

## 新型光谱曲线特征参数与水稻叶绿素含量间的关系研究

徐新刚<sup>1</sup>, 赵春江<sup>1</sup>, 王纪华<sup>1</sup>, 黄文江<sup>1</sup>, 李存军<sup>1</sup>, 刘焕军<sup>1, 2</sup>

1. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097

2. 东北农业大学资源与环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150030

**摘要** 利用高光谱信息检测作物叶绿素含量信息是田间作物长势诊断的重要研究内容。利用水稻光谱和叶绿素含量田间实测数据, 从作物叶绿素含量不同, 光谱曲线峰谷波形有“高矮胖瘦”形态变化的观点出发, 提出光谱曲线峰谷波形中特征边的上升、下降速率以及组成峰谷波形两边的夹角等新型特征量, 利用归一化光谱信息, 分析了这些变量与水稻叶绿素含量间的相关关系。研究结果显示: (1) 可见光波段范围 520~740 nm 之间的归一化光谱反射率与叶绿素含量间呈良好的负相关关系; (2) 绿峰反射光谱曲线特征边的变化速率及绿峰两边的夹角等变量与水稻叶绿素含量具有较好的相关性, 表明利用这些新型变量开展叶绿素含量高光谱无损监测成为可能, 这将为利用高光谱信息开展作物长势与营养诊断提供新的思路和方法。

**关键词** 光谱曲线特征; 变化速率; 夹角; 叶绿素含量

**中图分类号:** S132 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)01-0188-04

### 引言

叶绿素含量是作物主要的生化参数, 其变化不仅可用来评价作物的光合作用能力, 而且也是作物是否受环境胁迫(如病害)的指示剂, 特别是叶绿素与氮含量关系紧密, 检测叶绿素变化信息已成为田间作物氮肥施用的诊断性指标<sup>[1-3]</sup>。高光谱数据具有较高的光谱分辨率, 能够探测到作物叶片生化成分的微小变化, 检测具有无损、快捷等特点。利用高光谱手段对作物叶绿素含量进行快速、无损和准确的监测已成为作物田间生长状况诊断的重要研究内容<sup>[4-8]</sup>。

当前, 基于高光谱信息估测作物叶绿素含量的方法概括起来, 大致使用以下两大类变量: 一类是利用光谱波段组合生成的各种光谱指数, 如叶绿素吸收比值指数(CARD)<sup>[9]</sup>、色素比值指数(PSSR)<sup>[10]</sup>、三角植被指数(TVI)<sup>[11]</sup>等, 与叶绿素含量间有很好的相关关系。另一类是使用光谱特征变量。通常又表现为以下两种情形: (1) 利用反射光谱或归一化光谱的反射峰与吸收谷特征量及其衍生变量来度量叶绿素的变化。如遭受条锈病侵染的冬小麦冠层叶片色素会发生变化, 刘良云<sup>[12]</sup>等利用反射光谱的红谷吸收深度和绿峰反射高度监测冬小麦条锈病严重程度。Kokaly<sup>[13]</sup>等利用归一化光谱的吸收深度特征, 很好地估测了叶片氮素。(2) 基于导数光谱的特征变量及其衍生组合变量。由于导数光谱在光谱变化

区域(如蓝边、黄边和红边等区域)能方便地确定光谱曲线的拐点和极值, 得到较多的应用。如蒋金豹等利用绿边与红边一阶微分总和的归一化值估测了染病冬小麦的冠层叶片色素含量。张霞等<sup>[14]</sup>利用 OMIS 航空高光谱影像提取导数光谱的红边斜率和面积来估算小麦氮含量。总的说来, 基于波段组合的光谱指数法只是应用少数几个敏感波段来估算叶绿素含量, 在早期的高光谱应用研究中使用较多, 但随着光谱特征变量分析研究的深入, 从光谱曲线峰形或谷形区域整体形态出发, 利用特征位置、峰高或谷深、宽度和面积等特征变量及其衍生变量来分析叶绿素变化规律是当前高光谱应用研究的关注内容。

既然作物叶绿素含量不同, 其光谱曲线峰谷波形有“高矮胖瘦”的变化, 本文提出利用光谱曲线峰谷波形特征边的上升速率、下降速率以及组成峰谷两边的夹角等新型特征量来表达这种变化, 以水稻为研究对象, 在归一化光谱信息中提取这些变量, 初步探讨分析其与水稻叶绿素含量变化的响应关系, 以期利用高光谱信息开展作物长势与营养诊断提供新的思路和方法。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验区与数据获取

试验区位于黑龙江农垦前进农场, 该农场位于东北三江

收稿日期: 2010-02-26, 修订日期: 2010-05-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA10Z214, 2006AA10A307)和农业部公益性行业科研专项(200803037)资助

作者简介: 徐新刚, 1976 年生, 国家农业信息化工程技术研究中心副研究员 e-mail: xxgpaper@126.com

平原东南部,地处东经  $133^{\circ}52' \sim 133^{\circ}23'E$ , 北纬  $47^{\circ}24' \sim 47^{\circ}42'N$  之间,水稻是其主要种植作物,面积约占该农场作物总种植面积的 95% 以上。试验开展时,在前进农场水稻种植区域选择了 20 个水稻田块,每个田块面积  $10 \text{ hm}^2$  以上,且品种、播种及肥水管理均匀一致。

实验获取的数据主要包括水稻冠层叶片光谱和叶绿素含量:(1)冠层叶片光谱:使用 ASD FieldSpec Pro FR 便携式野外光谱仪测量光谱,按照测量规范,分别对选择的 20 个田块的水稻冠层叶片光谱测量 10 次,取平均值作为该田块水稻光谱的反射值,测量前后都立即进行参考板校正。观测时间为 2009 年 8 月 6 日。(2)叶绿素含量:利用手持式 SPAD-502 叶绿素仪测量水稻叶片叶绿素含量。SPAD-502 是利用两个不同波长的光源分别照射叶片表面,通过计算穿过叶片后这两个波长光源的透射光强度的差异,再通过某种换算得到最终叶片的相对叶绿素含量。测量叶绿素时,在每个田块选取长势均一的水稻植株 20 株,测量顶层水稻所有叶片叶绿素,然后取均值作为该田块水稻叶片叶绿素含量值。

## 1.2 方法

### 1.2.1 光谱数据预处理

为消除部分光谱噪声,并结合研究的需要,对所获得光谱数据作如下处理:(1)取 ASD 光谱仪  $400 \sim 1300 \text{ nm}$  常用波段区域的光谱信息, $400 \text{ nm}$  以下噪声较大,而  $1300 \text{ nm}$  以外的短波红外波段因水分吸收光谱不连续而被截取。(2)将选取波段进行 5 点平滑处理。(3)对平滑后的光谱进行归一化处理以消除部分光照差异的影响<sup>[15, 16]</sup>,归一化处理公式为: $\rho_i / \left( \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \rho_i \right)$ ,式中  $\rho_i$  指平滑后波段的反射率,本研究后续的处理与分析都是基于归一化光谱来展开。

### 1.2.2 光谱曲线峰谷波形特征参数

在植被反射光谱的可见光波段,由于叶绿素对红光和蓝光的强烈吸收,而对绿光的弱吸收,形成典型的植被反射光谱绿峰曲线;而在近红外波段由于叶片的多重反射,反射率急速增加,形成典型的光谱红谷曲线。图 1 显示的是健康生长的不同叶绿素含量的水稻冠层光谱。从图中可以看出,叶绿素含量较高的水稻植株的反射光谱绿峰曲线的峰值相对于含量较低的峰值要低,表现为绿峰波形的左边整体上升速率与右边整体的下降速率也较后者小,而从反射光谱红谷曲线波形看,其右边整体的上升速率则较后者的略显要快。

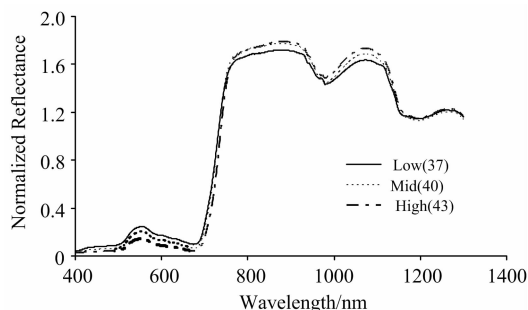


Fig. 1 Rice canopy reflectance of different chlorophyll content with SPAD value

基于此,本文提出利用反射光谱曲线中的特征波段区域曲线的上升或下降速率,以及峰谷曲线波形两边的夹角等新特征变量,分析它们与水稻叶绿素含量之间的相关性。这些特征变量的定义设计如图 2 所示,将反射光谱曲线划分为多个段,如图中的 AB, BC, CD 与 DE 等,每段近似为直线,则每段曲线的上升或下降速率通过拟合计算其斜率  $k_{AB}$ ,  $k_{BC}$ ,  $k_{CD}$  与  $k_{DE}$  等来表达;光谱曲线反射峰与吸收谷波形的特征夹角则用组成峰谷两边直线的夹角来表示,如图 2 中反射峰的夹角为直线 BC 与 CD 间的夹角  $\alpha$ ,吸收谷夹角为直线 CD 与 DE 的之间夹角  $\beta$ 。

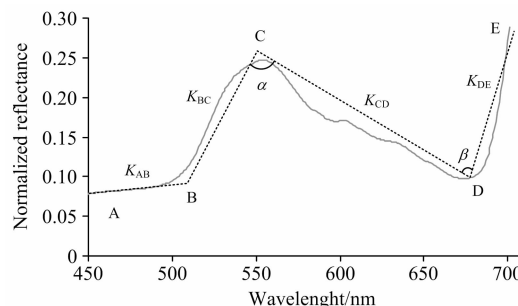


Fig. 2 Sketch map of characteristic parameters of spectral curve

本研究中定义的特征波段区域光谱曲线的变化速率及峰谷特征夹角如表 1 所示。

Table 1 Description of characteristic parameters of spectral curve in the study

名称	定义
$K_b$	蓝边 $490 \sim 530 \text{ nm}$ 光谱曲线变化速率
$K_g$	绿边 $500 \sim 550 \text{ nm}$ 光谱曲线变化速率
$K_y$	黄边 $550 \sim 580 \text{ nm}$ 光谱曲线变化速率
$K_{pv}$	绿峰顶到红谷底 $550 \sim 660 \text{ nm}$ 光谱曲线变化速率
$K_r$	红边 $680 \sim 770 \text{ nm}$ 光谱曲线变化速率
GPA1	反射绿峰两边(绿边与黄边)构成的夹角
GPA2	反射绿峰两边(绿边与峰谷边*)构成的夹角
RVA1	吸收红谷两边(黄边与红边)构成的夹角
RVA2	吸收红谷两边(峰谷边与红边)构成的夹角

注: \* 峰谷边是指可见光反射光谱曲线绿峰顶到红谷底波段区域( $550 \sim 660 \text{ nm}$ )

## 2 结果与分析

### 2.1 归一化光谱反射率与叶绿素含量间的相关性

图 3 显示的是归一化光谱反射率与叶绿素含量间的相关性曲线。从图中可以看出:波长小于  $770 \text{ nm}$ , 归一化光谱反射率与叶绿素含量呈负相关, $520 \sim 740 \text{ nm}$  之间的反射率与叶绿素含量间的相关系数绝对值几乎都在 0.5 以上,最大负相关系数位于  $720 \text{ nm}$  处;波长大于  $770 \text{ nm}$ , 归一化光谱反射率与叶绿素含量呈正相关,其中只有  $975 \sim 985 \text{ nm}$  波段区间的相关系数才在 0.5 左右。这表明可见光波段( $400 \sim 760 \text{ nm}$ )是水稻叶绿素光谱响应的敏感波段区域。

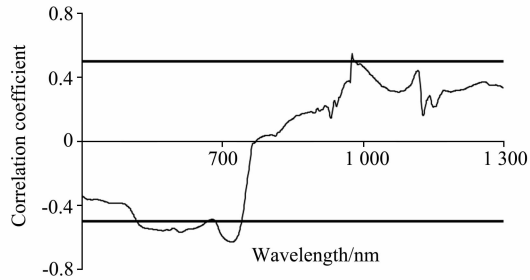


Fig. 3 Correlation coefficient between normalized spectra and chlorophyll content

## 2.2 光谱曲线特征参数变量与叶绿素含量间的相关性

利用表 1 中定义的光谱曲线特征参数及其组合变量与叶绿素含量进行相关性分析, 所得结果如表 2 所示。从表 2 可以看出: (1) 光谱特征边如蓝边、绿边和黄边曲线变化速率与叶绿素含量是存在着较好的相关性, 相关系数都在 0.6 左右, 而红边曲线变化速率相关性并不是很好, 但它与反射绿峰区域中特征边(如蓝边、绿边)变化速率的比值对叶绿素有一定的敏感性, 相关系数在 0.55 左右。(2) 从光谱曲线峰谷边夹角特征量与叶绿素含量相关性来看, 反射绿峰两边的夹角与叶绿素含量间有较好的相关性, 相关系数在 0.6 左右, 而构成吸收红谷两边的夹角特征量与叶绿素的相关性则不突出, 相关系数只在 0.4 左右。

Table 2 Correlation coefficient between spectral curve characteristic parameters and chlorophyll content

特征变量	$r$	特征变量	$r$
$K_b$	-0.614	$K_r/K_y$	-0.518
$K_g$	-0.611	$K_r/K_b$	0.556
$K_y$	0.572	$K_r/K_{pv}$	-0.487
$K_r$	-0.341	GPA1	0.611
$K_{pv}$	0.529	GPA2	0.595
$K_g/K_b$	0.366	RVA1	0.434
$K_g/K_y$	0.290	RVA2	0.405
$K_g/K_{pv}$	0.237	GPA1/RVA1	-0.016
$K_r/K_g$	0.553	GPA2/RVA2	-0.016

## References

- [1] Gitelson A A, Gritz Y, Merzlyak M N. *Journal of Plant Physiology*, 2003, 160(3): 271.
- [2] Datt B. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, 20(14): 2741.
- [3] Daughtry C S, Walthall C L, Kim M S. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74: 229.
- [4] TANG Yan-lin, HUANG Jing-feng, WANG Ren-chao(唐延林, 黄敬峰, 王人潮). *Chinese Journal of Rice Science(中国水稻科学)*, 2004, 18(1): 59.
- [5] XUE Li-hong, LU Ping, YANG Lin-zhang(薛利红, 卢萍, 杨林章). *Journal of Plant Ecology(植物生态学报)*, 2006, 30(4): 675.
- [6] Madeira A C, Mendonca A, Ferreira M E, et al. *Soil Science and Plant Analysis*, 2000, 31(5): 631.
- [7] WANG Xiu-zhen, WANG Ren-chao, HUANG Jing-feng(王秀珍, 王人潮, 黄敬峰). *Transaction of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2002, 18(1): 9.
- [8] LIU Wei-dong, XIANG Yue-qin, ZHENG Lan-fen, et al(刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2000, 4(4): 279.
- [9] Kim M S, Daughtry C S T, Chappelle E W, et al. *Proceedings of ISPRS, Val d' Isere, France*, 1994. 299.

由上述的分析可以看出, 本文提出的光谱曲线波形特征变量中, 反射绿峰曲线波段区域特征参量(如蓝边和绿边、蓝边变化速率及其夹角等)与叶绿素含量间有较好的相关性, 这与可见光波段光谱响应主要受色素含量影响的规律是一致的, 也表明了利用光谱曲线波形的上升、下降速率以及构成曲线峰谷波形两边的夹角等特征量来估测叶绿素含量是可能的。

## 3 结论

本文利用实测水稻光谱和叶绿素含量数据, 分析了水稻归一化光谱与叶绿素含量间的相关性。从作物叶绿素含量不同, 光谱曲线峰谷波形有“高矮胖瘦”形态变化的观点出发, 提出利用光谱曲线峰谷波形中特征边的上升、下降速率以及组成峰谷波形两边的夹角等新型特征量来表达这种变化, 初步分析了这些变量与水稻叶绿素间的相关关系, 结果表明:

(1) 在水稻归一化光谱与叶绿素含量相关分析中, 可见光波段范围 520~740 nm 之间的归一化光谱反射率与叶绿素含量间呈良好的负相关关系, 最大负相关系数位于 720 nm 处; 近红外波段仅 975~985 nm 狭窄波段区间的相关性较好。

(2) 通过将光谱曲线峰谷波形中特征边的上升、下降速率以及组成峰谷波形两边的夹角等新型特征量与水稻叶绿素含量进行相关分析, 表明水稻反射绿峰波形曲线中的特征边变化速率(如  $K_b$ ,  $K_g$  和  $K_y$  等)及绿峰夹角(GPA1 和 GPA2)等特征量与叶绿素含量间有好的相关性; 而水稻光谱吸收红谷波形曲线中特征量与叶绿素含量间的相关性不显著, 但其红边变化速率  $K_r$  与反射绿峰波形曲线中的特征边变化速率( $K_b$ ,  $K_g$  和  $K_y$  等)的比值却与叶绿素含量间的相关性较好。

因此, 利用光谱曲线峰谷波形中特征边的上升、下降速率以及组成峰谷波形两边的夹角等新型变量来估测水稻叶绿素含量是可能的。下一步的工作是, 争取获取更多水稻生育期的田间数据, 进一步验证本文所提出的新型特征参数的可行性和实用性, 为利用高光谱信息开展作物长势与营养诊断提供新的思路和方法。

- [10] Blackburn G A. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19(4): 657.
- [11] Broge N H, Lebane E. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76: 156.
- [12] LIU Liang-yun, HUANG Mu-yi, HUANG Wen-jiang, et al(刘良云, 黄木易, 黄文江, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2004, 8(3): 278.
- [13] Kokaly R, Clark R N. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 67: 267.
- [14] ZHANG Xia, LIU Liang-yun, ZHAO Chun-jiang, et al(张霞, 刘良云, 赵春江, 等). *Journal of Remote Sensing(遥感学报)*, 2003, 7(3): 176.
- [15] Yu B, Ostland M, Gong P, et al. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37: 2567.
- [16] Pu R. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(11): 2759.

## Study on Relationship between New Characteristic Parameters of Spectral Curve and Chlorophyll Content for Rice

XU Xin-gang<sup>1</sup>, ZHAO Chun-jiang<sup>1</sup>, WANG Ji-hua<sup>1</sup>, HUANG Wen-jiang<sup>2</sup>, LI Cun-jun<sup>1</sup>, LIU Huan-jun<sup>1, 2</sup>

1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China

2. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

**Abstract** It is of significance to monitor chlorophyll content with hyperspectral data for crop growth diagnosis in field. In the study, with the point of view that spectral curve shapes display “tall, low, fat and thin” morphological changes, we proposed some new characteristic parameters from spectral curve such as the ascensive or degressive velocities of segments composing peak or valley shapes in spectral curve, and angles formed by the lines fitting the segments of two sides of peak or valley curves, and used the normalized spectra to analyze correlation between these parameters and rice chlorophyll content. The result shows that (1) there is a good negative correlation between rice chlorophyll content and normalized reflectance spectra from 520-740 nm ; (2) characteristic parameters from green peak region of spectral curve display better correlation with rice chlorophyll content, which makes it possible to utilize the parameters to monitor crop chlorophyll content, and will provide new ideas and methods for carrying out crop growth diagnosis with hyperspectral data.

**Keywords** Characteristic parameter of spectral curve; Velocities of change; Angle; Chlorophyll content

(Received Feb. 26, 2010; accepted May 28, 2010)