

# 棉花叶片厚度的高光谱测试方法

隋学艳<sup>1</sup>, 李少昆<sup>2,3\*</sup>, 张晓冬<sup>1</sup>, 朱振林<sup>1</sup>,  
柏军华<sup>2,3</sup>, 王方永<sup>3</sup>, 明博<sup>3</sup>, 白彩云<sup>3</sup>

(1. 山东省农业科学院, 济南 250100; 2. 农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 北京 100081;  
3. 新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室, 石河子 832003)

**摘要:** 植物叶片厚度的变化能够指示植物生长状态的改变, 为了实时、活体、无损地获取叶片厚度, 该研究以棉花叶片为研究对象, 利用 DPS、Origin 统计分析软件分析 84 组光谱数据与叶片厚度的相关性。研究表明, 光谱反射率与叶片厚度在可见光 350~369 nm 及 664~689 nm 2 个较窄区域达到了极显著正相关关系, 在红外 917~1 884、2 048~2 380 nm 2 个区域呈极显著负相关关系, 总体相关程度红外波段高于可见光波段。红边参数与叶片厚度的相关性不高, 24 个形状参数与厚度达到了极显著相关水平, 其中, 中心为 980 nm 的吸收谷面积与叶片厚度相关度最高, 相关系数为 0.848。分别用反射率、植被指数、光谱形状参数建立并测试 3 个估算模型, 相对误差最高为 7.4%, 均方根差最高为 0.051 mm。结果表明利用高光谱分析技术, 可以实现叶片厚度的快速、活体测量。

**关键词:** 光谱分析, 参数提取, 测量, 叶片厚度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.01.046

中图分类号: S127

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-01-0262-05

隋学艳, 李少昆, 张晓冬, 等. 棉花叶片厚度的高光谱测试方法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 262-266.

Sui Xueyan, Li Shaokun, Zhang Xiaodong, et al. Measurement of cotton leaf thickness with hyper spectrum[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(1): 262-266. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

叶片是植物光合作用和呼吸作用的主要器官, 叶片厚度作为描述叶片性状的参数<sup>[1]</sup>, 在作物生理、生态研究与生产管理方面经常用到<sup>[2]</sup>。农作物研究中叶片厚度被用来衡量单位面积内功能叶片光合细胞的多少<sup>[3]</sup>, 林业、蔬菜研究中叶片厚度的增加度可以说明肥效的好坏<sup>[4-6]</sup>, 更多情况下叶片厚度作为衡量抗胁迫能力的形态指标<sup>[7-10]</sup>。应用游标卡尺<sup>[11-12]</sup>、显微镜<sup>[13]</sup>和浮力法<sup>[14]</sup>是比较经典的叶片厚度测定方法, 2004 年中国计量学院设计的应变式柔性传感器, 可以对叶片厚度微米位移快速测量<sup>[15]</sup>。游标卡尺、显微镜测定和浮力法均需离体测量且操作过程复杂, 对植物的损害性较大; 柔性传感器采取接触式测量, 叶片厚度在挤压测定时发生变化, 给测量带来误差<sup>[16]</sup>; 高光谱技术是 20 世纪 80 年代兴起的非接触性监测技术, 在无损伤监测作物长势及品质等方面已有较多报道<sup>[17-19]</sup>。估算模型多为相关度高的单波段反射率、一阶微分或为消除土壤背景值而构建的植被指数等建立的线性、非线性

性回归模型<sup>[20-21]</sup>, 未见测定叶片厚度方面的报道。本文以棉花叶片为研究对象, 分析叶片光谱与厚度的关系, 提取较好响应叶片厚度的光谱特征参数, 建立光谱统计估算模型, 为快速、活体获取植物叶片厚度数据提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2004-2005 年在石河子大学农学试验站进行, 供试品种为新陆早 13 号, 为获得不同厚度棉花叶片样本, 使所建模型具有一定普适性, 设置氮肥和水分两种处理。6 个氮肥水平: 采用不施氮 ( $N_0$ )、155.25 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_1$ )、310.50 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_2$ )、388.125 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_3$ , 适量)、465.75 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_4$ )、621 kg/hm<sup>2</sup> ( $N_5$ ); 5 个水分水平: 1 050 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> ( $W_0$ ), 2 100 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> ( $W_1$ ), 3 150 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> ( $W_2$ ), 4 000 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> ( $W_3$ , 适量), 4 800 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> ( $W_4$ )。采用宽 60 cm 窄 30 cm 行种植, 株距为 9.6 cm, 种植密度为每公顷  $2.4 \times 10^5$  株; 底肥施入 60%, 盛花期和盛铃期各追肥 20%, 采用膜下滴灌、水表控水, 根据棉花各生育期需水规律和天气情况, 全生育期共滴水 10 次, 其他管理同大田。

### 1.2 试验方法

叶片光谱测定方法: 使用美国产 ASD Fieldspec FR2500 型光谱仪配置的单叶测试工具 ASD Leaf Clip 进行单叶反射率光谱测定, 测定叶片位置选择在叶片主叶

收稿日期: 2008-11-08 修订日期: 2009-11-09

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2006BAD10A01); 国家“863”项目 (2006AA10Z207); 山东省科技支撑项目 (2009GG10009007)

作者简介: 隋学艳 (1980-), 女, 山东蓬莱人, 助理研究员, 研究方向为农业遥感。济南 山东省农业科学院, 250100。

Email: yeyatousxy@163.com

\*通信作者: 李少昆 (1963-), 男, 甘肃张掖人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为作物栽培、生理生态与作物信息科学。北京 中国农业科学院作物科学研究所, 100081。Email: Lishk@mail.caas.net.cn

脉左右中间厚度较均匀的部分, 左右各测 4 条, 每叶片获取 8 条光谱数据求平均值, 每次测定前后进行白板校正。

叶片厚度测定方法: 打孔器打取叶片, 用游标卡尺量取 10 片厚度, 求每片平均值。

叶绿素含量测定方法: 丙酮乙醇混合法<sup>[22]</sup>。

叶片含水量测定方法: 烘干称重法<sup>[23]</sup>。

### 1.3 试验样本

于 2005 年 7 月 15 日、7 月 18 日(盛花期), 分别摘取 11 个处理上中下叶层棉叶 84 片、87 片, 放带有冰块保温盒中, 迅速带回实验室, 先测光谱, 然后测叶片厚度, 样本叶片厚度的范围为 0.305~0.698 mm。2005 年 7 月 20 日, 用同样方法摘取叶片 247 片, 其中 96 片测定叶片厚度后测定打下圆片的叶绿素, 151 片测定叶片厚度后进行叶片水分含量测定。

### 1.4 光谱数据分析方法

绿色植被具有不同于其他物体的光谱曲线<sup>[24]</sup>, 有 6 个反射峰和 5 个吸收谷, 运用包络线技术求 6 个峰 5 个谷的形状参数<sup>[25]</sup>。其中,

谷形状参数: 吸收谷深度 ( $Depth_i$ )、吸收谷特征面积 ( $Area_i$ )、归一化吸收深度 ( $ND_i$ )。

峰形状参数: 反射峰深度 ( $P\_Depth_i$ )、反射峰特征面积 ( $P\_Area_i$ )、归一化反射峰深度 ( $P\_ND_i$ )。

运用 DPS、Origin 统计软件分析光谱反射率、植被指数、光谱形状参数与叶片厚度之间的相关性, 提取相关度较高的参数并建立叶片厚度的估算模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 光谱反射率与棉叶厚度相关分析

由图 1 可见, 可见光波段反射率与叶片厚度呈正相关关系, 在 350~369、664~689 nm 处达到了极显著水平, 363 nm 处正相关度最大, 为 0.370。在红外光波段, 反射率与叶片厚度呈负相关关系, 由 1 080、1 454、1 930 nm 将红外波段分为 4 个相关度较高的区域。其中, 917~1 884、2 048~2 380 nm 波段达到极显著相关水平, 1 331 nm 处负相关度最高, 为-0.801。总体相关程度红外波段高于可见光波段。

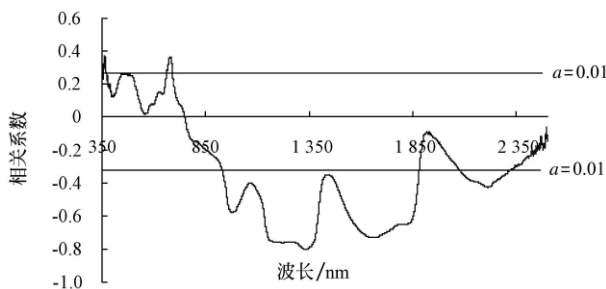


图 1 光谱反射率与叶片厚度的相关度 (样本数  $n=84$ )

Fig.1 Correlation degree between spectral reflectance and leaf thickness (84 samples)

### 2.2 植被指数、红边参数、反射峰和吸收谷形状参数与棉叶厚度相关分析

用正、负相关程度最高点 363、1 331 nm 处反射率构建差值植被指数<sup>[26]</sup> $DVI_{(1\ 331\ 363)}$ 、比值植被指数<sup>[26]</sup> $RVI_{(1\ 331\ 363)}$ 和归一化差值植被指数<sup>[26]</sup> $NDVI_{(1\ 331\ 363)}$ , 并与叶片厚度进行相关分析表明, 3 个植被指数与叶片厚度均达到极显著负相关水平, 其中以  $DVI$  相关系数最高, 为-0.820。提取并分析红边参数<sup>[27]</sup>、反射峰和吸收谷形状参数与棉叶厚度关系结果为, 红边参数中仅红边高斯模型宽度<sup>[27]</sup> $Lwidth$ 达到极显著水平, 形状参数中以 1 280、1 100、560 nm 为中心的反射峰归一化深度, 以 672 nm 为中心的吸收谷面积、吸收谷归一化深度, 以 1 690 nm 为中心的反射峰深度、面积, 以 1 280 nm 为中心的反射峰面积, 以 1 449 nm 为中心的吸收谷深度等 9 个参数与叶片厚度相关性不高, 其他 24 个形状参数与叶片厚度均达到了极显著相关水平, 正相关度最大为 0.848, 负相关度最大为-0.826。

### 2.3 棉叶厚度光谱估算模型的建立

#### 2.3.1 光谱反射率参数建模

选取在可见光 2 个正相关波段内相关度最高处 363、680 nm 的反射率, 以及红外光 4 个负相关波段内相关度最高处 981、1 331、1 665、2 213 nm 的反射率, 为了排除 6 个波段反射率之间的多重共线性得到可靠的模型, 应用逐步回归的方法, 选择方差分析  $F$  值、各回归系数的偏相关系数显著水平小于等于 0.01 的回归模型, 所建模型如下。

$$y=0.699+0.767R_{680}+1.088R_{981}-1.952R_{1331} \\ (R^2=0.770^{**}, F=82.38, Df=(3, 74)) \quad (1)$$

式中:  $y$ ——叶片厚度;  $R_{680}$ 、 $R_{981}$ 、 $R_{1331}$ ——分别为波长 680、981、1 331 nm 处的反射率

#### 2.3.2 植被指数、波谱形状参数建模

吸收谷、反射峰每个形状参数都包含了一定波长范围内若干波段的信息, 信息量大, 在此直接利用相关度最高的形状参数中心为的 980 nm 的吸收谷面积  $Area_{(980)}$  建立叶片厚度的估算模型。

植被指数选用相关度最高的  $DVI_{(1331\ 363)}$  为参数建立叶片厚度的估算模型。

依次进行直线、二次曲线、指数递减、指数增长、S 型曲线、高斯曲线、洛伦兹曲线等 7 种曲线回归, 筛选拟和优度  $R^2$  最大的模型, 最优结果见表 1。

### 2.4 模型检验

以独立于建模样本的 81 组数据对建立的 3 个模型进行检验, 求预测值与实测值之间的相关系数、相对误差、均方根差, 见表 2。

3 个模型的预测值与真实值之间均达到了极显著相关水平, 相对误差、均方根差都比较小, 准确度均在 90% 以上, 尤其是以  $R_{680}$ 、 $R_{981}$ 、 $R_{1331}$  建立的逐步回归模型, 准确度达到了 93.3%。因此 3 个模型都可以被用作棉花叶片厚度的估算模型, 进行棉花叶片厚度的预测。

表1 棉叶厚度光谱估算模型  
Table 1 Estimated models of cotton leaf thickness

参数	估算模型	参数及参数值	拟和优度 $R^2$	样本数 $n$	
$DVI_{(1331,363)}$	S型曲线 $y = A_2 + (A_1 - A_2) / (1 + \exp((x - x_0) / dx))$	$A_1$ 为 $y$ 始值	0.601	0.746**	78
		$A_2$ 为 $y$ 终值	0.396		
		$x_0$ 为使 $y$ 等于 $(A_1 + A_2) / 2$ 的 $x$ 值	0.533		
		$dx$ 为宽度	0.026		
$Area_{[980]}$	洛伦兹曲线 $y = y_0 + (2 \times A / \pi) \times (w / (4 \times (x - x_0)^2 + w^2))$	$A$ 为曲线下基线上的积分面积	5.459	0.793**	84
		$W$ 为半高	7.645		
		$y_0$	0.181		
		$x_0$	8.109		

注: \*\*0.01 极显著水平。

表2 模型检验  
Table 2 Model test

参数	预测值与真实值的相关系数 $R$	相对误差 $RE\%$	均方根差 $RMSE/mm$
$R_{680}$ $R_{981}$ $R_{1331}$	0.777**	6.7	0.043
$DVI_{(1331, 363)}$	0.694**	7.1	0.051
$Area_{[980]}$	0.774**	7.4	0.041

注: \*\*0.01 极显著水平 (样本数  $n=81$ )。

2006年8月3日,在试验田内随机取2株(A、B)棉花,从子叶节开始按叶片生长顺序依次测主茎叶片光谱(个别叶片脱落),用  $R_{680}$ 、 $R_{981}$ 、 $R_{1331}$  建立的模型进行估算,结果如图2所示。

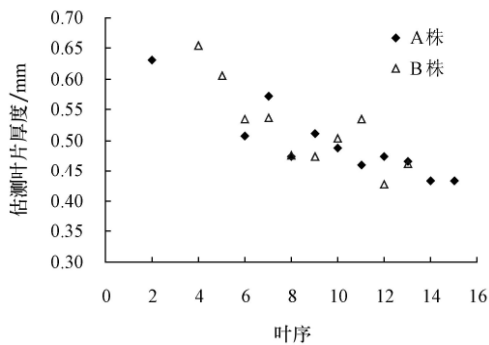


图2 2株棉花主茎叶片预测厚度

Fig.2 Estimated leaf thickness of two cotton plants

由图2可见,棉花整株叶片自下而上厚度基本呈现由厚到薄的趋势。

### 3 讨论

#### 3.1 叶片厚度与光谱特征相关性问题的探讨

影响植物光谱反射率的主要因素有植物叶片色素、叶片的细胞构造以及水分等<sup>[20]</sup>。叶片厚度与光谱反射在多个波段具有一定的相关性,为了解释这一现象,我们分析了叶片厚度与叶绿素的关系。将96组厚度与叶绿素质量分数  $mg/g$  数据进行相关分析,结果相关系数为  $-0.388$ ,达到极显著相关关系,表明随叶片厚度的增加叶绿素含量减少,对可见光的吸收能力随之下降,光谱的反射率增高,这可能是导致可见光部分反射率与叶片厚

度呈正相关关系的原因之一。

叶片的多孔薄壁细胞组织——海绵组织,对  $800 \sim 1300 \text{ nm}$  的近红外光高度反射,形成近红外高反射平台区<sup>[20]</sup>,同时此波段还包含蛋白质、木质素、淀粉等的特征吸收波段<sup>[26]</sup>。棉叶属于腹面叶,海绵组织靠近叶片下表皮<sup>[28]</sup>,叶片越厚生化组分对光吸收越多,到达海绵组织的近红外光越少,光谱反射率也就越低。

$1300 \sim 2500 \text{ nm}$  为中红外波段,水分是控制反射率的主要因素<sup>[20]</sup>,对151组数据进行相关分析得叶片厚度与含水量的相关系数为  $0.433$ ,达到极显著相关水平。而光谱反射率与叶片含水量在中红外呈负相关关系,相关度在  $1900 \sim 2000 \text{ nm}$  及  $2450 \sim 2500 \text{ nm}$  范围内不高,在其他范围均达到极显著水平<sup>[29]</sup>。因此随厚度的增加叶片含水量增加,中红外的光谱反射率降低,而在  $1900 \sim 2000 \text{ nm}$  及  $2450 \sim 2500 \text{ nm}$  范围内降低不明显。

#### 3.2 估测的不确定性

本试验所取叶片为7月中旬、新陆早13号棉株上中下不同部位的叶片,由于叶片组织结构、生化组分组成及含量上可能与其它品种或者与在棉花生育前期、后期等不同生育期有所不同,为此具有更高准确性、较强普适性的棉花叶片估测模型的建立还需要做大量的工作。

### 4 结论

本研究以非接触、无损、活体测量叶片厚度为目的,利用现代无损测量的高光谱技术,从绿色植物光谱曲线特征着手,分析了棉花叶片厚度与光谱反射率、植被指数、光谱形状参数之间的关系。根据绿色植物可见光、近红外、中红外3个波段光谱反射率产生机理以及光谱吸收特征与生化成分的关系,探讨了棉花叶片厚度与光谱反射率存在相关性的原因。运用逐步回归的方法,在众多高度相关的反射率中筛选了  $680$ 、 $981$ 、 $1331 \text{ nm}$  3个波段的光谱反射率,建立了线性回归模型;用原始光谱反射率最大正相关波段可见光  $363 \text{ nm}$ 、最大负相关波段近红外  $1331 \text{ nm}$  建立比值、差值、归一化差值植被指数,选择相关度最高的差值植被指数建立厚度预测模型,以S模型最优;以富含信息量最多的、与叶片厚度相关度最大,中心为  $980 \text{ nm}$  的吸收谷面积为变量建立回归模型,以洛伦兹模型最优。所建立的3个回归模型相对误差最

高为 7.4%，均方根差最大为 0.051，都达到了较高的准确度和精确度，可以用作棉花叶片厚度的预测。

### [参 考 文 献]

- [1] 葛体达. 夏玉米对干旱胁迫的响应与适应机制的研究[D]. 莱阳: 莱阳农学院农学系, 2004.  
Ge Tida. Responses and Adaptation Mechanisms of Summer Maize (*Zea mays* L.) to Drought Stress[D]. Laiyang: Department of Agronomy, Laiyang Agricultural College, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [2] 毛伟, 李玉霖, 赵学勇, 等. 科尔沁沙地灌丛内外草本植物狗尾草叶性状的比较研究[J]. 草业学报, 2009, 18(6): 144—150.  
Mao Wei, Li Yu-lin, Zhao Xue-yong, et al. Effect of Caragana microphylla on leaf traits of *Setaria viridis* in Horqin sandy land[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2009, 18(6): 144—150. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张义, 谢永生, 郝明德, 等. 果园生态系统生产力调控[J]. 生态学报, 2009, 29(12): 6811—6817.  
Zhang Yi, Xie Yongsheng, Hao Mingde, et al. Effect of controlling productivity on an apple orchard ecosystem[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(12): 6811—6817. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘平, 张素维, 周俊义, 等. 枣树生长发育前期高效叶面肥料的筛选[J]. 河北林果研究, 2007, 22(4): 376—378.  
Liu Ping, Zhang Suwei, Zhou Junyi, et al. Selection of efficient fertilizer for jujube trees in early growth period[J]. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 2007, 22(4): 376—378. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王红彬. CO<sub>2</sub> 施肥条件下高温对温室黄瓜光合性能的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学农学院, 2007.  
Wang Hongbin. Effects of High Temperature on Greenhouse Cucumber Photosynthetic Efficiency under CO<sub>2</sub> Enrichment [D]. Hu Hehaote: College of Agriculture, Inner Mongolia Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [6] 金慧. 不同来源有机肥及其配施对辣椒生长发育及品质的影响[D]. 长春: 吉林农业大学资源与环境学院, 2007.  
Jin Hui. Effects of different organic fertilizers on growth and quality of Hot Pepper[D]. Changchun: College of Resource and Environmental Science; Jilin Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王胜琪. 黄土高原乡土树种叶片旱性形态及解剖结构特征研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学林学院, 2007.  
Wang Shengqi. Studies of Leaf Drought and Anatomy Character of Growing in the Loess Plateau[D]. Yangling: College of Forestry, Northwest A & F University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李彦强. NaCl 胁迫对不同种源青钱柳幼苗生长和生理的影响[D]. 南京: 南京林业大学森林资源与环境学院, 2007.  
Li Yanqiang. The Growth and Physiological Responses of Seedlings of *C. Paliurus* (Batal.) Iljinskaja from Different Provenances under NaCl stress[D]. Nanjing: College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孟庆龙, 王光全, 董绍锋, 等. 桃叶片组织结构与其抗旱性关系的研究[J]. 西北林学院学报, 2005, 20(1): 65—67.  
Meng Qinglong, Wang Guangquan, Dong Shaofeng, et al. Studies on leaf tissue parameter and its relations to drought resistance of peaches[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, 20(1): 65—67. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨娟. 植物对 SO<sub>2</sub> 伤害的反应及生理抗性研究[D]. 临安: 浙江林学院环境科技学院, 2007.  
Yang Juan. Studies on Reaction of Plants to SO<sub>2</sub> Injury and Physiological Resistance[D]. Lin'an: College of Environment Technology, Zhejiang forestry university, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [11] 郑晓琴, 梁国鲁, 李晓林. 盾叶薯蓣自然变异类型间的比较研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(3): 267—270.  
Zheng Xiaoqin, Liang Guolu, Li Xiaolin. A comparison among natural variations of *dioscorea zingiberensis*[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2003, 11(3): 267—270. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李炜. 钾素营养对早熟禾草坪草抗旱性影响的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学园艺学院, 2004.  
Li Wei. Studies on Effects of Potassium Nutrition on Drought Resistance of Bluegrass Cultivars[D]. Haerbin: College of Horticulture, Northeast Agricultural University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [13] 闫克玉, 王海燕, 李兴波, 等. 烤烟国家标准(40级)河南烟叶厚度、叶质重及叶片密度研究[J]. 郑州轻工业学院学报, 1999, 14(2): 45—50.  
Yan Keyu, Wang Haiyan, Li Xingbo, et al. Study on the thickness and weight pre-square measure and density of tobacco leaves of He Nan flue-cured tobacco using official standard samples(40 grades)[J]. *Journal of Zhengzhou Institute of Light Industry*, 1999, 14(2): 45—50. (in Chinese with English abstract)
- [14] 许守民, 阎秀峰, 梁秀英, 等. 应用浮力法测定叶片厚度、体积、密度及内部空间体积[J]. 植物生理学通讯, 1989, (5): 58—61.  
Xu Shoumin, Yan Xiufeng, Liang Xiuying, et al. Application of buoyancy method for measuring leaf thickness, volume, density and internal gas volume[J]. *Plant Physiology Communication*, 1989, (5): 58—61. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李东升, 高晓红, 张文卓, 等. 植物叶片厚度和果径精密测量传感器的设计[J]. 传感器技术, 2004, 23(12): 43—46.  
Li Dongsheng, Gao Xiaohong, Zhang Wenzhuo, et al. Design of precise measuring sensor of thickness of plant leaves and diameter of plant fruit[J]. *Journal of transducer technology*, 2004, 23(12): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李东升, 何满喜. 叶片厚度仪原理误差的研究[J]. 中国计量学院学报, 2006, 17(1): 17—20.  
Li Dongsheng, He Manxi. Theoretical errors of plant leaf thickness instruments[J]. *Journal of China Ji Liang University*, 2006, 17(1): 17—20. (in Chinese with English abstract)
- [17] 冯伟, 朱艳, 姚霞, 等. 利用红边特征参数监测小麦叶片氮素积累状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 194—201.  
Feng Wei, Zhu Yan, Yao Xia, et al. Monitoring nitrogen

- accumulation in wheat leaf with red edge characteristics parameters[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 194—201. (in Chinese with English abstract)
- [18] 卢艳丽, 李少昆, 王纪华, 等. 基于冠层光谱的不同株型冬小麦籽粒蛋白质预测模型[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 147—153.  
Lu Yanli, Li Shaokun, Wang Ji Hua, et al. Prediction of grain protein based on canopy spectra in wheat with different plant types[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 147—153. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 水稻叶面积指数的高光谱遥感估算模型[J]. 遥感学报, 2004, 28(1): 47—52.  
Wang Xiuzhen, Huang Jingfeng, Li Yunmei, et al. Relationship between spectral vegetation indices and LAI in rice[J]. Journal of Remote Sensing, 2004, 28(1): 47—52. (in Chinese with English abstract)
- [20] 梅安新, 彭望录, 秦其明, 等. 遥感导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [21] 隋学艳, 李少昆, 柏军华. 遥感技术在农业上应用的研究进展[J]. 兰州大学学报, 2005, 41(专辑): 22—31.  
Sui Xueyan, Li Shaokun, Bai Junhua. The study development of the applying of remote sensing on agricultural[J]. Journal of Lanzhou University, 2005, 41(Special Issue): 22—31. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张宪政. 植物叶绿素含量测定—丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986, (3): 26—28.  
Zhang Xianzheng. Analysis method of plant chlorophyll content—extraction of acetone and ethanol component solvent[J]. Liaoning Agric Sci, 1986, (3): 26—28. (in Chinese with English abstract)
- [23] 作物栽培教研室. 作物栽培学实验指导[M]. 乌鲁木齐: 新疆大学出版社, 1998.
- [24] 孙家炳, 舒宁. 遥感原理、方法和应用[M]. 北京: 测绘出版社, 1997.
- [25] 卢艳丽. 小麦株型与籽粒蛋白质品质的遥感监测[D]. 北京: 中国农业科学研究院作物科学研究所, 2005.  
Lu Yanli. Monitoring of Plant Type and Grain Protein Quality Using Remote Sensing in Wheat[D]. Beijing: Institute of Crop Science, Chinese Academy of Agricultural Science, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [26] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 等教育出版社, 2000.
- [27] 胡昊, 自由路, 杨俐苹, 等. 不同氮营养冬小麦冠层光谱红边特征分析. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(6): 1317—1323.  
Hu Hao, Bai Youlu, Yang Liping, et al. Red edge parameters of winter wheat canopy under different nitrogen level. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(6): 1317—1323. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郑湘如. 植物学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2002.
- [29] 隋学艳. 棉花主要栽培生理指标的近地高光谱监测研究[D]. 石河子: 石河子大学农学院, 2006.  
Sui Xueyan. The Study of Cotton Main Cultivation Physiological by Near Ground High Remote Sensing[D]. Shi Hezi: College of Agriculture, Shihezi University, 2006. (in Chinese with English abstract)

## Measurement of cotton leaf thickness with hyper spectrum

Sui Xueyan<sup>1</sup>, Li Shaokun<sup>2,3\*</sup>, Zhang Xiaodong<sup>1</sup>, Zhu Zhenlin<sup>1</sup>,  
Bai Junhua<sup>2,3</sup>, Wang Fangyong<sup>3</sup>, Ming Bo<sup>3</sup>, Bai Caiyun<sup>3</sup>

(1. Shandong Academy of Agriculture Sciences, Jinan 250100, China;

2. Key Laboratory of Crop Physiology and Production, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Construction Crops, Shihezi 832003, China)

**Abstract:** Changes of leaf thickness can indicate the variations of plant growth state, in order to carry out real-time, live, non-destructive testing of leaf thickness, the study took cotton leaves as the research object. The correlation between plant leaf spectrum and thickness was studied on 84 couples of data of cotton, with DPS and Origin statistical softwares. Studies showed that the correlation between reflectance and leaf thickness showed significantly positive relationship in two visible light regions of 350-369 nm and 664-689 nm, and significantly negative relationship in two infrared regions of 917-1 884 nm and 2 048-2 380 nm. In general, the correlation degree between reflectance and leaf thickness in infrared light was higher than that in visible light. Red edge indices showed low correlation with leaf thickness, however 24 figure indices had significant correlation with leaf thickness, and the area of absorbtion with the center of 980nm had the highest correlation degree with correlation coefficient 0.848. Three models about leaf thickness were set and tested with reflectance, plant index and spectral figure index. Among these models, the highest relative error was 7.4%, and the RMSE was 0.051 mm. It is feasible to measure alive leaf thickness untouchably with hyper spectrum.

**Key words:** spectrum analysis, parameter extraction, measurements, leaf thickness