

选择式成像光谱探测技术及系统设计

陈健沛¹ 谢立恒¹ 马鸿键¹ 朱炜湛² 蔡志岗¹

¹中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275

²广东本致科技有限公司, 广东 广州 510663

摘要 提出选择式成像光谱的概念,即通过对待测对象所成图像进行整体观察来选择其中任意感兴趣的区域(ROI),同时探测所选区域的光谱信息,而不是像传统成像光谱技术对所有像元光谱的被动测量。在此基础上设计搭建基于分束立方体的选择式成像光谱探测系统,用于探测直径为192 pixel,位于图像中心的圆形区域的光谱信息。对其性能测试结果表明:该系统的光谱范围为380~850 nm,光谱分辨率为1.5 nm,镜头焦距为70~300 mm,最高空间分辨率为2.4 mm,室外自然条件下与原始光谱的相关系数达0.992以上。该系统结构简单,具有非接触、远距离、实时探测的优点,为光谱探测提供了一种新颖且有效的方法,具有较高的应用潜力。

关键词 光谱学; 选择式成像光谱; 光谱探测; 系统设计; 光谱特性; 空间分辨率

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.073007

Selectable Imaging Spectrum Detection and System Design

Chen Jianpei¹ Xie Liheng¹ Ma Hongjian¹ Zhu Weizhan² Cai Zhigang¹

¹State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technology, Sun Yat-sen University,
Guangzhou, Guangdong 510275, China

²Guangdong Beseen Technology Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510663, China

Abstract The concept of selectable imaging spectrum is proposed. It is an selectable imaging spectroscopy detection technology, namely, detecting the spectrum of the region of interest (ROI) selected through the whole observation of images, rather than the traditional imaging spectroscopy technology which passively measures all the pixels spectrum. Then an selectable imaging spectrometer based on beam-splitter-cube is designed to detect the spectrum information of 192 pixel diameter and located in the circular center area of the image. The performance test result shows that the spectral range of this system is 380~850 nm, the spectral resolution is 1.5 nm, lens focal length is 70~300 mm and the highest spatial resolution reaches 2.4 mm. Under natural outdoor conditions, correlation coefficient to the original spectrum is over 0.992. The proposed system with a high potential for application supplies a novel and effective method for spectral detection, it has the advantages of simple structure, non-contact, long distance and real-time detecting capability.

Key words spectroscopy; selectable imaging spectrum; spectrum detection; system design; spectral characteristic; spatial resolution

OCIS codes 300.6170; 300.6550; 220.4830; 120.6200;

1 引言

成像光谱技术是将成像技术与光谱测量技术相结合而产生的综合性技术,早在20世纪70年代末期,美国喷气推进实验室(JPL)首先提出了成像光谱仪的设想,并于1983年成功研制出世界上第一台成像光谱仪AIS-1^[1]。此后,成像光谱仪进入全面发展阶段,包括中国在内的一系列超光谱成像系统研制成功,并广泛应用于遥感观测,如地质矿物、植被生态及军事目标识别^[2-6]。根据不同的分光方式,成像光谱系统可分为棱镜

收稿日期: 2015-01-30; 收到修改稿日期: 2015-03-26; 网络出版日期: 2015-06-12

基金项目: 国家自然科学基金(10934011)、广东省产学研项目(2012B091000068)

作者简介: 陈健沛(1989—),男,硕士研究生,主要从事光谱探测、图像处理等方面的研究。E-mail: jp_ch89@hotmail.com

导师简介: 蔡志岗(1962—),男,教授,硕士生导师,主要从事光电检测、光纤传感等方面的研究。

E-mail: lasers@netease.com (通信联系人)

或光栅色散型、傅里叶变换型、可调谐滤光片型^[7],这些系统设计十分复杂,为了获取每一像元的光谱数据,采集时间长,而且成像光谱数据量庞大,不利于储存和传输,在很多实际应用场合中反而造成数据冗余。例如有些农作物检测^[8-12]、动物羽毛研究^[13-14]、地表勘察^[15]、铁锅炉光谱探测等,只需要定点测量光谱即可,而不需要对每个图像像元都进行光谱探测。针对该缺陷,本文提出了选择式成像光谱的概念,它是一种光谱探测区域可选择式光谱技术,即通过对待测对象所成图像进行整体观察,选择其中任意感兴趣区域(ROI),同时针对性地测量 ROI 光谱信息。选择式成像光谱技术打破了传统成像光谱技术对所有像元光谱的被动采集,省去对冗余数据的处理,不仅提高了单次探测速度,还能大大提高光谱分辨率,具有极大的应用潜力,特别适用于非接触、远距离、实时显示的光谱测量场合。如果配合图像识别技术,可自动识别 ROI,从而通过光谱特性对 ROI 进行物质鉴定。

在选择式成像光谱概念的基础上,设计一种基于分束立方体的选择式成像光谱探测系统,用于探测图像中心位置的光谱信息。该系统结构简单,操作灵活,是一种新颖且有效的光谱探测方法。

2 选择式成像光谱系统

2.1 系统设计

系统结构如图 1 所示,主要由成像镜头组、分束立方体、光纤、光谱仪、电荷耦合器件(CCD)摄像机和计算机构成,计算机预装选择式成像光谱分析软件。表 1 列出了主要器件的参数。自然场景通过成像镜头组形成图像平面光,由分束立方体将其分成两束,透射光束成像于 CCD,形成图像信息,实时显示于选择式成像光谱分析软件中;对反射光束,将光纤纤芯的一端固定在反射光束成像焦面的中心处,由此将光纤纤芯孔径大小的光耦合进光纤,进入光纤光谱仪形成光谱信息。

根据所选光纤纤芯孔径的大小,选择式成像光谱分析软件可在测量图像中心做相应大小的圆圈标志,并将该系统各个元件的相对位置锁定,保证图像中心的圆圈标志与光纤纤芯相对应。计算机控制光纤光谱仪与 CCD 摄像机的参数,并对光谱数据与图像数据进行下一步的处理分析。

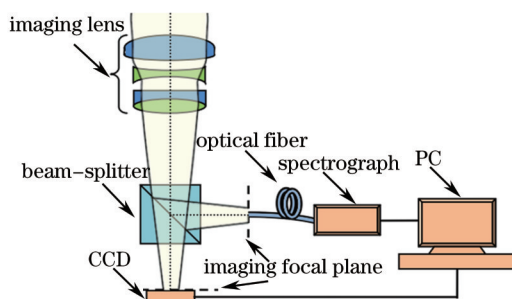


图 1 基于分束立方体的选择式成像光谱探测系统光路图

Fig.1 Diagram of selectable imaging spectrometer based on beam-splitting cube

表 1 主要系统组件及参数

Table 1 Main components and parameters

Component	Manufacturer	Main parameter
Imaging lens	Canon	Focal length: 70~300 mm, aperture: F3.5
Beam-splitter	SIGMA KOKI	Wavelength range: 400~700 nm, $R:T=1:1$
Spectrometer	Ocean Optics	Wavelength range: 350 ~ 1000 nm, spectral resolution: 1.5 nm
Optical fiber	Ocean Optics	Wavelength range: UV-VIS, core diameter: 0.6 mm
CCD	Daheng	Resolution: 2048×1536, sensor size: 6.4×4.8 mm

2.2 系统校正与操作

CCD 的像素尺寸为微米量级,系统搭建过程中较难保证光纤纤芯截面正好处于图像中心的相对位置,可通过该系统配套的选择式成像光谱分析软件进行校正,标记出准确的探测区域。校正方法如下:1)在图像中心附近显示与光纤纤芯大小一致的白色圆形亮斑,若纤芯半径 300 μm 对应图像半径 96 pixel,如图 2(a)所示;2)微调圆斑在图像中的位置,当系统探测得到的光谱能量最大时,可以确定此时圆斑所成的像即与光纤纤芯重合;3)通过软件选项里的圆圈标记参数设置对话框,如图 2(b)所示,设置标记圆心的 xy 轴坐标以及半

径大小,使圆圈标记正好覆盖圆斑,完成校正。

系统整体封装成一个单元,由三维运动平台承载。系统校正后,通过移动系统即可选择性的将ROI置于标记圆圈之中,实现对该区域的光谱测量。

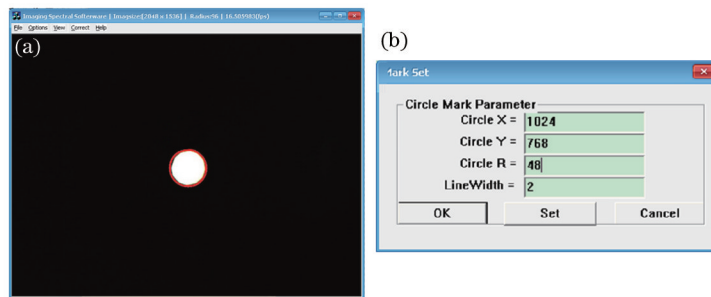


图2 选择式成像光谱分析软件。(a) 主界面;(b) 圆圈标记参数设置

Fig.2 Selectable imaging spectroscopy software. (a) Main interface; (b) circle mark parameter set

2.3 光谱特性

由表1可知系统中光纤光谱仪波长范围为350~1000 nm,但是成像透镜组及分束立方体往往无法满足如此大的响应带宽,从这两个元件的透射率曲线(图3)可以看出,在紫外及近红外波段有明显的衰减及波动,特别是成像透镜组的透射率曲线更加明显。

光谱特性测试方法如下:1)用卤素灯光源(Ocean Optics: LS-1)将白光均匀投射在标准漫反射参考白板(Ocean Optics: WS-1)上;2)分别用光纤光谱仪和基于分束立方体的选择式成像光谱系统先后测量其标准漫反射白板上的反射光谱,分别称之为原始参考光谱和探测光谱,并进行对比。测试结果如图4所示。

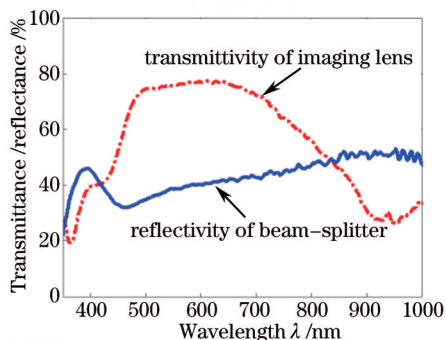


图3 成像透镜组透射率及分束立方体反射率

Fig.3 Transmission of imaging lens and reflectivity of beam-splitter-cube

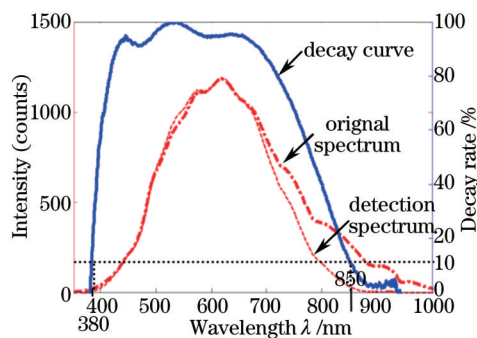


图4 光谱特性曲线

Fig.4 Curve of spectral characteristic

为了更加直观的观察,通过改变光谱仪的积分时间,特意将原始参考光谱及探测光谱的最高能量位置重合。并将探测光谱与原始光谱之比归一化,计算其相对衰减曲线。从图4可以明显看出,在波长在350~380 nm的紫外波段和850~1000 nm的近红外波段有严重的衰减,以相对衰减率大于0.1为标准,计算得到该系统的适用波长应为380~850 nm。这也说明了成像透镜组对系统的光谱特性影响最大,若改进成像透镜组还可以提高系统光谱特性的性能。

2.4 空间分辨率

针对所提出的选择式成像光谱系统,空间分辨率是指系统能够识别并进行光谱探测的最小空间范围。系统搭配的摄像机传感器分辨率为2048 pixel×1536 pixel,几何尺寸为6.4 mm×4.8 mm,搭配的光纤芯芯直径为0.6 mm,可以计算得到理想光谱采集范围对应于图像中心,直径为 $0.6/6.4 \times 2048 = 192$ pixel的圆形。映射到实际空间中,其空间分辨率还与像透镜组的焦距即放大倍数、探测距离这两个因素有关系。当成像透镜组放大倍数最大、探测距离最近时,同等条件下空间分辨率最高。将探测图像直径为192 pixel的圆形范围对应的实际空间大小定义为系统的空间分辨率。

将成像透镜组放大倍数调至最大,即焦距为300 mm,此时可对焦的最小物距为1.49 m,在此距离放置一显示屏,并与系统光轴垂直。显示屏显示黑白二值图像,分别为黑色横条纹、黑色竖条纹和黑色圆形等图

案,图案置于系统探测图像的圆圈标记之中。调整图案大小,使其条纹宽度或者圆形直径在探测图像中正好为 192 pixel,测量此时的条纹宽度为 2.4 mm,即为最高空间分辨率。图 5(a)~(c)即为摄像机捕捉得到的探测图像,理论上光谱探测区域为图中红色圆圈标志所示。图 5(d)为光谱仪积分时间保持为 250 ms 时探测得到的光谱图,并与显示屏图案全白时相同积分时间下采集得到的参考光谱进行对比分析。从图 5(d)可以看出峰值最高的位置为 527 nm,以此波长位置光谱能量作为参考,黑色圆形图案光谱能量为参考光谱能量的 1.6%,黑色横竖条纹光谱基本重合,其光谱能量为参考光谱能量的 0.5%,所以可以合理认为该系统的最高空间分辨率为 2.4 mm。当然通过搭配更小纤芯直径的光纤,空间分辨率会相应提高,不过通光量也会随着减少,信噪比会有一些降低。

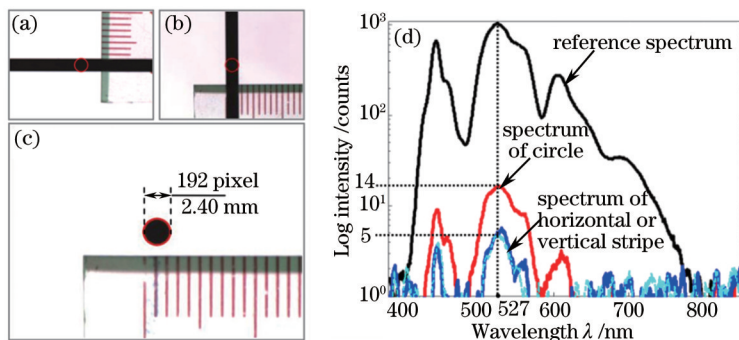


图 5 空间分辨率探测图像及光谱图。(a) 横条纹图; (b) 竖条纹图; (c) 圆形图; (d) 光谱图

Fig.5 Spatial resolution detection images and spectrograms. (a) Horizontal stripe; (b) vertical stripe; (c) circle pattern; (d) spectrogram

用同样的方法测量该系统在成像透镜为 300 mm 焦距下,不同探测距离的空间分辨率,如表 2 所示。根据视场角的理论,可以得知探测距离 D 与空间分辨率 R 应是线性关系,通过回归拟合得到其拟合直线为

$$R = (2.28D - 0.72) \times 10^{-3}. \quad (1)$$

表 2 空间分辨率

Table 2 Spatial resolution

Detection range D /m	1.5	3	4.5	6	7.5	9	12	15
Spatial resolution R /(10^{-3} m)	2.4	5.5	9.8	12.8	16.3	19.6	26.8	33.5

则视场角为 $\arctan(2.28 \times 10^{-3}) = 2.3$ mrad。由此可知,100 m 与 1 km 的空间分辨率分别为 0.23 m 和 2.3 m,足以满足大多数应用条件。进一步,月亮距离地球的平均距离为 384400 km,此距离的空间分辨率为 876 km,约为月亮直径 3476 km 的四分之一,尽管月光非常微弱,但是只需要 300 ms 的积分时间即可轻易得到月亮光谱,如图 6 所示,图中红色圆圈标志即为光谱探测区域。

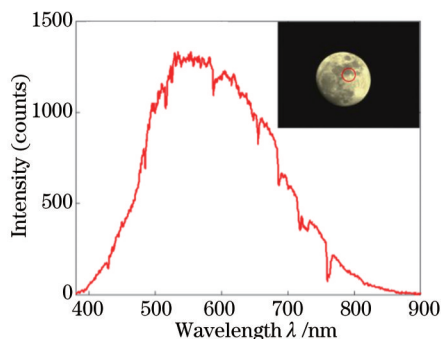


图 6 月亮光谱及测量图像

Fig.6 Spectrum and detection image of the moon

3 应用探索

基于分束立方体的选择式成像光谱探测系统在非接触、远距离、实时探测有明显的优点。为评价实际应用中探测结果的可靠性,基于中山大学著名古建筑惺亭为测量对象,在 40、80、130、160 m 不同距离探测约

为 35 cm 直径的柱子的光谱 S , 并与用光纤光谱仪直接测量得到的原始参考光谱 F 进行相关性分析, 光谱仪积分时间保持为 300 ms。采用皮尔森相关系数法^[6], 结果越接近 1, 相关性越强。计算公式为

$$r(F, S) = \frac{\sum (F - \bar{F})(S - \bar{S})}{\sqrt{\sum (F - \bar{F})^2 \sum (S - \bar{S})^2}}, \quad (2)$$

式中 \bar{F} 及 \bar{S} 为参考光谱 F 及探测光谱 S 的平均值, 得到探测光谱与参考光谱的相关系数。其结果如图 7 和表 3 所示。从图 7(e) 可以看出, 在光谱仪积分时间保持为 300 ms 的情况下, 随着探测距离增大, 虽然光谱能量有所降低, 但是曲线形态基本保持不变, 与参考光谱的相关系数都在 0.992 以上, 由此可见, 该选择式成像光谱探测系统在野外探测是完全可靠的。

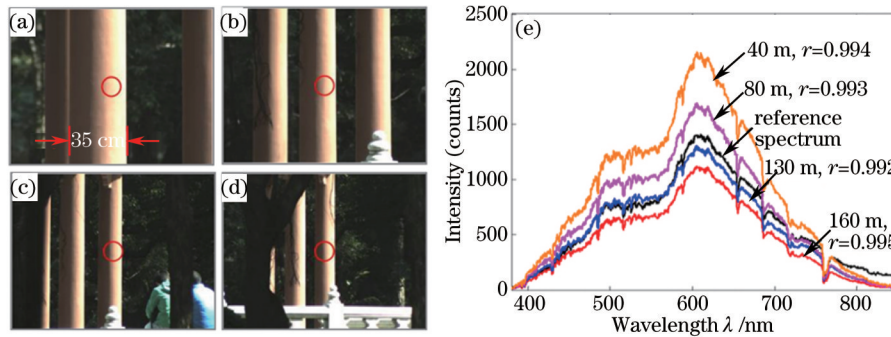


图 7 不同距离柱子测量图像及光谱图。(a) 40 m; (b) 80 m; (c) 130 m; (d) 160 m; (e) 光谱图

Fig.7 Detection images and spectrograms of the pillar at different distances. (a) 40 m; (b) 80 m; (c) 130 m; (d) 160 m; (e) spectrogram

表 3 柱子光谱的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of pillar spectrum

Detection range D	50	80	130	160
Pearson correlation coefficient $r(F, S)$	0.994	0.993	0.992	0.995

4 结 论

提出选择式成像光谱的概念, 这是一种探测区域可选择式的成像光谱技术, 即通过图像的整体观察来选择其中任意 ROI, 同时测量其光谱信息。选择式成像光谱技术打破了成像光谱技术对所有像元光谱的被动采集, 省去了对冗余数据的处理, 大大提高了单次测量速度, 并且增强光谱能量, 从而提高信噪比和光谱分辨率。选择式成像光谱技术是一种具有重大意义的创新与改进, 将会提供另一种新颖且有效的光谱探测方法, 具有极大的应用潜力。

为了实现选择式成像光谱探测, 设计搭建一套基于分束立方体的选择式成像光谱探测系统, 用于探测图像中心, 直接为 192 pixel 圆形区域的光谱信息。该系统的光谱范围为 380~850 nm, 光谱分辨率为 1.5 nm, 镜头焦距从 70~300 mm 可变, 最高空间分辨率为 2.4 mm, 与直接用光纤光谱仪测量得到的原始光谱相比较, 相关系数达 0.992 以上。且该系统结构简单, 操作灵活, 具有非接触、远距离、实时探测的优点, 野外探测能力强。若搭配性能更好的光谱仪及成像镜头, 其光谱范围、光谱分辨率、空间分辨率等性能还有很大的改善空间。

参 考 文 献

- 1 G Vane, R O Green, T G Chrien, *et al.*. The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS)[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44(2-3): 127-143.
- 2 D Tao, G Jia, Y Yuan, *et al.*. A digital sensor simulator of the pushbroom offner hyperspectral imaging spectrometer[J]. Sensors, 2014, 14(12): 23822-23842.
- 3 Xue Qingsheng. Optical system design of multi-model hyperspectral imager for spaced-based atmospheric remote sensing[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822005.

- 薛庆生. 空间大气遥感高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822005.
- 4 Du Shusong, Wang Yongmei, Tao Ran. Multiple beam interferential spectral imaging technology[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(8): 0830003.
- 杜述松, 王咏梅, 陶然. 多光束干涉光谱成像技术[J]. 光学学报, 2013, 33(8): 0830003.
- 5 Wang Yueming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(1): 010008.
- 王跃明, 郎均慰, 王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(1): 010008.
- 6 Fan Liheng, Lü Junwei, Deng Jiangsheng. Classification of hyperspectral remote sensing images based on bands grouping and classification ensembles[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0910002.
- 樊利恒, 吕俊伟, 邓江生. 基于分类器集成的高光谱遥感图像分类方法[J]. 光学学报, 2014, 34(9): 0910002.
- 7 Zheng Yuquan, Yu Bingxi. Overview of spectrum-dividing technologies in imaging spectrometers[J]. Journal of Remote Sensing, 2002, 6(1): 75-80.
- 郑玉权, 禹秉熙. 成像光谱仪分光技术概览[J]. 遥感学报, 2002, 6(1): 75-80.
- 8 Cao Pengfei, Li Hongning, Luo Yanlin, *et al.*. Selection of feature bands for phaseolus vulgaris leaves based on multi-spectral imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(1): 011101.
- 曹鹏飞, 李宏宁, 罗艳琳, 等. 基于多光谱成像选取四季豆叶片的特征波段[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(1): 011101.
- 9 Wu Di, Huang Lingxia, He Yong, *et al.*. Visible-near infrared reflection spectroscopy for crop-weed discrimination[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(8): 1618-1622.
- 吴迪, 黄凌霞, 何勇, 等. 作物和杂草叶片的可见-近红外反射光谱特性[J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1618-1622.
- 10 Chen Quansheng, Zhao Jiewen, Zhang Haidong, *et al.*. Identification of authenticity of tea with near infrared spectroscopy based on support vector machine[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 933-937.
- 陈全胜, 赵杰文, 张海东, 等. 基于支持向量机的近红外光谱鉴别茶叶的真伪[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 933-937.
- 11 Hong Tiansheng, Qiao Jun, Ning Wang, *et al.*. Non-destructive inspection of Chinese pear quality based on hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 151-155.
- 洪添胜, 乔军, Ning Wang, 等. 基于高光谱图像技术的雪花梨品质无损检测[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 151-155.
- 12 Guo Enyou, Liu Muhua, Zhao Jiewen, *et al.*. Nondestructive detection of sugar content on navel orange with hyperspectral imaging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(5): 91-93, 103.
- 郭恩有, 刘木华, 赵杰文, 等. 脐橙糖度的高光谱图像无损检测技术[J]. 农业机械学报, 2008, 39(5): 91-93, 103.
- 13 Zhu Xiaomei, Han Sen. Determination of Cu, Zn, Mn, Ni, Cr, Fe and Mo in the feather of Japanese crested ibis by ICP[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(5): 783-784.
- 朱小梅, 韩森. ICP法测定朱鹮羽毛中7种元素含量[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(5): 783-784.
- 14 Zhang Qingyue, Lü Hao, Zhao Qiuling, *et al.*. The color analysis of peacock feather[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 632-635.
- 张清悦, 吕浩, 赵秋玲, 等. 孔雀羽毛不同色区的色彩分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 632-635.
- 15 Xu Daqi, Ni Guoqiang, Shen Yuanting, *et al.*. Study on exploring for oil and gas using reflectance spectra of surface soils[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(3): 521-524.
- 徐大琦, 倪国强, 沈渊婷, 等. 利用地表土壤的反射光谱勘探油气的方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(3): 521-524.
- 16 J L Rodgers, W A Nicewander. Thirteen ways to look at the correlation coefficient[J]. The American Statistician, 1988, 42(1): 59-66.

栏目编辑: 苏 岑