

# 基于多个高光谱参数的玉米叶片 叶绿素含量估测模型

武倩雯<sup>1</sup>, 熊黑钢<sup>1,2</sup>, 靳彦华<sup>1</sup>, 王莉锋<sup>1</sup>, 王凯龙<sup>1</sup>

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;  
2. 北京联合大学应用文理学院, 北京 100083)

**摘要:** 采用 FieldSpecPro3 光谱仪和 SPAD-502 叶绿素仪分别测定玉米叶片的光谱与其相对应的叶绿素含量, 通过分析红边位置、蓝边位置以及绿峰位置等高光谱参数与叶绿素含量的关系, 建立叶绿素含量的单、双和多变量光谱预测模型。结果表明: 在可见光区域, 玉米叶绿素含量高, 光谱反射率低, 而进入近红外区则刚好相反, 叶绿素含量高, 光谱反射率高; 红边位置、绿峰位置及蓝边位置各高光谱参数与叶绿素含量的相关性均达极显著。其中红边位置与叶绿素含量的相关性最高, 相关系数达 0.84; 利用所选的 3 个高光谱参数分别建立的单、双以及三变量模型, 虽然大多数模型的精度  $R^2$  大于 0.71, 但分析对比得出利用红边、蓝边及绿峰位置 3 个变量建立的模型具有最大模型精度  $R^2$ 、最小标准误差 ( $S$ ) 和均方根误差 ( $RMSE$ ), 因此其模型预测能力较优。

**关键词:** 玉米叶片; 叶绿素含量; 估测模型  
**中图分类号:** S513      **文献标志码:** A

## Prediction model on chlorophyll content in maize leaf based on several high spectral parameters

WU Qian-wen<sup>1</sup>, XIONG Hei-gang<sup>1,2</sup>, JIN Yan-hua<sup>1</sup>, WANG Li-feng<sup>1</sup>, WANG Kai-long<sup>1</sup>

(1. College of Resources & Environment Science, Xinjiang University, Key Laboratory of Oasis Ecology Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830046, China;  
2. College of Applied Arts & Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this research, FieldSpecPro3 spectroscopy and SPAD-502 chlorophyll meter were used to measure the spectrum of corn leaf chlorophyll content and its amount respectively. Through the analysis on the relationships between chlorophyll content and parameters of red, blue, and green edge positions and spectral peak positions, single, double and multivariate spectral prediction models about the chlorophyll content were established. The results showed that in the visible spectrum, the higher corn chlorophyll content, the lower reflectance spectrum. However, exact opposite was observed in the infrared spectrum. Spectral parameters of red edge, green peak and blue edge positions were in significant correlations with the chlorophyll content, reaching up to 0.84 between red edge position and the chlorophyll content. As a result, single, double and three-variable models using three high spectral parameters were established. Although the accuracy of  $R^2$  were mostly greater than 0.71, it was further suggested that three-variable model had the best accuracy in  $R^2$ , the minimal standard deviation ( $S$ ) and root mean square error ( $RMSE$ ), which might provide better prediction results than the other two models.

**Keywords:** maize leaf; chlorophyll content; prediction models

叶绿素含量是作物生长过程中一个重要的生理指标, 对植被光合能力、发育阶段以及营养状况有重要的指示作用<sup>[1]</sup>, 实时掌握玉米叶绿素含量及冠层光谱的动态变化, 可以对玉米群体光合能力及营养状况进行有效监测, 在玉米生长与产量预测以及精确诊断与动态调控中具有重要意义。

国内外学者对建立作物叶绿素含量的最佳预测模型方面已有很多研究, 并取得了一系列成果: 通过

收稿日期: 2014-12-10  
基金项目: 国家自然科学基金(41171165); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划项目(IDHT20130322); 北京联合大学人才强校计划资助项目(BPHR2012E01)  
作者简介: 武倩雯(1989—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士, 主要研究方向为干旱区资源与环境。E-mail: wqw200952199@163.com。  
通信作者: 熊黑钢(1956—), 男, 湖南湘乡人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事资源与环境研究。E-mail: heigang@sbu.edu.cn。

对不同植被的光谱与叶绿素含量的研究,从而寻找它们各自的敏感波段<sup>[2]</sup>;分析作物不同生长期叶绿素含量与光谱的关系,建立不同生长阶段的最适模型<sup>[3]</sup>;采用不同指数对叶绿素含量进行建模并且检验其模型精度<sup>[4]</sup>;利用反射光谱数据,特别是红边参数估计作物叶绿素<sup>[5]</sup>、氮素营养状况<sup>[6]</sup>、叶面积指数<sup>[7]</sup>等;玉米、水稻的“红边”位置能很好地反映叶片叶绿素含量的信息<sup>[8]</sup>;通过研究植被光谱与叶绿素浓度的关系提出了光谱红边位置在植被叶绿素浓度估计中的重要作用<sup>[9]</sup>等。

这些研究大都是基于“红边”这一单变量建立作物叶绿素含量预测模型,而作物光谱的“峰谷”吸收特征是由叶片中相对应的生化物质引起的,这些化学成分是混合在一起的,彼此间加强或削弱了各自的吸收特征。所以,估测作物的某一生化成分时只用单一变量是不够的,需要进行变量选择和重组。由于玉米叶绿素含量不仅与红边位置相关性好<sup>[8]</sup>,与绿峰以及蓝边位置也具有较好的相关性<sup>[10]</sup>,并且这 3 个参数都是基于可见光波段,而此波段的反射率主要受叶片叶绿素含量的影响,因此它们能更好地反应叶绿素含量信息。本文在前人研究的基础上,分析多个玉米高光谱参数与其叶绿素含量之间的关系,建立预测模型。通过对比分析,选择最优的玉米叶片叶绿素含量预测模型。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于奇台县(43°25′~45°29′N,89°13′~91°22′E),地处新疆维吾尔自治区东北部,天山山脉东段博格达山北麓,准噶尔盆地东南缘。东边与木垒哈萨克自治县为邻,西边相接吉木萨尔县,南连吐鲁番市、鄯善县,西北与富蕴县、青河县相交,东北与蒙古国接壤。南北长 250 km,东西宽约 45~150 km,总面积为 1.81×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>,边界线长达 131.47 km,是新疆的边境县之一。年平均气温 5.5℃,7 月份最高气温 43℃,1 月份极端最低气温 -42.6℃。年平均降水 176 mm,蒸发潜力 2 141 mm,无霜期平均 156 d,年平均风速 2.9 m·s<sup>-1</sup>。夏季炎热,冬季寒冷,四季分明,属于典型的中温带大陆性干旱半干旱气候。

2012 年 7 月在平原区选择 3 块依靠井水灌溉的水浇地玉米,并用 GPS 进行现场定位。玉米行距 50 cm,苗高大约 2 m,叶宽大约 10 cm,整体长势较均匀,覆盖度达 95%~100%。品种是新玉 23 号,于 4 月中旬播种,9 月底至 10 月初收获。4 月 25 日左右浇第一次水,在整个生长期共浇水 6~7 次,施肥 1~2 次,主要是底肥、农家肥、尿素以及二胺分别约

30 kg·667m<sup>-2</sup>。

1.2 冠层光谱的采集及预处理

采用美国 ASD 公司的 FieldSpecPro3 光谱仪于 2012 年 7 月采集玉米光谱反射率数据,其测量的波长范围为 350~2 500 nm。去除受外界噪声影响较大的波段 1 000~2 500 nm,取 350~1 000 nm。这一波段包括了遥感常用的可见光和近红外波段,可满足本文分析要求。试验选择晴朗无云或少云的天气,光谱仪探头垂直向下,距玉米冠层顶部垂直高度约 15 cm,视场角 25°,每次采集玉米光谱前后进行白板校正以去除暗电流影响。选择 65 个点进行光谱测定,每点重复测量 5 次取平均值作为该点光谱测量的结果。

采用移动平均法对实测光谱进行去噪处理<sup>[11]</sup>,即选取测定样本某一点前后光谱曲线上一定范围测定它的平均值。作为该点的值。公式:

$$R'_i = \frac{1}{2k+1}(R_{i-k} + R_{i-k+1} + \cdots + R_i + \cdots + R_{i+k}) \tag{1}$$

式中, $R'_i$  为样本第  $i$  点的反射率值(均值), $i = 1, 2, 3, \cdots, n$ 。

1.3 叶绿素含量的测定

日本 Minolta Camera 公司生产的 SPAD-502 叶绿素仪通过测量叶片在两种波长范围内的透光系数来确定叶片叶绿素含量或“绿色度”。测量光谱的同时,采用对植物无破坏性的 SPAD-502 叶绿素仪测定 SPAD 值(Soil plant analysis development),以此代表玉米叶绿素含量<sup>[12-14]</sup>。在光谱仪探头所能辐射的范围内,选取不同方向的玉米叶片各 5 片,每片叶随机选取 10 个点测定其叶绿素含量,最终取 5 片叶的平均值。

1.4 光谱参数选取

选取红边位置、蓝边位置和绿峰位置 3 个光谱参数,它们是描述植被色素状态和健康状况的重要指示波段。红边位置是在 680~740 nm 波长范围内的最大一阶微分值对应波长。当绿色植被叶绿素含量高、生长旺盛时,“红边位置”会向长波方向偏移,即红移,反之,当绿色植被衰老或感染病虫害,叶绿素含量减少时,“红边位置”将向短波方向偏移,即“蓝移”<sup>[15-16]</sup>。490~530 nm 内的最大一阶微分值对应的波长为蓝边位置。在 500~600 nm 区间原始光谱出现峰值,将在此范围内光谱反射率的峰值对应的波长作为绿峰位置<sup>[10]</sup>。

1.5 精度评价

将总样本随机划分为两组,其中一组用于建立玉米叶片叶绿素含量预测模型,剩余一组用于模型

精度检验。用模型精度 ( $R^2$ )、标准误差 ( $S$ ) 和均方根误差 ( $RMSE$ ) 对预测模型进行精度评价<sup>[17]</sup>。计算公式为:

$$R^2 = \left[ \frac{\sum (y_i - \overline{y_i})(y_j - \overline{y_j})}{\sqrt{\sum (y_i - \overline{y_i})^2 \sum (y_j - \overline{y_j})^2}} \right]^2 \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_j - \overline{y_i})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - y_j)^2 / n} \quad (4)$$

其中,  $n$  为样本个数,  $y_i$  和  $y_j$  分别代表实测值和预测值,  $\overline{y_i}$  和  $\overline{y_j}$  分别代表实测值和预测值的平均值。 $R^2$  为模型预测值和实测值的相关系数的平方, 其越高, 表明预测模型预测能力越好。标准偏差是用以衡量数据偏离算术平均值的程度, 它越小, 说明值偏离平均值就越少。 $RMSE$  是用来衡量两个值之间的偏差, 其越小说明这两个值之间的偏差越小。

2 结果与分析

2.1 不同叶绿素含量的玉米冠层光谱特征

将用于建模样本的光谱数据按叶绿素含量大小分为三组, 得到不同叶绿素含量水平的玉米叶片反射光谱变化曲线(图 1)。总体来说, 玉米叶片光谱曲线具有一般健康植被光谱的“峰和谷”特征。在 450~500 nm 与 650~700 nm 之间, 蓝、红光波段形成两个低反射谷, 由于在此波段范围内光辐射被叶片中的叶绿素全部吸收进行光合作用, 因而具有较低的反射率。从 500 nm 起叶片的吸收减少, 形成一个小的反射峰。从 680~740 nm, 反射率有一个极大的增加过程, 在 740 nm 以后曲线趋于平缓, 成为高反射平台区。在可见光波段, 不同叶绿素含量的光谱反射率表现出的总体特点是: SPAD 35 > SPAD 40 > SPAD 46, 而在近红外区域, 其呈现出的特点与可见光波段完全相反, 即 SPAD 46 > SPAD 40 > SPAD 35。这是因为在可见光波段, 玉米叶片反射率主要取决于叶绿素含量的多少。叶绿素含量多, 吸收率高, 反射率就低。而近红外区域玉米叶片光谱反射率一般受叶片内部细胞结构的影响, 叶绿素含量高的叶片, 其内部细胞更为复杂, 因而反射率高。

2.2 玉米叶绿素含量与其红边、绿峰和蓝边位置的相关性

玉米红边、蓝边以及绿峰位置分别与叶绿素含量的相关分析表明, 它们与叶绿素含量具有良好的相关性且均达极显著水平 ( $P < 0.01$ ) (表 1)。其中, 红边位置和蓝边位置分别与叶绿素含量呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.84 和 0.61; 而绿峰位置与

叶绿素含量呈极显著负相关,  $r = -0.75$ 。因此, 可用这些高光谱参数建立玉米叶绿素含量估测模型。

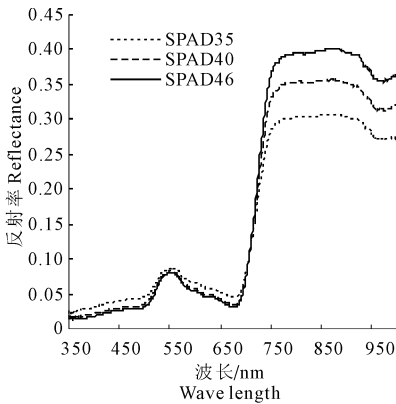


图 1 不同叶绿素含量 (SPAD 值) 玉米叶片的光谱反射率

Fig.1 Spectral reflectance of corn leaf

表 1 各光谱参数与叶绿素含量的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the variables and chlorophyll content

| 项目<br>Item                   | 红边位置<br>Red edge | 蓝边位置<br>Blue edge | 绿峰位置<br>Green edge |
|------------------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| 叶绿素含量<br>Chlorophyll content | 0.84 **          | 0.61 **           | -0.75 **           |

注: \* \* 极显著水平 ( $P < 0.01$ ); \* 显著水平 ( $P < 0.05$ )  
Note: “\* \*” shows significant correlation at  $P < 0.01$ ; “\*” significant correlation at  $P < 0.05$ .

2.3 玉米叶绿素含量估测模型的建立

利用回归分析法, 以叶绿素含量为因变量, 分别以红边位置、蓝边位置、绿峰位置、红边和蓝边位置、红边和绿峰位置、蓝边和绿峰位置以及红边、蓝边和绿峰位置为自变量建立玉米叶绿素含量的预测模型 (曲线模型  $R^2$  与一次线性模型相当, 因此, 只做一次线性模型)。

依据模型精确度  $R^2$  最大和标准误差最小的原则, 可以看出基于 3 个变量建立的模型预测能力最好, 其次是利用红边与绿峰位置、红边与蓝边位置、蓝边与绿峰位置建立的双变量模型, 最后是分别基于红边位置、绿峰以及蓝边位置建立的单变量模型 (表 2)。

2.4 精度评价

利用 25 个样本对玉米叶绿素含量估测模型进行精度评价。找出建模样本的红边位置、蓝边位置和绿峰位置, 分别将其代入不同的预测模型计算叶片叶绿素含量, 并将结果与实际测定的玉米叶片叶绿素含量进行对比, 以此来检验模型精度 (图 2)。

通过检验可知: 在单变量预测模型中, 由于红边位置与叶绿素含量关系密切, 作物在生长过程中随

表 2 玉米叶绿素含量估测模型

Table 2 Prediction models for corn chlorophyll content

| 序号<br>Number | 模型<br>Model                                                 | $R^2$ | 标准误差<br>SD | 序号<br>Number | 模型<br>Model                                                                        | $R^2$ | 标准误差<br>SD |
|--------------|-------------------------------------------------------------|-------|------------|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------|
| 1            | $y = -658.814 + 0.963x_{\text{red}}$                        | 0.71  | 2.831      | 5            | $y = 171.559 + 0.722x_{\text{red}} - 1.184x_{\text{green}}$                        | 0.75  | 2.657      |
| 2            | $y = -403.087 + 0.853x_{\text{blue}}$                       | 0.37  | 4.189      | 6            | $y = 1146.421 + 0.645x_{\text{blue}} - 2.607x_{\text{green}}$                      | 0.77  | 2.595      |
| 3            | $y = 1721.068 - 3.089x_{\text{green}}$                      | 0.56  | 3.495      | 7            | $y = 396.407 + 0.441x_{\text{red}} + 0.425x_{\text{blue}} - 1.622x_{\text{green}}$ | 0.81  | 2.348      |
| 4            | $y = -714.428 + 0.833x_{\text{red}} + 0.289x_{\text{blue}}$ | 0.74  | 2.716      |              |                                                                                    |       |            |

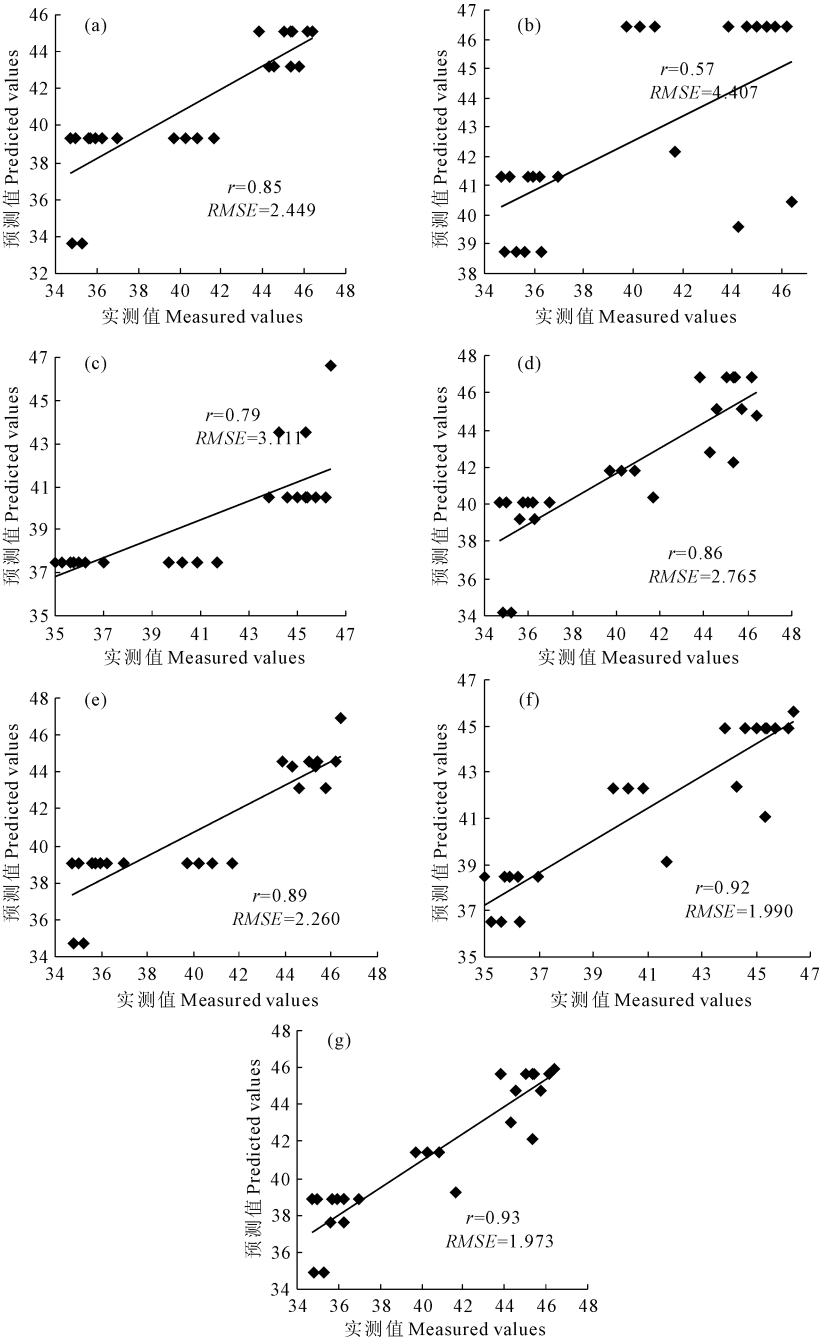


图 2 不同模型实测值与预测值之间的关系

Fig.2 Relationships between the measured and predicted values from different models

注: (a)红边位置; (b)蓝边位置; (c)绿峰位置; (d)红边位置和蓝边位置; (e)红边位置和绿峰位置; (f)蓝边位置和绿峰位置; (g)红边位置、绿峰位置和蓝边位置

Note: (a) red edge; (b) blue edge; (c) green peak; (d) red edge and blue edge; (e) red edge and green peak; (f) blue edge and green peak; (d) red edge, blue edge and green peak.

着叶绿素含量的升高,红边位置则向长波方向移动,反之亦然;因此,其模型精度不仅最高,而且不论是  $R^2$  还是  $S$  均接近双变量模型。双变量模型预测能力优于单变量模型。利用 3 个变量(红边、蓝边和绿峰位置)建立的预测模型最好,其模型精度  $R^2 = 0.81$  最大,标准误差和均方根误差均最小 ( $S = 2.348$ 、 $RMSE = 1.973$ ),预测值与实测值的相关性达 0.93。这是因为作物叶绿素含量不仅仅反映在红边位置,其受多种因素的共同影响,而红边位置、蓝边位置以及绿峰位置是描述植物色素状态和健康状况的重要指示波段<sup>[1,15-18]</sup>,三者结合能更好地反映作物的叶绿素含量情况,所建模型预测能力更高。

### 3 讨 论

叶绿素含量是植物营养胁迫、光合作用能力和生长状况的良好指示指标,直接控制着植被能量和物质交换。前人在建立玉米叶绿素含量的估测模型方面已经做了很多工作。采用不同指数对叶绿素含量进行建模并且检验其模型精度,对不同色素含量与其光谱特征的关系进行研究<sup>[4,19]</sup>;唐延林等<sup>[20]</sup>在玉米高光谱与红边特征的分析中,利用红边参数建立叶绿素含量预测模型等;吉海彦等<sup>[21]</sup>利用偏最小二乘方法建立了冬小麦叶片叶绿素和水分含量与反射光谱的定量分析模型等。但大多数研究都是经过相关分析后选择相关性较大的某一个指数或参数建立叶绿素含量的预测模型。由于作物的叶绿素含量受多种因素影响,所以只选用一种参数是远远不够的。本文是在前人研究的基础上选择与叶绿素含量相关性较大的 3 个参数,分别基于它们建立叶绿素含量的多变量预测模型。本试验的数据样本是在干旱地区采集的,由于样本有限及环境条件不同,所建模型能否适应其他地区及不同地类种植的玉米还需进一步研究。

### 4 结 论

本文测定了玉米叶片光谱及其对应的叶绿素含量,分析玉米叶片光谱红边、蓝边以及绿峰位置 3 个变量分别与叶绿素含量的相关性,并建立玉米叶片叶绿素含量监测的单变量、双变量和三变量模型。通过分析对比得出:利用红边、蓝边及绿峰位置 3 个变量建立的玉米叶片叶绿素含量预测模型最优,其模型预测值与实测值相关系数达 0.93,均方根误差  $RMSE$  最小,为 1.973。其次是双变量模型,最后是

单变量模型。

#### 参 考 文 献:

[1] Co Minolta. Chlorophyll SPAD – 502 Instruction Manual [Z]. Radiometric Instruments Operations,1989;17-21.

[2] 刘 克,赵文吉,郭道宇,等.野鸭湖典型湿地植物光谱特征[J].生态学报,2010,30(21):5853-5861.

[3] 王凯龙,熊黑钢,张 芳.干旱区冬小麦不同生长阶段的光谱特征与叶绿素含量估测研究[J].干旱区资源与环境,2013,27(11):45-49.

[4] 杨 杰,田永超,等.水稻上部叶片叶绿素含量的高光谱估算模型[J].生态学报,2009,12(29):6561-6571.

[5] 袁 杰,王登伟,黄春燕,等.基于高光谱数据的棉花叶绿素密度定量提取研究[J].干旱地区农业研究,2007,25(3):89-93.

[6] 张雪红,刘绍民,何蓓蓓.不同氮素水平下油菜高光谱特征分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2007,43(3):245-249.

[7] 黄敬峰,王 渊,王福民,等.油菜花红边特征及其叶面积素质的高光谱估算模型[J].农业工程学报,2006,22(8):22-26.

[8] 吴长山,童庆禧,郑兰芬,等.水稻、玉米的光谱数据与叶绿素的相关分析[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(1):31-37.

[9] Horler D N H, Barber J, Barringer A R. Effects of heavy metals on the absorbance and reflectance spectra of plants [J]. International Journal of Remote Sensing,1980,1(2):121-136.

[10] 钱育蓉,杨 峰,李建龙,等.利用高光谱数据快速估算高羊茅牧草光合色素的研究[J].草业学报,2009,18(4):94-102.

[11] 何 挺,王 静.土壤氧化铁光谱特征研究[J].地理与地理信息科学,2006,3(2):30-34.

[12] 李敏夏,张林森,李丙智,等.苹果叶片高光谱特性与叶绿素含量和 SPAD 值的关系[J].西北林学院学报,2010,25(2):35-39.

[13] 朱新开,盛海君,顾 晶,等.应用 SPAD 值预测小麦叶片叶绿素和氮含量的初步研究[J].麦类作物学报,2005,25(2):46-50.

[14] 卢晓萍,杨丙贤,徐婵娟,等.3 种小檗科植物叶片 SPAD 值与叶绿素的相关性及通径分析[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2012,39(3):261-266.

[15] 张金恒,王 珂,王人潮.高光谱评价植被叶绿素含量的研究进展[J].上海交通大学学报(农业科学版),2003,21(1):742-780.

[16] 张永贺,郭啸用,褚武道,等.基于红边位置的木荷叶片叶绿素含量估测模型研究[J].红外与激光工程,2013,42(3):798-804.

[17] 潘 蓓,赵庚星,朱西存,等.利用高光谱植被指数估测苹果树冠层叶绿素含量[J].光谱学光谱分析,2013,33(8):2203-2206.

[18] 黄春燕,王登伟,张煜星.基于棉花红边参数的叶绿素密度及叶面积指数的估算[J].农业工程学报,2009,25(增刊 2):137-141.

[19] 张俊华,张佳宝.夏玉米光谱特征对其不同色素含量的响应差异[J].西北农业学报,2010,19(4):70-76.

[20] 唐延林,王秀珍,等.玉米高光谱与红边特征的分析[J].山地农业生物学报,2003,22(3):189-194.

[21] 吉海彦,王鹏新,严泰来.冬小麦活体叶片叶绿素和水分含量与反射光谱的模型建立[J].光谱学与光谱分析,2007,27(3):514-516.