

# 高光谱数据与冬小麦叶绿素密度的相关性研究

孟卓强<sup>1,2</sup>, 胡春胜<sup>1</sup>, 程一松<sup>1</sup>

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北 石家庄 050021; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 分析 2006 年栾城试验站不同氮素水平下冬小麦的多时相的群体光谱测量数据和相应叶片叶绿素密度的测量数据, 发现: 冬小麦的群体光谱的导数光谱数据、红边光谱数据, 归一化植被指数 NDVI 和比值植被指数 RVI 与叶绿素密度具有很好的相关关系, 并且选取样本建立了相应的回归方程。以回归方程作为叶绿素高光谱估算模型, 并利用检验样本对估算模型进行检验, 结果表明, 以 745 nm 处一阶导数光谱值、733 nm 处二阶导数光谱值和红边振幅为变量的模型可以较好的估算叶绿素密度。

**关键词:** 冬小麦; 叶绿素密度; 高光谱数据; 相关分析; 估算模型

**中图分类号:** S127 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2007)06-0074-06

利用高光谱遥感技术对植被进行生长监测和研究光谱与植被生物物理参量之间的关系, 已有大量的研究报道。通过监测作物生育期内的光谱变化, 研究作物的反射光谱与生物量、叶面积指数、光合色素积累量、覆盖率、含水量、平均叶倾角等农学参数之间的关系, 能够定性描述和定量分析作物的生长与遥感光谱数据之间的关系。其中光合色素主要是叶绿素, 是最为重要和运用最为广泛的参数之一。

叶绿素和植被的光合能力、发育阶段以及氮素状况有较好的相关性, 通常是氮素胁迫、光合作用能力和植被发育阶段(特别是衰老阶段)的指示器<sup>[1]</sup>。由于叶片含氮量和叶绿素之间的变化趋势相似, 所以可以通过测定叶绿素来监测植株氮素营养, 因此植物叶绿素遥感研究可作为一种评价植物氮素状态的工具<sup>[2]</sup>。叶片及冠层光谱反射率对光合色素含量的响应可能作为一种监测光合作用、氮素状况和水、病害与污染等胁迫的有力手段<sup>[3]</sup>。

然而, 大量的研究主要是对叶片叶绿素浓度的研究。相对于对叶绿素浓度的研究, 对叶绿素密度研究有更大的优势。叶绿素密度是反映植被群体光合作用强弱、植被长势的重要参量, 它与叶面积指数、生物量与叶片叶绿素浓度等参量共同反映了农作物的生长状况和生产能力, 而且它具有其自身的优越性。首先, 弥补了叶片叶绿素浓度只能反映单个植株的长势, 而不能表达植被群体的长势的不足, 反映了单位面积农作物群体的特征; 其次, 农作物的群体光谱的典型特征在可见光—近红外波段主要受

叶绿素吸收的影响, 而叶绿素密度恰恰反映了农作物群体所含叶绿素的总量。因而作物的群体光谱与叶绿素密度的相关性要比群体光谱与叶面积指数和叶绿素浓度的相关性要好得多<sup>[4]</sup>。

吴长山等人对早稻, 晚稻, 玉米的群体光谱反射数据及导数光谱数据和叶绿素密度进行了相关分析, 发现二者具有很好的相关性, 并且对这几种农作物建立了统一的线性回归关系<sup>[5]</sup>。刘伟东等<sup>[6]</sup>通过对水稻叶绿素密度与高光谱数据的相关分析, 表明叶绿素密度与光谱数据的相关性明显优于光谱数据同 LAI 的相关性。

该研究结合冬小麦的生长发育规律, 对冬小麦进行多时相的冠层光谱和叶绿素密度的测量, 通过对光谱数据的各种处理, 对叶绿素密度和光谱数据进行相关分析, 并且建立了二者之间的回归方程, 作为叶绿素密度估算模型, 对叶绿素密度进行估算。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2006 年在中科院栾城农业生态系统试验站进行, 冬小麦供试品种为石新 733, 设 6 个氮肥处理,  $N_0$ : 0 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_1$ : 50 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_2$ : 100 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_3$ : 150 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_4$ : 200 kg/hm<sup>2</sup>;  $N_5$ : 300 kg/hm<sup>2</sup>, 播种及拔节期分两次平均施入, 每处理 3 个重复, 随机排列, 分 18 个小区, 小区面积为 162 m<sup>2</sup>(9 m × 18 m), 每个处理磷肥用量相同, 为 32.5 kg/hm<sup>2</sup>, 作为底肥一次施入, 田间管理按大田管理

收稿日期: 2007-01-30

基金项目: 中科院野外台站研究基金项目“基于 Greenseeker 技术的小麦—玉米氮素实时诊断和精准施肥研究”; 河北省科技推广项目“河北省典型地区精准农业技术试验示范”

作者简介: 孟卓强(1981—), 甘肃会宁人, 硕士研究生, 主要从事生态环境和农业遥感方面的研究。E-mail: zhqmeng@MS.sjiam.ac.cn

方式进行。

## 1.2 光谱测量

用美国分析光谱仪器公司 (Analytical Spectral Devices, ASD 公司) 生产的 ASD FieldSpecHandHeld (TM) (UV/VNIR) 野外光谱仪测定冬小麦冠层反射光谱特征。可在 325~1 075 nm 波长范围内进行连续测量, 光谱分辨率为 3.5 nm, 波段数 512, 视场角度 7.5°。测量时选择晴朗无风的天气, 在 11:00~14:00 之间观测, 仪器探头垂直向下, 每次测定扫描 5 次, 冠层与标准板的反射光谱测定交替进行, 每个样区观测 5 次, 取平均值代表光谱反射率值。由于天气条件限制, 2006 年 3~6 月, 对冬小麦群体反射光谱观测了 7 次, 观测期覆盖了冬小麦返青后的整个生育期。

## 1.3 叶绿素密度的测量

与光谱测量同步, 我们对冬小麦的鲜叶生物量、叶绿素含量进行了测量。叶绿素含量为单位重量叶片中的叶绿素的重量, 用 80% 的丙酮提取, 用分光光度计比色测定叶绿素的含量。光谱测量的同时, 采集同一测量小区的叶片, 测量鲜叶重量, 同时测量样本区的植株密度, 从而算出单位面积的鲜叶生物量。叶片的叶绿素密度等于叶绿素含量与单位面积鲜叶生物量的乘积。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同叶绿素密度冬小麦群体光谱特征

叶绿素密度受施肥水平的影响明显, 从图 1 可以看出, 整体表现为随氮肥用量的增大而增大的趋势, 就单个生育期而言, 抽穗期各氮肥处理冬小麦叶绿素密度均为整个生育期最大值。图 2 以抽穗期 N<sub>0</sub> 和 N<sub>4</sub> 处理为例, 来说明不同叶绿素密度下冬小麦冠层的光谱反射率的差别, 由营养水平差异引起的作物长势不同, 而导致叶绿素密度的差异, 使得光谱反射曲线差异很大。可见光波段, 因为植物光谱反射主要受叶绿素和其他色素控制<sup>[7]</sup>, 叶绿素对可见光强烈吸收, 所以高叶绿素密度导致群体反射率降低; 而在近红外波段, 高叶绿素密度的群体反射率高, 除了细胞结构的差异影响, 这主要是高叶绿素密度的作物群体其冠层厚度, 地面覆盖度, 生物量等的增大, 使得其反射率显著增加。

### 2.2 群体反射光谱及导数光谱与叶绿素密度的相关分析

2.2.1 群体反射光谱及一阶导数光谱与叶绿素密度的相关分析 将不同叶绿素密度的冬小麦群体反射光谱和一阶导数光谱分别与叶绿素密度进行单相

关分析, 可得到光谱数据与叶绿素密度的相关性曲线(见图 3)。

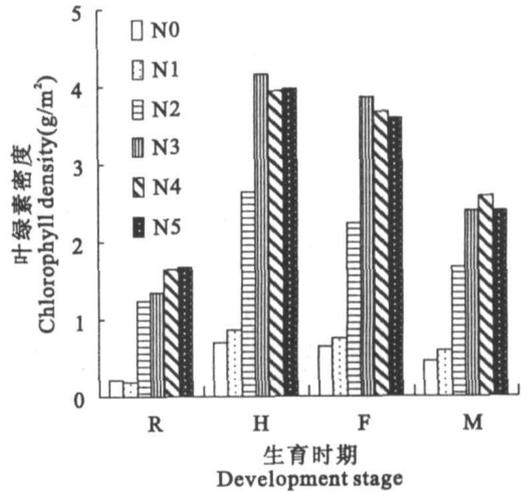


图 1 不同氮肥处理下的叶绿素密度

Fig. 1 Chlorophyll density under different N level at different developing stage

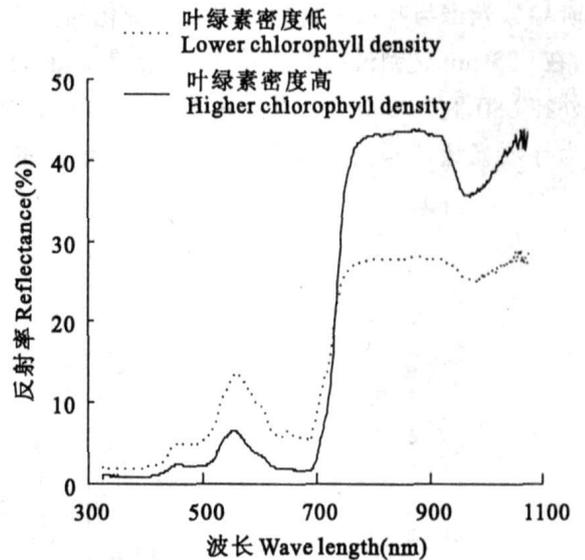


图 2 不同叶绿素密度下冬小麦冠层反射光谱

Fig. 2 Winter wheat canopy spectra under different chlorophyll density

从图 3 可以看出, 在 350~700 nm 较稳定的相关性是因为此波段光谱特征主要受叶绿素的吸收影响; 在 755 nm 之后, 光谱数据和叶绿素密度都反映了叶片的反射和多次散射的信息, 所以相关性较高; 而在 700~755 nm 之间, 拟合度很低, 其原因是该光谱范围正处于叶绿素等色素吸收波段与植物细胞结构散射引起的近红外高反射区的交接区域内。一阶导数光谱在波长 730~750 nm、790~810 nm、930~960 nm 处与叶绿素密度的相关性较高, 特别是在

730~750 nm 处的相关性比原始光谱与叶绿素密度的相关性好的多,拟合度达到了 0.898,浦瑞良、宫鹏对森林冠层的叶绿素进行的研究得到类似的结

论<sup>[8]</sup>,吴长山等人对水稻和玉米的叶绿素密度研究也有相同的结论<sup>[5]</sup>。

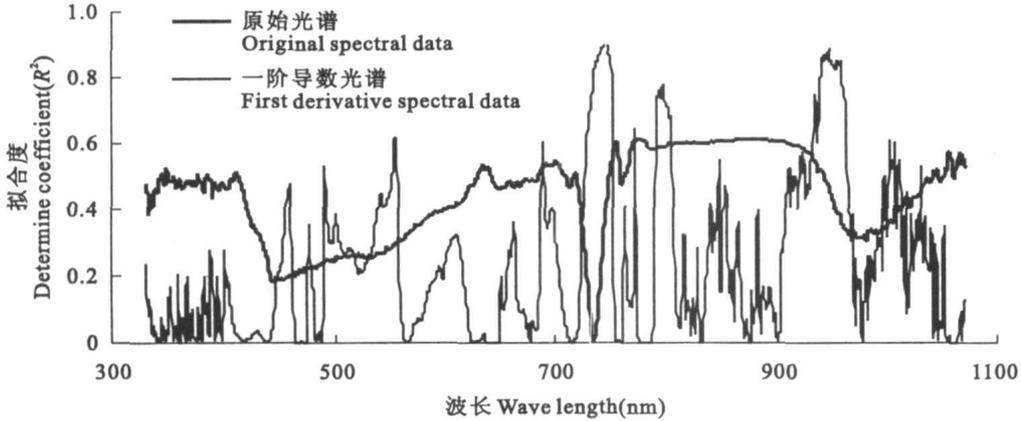


图 3 冬小麦群体反射光谱以及一阶导数光谱与叶绿素密度的相关分析

Fig. 3 Correlation between canopy reflectance spectral data, first derivative spectral data and chlorophyll density of winter wheat

### 2.2.2 二阶导数光谱与叶绿素密度的相关分析

将原始光谱做二阶微分处理,所得到的二阶导数光谱与叶绿素密度进行单相关分析,从图 4 可以看出,二阶导数光谱与叶绿素密度的拟合度变化幅度非常大,在 733 nm 达到最好的相关性,拟合度为 0.915,另外在 680, 830, 960 nm 附近都有较好的相关性。因为导数光谱能很好的消除土壤等背景信息的影

响,同时提高重叠光谱的分辨率,所以对原始光谱数据进行导数处理能提高其与叶绿素密度的相关性。另外,由于土壤背景反射光谱都是波长的近似线性函数,因此二阶导数在消除土壤背景方面作用更为显著,二阶导数光谱反射率是冠层叶绿素较好的指示器<sup>[9]</sup>。

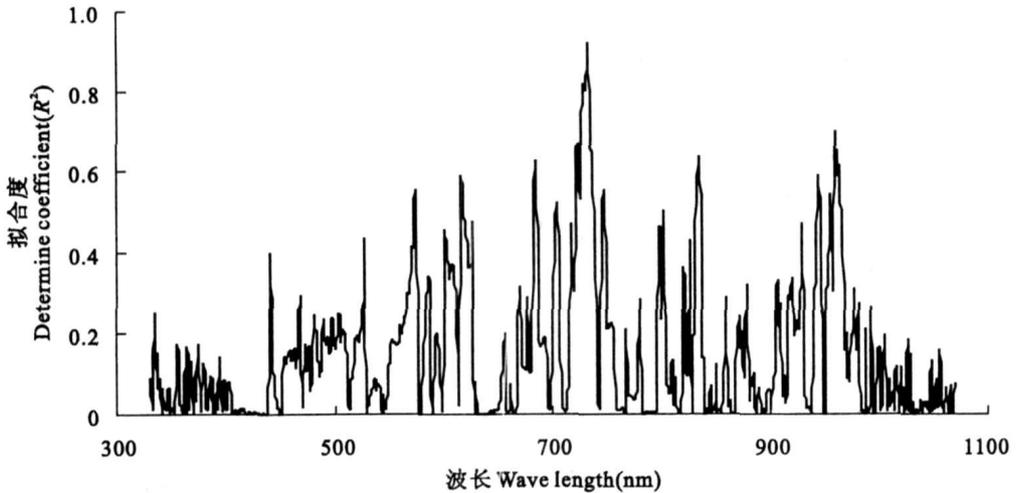


图 4 冬小麦二阶导数光谱数据与叶绿素密度的相关分析

Fig. 4 Correlation between second derivative spectral data of wheat canopy and chlorophyll density

2.2.3 叶绿素密度与导数光谱的回归分析 我们选取一阶、二阶导数光谱与叶绿素密度拟合度最高波段处的光谱数据,与叶绿素密度建立线性回归关系。依照高光谱数据与叶绿素密度的相关分析结果,一阶导数光谱、二阶导数光谱分别取 745、733 nm 处导数光谱数据与叶绿素密度建立线性回归关

系,回归结果如图 5。

从回归结果可以得知,745 nm 处的一阶导数光谱值与叶绿素密度存在着极显著的相关性,  $R^2$  达到 0.8991, 733 nm 处的二阶导数光谱值与叶绿素密度的相关性也达到极显著的水平,  $R^2$  达到 0.9152, 可以看出,二阶导数与叶绿素密度的回归结果明显优

于一阶导数, 二阶导数能更好地监测冬小麦群体的叶绿素密度。

### 2.3 红边参数与叶绿素密度的回归分析

红边是指由于植被在红光波段强烈的吸收与近红外波段强烈反射, 使光谱反射率在 680~760 nm 区域呈陡峭的爬升脊。植被光谱的红边参数主要有: ①红边位置  $\lambda_{red}$ : 红光范围 (680~760 nm) 内一

阶导数光谱最大值所对应的波长 (nm); ②红边振幅 (即红边斜率)  $d\lambda_{red}$ : 红光范围 (680~760 nm) 内一阶导数光谱的最大峰值 ( $\text{nm}^{-1}$ ); ③红边峰值面积 (简称红边面积)  $\sum d\lambda_{680\sim 760}$ : 680~760 nm 之间的一阶导数光谱所包围的面积 (无量纲和单位)。叶绿素密度与  $\lambda_{red}$ ,  $d\lambda_{red}$ ,  $\sum d\lambda_{680\sim 760}$  的回归关系如图 6。

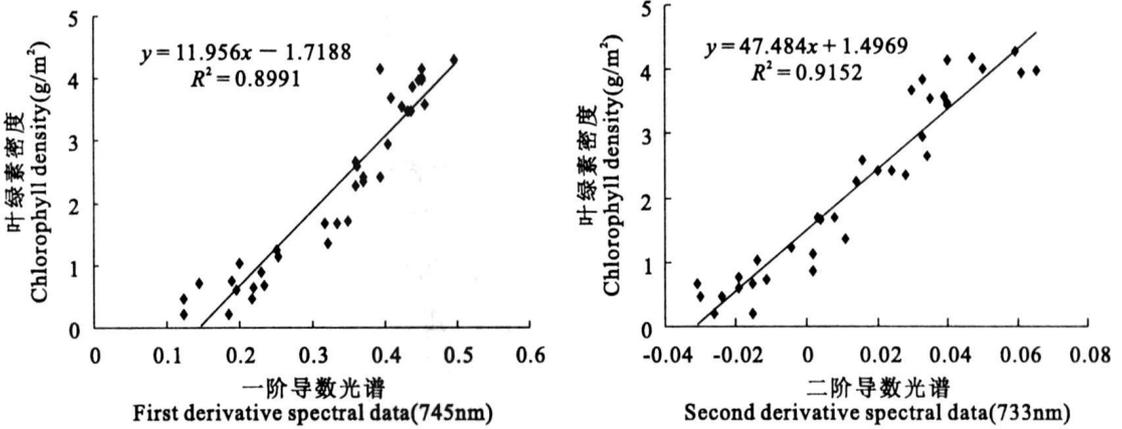


图 5 导数光谱值与叶绿素密度的回归分析

Fig. 5 Regression analysis between derivative spectral data and chlorophyll density

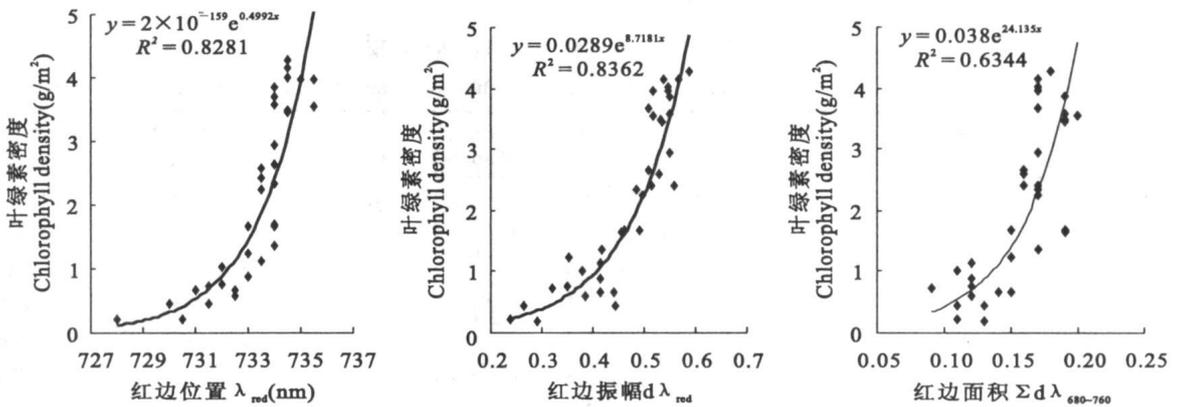


图 6 红边参数与叶绿素密度的回归分析

Fig. 6 Regression analysis between red edge parameters and chlorophyll density

从图可知, 红边位置, 红边振幅, 红边面积与叶绿素密度之间为指数关系, 相关关系均达到了 0.01 极显著检验水平, 从决定系数  $R^2$  来看, 红边位置和红边振幅与叶绿素密度的相关性要优于红边面积与叶绿素密度的相关性,  $R^2$  依次为 0.8281, 0.8362, 0.6344。

### 2.4 植被指数与叶绿素密度的回归分析

从高光谱数据中提取植被指数进行长势监测和营养诊断已得到广泛的研究, 研究表明用红光和近红外波段的不同组合进行植被研究非常好, 这些波段包含 90% 以上的植被信息。其中比值植被指数

和归一化植被指数应用最为广泛, 本文选用的小麦冠层的敏感波段为 NIR (近红外) 760~900 nm,  $R$  (红光) 630~690 nm。本文选取植被指数计算公式为: 比值植被指数 ( $RVI$ ) =  $NIR/R$ , 归一化植被指数 ( $NDVI$ ) =  $(NIR - R)/(NIR + R)$ , 其中  $R$ 、 $NIR$  表示对应波段范围的光谱反射率均值。

从图 7 可以看出,  $NDVI$  与叶绿素密度之间为指数关系,  $RVI$  与叶绿素密度之间为对数关系, 决定系数分别为 0.645 和 0.585, 均达到极显著相关水平。可见,  $RVI$  和  $NDVI$  和叶绿素密度之间有很好的相关关系。

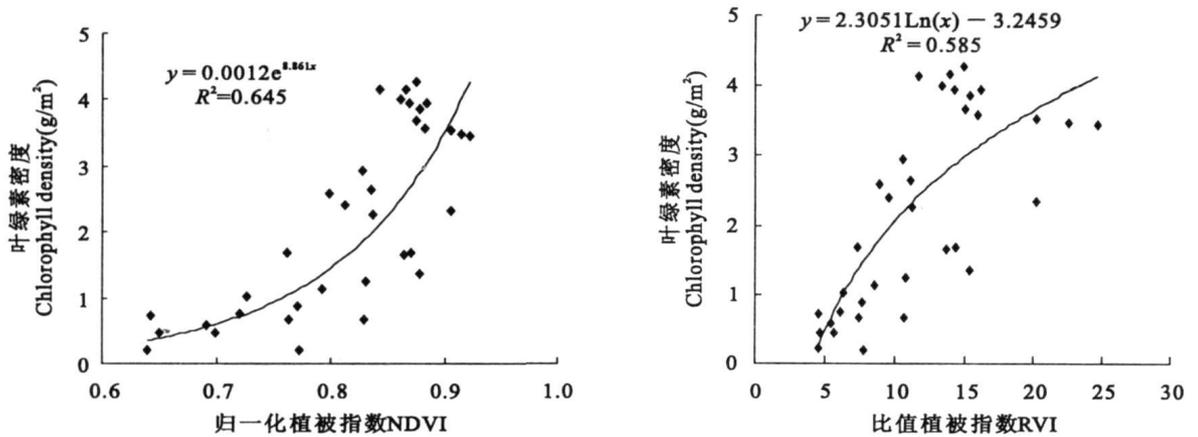


图 7 叶绿素密度与 NDVI 和 RVI 之间的回归分析

Fig.7 Correlation analysis between chlorophyll density and RVI and NDVI

### 2.5 回归方程的检验和叶绿素密度的估算

以建立回归方程的试验数据为建模样本,将前文所述回归方程作为叶绿素密度估算模型,另外以 20 个样本作为检验样本对建立的估算模型进行精度分析检验(表 1),公式中,  $y$  表示叶绿素密度,  $x$  为对应的变量。

从表 1 可知,叶绿素密度的高光谱估算模型的拟合  $R^2$  都通过了 0.01 极显著检验水平,以红边位

置  $\lambda_{red}$  为变量的预测模型  $R^2$  未通过极显著性检验水平,其他变量的预测模型  $R^2$  都通过了 0.01 极显著性检验水平,其中以 745 nm 处一阶导数为变量的模型预测精度达到最高,另外,以 733 nm 处二阶导数和红边振幅为变量的模型预测精度也较高。图 8 可直观的反映以一阶导数,二阶导数,红边振幅为变量的叶绿素估算模型预测效果。

表 1 高光谱估算叶绿素密度模型的拟合  $R^2$  与预测  $R^2$  比较Table 1 Comparison of simulated  $R^2$  with predicted  $R^2$  of models estimated chlorophyll density with models using variables of hyperspectra

变量 Variables	叶绿素密度估算模型 Models of estimated chlorophyll density	拟合 ( $R^2$ ) Simulated $R^2$	预测 ( $R^2$ ) Predicted $R^2$
一阶导数 First derivative spectra	$y = 11.956x - 1.7188$	0.8991 **	0.8065 **
二阶导数 Second derivative spectra	$y = 47.484x + 1.4969$	0.9152 **	0.7492 **
红边位置 $\lambda_{red}$	$y = 2 \times 10^{-159} e^{0.4992x}$	0.8281 **	0.2568
红边振幅 $d\lambda_{red}$	$y = 0.0289e^{8.7181x}$	0.8362 **	0.6184 **
红边面积 $\sum d\lambda_{red}$	$y = 0.038e^{24.135x}$	0.6344 **	0.4763 **
比值植被指数 RVI	$y = 2.3051\text{Ln}(x) - 3.2459$	0.5850 **	0.3744 **
归一化植被指数 NDVI	$y = 0.0012e^{8.861x}$	0.6450 **	0.3356 **

\*\* 显著水平 Significant ( $P \leq 0.01$ );  $y$ : 叶绿素密度 Chlorophyll density;  $x$ : 对应的变量 Corresponding variables.

## 3 讨论

叶绿素是农作物生长中的重要因素,而叶绿素密度反映了农作物群体的叶绿素含量,是估计农作物群体生产力的重要指标,冠层光谱也反映了作物群体的光谱特征,因此研究从冠层光谱提取的光谱特征参数与叶绿素密度的相关性有重要的意义。

导数光谱能去除背景噪音的影响,提高光谱数据与叶绿素密度的相关性,冬小麦的导数光谱与叶绿素密度有很好的相关性,二阶导数与叶绿素密度的相关性优于一阶导数与叶绿素密度的相关性。红边参数能很好的评价叶绿素密度,红边位置( $\lambda_{red}$ )和

红边振幅( $d\lambda_{red}$ )与叶绿素密度的相关性要优于红边面积( $\sum d\lambda_{680 \sim 760}$ )同叶绿素密度的相关性。植被指数 NDVI 和 RVI 与叶绿素密度之间也有很好的相关性。总体来说,导数光谱与叶绿素密度的关系最好,而二阶导数优于一阶导数。

用高光谱参数和叶绿素密度的回归方程作为叶绿素密度估算模型,以 20 个样本作为检验样本对模型进行验证,结果表明,除了以红边位置为变量的模型外,预测值和实测值之间的决定系数都达到了极显著水平。以 745 nm 处一阶导数、733 nm 处二阶导数和红边振幅为变量的估算模型,认为是叶绿素密度高光谱估算的较好模型。

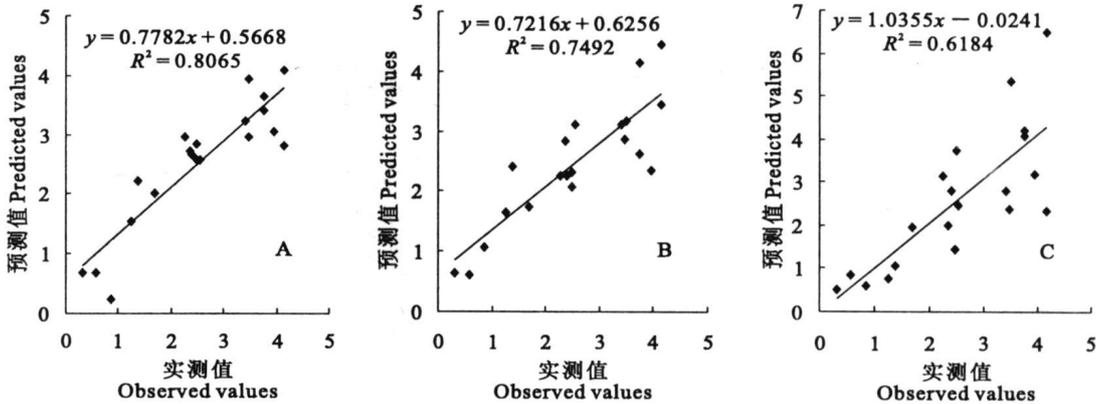


图8 叶绿素密度预测值与实测值比较

Fig. 8 Relationship between observed chlorophyll density and predicted chlorophyll density

A: 以 745nm 处一阶导数为变量的模型 Model using the first derivative spectra at 745 nm; B: 以 733nm 处二阶导数为变量的模型 Model using the second derivative spectra at 733 nm; C: 以红边振幅为变量的模型 Model using the red edge amplitude.

本研究取同一区域冬小麦叶绿素密度, 并且样本数较少, 在不同生态条件与不同的冬小麦品种的条件下, 叶绿素密度和高光谱数据之间的关系必然发生相应的变化, 要提高叶绿素密度与高光谱数据相关分析的准确性, 实现高光谱数据对叶绿素密度的准确估计, 必须通过不同区域及多年的大量数据, 提高回归关系的精确性, 建立相应的模型, 最终实现对不同生态区域, 不同品种的冬小麦叶绿素密度的估算。

#### 参考文献:

- [1] Minolta Co., Ltd. Chlorophyll SPAD-502 Instruction Manual [M]. Radiometric Instruments Operations, 1989. 17-21.
- [2] Filella J, Penuelas. The red edge position and shape as indicators of plant chlorophyll content, biomass and hydric status[J]. Int.

J. Remote sensing, 1994, 15(7):1459-1470.

- [3] Madeira A C, Mendonca A, Ferreira M E, et al. Relationship between spectroradiometric and chlorophyll measurements in green beans Communication[J]. Soil Science and Plant Analysis, 2000, 31(5-6):631-643.
- [4] Pinar A. Grass chlorophyll and the reflectance red edge[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(2): 351-357.
- [5] 吴长山, 项月琴, 郑兰芬, 等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究[J]. 遥感学报, 2000, 4(3): 228-232.
- [6] 刘伟东, 项月琴, 郑兰芬, 等. 高光谱数据与水稻叶面积指数及叶绿素密度的相关分析[J]. 遥感学报, 2000, 4(4): 279-283.
- [7] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 50.
- [8] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 196.
- [9] 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): 74-80.

## Study on correlation between chlorophyll density of winter wheat and hyperspectral data

MENG Zhuo-qiang<sup>1,2</sup>, HU Chun-sheng<sup>1</sup>, CHENG Yi-song<sup>1</sup>

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, CAS, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. Graduate school of CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract:** By field experiments, we achieve the chlorophyll density and hyperspectral data of winter wheat at different nitrogenous levels and different periods, and investigate the relationship between chlorophyll density and derivative spectra of canopies, red edge parameters, *NDVI*, *RVI* by correlation analysis. It shows that the correlative relationship is good. Regression analysis was performed between these variables and chlorophyll density, estimation models about chlorophyll density has been built. Through the test of other samples, model has been build by using the first derivative spectra data at 745 nm, the second derivativespectra data at 733 nm, and amplitude of red edge are the better one of estimating chlorophyll density of winter wheat by hyperspectral remote sensing data.

**Keywords:** winter wheat; chlorophyll density; hyperspectral data; correlation analysis; estimating model