

一种改进的叶绿素提取植被指数

董恒, 孟庆野, 王金梁, 秦其明*, 冯海霞, 蒋洪波, 刘明超
(北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘要:对 MERIS 陆地叶绿素指数(MTCI)进行了改进,提出了改性的 MERIS 陆地叶绿素指数(M-MTCI).该指数在植被覆盖度较高时(LAI > 1),可获得比 MTCI 和双峰冠层氮素指数(DCNI)更好的叶绿素提取精度,且比 MTCI 有更好的抗 LAI 干扰能力.这些结果的验证是建立在模拟以及实测数据的基础上,具有较好的可靠性,所以 M-MTCI 具有很好地监测植被叶绿素含量的潜力.

关键词:植被指数;MERIS 陆地叶绿素指数(MTCI);改性的 MERIS 陆地叶绿素指数(M-MTCI);双峰冠层氮素指数(DCNI);叶绿素含量

中图分类号:S127 文献标识码:A

A modified vegetation index for crop canopy chlorophyll content retrieval

DONG Heng, MENG Qing-Ye, WANG Jin-Liang, QIN Qi-Ming*,
FENG Hai-Xia, JIANG Hong-Bo, LIU Ming-Chao

(Institute of Remote Sensing and Geographic Information System, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Modified MERIS Terrestrial Chlorophyll Index (M-MTCI) was developed based on modifications of MTCI. M-MTCI is better than MTCI and Double-peak Canopy Nitrogen Index (DCNI) on aspects of chlorophyll content retrieval precision (when LAI > 1). Besides M-MTCI has better chlorophyll and LAI effects separation than MTCI. Validation by numerical simulations and *in-situ* measurements shows that M-MTCI is a reliable VI for chlorophyll content retrieval. Therefore, M-MTCI is a prosperous VI for chlorophyll content monitoring applications.

Key words: vegetation index; MERIS terrestrial chlorophyll index (MTCI); modified MERIS terrestrial chlorophyll index (M-MTCI); double-peak canopy nitrogen index (DCNI); chlorophyll content

PACS: 42.72.Ai

引言

传统的叶绿素检测方法如化验法和仪器(如 SPAD502)测试法,由于其样品采样的限制,不能很好地获取大区域植被叶绿素的情况,因此如何快速地获取大区域的叶绿素信息成为植被领域研究的重点,利用遥感手段进行叶绿素反演已成为解决该问题的重要途径。

目前的遥感叶绿素提取方法大概分为以下几类:

(1)利用统计的方法建立植被反射率或者反射率一阶微分等变换形式与植被叶绿素含量的回归模型.这类方法在叶绿素提取的早期研究中较为常用,也在叶片叶绿素的提取中取得了较好的效果.不过该类方法缺乏理论支撑,基于不同的观测数据,选取反演叶绿素的波段也不同,使得应用缺乏普适性^[1].

(2)基于物理模型的叶绿素反演方法.由于物理模型有着明确的物理机理,所以该方法具有很好的普适性.不过这类提取方法一般参数较多,模型的

收稿日期:2011-09-26,修回日期:2012-03-09

Received date: 2011-09-26, revised date: 2012-03-09

基金项目:国家自然科学基金(41071221,41101312);公益性行业(气象)专项(GYHY200806022)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (41071221, 41101312), and the R&D Special Fund for Public Welfare Industry of China (Meteorology): (GYHY200806022)

作者简介(Biography): 作者简介:董恒(1986-),男,江苏射阳人,博士研究生,主要研究领域为植被遥感. E-mail: simon19860912@126.com.

* 通讯作者(Corresponding author); E-mail: quqinpk@163.com.

运算量会随着参数的增多呈现几何倍数增长,同时如果模型选择不合适的代价函数和迭代策略,将会使得模型结果不收敛,也就得不到反演结果²¹。

(3) 植被指数法. 植被指数法是以一些物理机理为基础,通过多个波段组合的方式,建立与叶绿素统计关系的一种方法. 该方法简单实用,且具有一定的普适性,是遥感进行大规模监测较为可行的途径,吸引了很多学者进行这方面的研究²¹. 本研究也是属于此类方法.

随着高光谱遥感成像技术的发展,利用植被指数进行叶绿素提取的工作取得了很大的进展,建立了很多较好地提取叶绿素含量的模型,尤其是在叶片叶绿素含量提取方面. 不过在冠层叶绿素含量的提取方面还是存在以下两个方面的突出问题:

(1) 土壤背景的干扰. 在植被-土壤体系中,绝大多数情况下植被是不能完全遮蔽土壤背景的,所以传感器获得的信息包含植被信息和土壤信息,如何最大程度地突出植被信息而抑制土壤信息是构建植被指数考虑的重要内容.

(2) 植被冠层结构的干扰,尤其是 LAI 对植被冠层叶绿素反演的干扰³⁻⁴. 现在很多的模型都是针对植被光谱中特有的现象—红边而提出的⁵⁻⁶,但这些模型大多存在着一个问题,即没有将叶绿素含量和 LAI 两个作物重要的参数影响分离开. 如何突出作物植被叶绿素的信息、抑制 LAI 的信息也是现在提取叶绿素含量研究的重要考虑内容.

1 M-MTCI 指数

1.1 MTCI 指数

DASH 和 CURRAN 针对欧空局发射的 Envisat 卫星上搭载的 MERIS 传感器提出了获取作物叶绿素信息的植被指数 MTCI, 见式(1)¹⁷. 该指数的提出主要基于所观测到的当叶绿素浓度逐渐增加时, MERIS 传感器的第 8、9 波段反射率之间的差值逐步减小, 而第 9、10 波段反射率的差值越来越大.

$$MTCI = \frac{R_{\text{Band}10} - R_{\text{Band}9}}{R_{\text{Band}9} - R_{\text{Band}8}} = \frac{R_{753.75} - R_{708.75}}{R_{708.75} - R_{681.25}}, \quad (1)$$

其中 $R_{\text{Band}8}$ 、 $R_{\text{Band}9}$ 和 $R_{\text{Band}10}$ 分别为 MERIS 传感器第 8、9 和 10 波段的反射率值, 681.25、708.75 和 753.75 分别为三个波段的中心波长.

该指数具有计算简单、与叶绿素相关性强等优点, 并从 2004 年开始成为 MERIS 传感器叶绿素产品的核心算法, 在叶绿素提取、NPP 估算等方面都具有广泛的应用⁸⁻⁹. 虽然该模型在很多方面结果都令

人满意, 不过进一步研究发现, MTCI 还是存在受 LAI 干扰方向的问题.

1.2 M-MTCI 的建立

680 ~ 750 nm 被称为红边区域, 当叶绿素含量增大时, 整个红边区域反射率呈现减小的趋势, 但各个波段反射率减小的速率是不一样的. 为了研究红边区域反射率叶绿素变化的规律, 利用 PROSPECT + SAIL 进行了光谱的模拟. PROSPECT 模型是基于 ALLEN 平板模型发展起来的辐射传输模型, 可以模拟叶片 400 ~ 2500 nm 的光谱特性¹⁰. SAIL 模型是在 suit 模型基础上发展起来的一个冠层双向反射率模型, 给定冠层结构参数和环境参数, 该模型可以计算任何光照和观测几何条件下的冠层反射率和透射率¹¹. 这两个模型是现在公认的模拟叶片和冠层光谱效果较好的模型¹²⁻¹³.

利用 Prospect + SAIL 模型, 模拟在 LAI = 2 情况下不同叶绿素含量 (10、20、30、40、50、60 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) 的冠层光谱, 见图 1. 在模拟的冠层光谱基础上, 利用低叶绿素含量对应的反射率光谱减去相邻的高叶绿素含量对应的反射率光谱 (例如用叶绿素含量为 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 对应的反射率光谱减去叶绿素含量为 20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 对应的反射率光谱), 如图 2 所示 (其中, 曲线 10 ~ 20 代表叶绿素含量为 10 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 模拟光谱与叶绿素含量为 20 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 光谱的差值, 其余类推).

通过对模拟数据研究发现: 随着叶绿素含量不断地增大, 在 680 ~ 710 nm 波长区间, 随着波长增大, 反射率减小速率大致呈现增大的趋势, 在 710 ~ 750 nm 波长区间, 反射率减小速率大致呈现减小的趋势. 该现象说明 710 nm 周围是对叶绿素变化最敏感的波段, 710 nm 周围一般认为是红边位置所在, 这也是很多人利用红边位置提取叶绿素的理论基础.

MTCI 和 DCNI 两个指数就是利用了不同波长反射率对叶绿素含量变化敏感程度不同建立的. DCNI 是 Chen 等研究植被反射率的一阶微分值存在双峰效应后, 提出用来监测氮素变化的, 其基本形式是 $(R_{720} - R_{700}) / (R_{700} - R_{670})$, 为了减少 LAI 和土壤背景的影响, 同时进一步提高植被冠层氮素的提取精度, 他们在大量模拟数据研究的基础上对指数进行了改进, 建立了最终的植被指数—DCNI, 见式(2)¹⁴.

$$DCNI = (R_{720} - R_{700}) / (R_{700} - R_{670}) / (R_{720} - R_{670} + 0.03), \quad (2)$$

其中 R_{670} 、 R_{700} 和 R_{720} 分别为 670 nm、700 nm 和 720 nm 波长的反射率。

该指数无论是在模拟数据的验证,还是在实地数据检验中都取得了较好的效果. 虽然 DCNI 是针对氮素研究提出的,不过很多研究显示氮素和叶绿素两者之间具有较高的相关性¹⁵⁻¹⁶,所以 DCNI 可以用来监测叶绿素含量.

从 MTCI 和 DCNI 指数的定义可以发现:两个指数基本形式可以概括为 $(R_a - R_b) / (R_b - R_c)$ (其中 a, b, c 值大致在 680 nm 到 750 nm 之间,且 $a > b > c$),随着叶绿素含量不断增大, $(R_a - R_b)$ 相对于 $(R_b - R_c)$ 也逐渐增大,反之亦然. 该类模型理论上对叶绿素变化最敏感的形式大致为 $(R_{750} - R_{710}) / (R_{710} - R_{680})$. 因为 750 nm 和 680 nm 大约分别对应 710 ~ 750 nm 和 680 ~ 750 nm 两个区域对叶绿素变化最不敏感的位置,当叶绿素增大(减小)时,这两个波段是两个区域内反射率减少(多)最小的位置. 而 710 nm 则大约是 680 ~ 750 nm 对叶绿素变化最敏感的位置,当叶绿素增大(变小)时,该波段是整个区域内反射率减少(多)最大的位置,因此 $(R_{750} - R_{710})$ 与 $(R_{710} - R_{680})$ 的比值即成为对叶绿素最为敏感的组合. 事实也证明 MTCI 确实是一个能够较好地提取出叶绿素信息的指数. 而 MTCI 和 DCNI 两个指数比较大的区别在于 Chen 等的研究认为基于上述现象得到的 $(R_{750} - R_{710}) / (R_{710} - R_{680})$ 与 $(R_{720} - R_{670} + 0.03)$ 的比值具有更好的监测叶绿素和消除 LAI 影响的能力,模拟实验和实地测试也都支持了这一结论.

为了削弱 LAI 对叶绿素信息提取的影响,基于 MTCI 与 DCNI 是利用相似的现象建立起来的指数这一事实,参照 DCNI 的构建方法,研究对 MTCI 进行了改进,提出 M-MTCI 指数. 指数的具体形式如式(3)所示.

$$M - MTCI = (R_{750} - R_{710}) / (R_{710} - R_{680}) / (R_{750} - R_{680} + n) \quad (3)$$

(其中 n 为常数).

1.3 n 的确定

研究利用 Prospect + SAIL 模拟的方法对 n 进行确定. 模拟的光谱是在不同 LAI、不同叶绿素含量以及不同环境背景(内蒙沙土、山东盐化潮土、贵州黄壤土、秸秆)情况下得到的,其中不同背景的光谱是采用野外实测的方法获得的. 由于研究主要针对 LAI 和叶绿素的交叉影响,所以叶倾角分布(LAD)和叶肉结构参数设为固定值,不考虑这两个因素对光谱的影响. 具体的输入参数如表 1 所示.

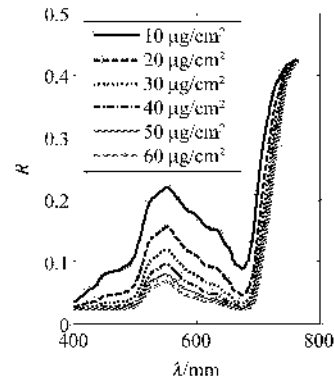


图 1 不同叶片叶绿素含量下模拟的冠层光谱
Fig. 1 Simulated canopy spectra with different leaf chlorophyll concentrations

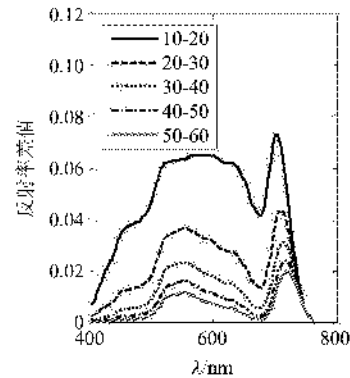


图 2 相邻叶绿素含量下冠层光谱的差值
Fig. 2 The difference of canopy spectra with different leaf chlorophyll concentrations

表 1 Prospect + SAIL 模型的输入参数
Table 1 Input parameters of Prospect + SAIL

输入参数	输入值
叶片叶绿素含量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)	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	0
观测天顶角	0
观测时间	10
LAD	Custom

在上述模拟的冠层光谱基础上,计算了 M-MTCI 在不同 n 值时与叶片叶绿素含量的相关性,当 n 为 0.16 时,二者相关性相对较高,因此确定 0.16 为 n 的值.

确定最终指数的形式如式(4)所示:

$$M - MTCI = (R_{750} - R_{710}) / (R_{710} - R_{680}) / (R_{750} - R_{680} + 0.16) \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 模拟数据验证与讨论

2.1.1 M-MTCI 提取叶绿素含量的精度评价

表 2 不同背景下, M-MTCI、MTCI 和 DCNI 与叶绿素含量之间的 R^2

Table 2 Correlations (R^2) between M-MTCI, MTCI, DCNI and chlorophyll concentration with different backgrounds

	内蒙沙土	山东盐化潮土	贵州黄壤土	秸秆
M-MTCI	0.8658	0.8008	0.8809	0.7869
MTCI	0.5631	0.6033	0.574	0.5261
DCNI	0.8054	0.7787	0.8088	0.6687

从表中可以看出,三个指数与叶片叶绿素之间都具有较好的线性相关性. M-MTCI 是其中对于叶绿素含量提取精度最高的指数,四种背景下 M-MTCI 与叶绿素含量的线性关系的决定系数都大于 0.78,有些背景下(贵州黄壤土)则高达 0.88,所以从叶绿素含量提取角度来讲, M-MTCI 比 MTCI 和 DCNI 表现得更为优异.

2.1.2 LAI 影响评价

虽然三个指数对于叶绿素含量提取的效果不错,不过研究也发现,并非任何时候三个指数都可以表现得很好. 如图 3 所示,在不同的 LAI 条件下,各个指数与叶绿素含量之间的关系为一个曲线簇,可见, M-MTCI、MTCI 和 DCNI 三者都受到 LAI 的影响,但程度不同. 当 LAI < 1 时,与 MTCI 相比, M-MTCI 和 DCNI 叶绿素含量之间的关系呈现更大的离散性,说明这两者受 LAI 的影响更大. 而 LAI > 1 时, M-MTCI 与 DCNI 则比 MTCI 表现出更好的抗 LAI 干扰的能力.

为了量化的表示 LAI 对于三个指数的影响,研究计算了三个指数在不同背景条件下与 LAI 的相关性,见表 3. 可见,三个指数在抑制 LAI 干扰方面都具有较好的效果,其中 M-MTCI 的抗干扰能力最强,不同土壤背景条件下所有的线性关系的 R^2 都在 0.06 以下,而 MTCI 的 R^2 都在 0.2 以上, M-MTCI 较为有效地解决了叶绿素与 LAI 交叉作用的问题.

2.1.3 M-MTCI 去除土壤背景

采用 P 指数对去除土壤背景的影响进行评价, P 指数的形式如式(5)所示,采用叶绿素含量在 10、40、60 和 100 $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ 情况下计算得到的指数,如图 5 所示.

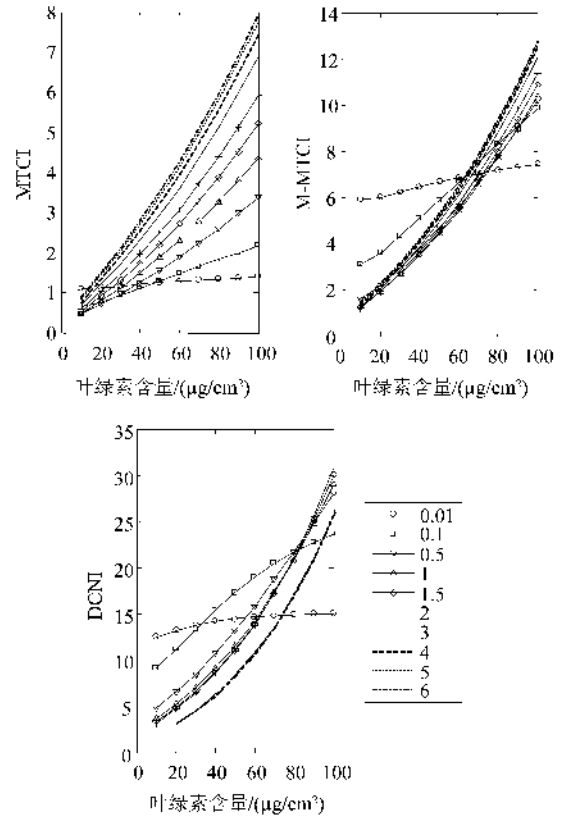


图 3 贵州土壤背景条件下 M-MTCI、MTCI 和 DCNI 在不同 LAI 情况下与叶绿素含量之间的关系

Fig. 3 The relationships between chlorophyll concentration and M-MTCI, MTCI, DCNI at different LAI values under Guizhou soil background

表 3 不同土壤背景条件下模拟光谱指数与 LAI 线性拟合的 R^2

Table 3 Correlations (R^2) between spectral index calculated from simulated spectra and LAI under different backgrounds

	内蒙沙土	山东盐化潮土	贵州黄壤土	秸秆
M-MTCI	0.0095	0.0001	0.0019	0.0519
MTCI	0.2644	0.225	0.2591	0.278
DCNI	0.0322	0.0109	0.0131	0.0873

$$P = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |VI_i - \overline{VI}|}{\overline{VI}}, \quad (5)$$

其中 VI_i 为第 i 种土壤背景下的植被指数, \overline{VI} 为植被指数的平均值, n 为土壤背景的个数.

从图 4 可以看出,对于不同叶绿素含量、不同 LAI 情况下,最优的抗土壤背景影响的指数是不同的,所以 M-MTCI、MTCI 和 DCNI 三个指数对于土壤背景影响的去除没有严格意义上的优劣.

综上所述,利用模拟光谱对 M-MTCI、MTCI 和 DCNI 的研究表明,三个指数无论是在叶绿素含量提

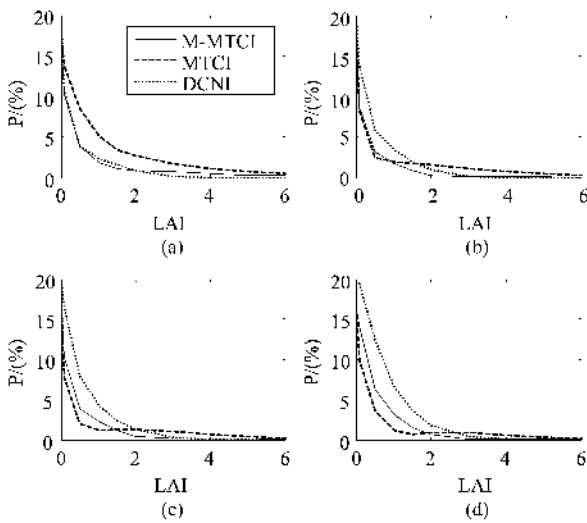


图4 不同叶绿素含量下的P值 (a) $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, (b) $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, (c) $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, (d) $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$
 Fig. 4 P values with chlorophyll concentrations of (a) $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, (b) $40 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, (c) $60 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, and (d) $100 \mu\text{g}/\text{cm}^2$

取方向,还是在分离 LAI 与叶绿素的交叉影响方面都有着很好的表现,其中 M-MTCI 在 LAI > 1 情况下比 MTCI、DCNI 表现得更为优异,不过在植被覆盖较低的情况下 (LAI < 1), MTCI 在三者之中具有最好的叶绿素提取效果。

2.2 实地观测验证

基于模拟冠层光谱有着很好效果的植被指数,应用实测的光谱不一定能得到很好的结果^[13]。为了进一步验证新提出的 M-MTCI 指数的适用性,本研究利用实地观测的小麦相关数据对三个指数进行了分析。

2.2.1 实验设计

2011 年 3 月至 6 月,在中国科学院山东禹城综合试验站,对小麦冠层进行了光谱测量,同步还测量了一些生态参数,具体包括: LAI、叶绿素浓度、叶片水分、植被覆盖度等。

实验区选择在禹城站水氮-作物关系耦合试验场。该试验场共设有 32 个试验小区,每个小区面积为 $5 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 。根据施氮量的不同分为 (T1) 空白,不施氮肥; (T2) 总生育期内施氮肥 $70 \text{ kg N}/\text{ha}$; (T3) 总生育期内施氮肥 $140 \text{ kg N}/\text{ha}$; (T4) 总生育期内施氮肥 $210 \text{ kg N}/\text{ha}$; (T5) 总生育期内施氮肥 $280 \text{ kg N}/\text{ha}$, 共 5 个级别。在对每个控制级别进行氮素控制的同时,保持每个处理的 P、K 水平一致 (P_2O_5 : $120 \text{ kg}/\text{ha}$; K_2O : $80 \text{ kg}/\text{ha}$)。根据浇水量的不同分为

60% 田间持水量和 80% 田间持水量两个级别。这样水氮控制总共 10 种控制级别,在田间呈随机分布,保证每个控制级别至少有 3 个重复。

2.2.2 小麦叶片叶绿素含量获取

本研究中小麦叶片叶绿素含量的测定采用分光光度计法,于每次冠层光谱实验之后,采集田间的叶片样品,称取 0.2 g 用 95% 乙醇 25 ml 浸泡 24 小时,取萃取液用分光光度计分别于 645 nm 和 663 nm 处测定吸光度值,然后根据相关公式得到叶绿素浓度值^[17]。

由于化验获得的是小麦叶片叶绿素浓度,即单位叶片重量的叶绿素含量,其单位为 $\mu\text{g}/\text{g}$,利用如下式子将其转化成叶片叶绿素含量。

$$\text{叶片叶绿素含量}(\mu\text{g}/\text{cm}^2) = \text{叶绿素浓度}(\mu\text{g}/\text{g}) \times \text{叶片鲜重}(\text{g}) / \text{叶片面积}(\text{cm}^2) \quad (6)$$

2.2.3 结果的验证与讨论

共使用了 50 组数据进行验证,分别采集于 2011 年 3 月 27 日、4 月 5 日、4 月 12 日、4 月 19 日和 4 月 26 日,对应的作物 LAI 范围为 $0.16 \sim 3.16$ 。对于叶绿素提取的精度,从三个角度进行了评价:植被指数与实测叶绿素相关关系 (R^2),估测值与实测值的均方根误差 (RMSE) 以及估测值与实测值的均方根误差与真实值平均值的比 (RMSE/均值, 误差率),结果如表 4 所示。

表 4 三个指数与叶绿素浓度的关系

Table 4 The relationships between the three indexes and chlorophyll concentrations

植被指数	R^2		RMSE/ ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)		误差率 (%)	
	所有样品	LAI > 1 的样品	所有样品	LAI > 1 的样品	所有样品	LAI > 1 的样品
M-MTCI	0.6415	0.7468	12.50	10.32	17.9	13.2
MTCI	0.7406	0.712	10.63	11.01	15.3	14.1
DCNI	0.5645	0.6476	13.78	12.18	19.7	15.6

从结果来看,三个指数都获得了不错的叶绿素反演结果。当指数验证采用的是所有叶绿素数据时, MTCI 无论是在相关性方面还是在误差方面都有着最好的表现。而将 LAI 小于 1 对应的数据剔除后, M-MTCI 和 DCNI 叶绿素反演精度都有了不小的提升, M-MTCI 成为三者中提取叶绿素信息最好的植被指数,这进一步验证了三个指数的适用范围的结论。不过研究也发现即使在 LAI > 1 的情况下, M-MTCI、DCNI 实测验证的结果与模拟验证的结果还是存在较大的差距。造成这些误差的原因除了仪器固有的误差,还有一个重要的原因是:禹城水氮耦合

试验场用地,虽然经过多年的改良,不同氮素处理的小区作物长势差异比较明显,不过由于是人工施肥,在同一个处理小区里作物的生长状态还是存在一定的差异,研究使用的叶片是破坏性采样获取的,小区里作物较少,所以不能进行大面积采样,只能选取少量代表性的样品,而光谱采集采用的是小区多个点光谱的平均值,两者的不完全对应可能会造成一些误差。

3 结论

在 MTCI 植被指数的基础上,结合 DCNI 处理叶绿素与 LAI 交叉影响的方法,提出了一种新的提取叶绿素含量的植被指数—M-MTCI。该指数是在不同背景条件、不同冠层结构环境下,在物理模型的基础上建立的。通过模拟数据和实测数据验证都获得了较为理想的结果,尤其是在叶面积指数较大的情况下(LAI > 1),表现出比 MTCI 和 DCNI 更好的叶绿素含量提取效果。因此,M-MTCI 在植被叶绿素含量反演方面具有很好的应用潜力。需要指出的是,由于研究使用数据的局限性,该指数需要更多的实测数据的验证。

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 Sensing of Environment*, 1996, **56**(3): 182-193.
- [2] YAN Chun-Yan, NIU Zheng, WANG Ji-Hua, et al. The assessment of spectral indices applied in chlorophyll content retrieval and a modified crop canopy chlorophyll content retrieval model [J]. *Journal of Remote Sensing* (颜春燕, 牛铮, 王纪华, 等. 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. *遥感学报*), 2005, **9**(6): 742-750.
- [3] Daughtry C S T, Walthall C L, Kim M S, et al. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, **74**(2): 229-239.
- [4] 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 Sensing of Environment*, 2002, **81**(2): 416-426.
- [5] Curran P J, Dungan J L, Gholz H L. Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine [J]. *Tree Physiol*, 1990, **7**(1-4): 33-38.
- [6] Ju C H, Tian Y C, Yao X, et al. Estimating leaf chlorophyll content using red edge parameters [J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(5): 633-644.
- [7] Dash J, Curran P J. The MERIS terrestrial chlorophyll index [J]. *International Journal of Remote Sensing*. 2004, **25**(23): 5003-5013.
- [8] Harris A, Dash J. The Potential of the MERIS Terrestrial Chlorophyll Index for Carbon Flux Estimation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(8): 1856-1862.
- [9] Panigada C, Rossini M, Busetto L, et al. Chlorophyll concentration mapping with MIVIS data to assess crown discoloration in the Ticino Park Oak Forest [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2010, **31**(12): 3307-3332.
- [10] Jacquemoud S, Baret F. PROSPECT: A model of leaf optical properties spectra [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **34**(2): 75-91.
- [11] Verhoef W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: The SAIL model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1984, **16**(2): 125-141.
- [12] 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 Sensing of Environment*, 1995, **52**(3): 163-172.
- [13] Haboudane D, Tremblay N, Miller J R, et al. Remote estimation of crop chlorophyll content using spectral indices derived from hyperspectral data [C]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(2): 423-437.
- [14] Chen P F, Haboudane D, Tremblay N, et al. New Spectral Indicator Assessing the Efficiency of Crop Nitrogen Treatment in Corn and Wheat [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, **114**(9): 1987-1997.
- [15] Madakadzic I C, Madakadzic R M. Field evaluation of the chlorophyll meter to predict yield and nitrogen concentration of switch grass [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, **22**(6): 1001-1010.
- [16] Lamb D W, Steyn-Ross M, Schaare P, et al. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: Theoretical modeling and experiment observations [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(18): 3619-3648.
- [17] Lichtenthaler H K. Chlorophyll and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes [J]. *Method of Enzymol*, 1987, **148**: 350-382.