

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2013.00319

## 利用光谱红边参数监测黄萎病棉叶叶绿素和氮素含量

陈 兵<sup>1</sup> 韩焕勇<sup>1</sup> 王方永<sup>1</sup> 刘 政<sup>1</sup> 邓福军<sup>1</sup> 林 海<sup>1</sup> 余 渝<sup>1</sup>  
李少昆<sup>2,3</sup> 王克如<sup>2,3</sup> 肖春华<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>新疆农垦科学院棉花研究所 / 农业部西北内陆区棉花生物学与遗传育种重点实验室 / 国家棉花改良中心新疆生产建设兵团分中心, 新疆石河子 832003; <sup>2</sup>中国农业科学院作物科学研究所 / 农作物基因资源与基因改良国家重大科学工程, 北京 100081; <sup>3</sup>新疆兵团绿洲生态农业重点开放实验室 / 石河子大学, 新疆石河子 832000

**摘 要:** 以黄萎病胁迫下棉花叶片为试验材料, 分析感染病害棉叶叶绿素(Chl)含量和氮素含量(LNC)与光谱红边参数间的关系, 建立病害棉叶 Chl 含量和 LNC 的光谱红边参数诊断模型。结果表明: (1)随着病情加重, 棉叶 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 LNC 逐渐减小, 其中 Chl a 下降最快, Chl b 下降最慢。(2)黄萎病叶片光谱反射率在可见光区(400~700 nm)、近红外光区(700~1300 nm)和短波红外光区(1300~2500 nm)呈现逐渐上升趋势, 在 520~680 nm 间达极显著( $P<0.01$ ); 光谱吸收率在可见光区和短波红外光区呈现逐渐下降的趋势, 达极显著( $P<0.01$ ), 在近红外光区呈现先升后降的趋势。(3)病害棉叶红边位置(Rep)、红边振幅(Dr)、红谷位置(Lo)、红边深度(Depth672)和红边面积(Area672)的值均减小, 红边宽度(Lwidth)的值增加, 且 Area672 减小的幅度最大, Dr 减小的幅度最小, Lwidth 增加的幅度较大。(4)病害棉叶 Chl a 含量、Chl b 含量、Chl a+b 含量和 LNC 均与红边参数 Rep、Lo、Depth672 和 Area672 呈极显著正相关, 与 Lwidth 呈极显著负相关, 与 Dr 未达显著相关。(5)利用红边参数建立的棉叶 Chl 含量和 LNC 的诊断模型均达极显著( $P<0.01$ ), 其中以 Area672 为自变量建立的病害棉叶 Chl a、Chl a+b 和 LNC 的诊断模型和 Lo 为自变量建立的 Chl b 诊断模型的精度最高, 能很好的诊断病害棉叶 Chl 含量和 LNC。

**关键词:** 棉花; 病害胁迫; 高光谱; 叶绿素含量; 氮素含量; 诊断模型

## Monitoring Chlorophyll and Nitrogen Contents in Cotton Leaf Infected by *Verticillium wilt* with Spectra Red Edge Parameters

CHEN Bing<sup>1</sup>, HAN Huan-Yong<sup>1</sup>, WANG Fang-Yong<sup>1</sup>, LIU Zheng<sup>1</sup>, DENG Fu-Jun<sup>1</sup>, LIN Hai<sup>1</sup>, YU Yu<sup>1</sup>, LI Shao-Kun<sup>2,3</sup>, WANG Ke-Ru<sup>2,3</sup>, and XIAO Chun-Hua<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Cotton Institute, Xinjiang Academy Agricultural and Reclamation Science / Northwest Inland Region Key Laboratory of Cotton Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture / Xinjiang Production & Construction Corps Subcenter of National Cotton Improvement Center, Shihezi 832000, China; <sup>2</sup>National Key Facility for Gene Resources and Genetic Improvement / Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; <sup>3</sup>Key Laboratory of Oasis Ecology Agriculture of Xinjiang Corps / Shihezi University, Shihezi 832003, China

**Abstract:** The relationship between chlorophyll (Chl) content, leaf nitrogen content (LNC) and red edge parameters were analyzed, and diagnose models of spectra red edge parameters were established for cotton leaf infected by *Verticillium wilt*. Results showed that: (1) Chl a, Chl b, Chl a+b content, and LNC decreased with increasing in severity level (SL) of *Verticillium wilt* in cotton leaves, in which Chl a showed the highest and Chl b showed the lowest decrement rate, respectively. (2) Spectrum reflectance increased with increasing severity of *Verticillium wilt* in the visible region (400–700 nm), near-infrared region (700–1300 nm) and short infrared region (1300–2500 nm), and significantly higher increment was detected in 525–680 nm region ( $P<0.01$ ). Spectrum absorption decreased significantly with increasing SL of *Verticillium wilt* in the visible region and short infrared region ( $P<0.01$ ), and which increased first and then decreased in near-infrared region. (3) Decrease of Rep, Dr, Lo, Depth672, Area672 and increase of Lwidth was detected among red edge parameters, in which Area672 showed the highest and Dr showed the Lowest decrement rate, respectively. (4) There was significantly positive correlation between Chl a, Chl b, Chl a+b, LNC of cotton leaves and Rep, Lo, Depth672, Area672 of red edge parameters, significantly negative correlation was found for Lwidth of red edge parameter, while no significant correlation was found for Dr of red edge parameter. (5) Diagnose models of Chl a, Chl a+b,

本研究由国家自然科学基金项目(41161068, 30860139, 31071371)和新疆农垦科学院科技引导计划项目(YXD201102)资助。

第一作者联系方式: E-mail: zyrcb@126.com

Received(收稿日期): 2012-06-20; Accepted(接受日期): 2012-11-16; Published online(网络出版日期): 2012-12-11.

URL: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20121211.1614.009.html>

edge parameter, while no significant correlation was found for Dr of red edge parameter. (5) Diagnose models of Chl a, Chl a+b, and LNC for *Verticillium wilt* in cotton leaves with the independent variables Area672, and Chl b with the independent variables Lo reached the best estimated precision ( $P < 0.01$ ). This could diagnose severity level of *Verticillium wilt* in cotton leaves effectively.

**Keywords:** Cotton; Disease stress; Hyper spectra; Chlorophyll content; Nitrogen content; Diagnose models

黄萎病是棉花的主要病害,主要在作物生长期致使叶片变黄或焦枯,严重的棉株,几乎整个病叶变黄或焦枯甚至脱落死亡。因为黄萎菌能产生大量的黄萎菌孢子,这些病菌孢子可产生毒素或大量繁殖阻塞纤维素导管,导致植物体内水分运输受阻,植物不能正常生长甚至死亡。该病流行时可大大地降低作物的产量,因此,在棉花生长的早期定期监测和预测黄萎病非常重要<sup>[1]</sup>。

叶片叶绿素和氮素是表征作物健康状况的主要生理指标,叶绿素是作物进行光合作用的重要物质,氮素是影响作物生长最重要的营养元素,因此,叶绿素和氮素含量的变化能直接和间接地反映作物生长好坏,最终影响作物的产量与品质<sup>[2-3]</sup>。由于叶绿素和氮素含量与作物营养、长势等指标密切相关,并与作物光合能力、发育阶段又有较好的相关性,所以它们通常被认为是作物胁迫、光合作用能力和作物发育阶段的指示器<sup>[4]</sup>。光谱红边是由作物叶片叶绿素在红光波段对光的强烈吸收与叶片内部组织在近红外波段对光的多次散射形成的强反射造成的,范围一般在 680~750 nm 之间。由于光谱红边主要依据作物的营养状况、生物量和物候期而发生变化,作物的叶片组织发生变化时也会引起光谱红边的相应变化,尤其当作物受到各种胁迫时,作物的红边特征常发生显著的变化<sup>[5-6]</sup>,因此,常被用来指示作物生长的好坏。最近的研究已经显示:作物叶片因病虫害导致其细胞结构、色素、水分、营养元素及外部形状等发生变化,其中叶绿素和氮素含量的变化尤为显著,从而引起光谱的变化,尤其是光谱红边的变化<sup>[1,7]</sup>。前人利用光谱特征对作物叶绿素和氮素含量的监测进行了大量研究。例如, Broge 等<sup>[8]</sup>、Ponzoni 等<sup>[9]</sup>和 Schlemmer 等<sup>[10]</sup>直接采用光谱反射率监测植株叶绿素和氮素含量, Blackburn 等<sup>[11]</sup>和 Yoder 等<sup>[12]</sup>利用对数形式的作物指数监测植株叶绿素和氮素含量, Haboudance 等<sup>[13]</sup>和 Errmann 等<sup>[14]</sup>利用不同敏感波段构建不同植被指数监测植株叶绿素和氮素含量。在利用光谱红边参数监测植被叶绿素和氮素含量方面,众多学者也提出了不同的监测方法:有直接采用单一方法计算某一红边参数对植株叶绿素和氮素含量进行监测的<sup>[15-16]</sup>,有改进或创建新的红边参数对植株叶绿素和

氮素含量进行监测的<sup>[17-18]</sup>,有利用不同算法计算同一光谱红边参数对植株叶绿素和氮素含量进行监测的<sup>[19-22]</sup>,也有采用两种或两种以上不同红边参数对植株叶绿素和氮素含量进行监测的<sup>[23-26]</sup>,而利用红边参数对黄萎病病害胁迫下棉叶叶绿素和氮素含量的监测研究未见有系统报道。

本文拟以病害胁迫下棉花叶片为材料,调查不同棉花品种不同生育期田间病害,借助光谱分析叶绿素和氮素含量与光谱红边参数间的关系,建立叶片叶绿素和氮素含量的反演模型,以期用简便、无损的遥感技术监测病害棉叶叶绿素和氮素含量,为大面积遥感监测棉花病害及长势监测、估产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地及种植情况

试验于 2005—2011 年在中国新疆石河子棉区进行。以小区试验为主,大田试验为辅。小区试验设在石河子大学新疆作物高产研究中心试验站和新疆农垦科学院棉花研究所黄萎病病圃田,2 个试验点土壤特性相近,土壤表层 0~20 cm 均为壤质灰漠土带有 10%~15% 的黏性,有机质含量 19%~22%。土层的主要成分为含碱解氮 77~82 mg kg<sup>-1</sup>、速效磷 93~97 mg kg<sup>-1</sup>、速效钾 300~315 mg kg<sup>-1</sup>,前茬均为棉花。2005—2009 年在石河子大学新疆作物高产研究中心试验站种植新陆早 6 号、新陆早 7 号、新陆早 13、新陆早 24、新陆早 33、中棉所 36、新彩 5 号和新海 21。小区面积为 42.5 m<sup>2</sup>,随机区组设计,3 个重复,密度均为 24 万株 hm<sup>-2</sup>。2005—2006 年为 60 cm + 30 cm 宽窄行设计,2007—2009 年为 15 cm + 50 cm 宽窄行设计。分别在每年的 4 月中下旬左右覆宽膜种植,膜上点播,膜下滴灌,灌水量为 3300 m<sup>3</sup> hm<sup>-2</sup>,施肥量为纯氮 300 kg hm<sup>-2</sup>,P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 150 kg hm<sup>-2</sup>和 K<sub>2</sub>O 75 kg hm<sup>-2</sup>。全生育期灌溉 11 次,从 6 月 12 日开始到 8 月 24 日结束,灌溉周期为每 8 d 一次。磷、钾和 1/3 的氮肥被用做基肥,2/3 的氮肥用做追肥,其中 2005—2007 年于每年的 6 月 28 日和 7 月 26 日分 2 次随水施入,2008—2009 年按比例每次灌水时随水滴施。其他按当地高产栽培模式管理。

2010—2011 年在新疆农垦科学院棉花研究所黄萎病圃田种植新陆早 8 号和新陆早 33。小区设置和管理均与石河子大学新疆作物高产研究中心试验站基本相同, 每小区种植密度为 26 万株  $\text{hm}^{-2}$ , 配置为 40 cm+20 cm 宽窄行。

大田试验分别设在石河子 143 团 19 连 19#地和 14 连 8#地、147 团种子站 2#地、148 团 11 连 28#地常年大面积暴发黄萎病的棉田。3 个地区的土壤均是黏壤土, 含有有机质 1.2%~1.5%、碱解氮 70~75  $\text{mg kg}^{-1}$ 、速效磷 80~90  $\text{mg kg}^{-1}$ 、速效钾 290~310  $\text{mg kg}^{-1}$ 。试验区品种除与试验田保持一致外, 还包括惠远 602 和新陆早 42。每年 4 月中下旬播种, 小区划分大小和设计同第一个试验保持一致, 其他栽培措施也按当地高产栽培模式管理。

## 1.2 取样及病害分级

在病害发生高峰期调查病害严重度, 选用不同病害级别棉株相邻或相近叶位叶片为样叶, 每小区内取棉株 3 株(包括正常和病害棉株), 每株取不同严重度棉叶 5 片(包括正常叶)。样叶被迅速放入自封袋中, 立刻带回实验室进行光谱及理化参数测试。参照病害分级标准<sup>[27]</sup>, 按棉叶受害枯黄面积占整个叶片面积百分数的可视化症状, 将发病程度分为 5 级, 即正常(b0): 无症状; 轻度(b1): 症状(0~25%); 中度(b2): 症状(25%~50%); 严重(b3): 症状(50%~75%); 极严重(b4): 症状(75%~100%)。

## 1.3 叶片光谱和理化参数测定

1.3.1 高光谱数据获取 单叶光谱采用美国 ASD Field spec Pro FR 2500 便携式光谱仪与 ASD Leaf Clip 测试夹耦合测定。单叶光谱测试夹本身带有模拟光源, 测试视场范围直径 2.5 cm, 可在密闭环境下测定, 没有外界光源和环境的干扰。Pro FR 2500 便携式光谱仪有 512 个光谱波段, 波段范围为 350~2500 nm, 光谱分辨率在 350~1000 nm 为 3 nm, 1000~2500 nm 为 10 nm。将小区试验田和大田取回的不同严重度棉叶立即测试, 测试时对每片样叶分中上部、左基部和右基部各测 2 次, 每次测定 2 条光谱曲线, 每条光谱曲线扫描时间 0.2 s, 取平均值作为该叶片的光谱反射值。每次测量前均用 ASD Leaf Clip 内置标准参考白板进行校正, 之后先黑板做底板测反射率值, 再白板做底板测透反射率值, 最后计算吸收率值。吸收率值的计算公式如下:

$$\text{吸收率} = 1 - \text{反射率} - \text{透射率} \quad (1)$$

分别在每年的盛蕾期、盛花期、盛铃期和吐絮期对

样叶进行光谱和理化参数测试。

1.3.2 叶片叶绿素含量测定 将测定光谱的叶片用半径为 0.3 cm 的打孔器取下 0.2 g 左右, 置于 95% 乙醇中避光浸提 24 h, 用分光光度计测定 665、649 和 470 nm 处的 OD 值并计算叶片叶绿素密度<sup>[28]</sup>, 包括叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b) 和叶绿素 a+b (Chl a+b) 的单位面积含量( $\text{mg cm}^{-2}$ )。叶绿素密度计算公式如下:

$$\text{Chl.D} = \frac{C \times V}{N \times \pi \times (R/10)^2 \times 1000} \times \text{稀释倍数} \quad (2)$$

式中,  $C$  为色素浓度( $\text{mg L}^{-1}$ ),  $V$  为提取液体积( $\text{mL}$ ),  $N$  为打孔叶片数,  $R$  (cm) 为打孔器半径。

1.3.3 叶片氮素含量测定 将测试光谱后的不同严重度叶片在 105℃ 杀青 30 min, 80℃ 烘干至恒重, 称取 0.2 g 粉碎过 100 目筛后的样品用瑞士 BUCHI 公司产全自动 B-339 凯氏定氮仪测定叶片全氮含量 [leaf nitrogen content, LNC ( $\text{mg g}^{-1}$ )]<sup>[29]</sup>。

## 1.4 数据分析

用 ASD 公司提供的 ViewSpec Program 软件处理得到不同严重度样叶的原始反射光谱数据和光谱反射率曲线。再采用光谱归一化微分分析技术, 在 Matlab 7.01 软件中对反射光谱数据进行一阶微分处理, 得到微分光谱, 其近似计算方法如下<sup>[30]</sup>:

$$\rho'(\lambda_i) = \frac{[\rho(\lambda_{i+1}) - \rho(\lambda_{i-1})]}{(\lambda_{i+1}) - (\lambda_{i-1})} \quad (3)$$

式中,  $\lambda_i$  为波段  $i$  波长值;  $\rho(\lambda_i)$  为波长  $\lambda_i$  的光谱反射率值;  $\rho'(\lambda_i)$  为波段  $i$  的一阶微分值。并进一步提取红边特征参数。包括: 红边位置(REP)为在 680~750 nm 范围内光谱反射率的一阶微分值达到最大时所对应的波长; 红谷位置(Lo)为在 680~750 nm 范围内光谱反射率的一阶微分值达到最小时所对应的波长; 红边宽度(Lwidth)为吸收谷深度一半处的宽度; 红边振幅(Dr)为红边区域内一阶微分光谱值的最大值; 红边深度(Depth672)为 672 nm 处的吸收深度; 红边面积(Area672)为 680~750 nm 红边范围内光谱一阶微分值的和。用 SPSS 10.0 软件分析, 2005—2007 年的 90 个样本用于建模, 2008—2011 年的 80 个样本用于模型检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同严重度病害棉叶叶绿素(Chl)含量和氮素含量(LNC)变化

从图 1 可以看出, 随着病害严重度的增加, 病

害棉叶 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 LNC 逐渐减小, 其中 Chl a 的下降最快, Chl b 下降最慢, 并且差异极显著( $P<0.01$ )。此外, Chl a 减小的幅度最大( $F=190.96>F_{0.01}$ ), Chl a+b 次之( $F=176.81>F_{0.01}$ ), LNC 再次

( $F=63.696>F_{0.01}$ ), Chl b 最小( $F=48.94>F_{0.01}$ )。幅度减小的顺序是: Chl a>Chl a+b>LNC>Chl b。说明叶片 Chl 含量和 LNC 的变化与黄萎病病害发生的情况基本一致。

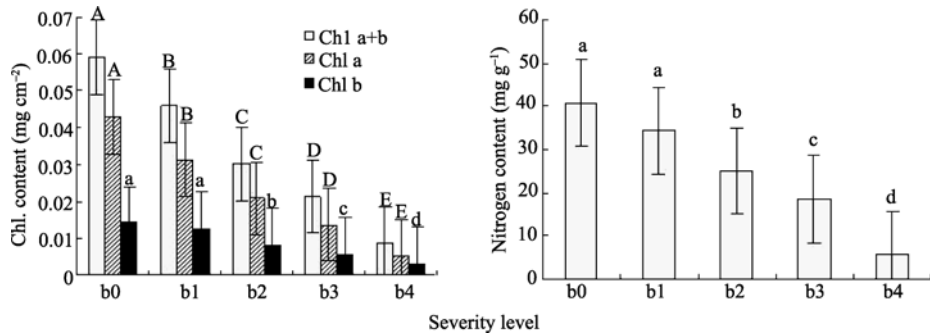


图 1 不同严重度黄萎病棉叶叶绿素和氮素含量变化

Fig. 1 Changes of chlorophyll and nitrogen content for cotton leaf infected by *Verticillium wilt* in different severities

b0: 无症状; b1: 轻度症状(0~25%); b2: 中度症状(25%~50%); b3: 严重症状(50%~75%); b4: 极严重症状(75%~100%)。图柱上不同小写和大写字母分别表示在 0.05 和 0.01 水平差异显著。

b0: healthy cotton, no symptoms; b1: slight *Verticillium* symptom (0–25% yellow and scorched), b2: moderate *Verticillium* symptoms (25%–50% yellow and scorched); b3: severe *Verticillium* symptoms (50%–75% yellow and scorched); b4: very severe *Verticillium* symptoms (75%–100% yellow and scorched). Bars with superscripts of different small letters and capital letters indicate significant levels at 0.05 and 0.01, respectively.

## 2.2 不同严重度病害棉叶光谱曲线特征

图 2 可知, 黄萎病叶片光谱反射率和吸收率均随病情加重呈现明显的变化规律。图 2-a 表明, 随病情加重, 黄萎病叶片平均光谱反射率均在可见光区(400~700 nm), 近红外光区(700~1300 nm)和短波红外光区(1300~2500 nm)呈现逐渐上升趋势, 在 520~680 nm 波段范围内尤为显著( $P<0.01$ )。即正常叶片(b0)的平均光谱反射率最低, 极严重叶片(b4)的平均光谱反射率最高。此外, 随发病程度增加, 病叶同正常叶之间的平均光谱反射率差值逐渐加大, 当

病叶严重度为 b1 时, b1 和 b2 之间的平均光谱反射率仅在可见光区开始达到极显著水平( $P<0.01$ ), 而当病叶严重度为 b2 时, b1 和 b2 之间的平均光谱反射率不仅在可见光区达到极显著水平( $P<0.01$ ), 而且在近红外光区和短波红外光区也开始到达极其显著的水平( $P<0.01$ )。图 2-b 表明, 随病情加重, 黄萎病叶片平均光谱吸收率均在可见光区和短波红外光区呈现逐渐下降的趋势, 且达到极显著( $P<0.01$ ); 在近红外光区变化较复杂, 呈现先升后降的趋势, 即不同严重度叶片平均吸收率在 700~1200 nm 波段

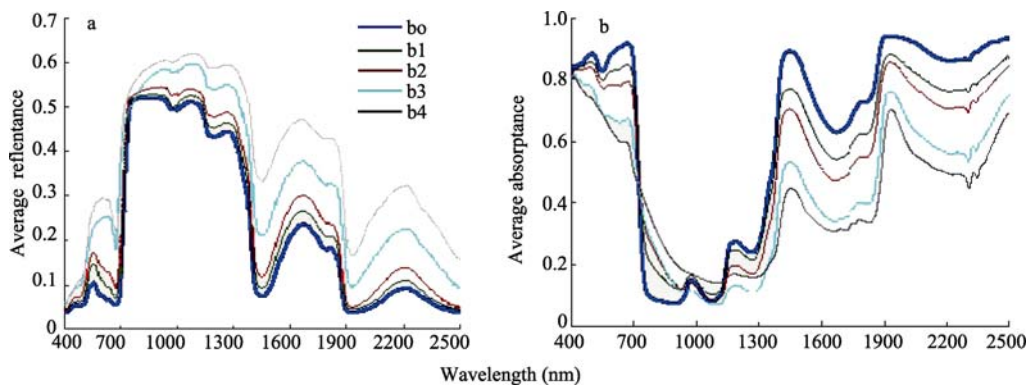


图 2 棉花黄萎病不同严重度叶片平均光谱曲线

Fig. 2 Average spectra of cotton leaf infected by *Verticillium wilt* in different severities

b0: 无症状; b1: 轻度症状(0~25%); b2: 中度症状(25%~50%); b3: 严重症状(50%~75%); b4: 极严重症状(75%~100%)。

b0: healthy cotton, no symptoms; b1: slight *Verticillium* symptom (0–25% yellow and scorched), b2: moderate *Verticillium* symptoms (25%–50% yellow and scorched); b3: severe *Verticillium* symptoms (50%–75% yellow and scorched); b4: very severe *Verticillium* symptoms (75%–100% yellow and scorched).

范围内逐渐上升, 1200~1300 nm 波段范围内逐渐下降。总体而言, 可见光波段和短波红外波段病害叶片光谱特征规律明显, 近红外波段存在差异。说明光谱在可见光和短波红外光对病害棉叶不同严重度的识别能力好于近红外。

2.3 不同严重度病害棉叶光谱红边参数特征

对不同病害严重度棉叶的一阶微分光谱的均值分析后发现, 所有的试验品种的一阶微分平均值变化最大的波段位于红边区域(680~750 nm)(图 3)。与正常叶片的红边相似, 棉花黄萎病不同严重度叶片光谱的红边均具有“单峰”现象, 且单峰逐渐降低。此外, 红边位置明显向短波方向移动。即红边振幅减小, 红边位置发生“蓝移”。

进一步对棉叶受黄萎病胁迫后不同严重度的 6 个光谱红边参数分析后发现, 病害胁迫导致光谱红边位置(Rep)、红谷位置(Lo)、红边振幅(Dr)、红边宽度(Lwidth)、红边深度(Depth672)和红边面积

(Area672)的值均发生了很大变化(表 1)。

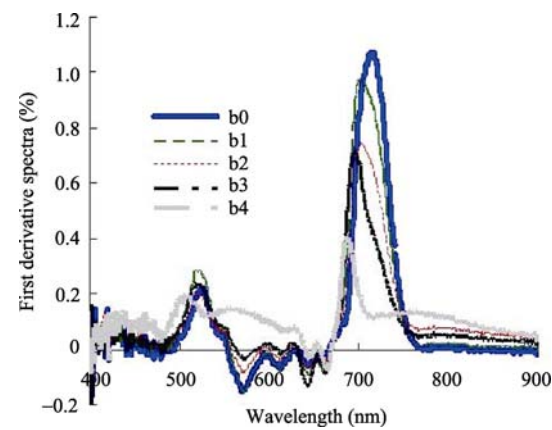


图 3 不同严重度棉花黄萎病叶片平均红边光谱曲线  
Fig. 3 Red edge spectra curve of cotton leaf infected by *Verticillium wilt* in different severities  
b0: 无症状; b1: 轻度症状(0~25%); b2: 中度症状(25%~50%); b3: 严重症状(50%~75%); b4: 极严重症状(75%~100%).  
b0: healthy cotton, no symptoms; b1: slight *Verticillium* symptom (0~25% yellow and scorched); b2: moderate *Verticillium* symptoms (25%~50% yellow and scorched); b3: severe *Verticillium* symptoms (50%~75% yellow and scorched); b4: very severe *Verticillium* symptoms (75%~100% yellow and scorched).

表 1 不同严重度黄萎病棉叶光谱红边参数统计值  
Table 1 Statistics value of severity for cotton leaf infected by *Verticillium wilt* with spectral red edge parameters

参数 Parameter	处理 Treatment	统计值 Statistics value				参数 Parameter	处理 Treatment	统计值 Statistics value			
		Mean	Min.	Max.	SE			Mean	Min.	Max.	SE
REP	b0	709	707	712	0.35	Lwidth	b0	24.29	20.11	27.00	0.41
	b1	706	702	710	0.50		b1	26.44	22.29	32.38	0.64
	b2	703	696	709	0.91		b2	30.58	21.14	36.79	0.93
	b3	697	685	707	1.37		b3	39.14	30.78	52.98	1.34
	b4	688	679	711	2.10		b4	50.13	38.92	62.44	1.50
Lo	b0	685	682	690	0.53	Depth672	b0	0.80	0.70	0.86	0.01
	b1	680	675	685	0.77		b1	0.76	0.69	0.82	0.01
	b2	673	664	685	1.36		b2	0.69	0.50	0.80	0.02
	b3	658	632	670	2.14		b3	0.56	0.33	0.76	0.03
	b4	639	627	656	2.00		b4	0.42	0.15	0.66	0.04
Dr (*100)	b0	1.11	0.96	1.24	0.02	Area672	b0	97.16	81.93	108.04	1.56
	b1	1.05	0.83	1.16	0.02		b1	85.33	71.07	97.85	1.77
	b2	0.10	0.78	1.27	0.04		b2	70.55	43.91	90.63	2.99
	b3	0.96	0.48	1.36	0.06		b3	48.01	30.54	72.95	3.00
	b4	0.99	0.28	1.35	0.08		b4	27.90	5.52	53.30	3.14

b0: 无症状; b1: 轻度症状(0~25%); b2: 中度症状(25%~50%); b3: 严重症状(50%~75%); b4: 极严重症状(75%~100%)。Mean: 平均值; Min.: 最小值; Max.: 最大值; SE: 标准误。

b0: healthy cotton, no symptoms; b1: slight *Verticillium* symptom (0~25% yellow and scorched); b2: moderate *Verticillium* symptoms (25%~50% yellow and scorched); b3: severe *Verticillium* symptoms (50%~75% yellow and scorched); b4: very severe *Verticillium* symptoms (75%~100% yellow and scorched). Mean: mean value; Min.: minimum value; Max: maximum value; SE: standard error.

表 1 表明, 随黄萎病棉叶病情严重度的增加, REP 和 Lo 均减小, 且明显向短波方向移动, 与图 3 的结果具有很好的一致性, 且 Dr、Depth672 和

Area672 均减小, 而 Lwidth 增加。进一步分析可知, 在减小的红边参数中, Area672 的值减小的幅度最大, 平均值由 97.16 减小到 27.90, 最小值由 81.93 减小

到 5.52, 最大值由 108.04 减小到 53.30, 标准误由 1.56 增加到 3.14, Dr 减小的幅度最小, 平均值由 1.11% 减小到 0.99%, 最小值由 0.96% 减小到 0.28%, 最大值由 1.24% 增加到 1.35%, 标准误由 0.02% 增加到 0.08%。Lo、Depth672 和 Area672 的值减小的幅度居中。在增加的红边参数中, 红边参数 Lwidth 的值增加的幅度较大, 平均值由 24.29 增加到 50.13, 最小值由 20.11 增加到 38.92, 最大值由 27.00 增加到 62.44, 标准误由 0.41 增加到 1.50。光谱红边参数的变幅大小顺序是: Area672>Lo>Lwidth>REP>Depth672>Dr。综合分析以上内容可知, 棉叶受黄萎病病害胁迫后不同严重度光谱红边参数发生了相应的变化, 表现出了黄萎病叶片特有的光谱特征。

#### 2.4 病害棉叶 Chl 含量和 LNC 与红边参数间的相关性

由不同严重度棉叶 Chl 和 LNC 的变化和棉叶光谱红边参数特征可知, 黄萎病使得棉叶 Chl 和 LNC 及光谱红边参数 REP、Lo、Dr、Lwidth、Depth672 和 Area672 的值均发生了较大的变化。为更好地分析病害发生后叶片 Chl 和 LNC 与光谱红边参数的关系, 我们对两者进行了相关分析(表 2)。表 2 表明, 病

害棉叶 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 LNC 均与红边参数 REP、Lo、Dr、Depth672 和 Area672 呈极显著正相关, 与红边参数 Lwidth 呈极显著负相关, 与红边参数 Dr 未达显著相关。在极显著相关范围内, 整体上 Chl a+b 含量与红边参数的显著性最好, Chl a 含量其次, LNC 再次, Chl b 含量较好。其中, Chl a、Chl a+b 和 LNC 均与红边参数 Area672 的相关性最好, 相关系数分别是 0.896、0.906 和 0.886; Chl b 含量与红边参数 Lo 的相关性最好, 相关系数为 0.765; Chl a、Chl b 和 Chl a+b 与红边参数 Depth672 的相关性最差, 相关系数分别是 0.772、0.649 和 0.788; LNC 与 REP 的相关性最差, 相关系数为 0.800。对 Chl a 和 Chl a+b 而言, 红边参数相关性顺序是 Area672>Lo>Lwidth>REP>Depth672>Dr; 对 Chl b 而言, 红边参数相关性顺序是 Lo>Area672>Lwidth>REP>Depth672>Dr; 对 LNC 而言, 红边参数相关性顺序是 Area672>Lo>Lwidth>Depth672>REP>Dr。由于不同严重度病害棉叶 Chl 和 LNC 与光谱红边参数具有很好的相关性, 同时棉叶 Chl 和 LNC 与光谱红边参数的变化规律具有很好的一致性。因此, 可利用光谱红边参数对病害棉叶 Chl 和 LNC 进行诊断。

表 2 黄萎病棉叶叶绿素(Chl)含量和氮素含量(LNC)与高光谱参数间的相关性  
Table 2 Correlation between chlorophyll and nitrogen contents of cotton leaf infected and hyper spectral parameters

生理参数 Physiological parameter	红边参数 Red edge parameter					
	REP	Lo	Dr	Lwidth	Depth672	Area672
Chl a	0.826**	0.882**	0.234	-0.830**	0.772**	0.896**
Chl b	0.712**	0.765**	0.100	-0.723**	0.649**	0.740**
Chl a+b	0.827**	0.889**	0.241	-0.841**	0.788**	0.906**
LNC	0.800*	0.885**	0.255	-0.866**	0.819**	0.886**

\*表示达 0.05 显著水平; \*\*表示达 0.01 显著水平。

\* Significant at the 0.05 probability level; \*\* Significant at the 0.01 probability level. LNC: leaf nitrogen content.

#### 2.5 黄萎病棉花叶片 Chl 含量和 LNC 诊断模型

在综合分析相关分析结果的基础上, 以 2005—2007 年的样本数据作为训练样本, 选择与黄萎病叶片 Chl 和 LNC 相关性最好的不同红边参数分别建立叶片 Chl 和 LNC 的诊断模型。其中, 以红边参数 Area672 为自变量, 以 Chl a、Chl a+b 和 LNC 为因变量, 建立棉花黄萎病叶片 Chl a、Chl a+b 和 LNC 的诊断模型; 以红边参数 Lo 为自变量, 以 Chl b 含量为因变量, 建立棉花黄萎病叶片 Chl b 含量的诊断模型(表 3)。分析表 3 可得, 建立的所有 Chl 和 LNC 诊断模型的决定系数均通过了 0.01 的极显著相关, 只是不同红边参数建立的诊断模型精度不同。

以红边参数 Area672 为自变量建立的棉花黄萎病叶片 Chl a、Chl a+b 和 LNC 诊断模型的  $R^2$  均超过了 0.6, 总体上精度高于以红边参数 Lo 为自变量建立 Chl b 含量的诊断模型, 以红边参数 Area672 为自变量建立的 Chl a+b 含量诊断模型的精度最高, 最高  $R^2$  超过了 0.86, 以红边参数 Lo 为自变量建立的 Chl b 含量的诊断模型的精度最低, 最低  $R^2$  低于 0.57。模型精度的大小顺序是: Chl a+b>Chl a>LNC>Chl b, 与 Chl 和 LNC 的变化, Chl 和 LNC 与红边参数相关性分析的结果具有很好的一致性。

由于最佳诊断模型的标准是既要相关系数通过 0.01 极显著检验水平, 又要其  $F$  值最大<sup>[32]</sup>。因



此, 在相同自变量建立的 Chl 和 LNC 的不同类型诊断模型的相关系数均通过 0.01 极显著检验水平且差别不大时,  $F$  值最大的即为该病害叶片 Chl 和 LNC 的最佳诊断模型。基于此, Chl a、Chl b 和 Chl a+b 的最佳诊断模型类型是指数函数, LNC 的最佳诊断模型是线性函数, 模型表达式分别如表 3 中加

粗部分所示。  
为考察诊断模型的精度, 利用 2008—2011 年独立试验数据对建立的棉花黄萎病叶片 Chl 和 LNC 诊断方程进行检验。以叶片 Chl 和 LNC 的实测值为横坐标  $x$ , 红边参数 Area672 和 Lo 算出的预测值为纵坐标  $y$  作散点图, 并对其进行趋势线拟合(图 4)。

表 3 黄萎病棉叶叶绿素(Chl)含量和氮素含量(LNC)的光谱红边参数诊断模型  
Table 3 Models between chlorophyll and nitrogen contents of cotton leaf infected by *Verticillium wilt* and hyper spectral parameters

模型因变量(y)	模型自变量(x)	诊断模型	决定系数( $R^2$ )	$F$ 值
Independent of model	Dependent of model	Diagnosing models	Determinative coefficient	$F$ -value
Chl a	Area672	$y = 0.0004x - 0.0063$	0.803 **	276.501
		$y = 0.0175 \ln x - 0.0481$	0.609 **	106.046
		$y = 4 \times 10^{-6} x^2 - 2 \times 10^{-5} x + 0.0047$	0.842 **	178.965
		$y = 0.0002 x^{1.0906}$	0.752 **	206.120
		<b><math>y = 0.0034e^{0.0254x}</math></b>	<b>0.840 **</b>	<b>355.903</b>
Chl b	Lo	$y = 0.0002x - 0.1272$	0.583 **	95.200
		$y = 0.1342 \ln x - 0.8638$	0.580 **	93.874
		$y = 3 \times 10^{-6} x^2 - 0.0037x + 1.1711$	0.616 **	53.623
		$y = 3 \times 10^{-56} x^{18.9126}$	0.660 **	131.828
		<b><math>y = 3.6 \times 10^{-11} e^{0.0287x}</math></b>	<b>0.660 **</b>	<b>132.015</b>
Chl a+b	Area672	$y = -0.0006x + 0.0080$	0.822 **	313.355
		$y = -0.0247 \ln x - 0.0670$	0.632 **	117.001
		$y = 5 \times 10^{-6} x^2 + 3 \times 10^{-5} x + 0.0061$	0.856 **	198.353
		$y = 4 \times 10^4 x^{1.0534}$	0.782 **	244.485
		<b><math>y = 0.0053e^{0.0244x}</math></b>	<b>0.861 **</b>	<b>421.988</b>
LNC	Area672	<b><math>y = 0.0333x + 0.3941</math></b>	<b>0.784 **</b>	<b>247.352</b>
		$y = 1.4095 \ln x - 3.1157$	0.682 **	146.056
		$y = -0.00003x^2 + 0.0369x + 0.3098$	0.785 **	122.148
		$y = 0.1254x^{0.7208}$	0.724 **	178.439
		$y = 0.7969e^{0.0162x}$	0.755 **	209.564

表中加粗部分表示棉花黄萎病叶片 Chl a、Chl b、Chl a+b 和 LNC 的最佳诊断模型。  
The bold parts indicated best diagnosis models for Chl a, Chl b, Chl a+b, Chl a+b, and LNC of cotton leaf infected by *Verticillium wilt*.

考虑到建立模型时氮素模型的最佳模型是线性, 叶绿素的最佳模型是指数, 而检验模型是在建立的模型基础上求得预测值后以线性模型的最终形式体现的, 造成了叶绿素模型中间存在着模型转化问题, 降低了  $R^2$ 。因此, 为避免单一利用  $R^2$  检验模型精度不准确, 本文用了 3 个指标综合评价模型精度, 分别是决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)和相对误差(RE)。图 4 可知, 4 个拟合方程的  $R^2$  均超过 0.5, 分别为 0.718、0.502、0.740 和 0.754, RMSE 均小于 0.6, 分别为 0.009、0.004、0.013 和 0.600, RE 均小于 0.08, 分别为 0.088、0.070、0.044 和 0.007。综合分析 3 个指标可知, 虽然氮素检验模型  $R^2$  大于 Chl a、Chl b 和 Chl a+b, RE 小于 Chl a、Chl b 和 Chl a+b, 然而值

却很接近, 但氮素检验模型的 RMSE 明显大于 Chl a、Chl b 和 Chl a+b, 且差值很大。因此, 总体上氮素模型的检验精度小于 Chl a 和 Chl a+b, 大于 Chl b。对方程的系数和截距而言, Chl a、Chl a+b 和 LNC 方程的系数均接近 1, Chl a、Chl b 和 Chl a+b 方程的截距均接近 0, 表明利用光谱红边参数 Area672 和 Lo 建立的方程来诊断棉花黄萎病叶片叶绿素和氮素含量的准确性较高, 稳定性较好, 表现较为优秀。

3 讨论

本文首先将不同时期不同品种的危害棉叶 Chl 含量和 LNC 进行平均, 再与不同病害严重度平均值进行组合分析了不同病害严重度棉叶 Chl 和 LNC 变

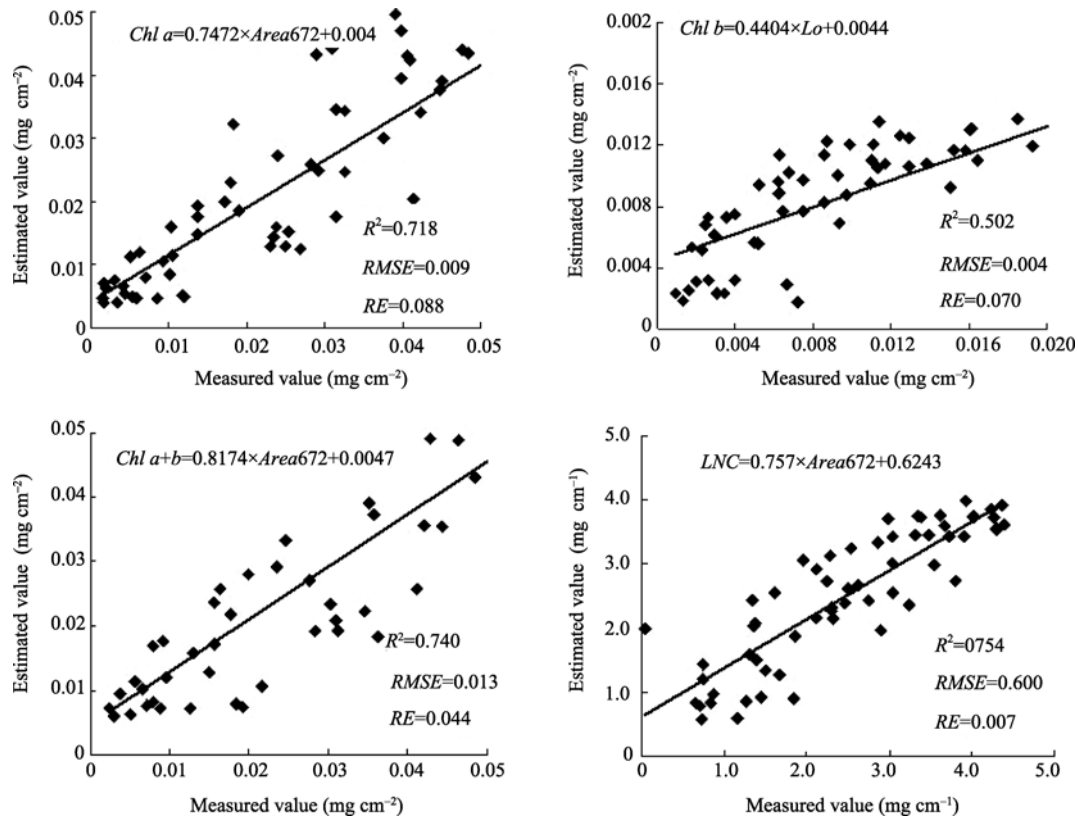


图 4 黄萎病棉叶叶绿素和氮素含量红边参数诊断模型的预测值与实测值拟合

Fig. 4 Comparison of chlorophyll and nitrogen content of cotton leaf infected by *Verticillium wilt* between the actual values and the estimated values from different diagnosis models of red edge parameters

化情况。同时对不同时期不同品种的病害棉叶光谱反射率和吸收率进行了平均并作了进一步分析。由于叶片光谱在可见光区主要受 Chl 和 LNC 影响,在近红外和短波红外光区主要受 Chl、LNC、叶片厚度、水分和干物质等影响<sup>[31-32]</sup>。另一方面,病菌感染叶片后大量分生孢子和菌丝体不断繁殖阻碍了棉花体内水分运输,降低了叶片蒸腾,同时它们产生的各种毒素不断地对叶片各个细胞器产生毒害,导致叶片内部细胞结构发生显著变化,叶绿体和蛋白质体等受到破坏,Chl 和 LNC 不断下降<sup>[1]</sup>,叶片变黄干枯,导致黄萎病发生后叶片光谱在可见光区、短波红外光区反射率逐渐增加,吸收率逐渐减小,近红外光区反射率逐渐增加,吸收率先升后降,而红光波段处的 REP、Lo、Dr、Depth672 和 Area672 迅速减小,而 Lwidth 增加。此外,由于红边参数均是从叶片一阶导数光谱中提取出来的,而导数运算往往会引入一定的噪声,使得红边常会出现单峰、双峰或者多个极值等现象<sup>[5,7,19]</sup>,对红边参数准确性有一定的影响。同时不同红边参数计算方法和表示的意义不同,受到的影响因子不同,值的大小和变幅

也不相同<sup>[5]</sup>。在红边参数中,Area672 由于覆盖了较多波段,包含了更多光谱反射能量和信息,同时也包含了较多的非敏感波段,抗干扰能力差,稳定性差,变幅最大,差异很明显;REP、Lo 和 Lwidth 所包含的波段数少,同时受测试环境不确定因素的影响较大,抗干扰能力较差,稳定性较弱,变幅较大,差异明显;Depth672 和 Dr 密切相关,Dr 往往只覆盖一个或几个较少的波段,受测试环境等不确定因素的影响较小,抗干扰能力好,稳定性好,变幅最小,差异较明显。

由于叶片不同组分对光谱不同波段和参数敏感性不同<sup>[1,33]</sup>,导致病害棉叶 Chl 和 LNC 对不同红边参数的响应不同。前人的研究表明虽然红边参数很多,同一参数也有不同的算法,但真正能用来监测叶片理化参数的并不多,最常用且相关性较好的主要有 REP、Lo、Dr、Depth672、Area672 和 Lwidth 六个红边参数。因此,本文并未对所有的红边参数进行分析,也未对同一红边参数运用不同算法计算的差异进行分析,而是在前人的研究基础上选择了这 6 个红边参数和常用最优的计算方法,通过对 6



个光谱红边参数分析后发现, 病害胁迫导致 6 个光谱红边参数的值均发生了很大变化, 且和病害严重程度均有很好的相关性。基于相关性的不同选择与黄萎病叶片 Chl 和 LNC 相关性最好的 2 个红边参数 Area672 和 Lo 分别建立了叶片 Chl 和 LNC 的诊断模型。其中, 以红边参数 Area672 为自变量建立的叶片 Chl a、Chl a+b 和 LNC 诊断模型和以红边参数 Lo 为自变量建立的叶片 Chl b 含量的诊断模型均具有很高的精度, 能很好地诊断黄萎病棉花叶片 Chl 和 LNC。与正常的作物叶片 Chl 和 LNC 监测结果进行比较, 与前人的相关探究具有很好的一致性, 例如, 刘炜等<sup>[5]</sup>研究表明基于红边面积尤其是改进红边面积可以更准确地指示夏玉米 Chl 含量的变化, 黄春燕等<sup>[23]</sup>研究表明红边面积与 Chl 密度的相关性最好, 能准确地估算棉花叶片 Chl 密度, 因此, 可以使用统一的光谱红边参数 Area672 监测正常和病害条件下的 Chl 和 LNC。但也有一些不同之处, 例如, 卢艳丽等<sup>[34]</sup>的研究表明红边参数 Lo 与冬小麦冠层不同叶位 LNC 的相关性最好, 谭昌伟等<sup>[24]</sup>的研究表明利用红边参数 REP 来反演夏玉米叶片 Chl a、Area672 来反演 Chl b、Chl a+b 能达到最好的效果。可能的原因是不同作物类型对光谱红边参数的响应不同, 不同病虫等胁迫的致病因子不同, 对叶片 Chl 和 LNC 的迫害机理不同所致。因此, 考虑到各种条件下监测的准确性和精度差异, 建议在监测的准确性和精度要求不高的情况下可以通用, 在要求较高的条件下各自选用各自最优参数。此外, 值得说明的是本文提出运用红边参数 Area672 为自变量建立的叶片 Chl a、Chl a+b 和 LNC 诊断模型, 由于叶片 Chl 和 LNC 之间本身具有很好的相关性, 所以可以同时 Chl a、Chl a+b 和 LNC 监测, 但是由于运用红边参数 Area672 为自变量建立 Chl a、Chl a+b 和 LNC 的最佳模型类型和方程(包括方程的各个系数)是不同的, 在具体应用的时候仍需根据具体需要选择不同的方程。

在不同病害严重程度下光谱红边参数对 Chl 等参数反演结果的影响分析中, 本文重点研究不同红边参数对 Chl 等参数反演结果的准确性和精确性。因为在研究中不同严重程度作为中间桥梁将光谱红边参数和 Chl 等参数联系起来, 使得光谱红边参数和 Chl 等理化参数一一对应, 严重程度并不直接参与建模, 所以不会对反演结果产生影响。由于病害发生后首先在叶片水平有所表现, 进而发展到冠层水平, 而

冠层的光谱特征最主要是由叶片表现, 在冠层的光谱构成中, 叶片占有最为重要的贡献, 所以叶片水平的研究是基础, 在研究病害发生后对棉花生化组分的影响也应先从叶片着手。当然冠层水平的研究也很重要, 但由于冠层水平的研究受到取样数量 and 时间的限制, 开展的较晚也较少, 仍需不断的开展, 在本文不再作细致的讨论。另一方面本文利用红边特征监测病害叶片 Chl 和 LNC 也为冠层叶片 Chl 和 LNC 的监测提供了理论基础, 而卫星影像监测时所包含的部分波段也存在于红边范围内, 通过对病害冠层叶片 Chl 和 LNC 的监测实现病害的监测, 为卫星影像监测病害提供了可能。在卫星影像监测中, 虽然监测的是发病叶片与非发病叶片和土壤背景等的混合象元, 但由于病害监测时, 冠层覆盖度已经很高, 尤其病害高峰期时正处在棉花铃期, 覆盖度通常在 90% 以上, 土壤背景的影响很小, 而且可通过遥感方法再次消除土壤的影响, 至于监测的混合象元中包括发病叶片与非发病叶片, 在进行地面病害单叶和冠层监测时同样存在, 也正是如此, 才能将病害分成不同的严重程度进行不同层面病害叶绿素和氮素的监测, 所以卫星影像的监测结果应该和地面监测冠层的结果一致, 只是精度略低。因此, 本研究的结果可为卫星影像监测病害提供理论依据, 具有很好的实用性。

此外, 前人已利用红边参数对作物 Chl 和 LNC 等组分的监测做了大量研究, 在研究过程中所采取的方法基本相同。另一方面, 虽然病害发生会导致植物叶片 Chl 和 LNC 变化, 至于一些年份可能在黄萎病发生的同时还存在枯萎病等其他病害, 或者水分胁迫、氮素胁迫等可能导致植物叶片 Chl 和 LNC 减小, 但导致植物叶片 Chl 和 LNC 变化的原因是不同的, 即机制是不同的。黄萎病胁迫下棉叶 Chl 和 LNC 减小是由于病菌侵染植株后病菌大量繁殖和产出大量有毒物质, 堵塞了导管并破坏了植株内部结构所致, 枯萎病胁迫下棉叶 Chl 和 LNC 减小与黄萎病胁迫下的变化具有相似性, 而水分胁迫, 氮素胁迫下的叶片 Chl 和 LNC 减小是由于植株本身养分供应不足所致, 所以在今后的研究中应首先明确 Chl 和 LNC 是由哪种胁迫引起的, 并针对不同的胁迫条件进行分析。由于病害发生后叶片内部生理生化反应是个复杂的过程, 还伴随着叶片水分、叶厚、叶内各种酶的变化等, 必将对叶片光谱红边产生一定的影响, 这些参数的变化如何, 它们和红边参数的

关系如何,能否用相应的红边参数对其进行诊断,将是今后研究的主要内容。

#### 4 结论

利用光谱红边参数对黄萎病棉叶 Chl 含量和 LNC 的监测探讨了黄萎病棉叶光谱反射率和光谱吸收率在可见光区、近红外光区和短波红外光区的变化规律,明晰了黄萎病棉叶红边特征,红边参数 REP、Lo、Dr、Depth672、Area672 和 Lwidth 的变化规律,并通过分析黄萎病棉叶 Chl 和 LNC 与红边参数的相关性,建立了病害棉叶 Chl 和 LNC 的红边参数诊断模型,实现了棉花黄萎病叶片 Chl 和 LNC 的光谱定量反演,为黄萎病棉叶的生理变化特征监测及光谱特征监测机制研究提供了理论基础。

#### References

- [1] Chen B, Li S K, Wang K R, Zhou G Q, Bai J H. Evaluating the severity level of cotton *Verticillium* using spectral signature analysis. *Int J Remote Sens*, 2012, 33: 2706–2724
- [2] Reddy K R, Koti S, Davidonis G H, Reddy V R. Interactive effects of carbon dioxide and nitrogen nutrition on cotton growth, development, yield and fiber quality. *Agron J*, 2004, 96: 1148–1157
- [3] Lee Y J, Yang C M, Chang K W, Shen Y. A simple spectral index using reflectance of 735 nm to assess nitrogen status of rice canopy. *Agron J*, 2008, 100: 205–212
- [4] Hatfield J L. Remote detection of crop stress: application to plant pathology. *Phytopathology*, 1990, 80: 37–39
- [5] Liu W(刘伟), Chang Q-R(常庆瑞), Guo M(郭曼), Xing D-X(邢东兴), Yuan Y-S(员永生). Monitoring of leaf nitrogen content in summer corn with first derivative of spectrum based on modified red edge. *J Northwest A&F Univ (Nat Sci Edn)*(西北农林科技大学学报:自然科学版), 2010, 38(4): 91–98 (in Chinese with English abstract)
- [6] Smith K L, Steven M D, Colls J J. Use of hyperspectral derivative ratios in the red edge region to identify plant stress responses to gas leak. *Remote Sens Environ*, 2004, 92: 207–217
- [7] Jiang J-B(蒋金豹), Chen Y-H(陈云浩), Huang W-J(黄文江). Using hyper-spectral derivative index to monitor winter wheat diseases. *Pectroscopy Spectral Anal* (光谱学与光谱分析), 2007, 27(12): 2475–2479 (in Chinese with English abstract)
- [8] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data. *Remote Sens Environ*, 2002, 81: 45–57
- [9] Ponzoni F J, Goncalves J L. Spectral features associated with nitrogen, phosphorus, and potassium deficiencies in *Eucalyptus saligna* seedling leaves. *Int J Remote Sens*, 1999, 20: 2249–2264
- [10] Schlemmer M R, Francis D D, Shanahan J F, Schepers J S. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. *Agron J*, 2005, 97: 106–112
- [11] Blackburn G A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sens Environ*, 1998, 66: 273–285
- [12] 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. *Remote Sens Environ*, 1995, 53(3): 199–211
- [13] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, Zarco-Tejada P J, Dextraze L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sens Environ*, 2002, 81: 416–426
- [14] Errmann I, Karnieli A, Bonfil D J, Cohen Y, Alchanatis V. SWIR-based spectral indices for assessing nitrogen content in potato fields. *Int J Remote Sens*, 2010, 31: 5127–5143
- [15] Huang W-J(黄文江), Wang J-H(王纪华), Liu L-Y(刘良云), Zhao C-J(赵春江), Wang J-D(王锦地), Du X-H(杜小鸿). The red edge parameters diversification disciplinarian and its application for nutrition diagnosis. *Remote Sens Technol Appl* (遥感技术与运用), 2003, 18(4): 206–211 (in Chinese with English abstract)
- [16] Lamb D W, Steyn-Ross M, Schaare P, Hanna M M, Silvester W, Steyn-Ross A. Estimating leaf nitrogen concentration in ryegrass (*Lolium* spp.) pasture using the chlorophyll red-edge: theoretical modeling and experimental observations. *Int J Remote Sens*, 2002, 23: 3619–3648
- [17] Jiang J-B(蒋金豹), Chen Y-H(陈云浩), Huang W-J(黄文江), Li J(李京). Hyperspectral estimation models for LTN content of winter wheat canopy under stripe rust stress. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2008, 24(1): 35–39 (in Chinese with English abstract)
- [18] Ju C H, Tian Y C, Yao X, Cao W X, Zhu Y, Hannaway D B. Estimating leaf chlorophyll content using red edge parameters. *Pe-dosphere*, 2010, 20: 633–644
- [19] Xue L-H(薛利红), Yang L-Z(杨林章). Comparative study on estimation of chlorophyll content in spinach leaves using various red edge position extraction techniques. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2008, 24(9): 165–169 (in Chinese with English abstract)
- [20] Yao X(姚霞), Tian Y-C(田永超), Liu X-J(刘小军), Cao W-X(曹卫星), Zhu Y(朱艳). Comparative study on monitoring canopy

- leaf nitrogen status on red edge position with different algorithms in wheat. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2010, 43(13): 2661–2667 (in Chinese with English abstract)
- [21] Zhang Q-L(张清林), Chen W-H(陈文惠), Zhang Y-H(张永贺), Guo X-C(郭啸川), Chu W-D(褚武道), Xu W-M(许炜敏). Estimation models of chlorophyll contents in leaves of *Acacia confusa* based on the red edge position. *J Subtrop Resour Environ* (亚热带资源与环境学报), 2011, 6(3): 9–17 (in Chinese with English abstract)
- [22] Cho M A, Skidmore A K. A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: the linear extrapolation method. *Remote Sens Environ*, 2006, 101: 181–193
- [23] Huang C-Y(黄春燕), Wang D-W(王登伟), Zhang Y-X(张煜星). Estimation of cotton canopy chlorophyll density and leaf area index based on red-edge parameters. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2009, 25(suppl-2): 137–141 (in Chinese with English abstract)
- [24] Tan C-W(谭昌伟), Wang J-H(王纪华), Guo W-S(郭文善), Lu J-F(陆建飞), Zhang H-C(张洪程), Jiang H-R(蒋海荣). Agronomy parameters of summer maize diagnosed by red edge parameters obtainable from remotely sensing data. *J Fujian Agric For Univ* (Nat Sci Edn)(福建农林大学学报·自然科学版), 2006, 35(2): 123–128 (in Chinese with English abstract)
- [25] Main R, Cho M A, Mathieu R, O'Kennedy M M, Ramoelo A, Koch S. An investigation into robust spectral indices for leaf chlorophyll estimation. *ISPRS J Photogram Remote Sens*, 2011, 66: 751–761
- [26] Huang J F, Wang X Z, Wang R C. The red edge parameters as indicators of rice nitrogen levels. *Multispect Hyperspect Remote Sens Instr Appl*, 2003, 4897: 311–317
- [27] Fang Z-D(方中达). Research Method for Plant Disease (植病研究方法). Beijing: Agriculture Press, 1979. pp 3–5 (in Chinese)
- [28] Danson F M. Red edge response to leaf area index. *Int J Remote Sens*, 1995, 16: 183–188
- [29] Bao S-D(鲍士旦). Analysis for Soil and Agricultural Chemistry (土壤农化分析), 3rd edn. Beijing: China Agriculture Press, 2000. pp 14–38 (in Chinese)
- [30] Demetrialdes-Shan T H, Steven M D, Clark J A. High resolution derivative spectra in remote sensing. *Remote Sens Environ*, 1990, 33: 55–64
- [31] Chen B(陈兵), Li S-K(李少昆), Wang K-R(王克如), Wang F-Y(王方永), Tan H-Z(谭海珍), Liu G-Q(刘国庆), Chen J-L(陈江鲁). Spectrum characteristics of cotton single leaf infected by *Verticillium wilt* and estimation on severity level of disease. *Sci Agric Sin* (中国农业科学), 2007, 40(12): 2709–2715 (in Chinese with English abstract)
- [32] Jing X(竞霞), Wang J-H(王纪华), Song X-Y(宋晓宇), Xu X-G(徐新刚), Chen B(陈兵), Huang W-J(黄文江). Continuum removal method for cotton *Verticillium wilt* severity monitoring with hyperspectral data. *Trans CSAE* (农业工程学报), 2010, 26(1): 193–198 (in Chinese with English abstract)
- [33] Liang S-Z(梁守真), Shi P(施平), Ma W-D(马万栋), Xing Q-G(邢前国), Yu L-J(于良巨). Relational analysis of spectra and red-edge characteristics of plant leaf and leaf biochemical constituent. *Chin J Eco-Agric* (中国生态农业学报), 2010, 18(4): 804–809 (in Chinese with English abstract)
- [34] Lu Y-L(卢艳丽), Li S-K(李少昆), Bai Y-L(白由路), Xie R-Z(谢瑞芝), Gong Y-M(宫永梅). Spectral red edge parametric variation and correlation analysis with n content in winter wheat. *Remote Sens Technol Appl* (遥感技术与应用), 2007, 21(1): 1–7 (in Chinese with English abstract)