

## 高光谱数据与棉花叶绿素含量和叶绿素密度的相关分析

王登伟, 黄春燕, 张伟, 马勤建, 赵鹏举

(石河子大学, 新疆兵团绿洲生态农业重点实验室 / 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003)

**摘要:**通过获取棉花不同品种、不同种植密度单叶和冠层关键生育时期的反射光谱, 与其相应的单叶叶绿素含量(CHL. C, 下同)和冠层叶绿素密度(CH. D, 下同)进行多元统计的逐步相关分析。结果表明, 棉花冠层 CH. D 在其反射光谱 762 nm 波段处的相关系数达最大值( $R_{CH.D} = 0.8134^{**}$ ,  $n=94$ ); 对于一阶微分光谱, 单叶 CHL. C 和冠层 CH. D 的敏感波段均发生在 750 nm 波段处, 基于 750 nm 波段的微分数值, 建立了棉花 CHL. C 和 CH. D 线性相关模型 ( $R_{CHL.C} = 0.7382^{**}$ ,  $RMSE = 0.1831$ ,  $n=66$ ;  $R_{CH.D} = 0.9027^{**}$ ,  $RMSE = 0.3078$ ,  $n=94$ ), 为利用高光谱遥感技术精确提取反映棉花生长状况的叶绿素信息提供了依据。

**关键词:**棉花; 高光谱; 叶绿素含量; 叶绿素密度; 相关分析

**中图分类号:** S562.01 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-7807(2008)05-0368-04

## Relationships Analysis between Cotton Chlorophyll Content, Chlorophyll Density and Hyperspectral Data

WANG Deng-wei, HUANG Chun-yan, ZHANG Wei, MA qin-jian, ZHAO Peng-ju

(Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Bingtuan / College of Agronomy, Shi hezi University, Shi Hezi Xinjiang 832003, China)

**Abstract:** Single leaf and canopy hyperspectral reflectance data were recorded at the key growth stages in a cotton filed experiment with cultivars and planting densities level, at the meantime, cotton single leaf chlorophyll content(CHL. C) and canopy chlorophyll density (CH. D.) were tested in the laboratory. Utilizing multivariate regression method analyzes the correlation between hyperspectral data and its CH. D. The results showed that the maximum correlation coefficients of CH. D occurred at the reflectance bands of 762 nm( $R_{CH.D} = 0.8134^{**}$ ,  $n=94$ ); the highest correlation coefficients between the first derivative spectral data and CHL. C, CH. D both occurred at band of 750 nm, based on the first derivative value of band at 750 nm, the linear function model was established ( $R_{CHL.C} = 0.7382^{**}$ ,  $RMSE = 0.1831$ ,  $n=66$ ;  $R_{CH.D} = 0.9027^{**}$ ,  $RMSE = 0.3078$ ,  $n=94$ ). This research shows that chlorophyll information of reflecting cotton growing status can be preciously obtained by using hyperspectral remote sensing.

**Key words:** cotton; hyperspectrum; chlorophyll content; chlorophyll density; correlation analysis

高光谱分辨率遥感技术是未来精准农业技术体系中获取农田数据的重要手段。利用高光谱遥感提取反映作物光合生产能力和作物长势状况的叶绿素特征波段信息, 建立作物叶绿素的遥感监测与诊断模型, 可有效地对作物进行实时快捷无损的长势监测<sup>[1-3]</sup>, 对进一步提高作物生长的预见性具有重要的意义。HANSEN 等<sup>[4]</sup>研究了小麦高光谱反射率与叶绿素密度等变量的相关波段,

认为 87% 的敏感波段集中在红边光谱范围内。JAGO 发现草地、小麦的光谱红边位置与叶绿素密度之间具有显著的相关性, 用它们可以测定地面植被的叶绿素密度<sup>[5]</sup>; BROGE 研究了二次土壤调节植被指数(SAVI2)与小麦冠层的叶绿素密度<sup>[6]</sup>; 基于光谱多元统计分析技术, YODER 等研究了枫树冠层光谱与叶绿素含量、全氮含量的相关性达到极显著的波段集中在 730~750 nm 之

收稿日期: 2007-09-28 作者简介: 王登伟(1966-), 男, 副教授, wdw\_agr@shzu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(30460060 和 30060039)

间<sup>[7]</sup>;浦瑞良等研究,湿地松人工林间的一阶微分光谱 723 nm 波段的数值和 CHL. C 的最大相关系数为 0.85<sup>[2]</sup>;吴长山等通过微分光谱与不同季节早播稻、晚播稻和玉米的 CH. D 的相关性分析,提取了这三种不同类型作物与 CH. D 相关性最高的一阶微分光谱 762 nm 的特征波段,并建立了 762 nm 导数光谱数值与 CH. D 的线性方程,模型估计精度为 80.6%<sup>[11]</sup>;王秀珍等对水稻的反射光谱及一阶微分光谱与叶绿素含量和叶绿素密度进行了相关性研究,确定了反射光谱及其一阶微分光谱与叶绿素含量和叶绿素密度间的敏感波段<sup>[8]</sup>。目前利用高光谱遥感数据研究作物的叶绿素状况主要集中在小麦、水稻、玉米等作物上。本文利用新疆棉花的多时相高光谱数据,通过对棉花叶绿素的遥感定量研究,为高光谱遥感监测棉田长势状况提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验田和试验设计

试验于 2004—2006 年在石河子大学农学院田间试验站(44°20'N,86°3'E)进行。种植面积 0.13 hm<sup>2</sup>,小区面积 30 m<sup>2</sup>,土壤肥力中等,4 月中下旬膜上点播,30 cm+60 cm 宽窄行种植。全生育期化控 4 次,7 月 15 日棉花打顶,其它管理同大田。

(1)2 品种 4 水平种植密度的试验,采用裂区设计,品种为主区,密度为副区。供试棉花品种为新陆早 6 号、8 号,种植密度分别为 18 万株·hm<sup>2</sup>、22.5 万株·hm<sup>2</sup>、27 万株·hm<sup>2</sup>和 31.5 万株·hm<sup>2</sup>;(2)品种比较试验,采用 3 重复随机区组排列。供试品种为炮台 1 号(品系)、中棉所 36、新陆早 4 号、6 号、7 号、8 号、10 号和 13 号,种植密度为 21 万株·hm<sup>2</sup>。试验(1)和(2)是利用棉花不同品种、不同密度、不同生育时期单叶 CHL. C、冠层 CH. D 的较大差异,增加反射光谱的响应梯度,以利于高光谱多元统计分析技术的应用。

### 1.2 测试项目

1.2.1 光谱测试。(1)棉花冠层高光谱数据测量:采用美国 ASD Fieldspec FR 2500 型野外光谱辐射谱仪,光谱范围 350~2 500 nm,光谱区的分辨率 350~1 000 nm 为 3 nm,1 000~2 500 nm 为 10 nm。在晴朗无云的 11:30~14:00,选择具有代表性的、均匀的无病虫害的样本点,分别在棉花的盛蕾期、开花期、花铃期、盛铃期、盛铃末期、吐絮期测定冠层光谱,测量前均用白板进行标定,25°视场角,传感器探头向下,距冠层垂直高度 1 m,每个处理小区内不同的样点测试 10 条曲

线,设定扫描时间是 0.2 s,以其平均值作为该处理冠层的光谱反射值。(2)棉花单叶光谱测定:打顶前测试倒 4 叶,打顶后测试倒 1 叶,单叶测试时设定 5°视场角,传感器探头向下,距单叶 10 cm 高度,每次测试 5 条光谱曲线,每条设定扫描时间是 0.2 s。

1.2.2 生物量的测定。在光谱测定区取棉花样本株鲜叶称重(用于计算叶绿素密度),同时测量样本的占地面积,计算单位面积的鲜叶生物量重。

1.2.3 叶绿素含量的测定(Chlorophyll content,简称 CHL. C, mg·g<sup>-1</sup>)。打顶前在各光谱测定区取 15 株棉花的主茎倒 4 展开叶,打顶后取 15 株棉花的倒 1 展开叶片,重复 3 次,用无水乙醇+丙酮各 50%浸提叶片 24 h,在分光光度计下测定各叶绿素的含量,取平均值计算各处理的棉花叶片总叶绿素含量,并计算叶绿素密度(Chlorophyll Density,简称 CH. D)。

### 1.3 计算公式

1.3.1 光谱反射率的一阶微分。 $\rho'(\lambda_i) = [\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})] / 2\Delta\lambda$

式中  $\lambda_i$  为每个波段的波长, $\rho'(\lambda_i)$  为波长  $\lambda_i$  的一阶微分光谱。 $\Delta\lambda$  是波长  $\lambda_{i-1}$  到  $\lambda_i$  的间隔。

1.3.2 叶绿素密度(CH. D, g·m<sup>-2</sup>) = 叶绿素含量×单位土地面积上的鲜叶重。

## 2 试验数据分析

### 2.1 棉花叶片的反射光谱特征

棉花叶片是制造光合产物的重要源,它的光谱反射曲线能形象地反映叶片的生长状况。研究表明,不同品种类型、不同生育期和不同营养状况下的棉花叶片反射光谱波形是相似的,主要区别在反射率的大小上(图 1)。叶片在可见光区(400~700 nm)的反射率主要是由叶绿素等色素的吸收引起的,其中 400~500 nm、630~680 nm 和 700~765 nm 为叶绿素吸收带,特别是 750~770 nm 的波段反射率与叶绿素含量具有较好的相关性<sup>[9]</sup>。棉花单叶叶片光谱反射特征主要由叶片中的叶肉细胞、叶绿素、叶黄素、胡萝卜素、花青素等色素、水分含量和其它生化组分对光线的吸收、反射、透射形成的<sup>[10]</sup>。

### 2.2 棉花冠层反射光谱及微分光谱与其 CHL. C 和 CH. D 的相关分析

浦瑞良等<sup>[2]</sup>认为,采用逐步回归的分析方法,可以确定对于某种化学成分重要的波长位置,并说明这种波段值和化学成分浓度有较好的相关性。

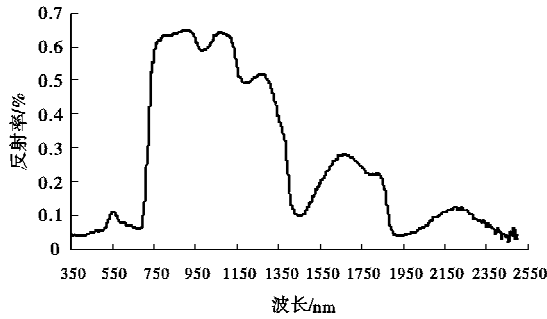


图1 棉花单叶反射光谱曲线

Fig. 1 Cotton single leaf reflectance spectral curve  
用棉花单叶和冠层的反射光谱数据分别与

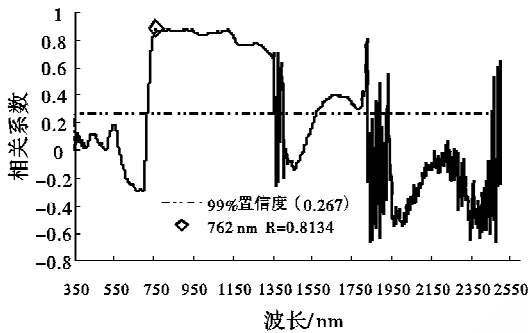


图2 花冠层反射光谱与叶绿素密度的相关分析

Fig. 2 Correlation analysis between the reflectance spectral data and chlorophyll density of cotton canopy leaves

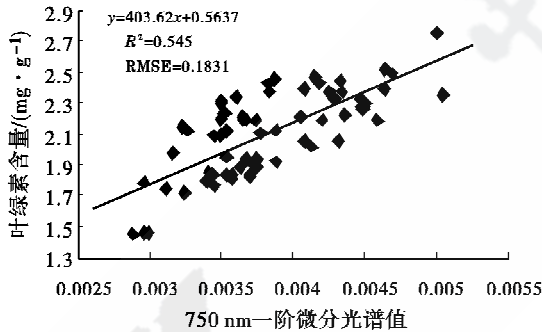


图4 棉花单叶750 nm波段一阶微分光谱值与叶绿素含量的相关分析

Fig. 4 Correlation between the first derivative spectra data at 750 nm and chlorophyll content of cotton single leaf

有研究表明,微分光谱独立于土壤背景,能更好地获取植被目标信息,监测冠层的叶绿素含量<sup>[11-12]</sup>。宋开山<sup>[13]</sup>等对大豆研究表明:大豆微分光谱在红边波段与叶绿素 a、b 含量的相关性明显强于反射光谱与叶绿素 a、b 含量的相关性,王秀珍<sup>[12]</sup>等研究证明水稻冠层的一阶微分光谱数据能够改善与 LAI、CHL. C 的相关性。本研究用棉花单叶和冠层的一阶微分光谱数据分别与 CHL. C 和 CH. D 进行逐步相关分析,相关性最高的敏感波段均在 750 nm 处,最大相关系数 ( $R_{CHL.C} = 0.7382^{**}$ ,  $n = 66$  和  $R_{CH.D} = 0.9027^{**}$ ,  $n = 94$ ) 均达到 1% 的极显著检验水平。

CHL. C 和 CH. D 进行逐步回归分析,棉花单叶反射光谱与 CHL. C 的相关性达到 1% 的极显著的波段范围分别为 738~896 nm, 953~1047 nm, 1135~1326 nm, 1812~183 nm, 而棉花冠层反射光谱数据与 CH. D 的相关性达到 1% 的极显著的波段范围在 762~1 347 nm 的近红外高平台处。分析表明,冠层 CH. D 的敏感波段发生在 762 nm 波段 ( $R_{CH.D} = 0.8134^{**}$ ,  $n = 94$ )。图 2 为棉花冠层反射光谱数据与 CH. D 相关关系的变化规律曲线。

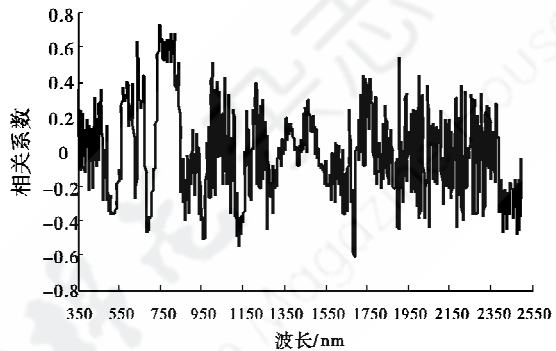


图3 棉花单叶微分光谱与叶绿素含量的相关分析

Fig. 3 Correlation analysis between the first derivative spectral data and chlorophyll content of cotton single leaf

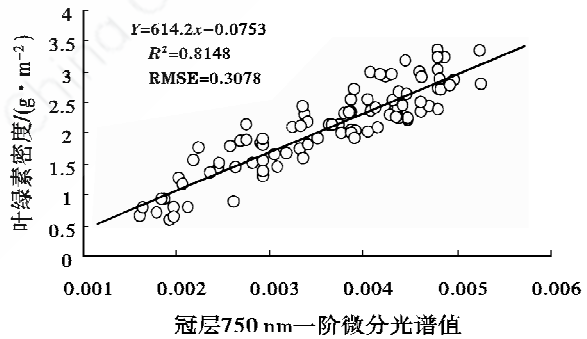


图5 棉花冠层750 nm波段一阶微分光谱数值与叶绿素密度的相关分析

Fig. 5 Correlation between the first derivative spectra data at 750 nm and chlorophyll density of cotton canopy leaves

因此,750 nm 波段可以作为测定棉花生育期单叶 CHL. C 和冠层 CH. D 的光谱特征波段,这也表明微分光谱数据更有利于确定叶绿素含量的敏感光谱波段,图 3 为棉花单叶一阶微分光谱数据与叶绿素含量的相关关系的变化规律,棉花冠层一阶微分光谱数据与叶绿素密度的相关关系与图 3 类似。

### 2.3 一阶微分光谱与棉花单叶叶绿素含量和冠层叶绿素密度相关分析

棉花单叶和冠层的一阶微分光谱 750 nm 波段数值分别与单叶叶绿素含量和冠层叶绿素密度进行线性相关分析,相关系数均达到 1% 的极显

著检验水平( $R_{CHL.C}=0.7382^{**}$ ,  $RMSE=0.1831$ ,  $n=66$  和  $R_{CH.D}=0.9027^{**}$ ,  $RMSE=0.3078$ ,  $n=94$ , 见图 4、图 5)。

表明棉花单叶和冠层的 750 nm 波段的一阶微分光谱数据分别与棉花单叶 CHL. C 和冠层 CH. D 均有较高的相关性,且棉花冠层的 750 nm 波段的一阶微分光谱数据与棉花 CH. D 的相关性高于与棉花单叶 CHL. C,说明冠层叶绿素密度不仅包含了棉花单叶叶绿素含量、也包含了棉花冠层单位面积的鲜叶片的生物量信息,而单叶只反映单株棉花打顶前的倒四和打顶后的倒一功能叶片的叶绿素含量的状况,不能表达棉花冠层所有叶片的叶绿素含量,故冠层 750 nm 波段的一阶微分光谱数据与冠层叶绿素密度的相关性高于棉花单叶 750 nm 波段的一阶微分光谱数据与棉花单叶叶绿素含量的相关性。

### 3 讨论与结论

棉花冠层反射光谱与棉花冠层 CH. D 的相关关系的最大值波段为 762 nm ( $R_{CH.D}=0.8134^{**}$ ,  $n=94$ )。而棉花单叶和冠层的一阶微分光谱分别与棉花单叶 CHL. C、冠层 CH. D 的最大相关关系的敏感波段均在 750 nm 处,这与许多研究已证明的叶绿素敏感波段在红光区 670~770 nm 的结果相一致<sup>[1-3,5,8,11,14-20]</sup>。说明光谱微分技术消除了环境干扰和背景噪音,使提取的棉花营养状况的信息更加精确。光谱多元统计分析技术是一种预测精度较高的光谱分析方法。本文利用光谱多元统计分析技术,通过一阶微分光谱提取了棉花单叶叶绿素含量和冠层叶绿素密度信息,可以评价棉花单叶和冠层叶片的叶绿素生长状况。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 浦瑞良,宫 鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:185-228.
- [3] 王登伟,李少昆,田庆玖,等. 棉花主要栽培生理参数的高光谱估测研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7):770-774.
- [4] HANSEN P M, Schjoerring J K. Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen statue in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression[J]. Remote Sensing Environment, 2003, 86(4):542-553.
- [5] JAGO R A, Cutler M F J, Curran P J. Estimate canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra[J]. Remote Sensing Environment, 1999, 68(3):217-224.
- [6] BROGE N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data [J]. Remote Sensing Environment, 2002, 81(1):45-57.
- [7] YODER B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting Nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance Spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales [J]. Remote Sensing Environment, 1995, 53(3):199-221.
- [8] 王秀珍,黄敬峰,李云梅,等. 高光谱数据与水稻农学参数之间的相关分析[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2002, 28(3):283-288.
- [9] 金震宇,田庆久,惠凤鸣,等. 水稻叶绿素浓度与光谱反射率关系研究[J]. 遥感技术与应用, 2003, 18(3):134-137.
- [10] 王 珂,沈掌泉,王人潮. 植物营养胁迫与光谱特性[J]. 国土资源遥感, 1999, 39(1):9-14.
- [11] 张金恒,王 珂,王人潮. 高光谱评价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.
- [12] 王秀珍,王人潮,黄敬峰. 微分光谱遥感及其在水稻农学参数测定上的应用研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(1):9-13.
- [13] 宋开山,张 柏,王宗明,等. 大豆叶绿素含量高光谱反演模型研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8):16-20.
- [14] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,等. 玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究[J]. 科技通报, 2007, 23(1):83-87.
- [15] 唐延林,王秀珍,黄敬峰. 棉花高光谱及其红边特征(I) [J]. 棉花学报, 2003, 15(3):146-150.
- [16] 唐延林,王秀珍,李建龙,等. 棉花高光谱及其红边特征(II) [J]. 棉花学报, 2003, 15(4):215-220.
- [17] 李志博,魏亦农,张荣华,等. 棉花不同叶位叶绿素荧光特性初探[J]. 棉花学报, 2005, 17(3):189-190.
- [18] 祁亚琴,王登伟,陈冠文,等. 基于高光谱数据提取作物冠层特征信息的研究进展[J]. 棉花学报, 2005, 17(6):371-375.
- [19] 王春艳,饯田昭弘,王道龙,等. 新疆石河子棉区高密条件下冠层结构和光分布特征[J]. 棉花学报, 2006, 18(4):223-227.
- [20] 李志博,魏亦农,杨 敏,等. 低温胁迫对棉花幼苗叶绿素荧光特性的影响初探[J]. 棉花学报, 2006, 18(4):255-256.