

## 冻害胁迫小麦的图谱特征解析研究

段运生<sup>1,2</sup>, 张东彦<sup>1,3</sup>, 黄林生<sup>1</sup>, 赵晋陵<sup>1</sup>

1. 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039;
2. 安徽大学 现代教育技术中心, 安徽 合肥 230601;
3. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097)

**摘要:** 冻害是造成中国农业生产重大损失的气象灾害之一, 对国内粮食安全生产造成严重威胁。利用图像处理技术提取冻害前后小麦的覆盖度特征, 用高光谱技术研究冻害前后小麦的光谱变化特征并确定遥感诊断的敏感波段。研究表明: 可见光波段的绿、红光可用于诊断冻害胁迫, 尤其在绿峰与红谷位置表现明显; 近红外波段是判断冻害胁迫的敏感区间。综上, 光谱分析结合图像处理技术用于田间小麦冻害特征区间提取是可行的。

**关键词:** 地面覆盖度; 冻害胁迫; 高光谱和图像特征; 小麦

**中图分类号:** S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2218-06

## Comparison of hyperspectral and imagery characteristics of freezing stress and normal wheat

Duan Yunsheng<sup>1,2</sup>, Zhang Dongyan<sup>1,3</sup>, Huang Linsheng<sup>1</sup>, Zhao Jinling<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230039, China;
2. Modern Educational Technology Center, Anhui University, Hefei 230601, China;
3. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

**Abstract:** Freezing stress is one of the meteorological disasters causing significant loss of agricultural production in China, and easily leads to serious threat for national crop security. Image processing technique was used to extract the coverage characteristics of freezing stress and normal wheat, while hyperspectral remote sensing technology was utilized to explore spectral changes of freezing stress and normal wheat and determine the sensitive recognition bands. The results indicated that the green and red bands in visible ranges are identification bands of freezing stress, especially in the green peak and red valley location; near-infrared bands are sensitive range to detect freezing stress. In conclusion, spectral analysis combination with image processing technology is feasible for analyzing and extracting freeze injury characteristics of wheat in the field.

**Key words:** ground coverage; freezing stress; hyperspectral and imaging characteristics; wheat

收稿日期: 2014-11-20; 修订日期: 2014-12-22

基金项目: 安徽省高等学校省级自然科学基金项目(KJ2013A026); 安徽省自然科学基金(1308085QC58);

国家自然科学基金青年基金(41301471); 安徽大学博士科研启动项目

作者简介: 段运生(1972-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事农业大数据分析与应用方面的研究。Email: ysduan@ahu.edu.cn

通讯作者: 张东彦(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事高光谱遥感与图像处理方面的研究。Email: hello-lion@hotmail.com

## 0 引言

冻害是指在农作物生长季节温度过低对作物造成的损害。不同程度的冷冻害会造成农作物大面积死亡或延迟生长,致使农作物产量大幅度减产。冻害是造成中国农业生产重大损失的气象灾害之一,近年来在华北平原和长江中下游地区频繁发生,对粮食安全生产造成了严重威胁<sup>[1]</sup>。传统的小麦冻害面积及受害程度估算一般凭借农业专家的肉眼观察判断得出,估算结果存在较大误差。随着卫星遥感数据的出现,在小麦冻害预测预报中得到广泛应用,如汤志成和孙涵利用较低空间分辨率的 NOAA 数据合成绿度图,对比不同时相的绿度差异对江苏省冬小麦冻害状况进行评价<sup>[2]</sup>;杨邦杰等利用 NOAA 数据构建植被指数,结合气象资料对山东省冬小麦晚春冻害进行了遥感监测研究<sup>[3]</sup>;张晓煜等对宁夏春小麦、夏玉米冻害进行了遥感监测研究<sup>[4]</sup>;张雪芬等利用 NOAA 数据,结合气象资料对河南地区的冬小麦冻害监测进行了遥感技术和方法探讨<sup>[5]</sup>。这些早期研究为冻害遥感监测、粮食损失估算提供了依据,但所用的遥感数据存在空间分辨率偏低的问题,致使其大面积监测的优势未能发挥。随着材料科学的飞速发展和自然灾害预警预测的迫切需求,高分辨率卫星数据不断出现,为小麦冻害监测评估提供了坚实的数据支持。但是这些卫星影像价格偏高,且运行周期长,及时的预警预测同样受到限制。近地高光谱遥感的出现能很好地解决上述难题。目前,已有研究表明,高光谱在冻害胁迫诊断中有独特的优势。如李章成等用霜箱模拟冻害,利用高光谱仪获得不同冻害程度小麦的冠层反射光谱,在小麦冻害胁迫的遥感诊断机理及光谱特征提取方面进行初步探索<sup>[6]</sup>。由于小麦冻害症状具有延迟性、隐蔽性等特点,需要近地大量的研究得出结论继而为大尺度冻害遥感监测提供理论支持。

地面覆盖度(被叶片覆盖的地面百分比)能反映植被对光的截获能力,也能指示植被的生物产量,是农学与生态学家一直关心的一个重要参数。数码图像技术作为一个作物信息快捷、无损获取的手段,在精准农业应用上有很好的表现<sup>[7]</sup>。如李存军等利用数码图像提取小麦不同生育期的覆盖度,并结合高光谱寻找其敏感波段,为小麦长势监测提供方法与理

论支持<sup>[8]</sup>;卢艳丽等利用机器视觉提取冬小麦的覆盖度,分析不同覆盖度对小麦冠层光谱的影响及研究量化估产<sup>[9]</sup>;朱蕾等利用高光谱测定油菜、玉米、水稻三种作物不同覆盖度水平下的冠层光谱,结合数码图片提取的植被覆盖度研究作物植被覆盖度的高光谱遥感估测模型<sup>[10]</sup>。王方永等也通过数码相机提取棉花的覆盖度,再结合成像光谱仪估测棉花叶片叶绿素和氮含量<sup>[11]</sup>。

上述研究结果表明,基于图像技术的覆盖度精准提取,结合地面高光谱去研究作物的养分精细变化、长势趋势分析、胁迫特征提取有很大的优势。目前,二者结合进行小麦地面冻害监测研究鲜有报道。虽然近几年出现的成像光谱仪具有光谱和图像信息的数据优势,但由于其价格昂贵、受外界环境因素影响大、观测范围较小等因素限制了它的快速推广应用。文中拟通过机器视觉技术准确提取冻害胁迫后小麦的覆盖度,分析绿度指数变化规律,寻找小麦冻害前后图像特征;然后再通过高光谱量化分析的优势寻找冻害胁迫后小麦的光谱敏感区间,提取其特征,尝试在监测手段上有所突破,以期为大面积小麦冻害的卫星遥感监测提供可靠的地面数据支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

该试验于2010年9月至2011年7月在北京昌平区小汤山国家精准农业研究示范基地(40.18°N, 116.27°E)开展,选择华北与淮河流域10个小麦品种(ND195、ZY206、JD17、YN19、JD12、J9843、J9428、ND3432、ND211、ZM175)分3个不同播种时期(2010.9.27、2010.10.3、2010.10.9)进行9 m×12 m的田间小区种植,每个小区的播种密度40万/亩。经调查发现,种植小区土壤为华北地区常见的潮土,试验前根据土壤养分调查,确定底肥为尿素10公斤/亩,复合肥22.5公斤/亩(N:13%; P:14%; K<sub>2</sub>O; 总养分≥53%),正常田间管理。

### 1.2 数据采集

#### 1.2.1 覆盖度软件介绍及使用

利用 Sony 数码相机对13个小区的小麦冠层进行垂直拍照,此时距地面110 cm高,保证了地面有固定的视场范围,两次拍照日期分别为2010年12月16日(冻害前)和2011年1月12日(冻害后),对应小

麦的生育期为越冬期。拍照时天气晴朗、风力 2~3 级,拍照时间为 9:30~14:30。拍照产生的数字照片为 2048 pixel×1 536 pixel,以 JPEG 格式储存到计算机中。

由于数码相机产生的是中心投影的影像,随着视场角的增大,畸变也增大,即边缘处变形最大,故只取影像中间的 1 284 pixel×1 284 pixel 进行分析提取小麦覆盖度。提取算法如下。

若像元同时满足条件:  $R>G$  and  $R>B$ ,  $60\leq H\leq 240$  则是小麦,否则为背景土壤( $R$ 、 $G$ 、 $B$  指像元红绿蓝颜色值, $H$  指像元的色调)。文中利用该算法进行编程,然后对数字影像进行自动分类。程序包含 4 部分:影像读取; $H$  值的计算;小麦提取,覆盖度计算;结果输出。最后经目视检验,覆盖度自动提取的精度在 95%以上<sup>[8]</sup>。

### 1.2.2 高光谱数据采集

拍摄数字照片之后,立即用 ASD Fieldspec FR2500 光谱仪测定小麦冠层反射率,该光谱仪的采样间隔为 1.4 nm(350~1 000 nm 区间),视场角 25°,测量时距小麦冠层 130 cm,每个小区测定 10 次后取平均作为该样点的观测值,每次测定前后进行参考板校正。单株小麦叶片光谱测定也在自然光下进行,每个叶片测定其叶尖、叶中、叶基 3 个部位,然后取平均值作为该叶片的光谱值,高光谱的反射率转换方法见参考文献[12]。

### 1.3 数据处理方法

在计算光谱反射率后,选择归一化法进一步处理数据,目的是消除因光照差异造成的影响,尽量突出小麦本身的反射光谱信息<sup>[3]</sup>。该方法的原理是逐像元计算每个像素的光谱均值,然后每个波段光谱反射率除以该均值,得到的归一化反射率值在[0, 2]之间。

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

式中: $R_{ij}$  为归一化反射率; $i, j$  分别为起始和终止波段; $K$  为总的波段数。

文中所有数据采用 EXCEL2007 和 origin7.5 数据软件进行画图 and 数据分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 冻害胁迫下小麦覆盖度的图像特征

已有研究表明,覆盖度变化能很好地反映植被

长势状况,是利用遥感技术无损监测植被生命信息的重要参数<sup>[14]</sup>。作物的覆盖度随着生育期推进会会发生显著的变化,即呈现低-高-低的趋势。冻害胁迫后的小麦覆盖度特征前人研究很少,究其原因可能受两方面制约:(1) 小麦易发生冻害的生育期在越冬期、返青期、拔节期、孕穗期,基本上都属于生育前期,此时的地面覆盖度低,裸露土壤、往年作物秸秆、干旱等因素影响,覆盖度影响因素复杂;(2) 学者更倾向于利用气象数据去解释冻害影响,而关注冻害后覆盖度变化少。文中尝试利用图像数据提取冻害前后小麦覆盖度变化特征,直观地说明冻害对小麦生长的影响。当小麦冻害胁迫后,麦苗叶片干绿卷曲,植株出现干枯,地面覆盖度降低,如图 1(c)所示。而正常的小麦表现为叶片卷曲,但有生命活性,如图 1(a)所示。对比图 1(b)与 1(d)发现,小麦植株大小没有明显变化,冻害胁迫前后小麦地面覆盖度差异明显,受冻害胁迫的小麦土壤大量裸露,且地表变干变硬。为了更好地说明小麦冻害胁迫前后覆盖度变化,对冻害胁迫前后的数码图像进行麦苗覆盖度和绿度值提取,结果如表 1 所示。由表可知,冻害前后苗覆盖度和绿度值差异明显。如冻害前覆盖度最高达到 40.11%,而冻害后降为 32.48%;绿度指数也由 1.65 降为 1.48。同时,文中将不同播期 36 个小麦样区进行冻害前后覆盖度与绿度指数统计,发现冻害前后两种指标都有明显差异,这为利用图像技术进行小麦冻害胁迫研究提供了可靠的数据支持。

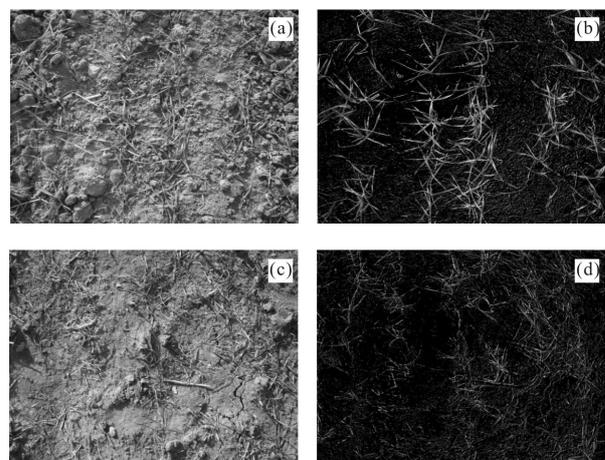


图 1 冻害胁迫和正常小麦地面覆盖度提取前后的图像  
Fig.1 Original and extracting images of ground coverage for normal and freezing stress wheat

表 1 田间小麦的地面覆盖度和绿度值的统计值

Tab.1 Statistic values of ground coverage and green index for the field wheat

Feature value	Maximum value	Minimum value	Average value
Coverage(12.16)	40.11	14.17	27.14
Green index(12.16)	1.65	1.40	1.53
Coverage(1.12)	32.48	13.04	22.76
Green index(1.12)	1.48	1.22	1.35

在大田提取覆盖度时容易受到土壤背景的影响,为了消除背景对覆盖度提取的影响,证明图像覆盖度提取能说明小麦冻害前后的差异,文中进一步对冻害前后单株小麦覆盖度(定义为侧向投影率)和绿度值进行提取,结果如图 2 和表 2 所示。从图 2(a)、图 2(b)可见,冻害前叶片表现为深绿,茎饱满且颜色为淡绿;当冻害后,叶片干枯卷曲,茎亮白表现为失水(图 2(c)、2(d))。利用图像处理软件进行覆盖度和绿度值数提取,发现冻害前覆盖度最高可达 61.73%,相应的绿度值为 1.71;而冻害胁迫后,覆盖度降为 36.84%,相应的绿度值为 1.59。

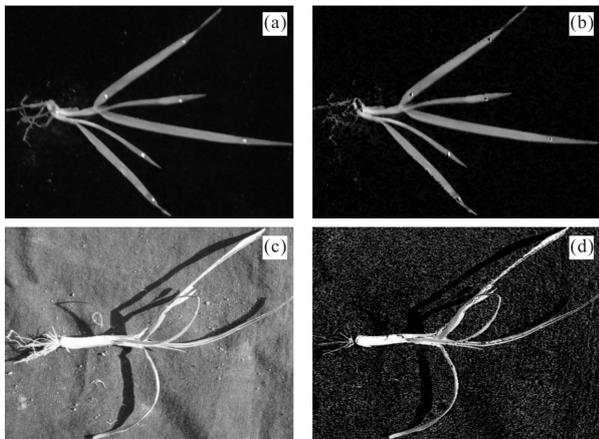


图 2 冻害胁迫和正常小麦单株覆盖度提取前后的图像

Fig.2 Original and extracting coverage images of single plant for normal and freezing stress wheat

表 2 单株小麦的覆盖度和绿度值的统计值

Tab.2 Statistic values of ground coverage and green index of single plant

Feature value	Maximum value	Minimum value	Average value
Coverage(12.16)	61.73	25.40	43.57
Green index(12.16)	1.71	1.46	1.59
Coverage(1.12)	36.84	21.19	29.01
Green index(1.12)	1.59	1.04	1.32

## 2.2 冻害胁迫下小麦覆盖度的高光谱特征

前人利用图像处理技术在作物养分、水分、病虫害等胁迫诊断进行了大量的研究<sup>[15]</sup>,但是因其只含有红绿蓝 3 个波段的信息,拥有的信息量少而受到限制。近地高光谱拥有海量的信息和高的光谱分辨率,所以在作物各种胁迫研究中表现出独特的优势<sup>[16]</sup>。文中利用地物光谱仪采集冻害前后小麦的光谱反射率,从高光谱的角度说明冻害胁迫前后覆盖度变化特征,结果如图 3 所示。从图 3(a)可知,小麦生长前期光谱主要受裸露土壤影响,因此没有明显的绿峰,在 350~670 nm 区间光谱表征和土壤类似;在 670 nm 左右的红谷位置,正常小麦表现有明显的吸收谷,而冻害胁迫小麦吸收谷不明显。究其原因可解释为:(1) 冻害后小麦叶片内部叶绿素细胞失水而丧失活性,叶片卷曲而干枯,因此植被特征表现不明显;(2) 受土壤背景影响大,因此弱化了作物的光谱特征。

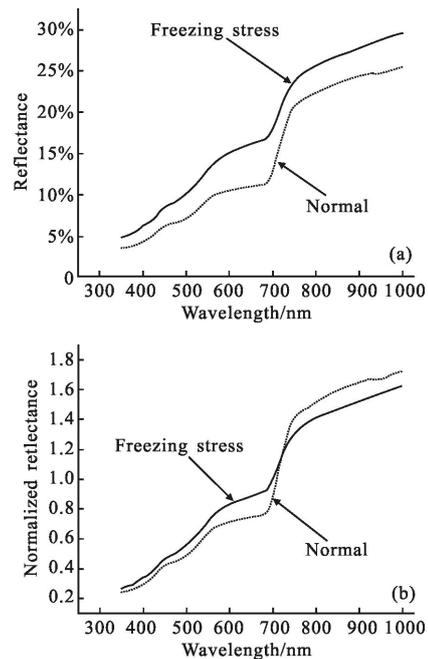


图 3 冻害胁迫和正常小麦的原始光谱和归一化光谱对比图

Fig.3 Original and normalized spectral curves of normal and freezing stress wheat

分析实验 36 个小区的小麦样本,发现冻害前后的原始光谱特征不显著,虽然整体趋势是冻害后小麦反射率光谱大于冻害前小麦,但特征区域不明显,如图 3(a)所示。为了消除不同光照引起的反射率值差异,同时降低土壤背景对特征区间的影响,文中选择归一化法对原始光谱进行再处理,结果如图 3(b)

所示。由图可知,可见光波段,冻害前后光谱曲线的特征在 350~550 nm 区间差异不大,在 550~680 nm 表现明显,正常小麦的红谷特征尤其显著,且还有细微的特征如绿峰到红谷曲线爬升缓慢,而冻害后,绿峰-红谷特征不显著,且爬升快;近红外波段(750~1 000 nm),冻害前后差异明显,可解释为冻害后小麦叶绿素活性部分或全部丧失,反射光谱在小麦群体间多次散射的能量下降,所以表现为正常小麦反射值高。

综上所述,因其 550~680 nm 的光谱区间正好处于可见光的绿波段与红波段,所以利用图像数据中的绿、红颜色特征也可研究小麦冻害胁迫,而高光谱在近红外波段有很好的表现,因此可以在此区间进行重点研究。

小麦冻害的近地研究是一个新的课题,文中对其群体特征进行提取研究后,为了寻找更敏感的特征波段,也对单株小麦进行了冻害前后的光谱特征对比分析,结果如图 4 所示。对于单株小麦的原始反射光谱,由图 4(a)可知:在可见光波段,冻害前后的反射率值在绿峰处表现特别明显;在近红外波段,冻害前有高的反射率平台,而冻害后在近红外反射率平台出现缓缓升高的现象。对所有试验样本的原始光谱进行分析,发现正常与冻害小麦的敏感特征区间不显著,为了突出特定的差异区间,对数据进行归一化处理,如图 4(b)所示。由图 4(b)可知,单株归一化光谱的整体趋势是:在可见光波段,小麦冻害前后差异明显,冻害前的小麦有显著的绿峰和红谷,而冻害后绿峰与红谷特征弱化;其次在绿峰到红谷的区间波段,冻害前表现特征是降落的比较快,即峰谷特征明显;而冻伤后,峰谷间下降较慢。在近红外波段,冻害前期反射率值变化较平缓,而冻害后则是由低到高,出现爬坡的特征。上述研究现象和群体特征相似,但表现的更明显。

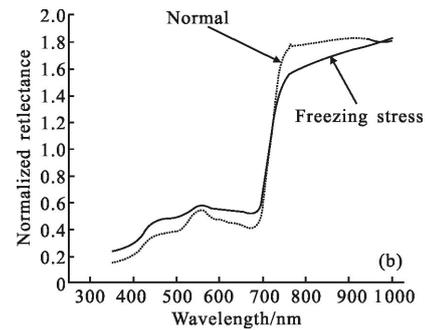
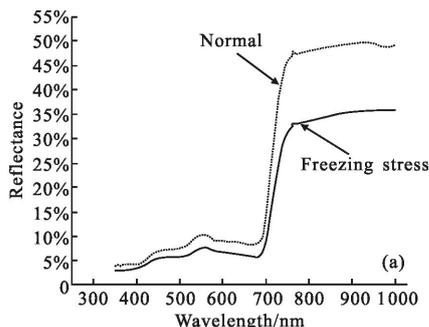


图 4 冻害胁迫和正常单株小麦的原始光谱和归一化光谱的对比图

Fig.4 Original and normalized spectral curves for normal and freezing stress of single plant

### 3 结果与讨论

文中利用图像处理技术及高光谱分析技术对冻害胁迫前后的小麦图像及光谱特征进行了研究,并用基于图像技术的绿度指数对冻害影响进行说明;同时,利用高光谱精细的光谱信息对其冻害敏感波段进行寻找。结果表明:无论是图像处理技术还是高光谱分析技术,冻害特征都在绿光与红光区间有很好的表现,因此可在这两个波段区间寻找或构建冻害胁迫指数用于冻害胁迫监测。其次,在高光谱曲线特征上,在峰谷特征区间可研究其峰谷的斜率或变化速度,去进行冻害胁迫研究;此外,在近红外波段,冻害前后小麦无论是群体指标还是单株指标都表现为正常高的反射率平台,而冻害胁迫后反射率由低到高,出现爬坡的现象。

上述研究结果是在一年数据上取得的,后续需进行多年观测进而确定其光谱诊断范围,从而为大尺度遥感监测服务。其次,小麦冻害时有可能伴随着干旱影响,是否影响冻害判断,需要寻找特例或做专项研究。再次,文中研究的冻害胁迫发生在小麦生育前期(越冬期),此时,小麦覆盖度的图像特征与光谱特征受土壤背景干扰因素较大,尤其是松软土壤和干硬土壤有较大的光谱差异。此外,文中选择了多个小麦品种进行冻害胁迫研究,虽然都发生冻害,但是程度不一致,因此原始光谱反射率值有差异,经归一化处理后表现的趋势基本一致,但未做冻害级别划分。下一步试验需要重点选择 1~2 个易冻品种进行冻害程度划分研究,以期为冻害的大面积遥感监测提供理论支持。

## 参考文献:

- [1] Feng Yuxiang, He Weixun, Sun Zhongfu, et al. Climatological study on frost damage of winter wheat in China [J]. *Acta Agron Sin*, 1999, 25(3): 335-340.
- [2] Feng Yuxiang, He Weixun. Study of Frostbite [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1996: 14-15.
- [3] Tang Zhicheng, Sun Han. Analysis winter wheat freeze injury with NOAA remote sensing data [J]. *Remote Sensing Information*, 1989, 4: 37-39.
- [4] Yang Bangjie, Wang Maoxin, Pei Zhiyuan. Monitoring freeze injury to winter wheat using remote sensing [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(2): 136-140.
- [5] Zhang Xiaoyun, Chen Yuying, Su Zhansu, et al. A study on monitoring frost of main crop in the area of Ningxia by using remote sensing [J]. *Remote Sensing Technology Application*, 2001, 16(1): 32-36.
- [6] Zhang Xuefen, Chen Huailiang, Zheng Youfei, et al. Monitoring the freezing injury of winter wheat by remote sensing [J]. *Journal Nanjing Institute Meteorology*, 2006, 29(1): 94-100.
- [7] Li Cunjun, Zhao Chunjiang, Liu Liangyun, et al. Retrieval winter wheat ground cover by short-wave infrared spectral indices in field and sensitivity analysis [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5): 159-164.
- [8] Li Cunjun, Wang Jihua, Liu Liangyun, et al. Automated digital image analyses for estimating percent ground cover of winter wheat based on object features [J]. *Journal of Zhejiang University (Agri & Life Sci)*, 2004, 30(6): 650-656.
- [9] Lu Yanli, Hu Hao, Bai Youlu, et al. Effects of vegetation coverage on the canopy spectral and yield quantitative estimation in wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(1): 96-100.
- [10] Zhu Lei, Xu Junfeng, Huang Jingfeng, et al. Study on hyperspectral estimation model of crop vegetation cover percentage [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(8): 1827-1831.
- [11] Wang Fangyong, Wang Keru, Li Shaokun, et al. Estimation of chlorophyll and nitrogen contents in cotton leaves using digital camera and imaging spectrometer [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2010, 36(11): 1981-1989.
- [12] Zhang Dongyan, Huang Wenjiang, Wang Jihua, et al. In-situ crop hyperspectral acquiring and spectral features analysis based on pushbroom imaging spectrometer [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(12): 188-192.
- [13] Lukina E V, Stone M L, Raun W R. Estimating vegetation coverage in wheat using digital images [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1999, 22(2): 341-350.
- [14] Karcher D E, Richardson M D. Quantifying turfgrass color using digital image analysis[J]. *Turfgrass Science*, 2003, 43: 943-951.
- [15] Ribeiro A, Ranz J, Burgos-Artiz X P, et al. An image segmentation based on a genetic algorithm for determining soil coverage by crop residues[J]. *Sensors*, 2011: 11, 6480-6492.
- [16] Casadesus J, Kaya Y, Bort J, et al. Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments[J]. *Annual Applied Biology*, 2007, 150: 227-236.