

# 小麦叶片胁迫状态下的高光谱图像特征分析研究

张东彦<sup>1,2</sup>, 张竞成<sup>1,2</sup>, 朱大洲<sup>1</sup>, 王纪华<sup>1,2</sup>, 罗菊花<sup>1</sup>, 赵晋陵<sup>1</sup>, 黄文江<sup>1\*</sup>

1 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097

2 浙江大学农业遥感与信息技术应用研究所, 浙江 杭州 310029

**摘要** 作物在遭受各种胁迫下的长势及健康诊断是精细农业操作的重要环节。高光谱成像技术具有图谱合一的优势, 已成为近年来国内外研究的热点。本文以叶片尺度的小麦为研究对象, 利用自主研发的成像光谱仪, 采集遭受养分、病虫害胁迫的小麦叶片高光谱图像, 利用逐像素平均法增强光谱特征, 根据反射率差异进行分析研究。结果表明, 提取的高光谱能够反映不同叶位叶片的养分差异, 还能利用成像图直观地进行作物养分胁迫程度判断; 利用成像光谱仪 2 nm 的光谱分辨率和毫米级的空间分辨率, 在作物感染病害时, 既可定量每个叶片的病斑个数, 又能定性分析感染面积对叶片造成的影响; 在作物遭受虫害时, 可对蚜虫群体甚至单个蚜虫的光谱信息进行提取, 这为定量研究蚜虫对小麦叶片的危害提供了新的手段。上述结果充分说明成像高光谱在作物长势定量定性分析研究中具有独特的优势。

**关键词** 高光谱成像; 特征分析; 胁迫; 小麦叶片

中图分类号: S127 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)04-1101-05

## 引言

及时、快速、无损是光谱探测技术应用于农作物的优势, 也是现代数字农业对于田间作物长势状况实时监测和精细管理的需求。传统的作物长势信息诊断研究是基于机器视觉或光谱分析技术进行的。机器视觉技术中常用的彩色图像, 是根据较宽波段内的 R、G、B 分量表征样品在可见光区的颜色信息, 其空间信息量较大, 能涵盖一定区域内的样品信息, 但光学信息量较小, 尤其当作物遭受不同胁迫时, 仅凭可见光区的图像特征难以准确分辨, 从而影响研究结果。而传统光谱分析手段则存在以点代面的问题, 无法提供面状的连续光谱测量, 当需要针对植物器官不同部位进行精细的光谱特征提取时, 往往存在较大的局限性。

高光谱成像技术集光谱检测和图像检测二者的优势为一体, 在作物养分诊断、病虫害程度判别方面具有明显优势。近几年来国内外一些学者已将高光谱成像技术成功用于作物养分、病害胁迫诊断研究, 取得了初步进展。如 Inoue 等<sup>[1]</sup>、黄慧等<sup>[2]</sup>、王伟等<sup>[3]</sup>、张东彦等<sup>[4]</sup>、谭海珍等<sup>[5]</sup> 应用成像高光谱系统诊断水稻、小麦的养分状况; Christian 等<sup>[6]</sup>、田有

文等<sup>[7]</sup>、柴阿丽等<sup>[8]</sup>、蔡健荣等<sup>[9]</sup> 应用光谱成像技术进行小麦、黄瓜、柑橘的病虫害诊断研究。由于成像高光谱具有图谱合一的优势, 可以精确到叶片一个点去探测作物不同胁迫症状的特征, 又可获取受胁迫作物面状的光谱信息, 点面结合综合地反映作物遭受胁迫的程度。所以, 成像高光谱已经成为国内外研究的热点。目前, 学者们利用高光谱成像技术量化地提取作物所遭受的各种胁迫特征, 根据高分辨率的图像对叶片及叶片的局部区域进行分析, 最终定性其遭受胁迫的程度, 从而在更加微观的尺度上进行机理探测研究。本文利用自主研发的成像光谱仪, 采集遭受养分、病虫害胁迫下的小麦叶片的高光谱图像, 采用逐像素平均法增强光谱特征, 然后对不同叶位叶片光谱特征, 不同病害、虫害胁迫的叶片光谱特征进行提取分析, 为高光谱成像技术用于作物各种胁迫诊断提供理论探索。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验设计

试验地点位于北京农林科学院实验农场 (40°17' N, 116°43' E)。供试小麦品种为京冬 12, 常规肥水管理。在小

收稿日期: 2010-08-21, 修订日期: 2010-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41071276, 41071228), 国家高新技术研究发展计划(863计划)项目(2010AA10Z201)和农业部行业科技项目(200903010)资助

作者简介: 张东彦, 1982年生, 浙江大学农业遥感与信息技术应用所博士研究生 e-mail: hell@lion@hotmail.com

\* 通讯联系人 e-mail: huanwgj@nercita.org.cn

麦的灌浆期,小麦叶片感染了不同程度的白粉病。本文引用植物病理学的判断标准<sup>[10]</sup>,在整叶尺度上根据叶片上病斑的大小和多少进行严重度划分。共分为 4 级:即健康 0 级(叶片无病斑)、轻度病害 1 级(叶片病斑小且少)、中度病害 2 级(叶片病斑小而多或大而少)、重度病害 3 级(叶片病斑大得多)。此外,在叶片局部则根据病斑数占总数的百分比划分为:正常(0%)、轻度(5%)、中度(15%)、重度(30%)、严重(50%)。不同感染程度各取 4 片叶子,都取植株的倒 2 叶,共采集 16 片。

感染蚜虫的叶片,根据蚜虫在叶片上的数量进行等级划分。严重 80~100 个、重度 50~80 个、中度 20~50 个、轻度 1~20 个、正常叶片作为对照。每种程度采摘 5 片叶子,共收集 25 片叶。

养分胁迫以正常生长状况下植株垂直梯度的叶片作为采摘对象,取同一株的旗叶、倒 2 叶、倒 3 叶,选取长势均一的植株 5 株共得 15 片叶。

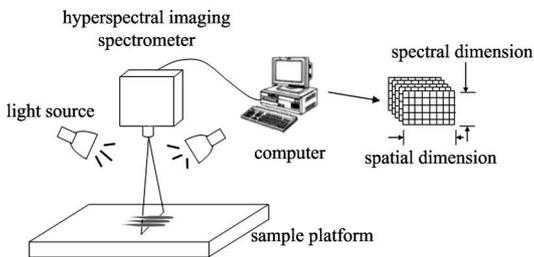


Fig 1 Demonstration of the hyperspectral imaging system

## 1.2 高光谱成像系统

本试验利用高光谱成像系统进行叶片图像立方体的获取,系统工作过程如图 1 所示。该系统由推扫式成像光谱仪(pushbroom imaging spectrometer, PIS)、电控平移台及控制器、可调式卤元素光源、台式电脑等部件组成。光谱仪在使用前委托中国科学院安徽光学精密机械研究所的国家光辐射定标与表征技术创新实验室进行了严格测试和定标,成像光谱仪的波长范围 400~1 000 nm;光谱分辨率 2 nm;空间分辨率 0.5 mm;图像分辨率 1 400(空间维)×1 024(光谱维);光谱采样间隔 0.7 nm;光谱仪的视场角 24°。

## 1.3 成像光谱获取与反射率转换

在进行叶片高光谱成像前,根据成像效果固定仪器的高度。经测量镜头距电动平移台 380 mm;光源距平台 300 mm,与平台成 45°角;电动平移台的合适速度为 2.3 mm·s<sup>-1</sup>;然后设置成像采集系统的参数,最佳的曝光时间和帧频数分别为 100 ms 和 9 fps。小麦叶片平铺于黑布上,光谱仪视场内放置参考板。随着电动平移台匀速移动,同时获取叶片和参考板的高光谱立方体。其中,每张图片包含 1 024 个光谱波段。

采集的高光谱图像以 BMP 格式保存在计算机中,为了对数据进行光谱特征提取与分析需完成光谱图像的拼接与反射率转换。本文通过 MATLAB 7.0 软件把原始图像拼接为 BIL 格式的整幅影像,再用 ENVI 4.5 软件中的经验线性法模块完成影像的反射率转换。

## 1.4 光谱特征增强

由于光谱仪的暗电流在各波段下响应不均匀,造成图像含有噪声。本文使用 Origin 7.5 软件中的 S-G 卷积平滑模块进行光谱去噪与光谱曲线表达,同时为了研究需要,去掉噪声较大的波段,最后使用的有效波段是 450~900 nm。

为了增强叶片在不同胁迫状态下的光谱特征,消除因光照引起的反射率差异,本研究对反射率采用归一化方法处理。它的原理是逐像素计算每个像素的光谱均值,然后用每个波段的光谱反射率除以该均值<sup>[11]</sup>,如式 1。最后得到的归一化反射率值在 [0~2.5] 之间。

$$R_{ij} = \left[ \frac{R_{ij}}{\frac{1}{K} \sum_j R_{ij}} \right] \quad (1)$$

$R_{ij}$  表示归一化反射率,  $i$  和  $j$  分别表示起始和终止波段,  $K$  表示总的波段数。

## 2 结果与分析

### 2.1 养分胁迫下叶片(不同叶位叶片)光谱特征提取与分析

根据作物的生长发育规律,不同叶位叶片的养分会在层次上出现差异,同时,叶片的光谱信息也会不同<sup>[12, 13]</sup>。本文从叶片高光谱图像上提取不同叶位叶片面状的光谱信息(如图 2),目的是消除叶片因光照分布不均造成的点状数据误差,更准确地探查作物垂直梯度上因养分缺失引起的光谱差异。从图 2(b)中可知,可见光波段,下层叶片的反射率最高,中层次之,上层最低,尤其在 550~650 nm 的红绿波段表现明显;其次,在 680 nm 附近出现吸收谷,下层和中上层差异较大;700~760 nm 波段为植被特有的红边特征,中上层叶片因长势状况良好,所以红移,而下层叶片因养分缺失而发黄,红边向蓝波方向移动。造成上述光谱特征差异的主要原因是叶片中叶绿素含量不同所致。这和前人的研究结果一致<sup>[14]</sup>,即叶绿素含量是解析光谱变化的敏感因子,可见光波段以叶绿素 a,叶绿素 b 在蓝绿光区的强反射与红光区的强吸收为特征。

780~900 nm 的近红外波段与可见光波段正好相反。中上层叶片因生命力旺盛,细胞结构完好,光在叶片内部形成多次散射,所以反射率值高;而下层因叶片养分缺失变黄,叶绿素含量降低,细胞结构发生变化,致使其反射率明显低于中上层。这与其他学者在不同施肥处理下的研究结果一致<sup>[15]</sup>。即近红外波段主要以叶片细胞结构引起的多次散射差异为判断标准。

综上所述,本研究利用高光谱成像技术对不同叶位叶片养分胁迫进行诊断时,既可以提取不同叶位叶片的高光谱差异,还可以根据成像图直观地进行视觉判断,这为作物养分胁迫的准确诊断提供了有利的手段。

### 2.2 白粉病胁迫下叶片光谱特征提取与分析

因叶片的高光谱立方体包含二维的图谱信息,所以图像上的每个像素在波段区间都有连续的光谱信息,这对于作物遭受病害胁迫时的定量定性分析具有独特的优势。本研究借助成像光谱仪在近地观测时具有高空间分辨率的特点,定量

的研究病斑的数量和感染面积对叶片造成的影响。首先研究同一叶片上病斑的数量特征(如图 3),再对白粉病叶的严重程度(如图 4)进行定性研究。目的是充分发挥成像光谱仪图

谱合一的优势,在两个维度上精细地提取白粉病叶片的光谱特征,从微观上探讨不同病情程度叶片的光谱响应。

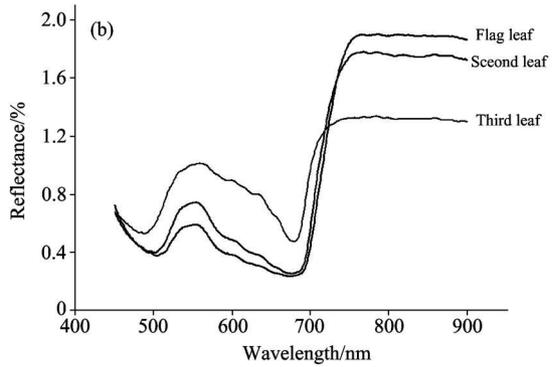
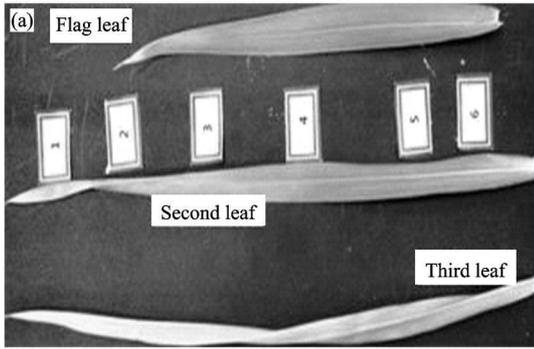


Fig 2 (a) Imaging leaves on different layers (b) The reflectance of leaves on different layers

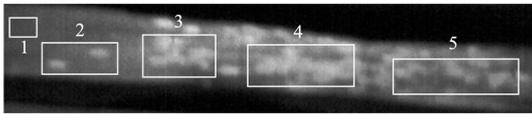


Fig 3 Different quantities of powdery mildew on single leaf  
1: 0%; 2: 5%; 3: 15%; 4: 30%; 5: 50%

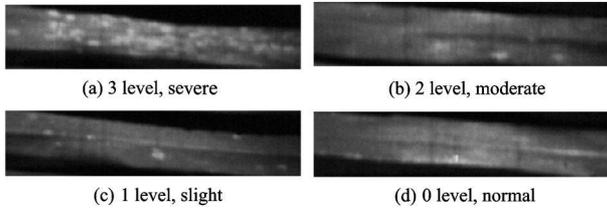


Fig 4 Powdery mildew leaves on different levels  
(a): Severe; (b): Moderate; (c): Slight; (d): Normal

图 5 是单叶不同病斑数和不同等级的白粉病叶在 450~900 nm 波段的反射率。由图 5(a)可知,在 550~680 nm 波段范围内,单叶不同病斑数的反射率呈现严重(50%)> 重度(30%)> 中度(15%)> 轻度(5%)> 正常(0%)的规律。这是因为在可见光波段,作物的光谱性质主要受叶绿素含量的影响。正常的叶片会出现 550 nm 的反射峰和 680 nm 的吸收谷。当感染白粉病后,叶片中的叶绿素含量降低,直观表现

为浅黄和白色,在阳光照射下,吸收值减少,所以反射值更高。在 780~900 nm 近红外波段,叶片正常部分的光谱反射强度与病斑部分的反射强度有明显差异,但不同病斑数之间的差异较可见光部分缩小。总体规律为正常(0%)> 轻度(5%)> 中度(15%)> 重度(30%)> 严重(50%),与可见光正好相反。这是由于叶片在近红外波段的光谱特性由叶片内部的细胞结构决定,正常叶片内的细胞会对光形成多次散射,因而反射率较高,而白粉病影响了叶片的内部结构,所以反射率值降低。

为了全面反映感染白粉病叶片的光谱特性,寻找光谱对白粉病敏感的波段范围,本文既对病斑的光谱和病斑周围正常部分的光谱进行对比分析[如图 5(a)],又考虑了染病后整叶的光谱信息的差异[如图 5(b)]。由图 5(b)可知,550~680 nm,780~900 nm 波段仍然是判断不同等级病害的敏感波段;且呈现的规律和单叶病斑数的规律一致。但是,分析反射率值得出,可见光波段比近红外波段差异显著;正常与严重的叶片光谱差异明显;可是轻度和中度病害光谱差异不明显。由此说明,点状光谱数据(如图 3)反映面状信息(如图 4)时有一定的误差。所以要真实地探测病害对叶片的影响,应考虑病斑的数量、大小及所占叶片的百分比,否则会导致建立的预测模型代表性降低。

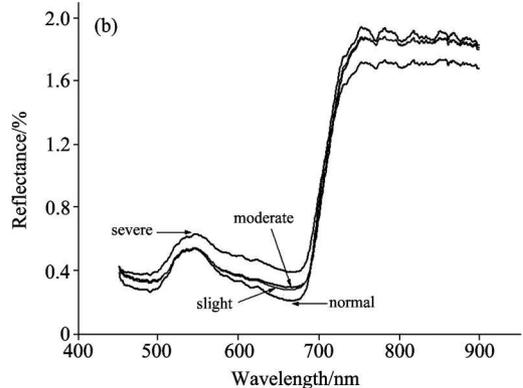
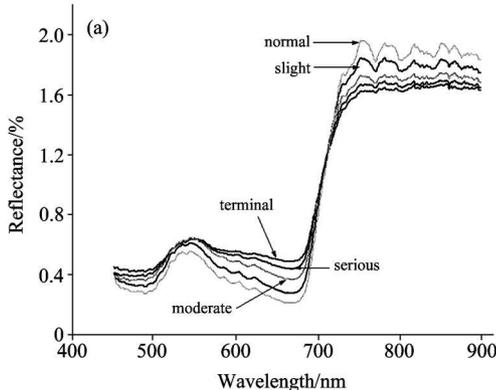


Fig 5 Reflectance of powdery mildew leaves

(a): Reflectance of powdery mildew of different amounts on single leaf; (b): Reflectance of powdery mildew of different levels

### 2.3 蚜虫胁迫下叶片的光谱特征提取与分析

本研究采用的成像光谱仪可以精确到 0.5 mm, 在获取面状叶片光谱图像的同时, 能对蚜虫群体甚至单个蚜虫的光谱进行提取分析, 这为定量研究蚜虫对小麦叶片的危害提供了新的手段。图 7 是蚜虫、附着蚜虫的叶片[图 7(a)]、受蚜虫破坏后的叶片[图 7(b)]和正常叶片的反射率。由图 6 中可知, 四种状态下反射率曲线有一致的趋势, 即 550 nm 的反射峰, 680 nm 的吸收谷, 680~780 nm 的红边, 780 nm 以后的近红外反射平台。但是, 正常叶片在 680 nm 处的红光波段有最显著的吸收谷, 附着蚜虫和破坏后的叶片次之, 蚜虫也有相似光谱。正常叶片在近红外波段反射率值最高, 受破坏叶片和有蚜虫的叶片次之, 说明正常叶片内部细胞结构正常, 形成多次反射, 所以反射值最高。蚜虫反射率随波段增加而逐渐升高, 但低于遭受虫害前后叶片的反射率值。

正常叶片和受蚜虫破坏叶片的反射率在 450~500 nm, 560~680 nm, 750~900 nm 波段有明显差异, 可作为判断遭受蚜虫胁迫的识别波段。有蚜虫的叶片和受蚜虫破坏后的叶片反射率相差不大, 可以把二者统称为作物遭受虫害的胁迫状态。

在 450~700 nm 波段, 蚜虫反射率都最高, 但还表现为 550 nm 反射峰, 680 nm 的吸收谷, 说明叶片或多或少都有一定的贡献; 可是在 700~780 nm 的红边位置, 明显和绿色植物光谱特征有别, 所以也可以把红边作为判断蚜虫病害的特征区域。

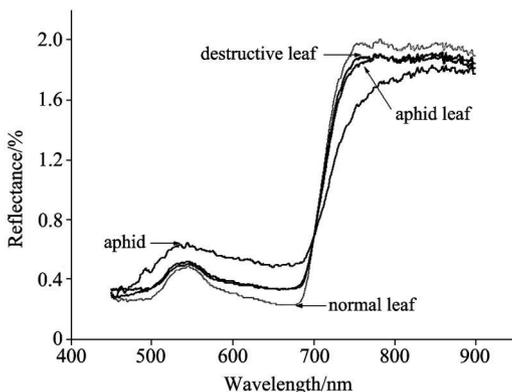


Fig 6 Reflectance of leaf with aphids, destructive leaf, normal leaf and aphid

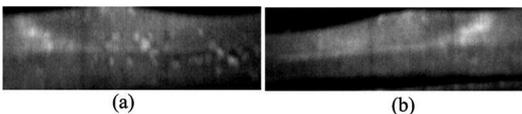


Fig 7 Images of leaf with aphids and removing aphids

(a): Leaf with aphids; (b): Leaf of removing aphids

## 3 讨论

农作物的自然生长是一种动态的过程, 影响其生长发育的胁迫是多样与复杂的, 我们首先去除其他影响因素从单叶尺度着手研究, 目的是寻找影响其变化的敏感波段, 然后构建养分诊断、病虫害预警预测模型, 进而在大田尺度进行验证, 才能真正用于精准农业的生产管理。

作物遭受胁迫影响时, 会表现出不同的光谱响应, 而捕捉敏感的光谱差异是利用遥感研究的基础。文中在图谱合一的数据立方体上, 既获得了点状的病斑、蚜虫光谱信息, 又提取了受其感染后的面状叶片信息, 尝试点面结合, 更详尽的解释叶片遭受胁迫后的光谱变化特征。这是成像光谱仪近地应用的优势。但是, 本研究的工作环境还需改进。比如, 安排两个实验光源, 使收集的数据不存在阴影的影响, 更全面的反应叶片在胁迫状态的长势信息。其次, 本研究仅做了不同胁迫状态下叶片光谱特征分析, 虽然可以为养分、病虫害田间遥感监测提供理论补充和支持, 但还需基于数据进行模型构建研究。

成像光谱仪近地研究是精确农业发展的趋势之一, 目前的研究还处于探索阶段, 不论从传感器性能的提高、仪器采集软件的完善、反射率的转换、高光谱立方体海量数据的处理、光谱信息利用等方面都需要不断的深入研究。随着成像光谱仪性能的提高和成本的下降, 其在农业中的应用将越来越广。

## 4 结论

本文基于高光谱成像技术对叶片不同胁迫(养分、病虫害)的光谱特征进行提取与分析, 有如下结论。

(1) 作物在不同养分胁迫下(不同叶位叶片), 叶片光谱信息表现为: 在可见光波段, 养分充足的叶片反射率低于胁迫状态下的叶片, 倒 1 叶与倒 2 叶差别不大, 但二者与倒 3 叶有明显差异; 在近红外波段, 养分充足叶片(倒 1、倒 2 叶)明显高于受胁迫叶片(倒 3 叶)。这从遥感的角度对作物不同层次的养分诊断研究提供了理论依据。

(2) 作物在不同等级白粉病胁迫下(由轻到重), 同一叶片不同数量病斑在 550~680 nm 波段光谱反射率为, 严重> 重度> 中度> 轻度> 正常, 在近红外波段正好相反。然而, 不同等级病害叶片光谱反射率在 550~680 nm 表现为, 白粉病严重时, 反射率最高; 正常时, 反射率最低; 轻度与重度相差不大。在近红外波段正好与此结果相反且不同等级病害胁迫下的差异不明显。

此外, 文中得出点状光谱数据反映面状信息有一定的误差, 要全面反应面状的真实情况, 还需考虑叶片病斑的大小、病斑数量、及其占整个叶片的面积等其他因素, 否则会影响预测模型的精度。

(3) 作物在蚜虫胁迫下(叶片是否附着蚜虫), 附着蚜虫叶片与破坏后叶片光谱反射率差异不明显, 但与正常叶片在 450~500, 560~680, 750~900 nm 波段差异都明显; 蚜虫光谱反射率也表现为一定的植被特征, 但整体偏高, 且在红边和近红外波段明显偏低, 可作为划分蚜虫病情指数提供一定参考。

(4) 通过比较三种胁迫状态下的分析结果发现, 560~680 nm 的可见光波段和 780~900 nm 的近红外波段是诊断三种胁迫的敏感波段。但是, 养分胁迫在 550 nm 处、780~900 nm 差异最显著; 病虫害胁迫在 680 nm 处、780~900 nm 差异最显著; “红边”也是判断正常叶片与虫害胁迫叶片的显著特征之一。

## References

- [ 1 ] Inoue Y, Penuelas J. *International Journal of Remote Sensing*, 2001, 22(18), 3883.
- [ 2 ] HUANG Hui, WANG Wei, PENG Yan kun(黄慧, 王伟, 彭彦昆). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2010, 30(7): 1811.
- [ 3 ] WANG Wei, PENG Yan kun, MA Wei(王伟, 彭彦昆, 马伟). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报)*, 2010, 5(41): 172.
- [ 4 ] ZHANG Dong yan, SONG Xiaoyu, MA Zhi hong(张东彦, 宋晓宇, 马智宏). *Scientia Agriculture Sinica(中国农业科学)*, 2010, 43(11): 2239.
- [ 5 ] TAN Hai zhen, LI Shaokun, WANG Keru(谭海珍, 李少昆, 王克如). *Acta Agronomica Sinica(作物学报)*, 2008, 34(10): 1812.
- [ 6 ] Christian Nansen, Tulio Macedo, Rand Wwanson. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(10): 2447.
- [ 7 ] TIAN You wen, LI Tian lai, ZHANG Lin(田有文, 李天来, 张琳). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2010, 26(5): 202.
- [ 8 ] CHAI A li, LIAO Ning fang, TIAN Li xun(柴阿丽, 廖宁放, 田立勋). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2010, 30(5): 1357.
- [ 9 ] CAI Jiarong, WANG Jiar hei, CHEN Quar sheng(蔡健荣, 王建黑, 陈全胜). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2009, 25(1): 127.
- [ 10 ] Agelisi. *Plant Pathology(植物病理学)*. Beijing: China Agricultural Press(北京: 中国农业出版社), 2009.
- [ 11 ] RUILIANG P U. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(11): 2759.
- [ 12 ] ZHAO Chur jiang, HUANG Weir jiang, WANG Ji hua(赵春江, 黄文江, 王纪华). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(农业工程学报)*, 2006, 22(6): 104.
- [ 13 ] WANG Ji hua, ZHAO Chur jiang, HUANG Weir jiang(王纪华, 赵春江, 黄文江). *Basis and Application of Quantitative Remote Sensing in Agriculture(农业定量遥感基础与应用)*. Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2008. 141.
- [ 14 ] Zhang Jingheng, Wang Ke, Bailey J S. *Pedosphere*, 2006, 16(1): 108.
- [ 15 ] WANG Yuan yuan, LI Gui cai, ZHANG Li jun(王圆圆, 李贵才, 张立军). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2010, 30(4): 1070.

## Investigation of the Hyperspectral Image Characteristics of Wheat Leaves under Different Stress

ZHANG Dong yan<sup>1, 2</sup>, ZHANG Jing cheng<sup>1, 2</sup>, ZHU Da zhou<sup>1</sup>, WANG Ji hua<sup>1, 2</sup>, LUO Ji hua<sup>1</sup>, ZHAO Ji ling<sup>1</sup>, HUANG Weir jiang<sup>1\*</sup>

1. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China
2. Institute of Remote Sensing & Information Technique, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China

**Abstract** The diagnosis of growing status and vigor of crops under various stresses is an important step in precision agriculture. Hyperspectral imaging technology has the advantage of providing both spectral and spatial information simultaneously, and has become a research hot spot. In the present study, auto development of the pushbroom imaging spectrometer (PIS) was utilized to collect hyperspectral images of wheat leaves which suffer from shortage of nutrient, pest and disease stress. The hyperspectral cube was processed by the method of pixel average step by step to highlight the spectral characteristics, which facilitate the analysis based on the differences of leaves reflectance. The results showed that the hyperspectra of leaves from different layers can display nutrient differences, and recognize intuitively different stress extent by imaging figures. With the 2 nanometer spectral resolution and millimeter level spatial resolution of PIS, the number of disease spot can be qualitatively calculated when crop is infected with diseases, and, the area of plant disease could also be quantitatively analyzed; when crop suffered from pest and insect, the spectral information of leaves with single aphid and aphids can be detected by PIS, which provides a new means to quantitatively detect the aphid destroying of wheat leaf. The present study demonstrated that hyperspectral imaging has a great potential in quantitative and qualitative analysis of crop growth.

**Keywords** Hyperspectral imaging; Characteristic analysis; Stress; Wheat leaf

\* Corresponding author

(Received Aug. 21, 2010; accepted Nov. 16, 2010)