

基于多光谱成像选取四季豆叶片的特征波段

曹鹏飞 李宏宁 罗艳琳 林立波 许海滨 冯洁

云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650500

摘要 在400~720 nm波段范围,基于液晶可调谐滤波器(LCTF)和CMOS相机组合的多光谱成像系统,以四季豆叶片为研究对象每隔5 nm进行成像。根据图像亮度信息法和波段指数法的相关原理,首先分别计算得到各波段四季豆叶片的波段指数值和可识别度;然后对四季豆叶片的波段指数值和可识别度进行排序,综合图像的灰度离散、亮度信息丰富和波段的相关性小等特点,得出545、630、645、720、650和570 nm波段有较大的波段指数值和较好的识别度;最后根据最小欧氏距离法和光谱角度匹配法分别对四季豆叶片的特征波段的分类精度予以计算,两种方法的分类精度分别为100.00%和83.33%,得出选取的特征波段对四季豆叶片具有较好的分类精度。因此,545、630、645、720、650和570 nm波段可作为四季豆叶片的特征波段。

关键词 成像系统;特征波段;多光谱成像;四季豆叶片;分类精度

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.011101

Selection of Feature Bands for *Phaseolus vulgaris* Leaves Based on Multi-Spectral Imaging

Cao Pengfei Li Hongning Luo Yanlin Lin Libo Xu Haibin Feng Jie

*School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University,
Kunming, Yunnan 650500, China*

Abstract Multi-spectral images of *Phaseolus vulgaris* leaves at the wavelength range of 400~720 nm with an interval of 5 nm are captured by using a multi-spectral imaging system which mainly consists of liquid crystal tunable filter (LCTF) and CMOS camera. Firstly, according to the principles of image brightness and band index, the value of band index and identifiability for *Phaseolus vulgaris* leaves are calculated respectively among every band. Then, through sorting the value of band index and identifiability for *Phaseolus vulgaris* leaves, it can be concluded that bands 545, 630, 645, 720, 650 and 570 nm have preferable identification with considering the characteristics of discrete gray levels and rich brightness of images and little correlation coefficient among different bands. Finally, the classification accuracy for *Phaseolus vulgaris* leaves is calculated according to the principles of minimum Euclidean distance and minimum spectral angle matching. The classification accuracy of characteristic bands for *Phaseolus vulgaris* leaves is 100.00% and 83.33% separately through using these two methods. We can draw a conclusion that these bands have ideal classification accuracy. Therefore, bands 545, 630, 645, 720, 650 and 570 nm can be used as feature bands for *Phaseolus vulgaris* leaves.

Key words imaging systems; feature band; multi-spectral imaging; *Phaseolus vulgaris* leaves; classification accuracy

OCIS codes 110.2970; 200.4560; 300.6550; 350.4600

收稿日期: 2013-08-14; 收到修改稿日期: 2013-09-24; 网络出版日期: 2013-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(60968001,61168003)、云南省自然科学基金(2009CD047,2011FZ079)和国家大学生创新创业训练计划(201210681005,201310681004)

作者简介: 曹鹏飞(1987—),男,硕士研究生,主要从事新型光谱成像技术方面的研究。E-mail: supercao@163.com

导师简介: 冯洁(1975—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事多光谱成像和颜色科学方面的研究。

E-mail: fengjie_ynnu@126.com(通信联系人)

1 引言

我国园艺作物产业发展迅速,其总产值在我国农业产品中的比重已高达60%^[1]。我国园艺作物种类繁多,地域辽阔,如何快速、远距离、大面积地收集作物信息对及时指导和调控农业发展意义重大^[2]。基于人眼视觉,凭主观经验观察作物的颜色、纹理和形状可以获取大量直观信息,但往往对作物特征信息有误判、效率低,不能一次性远距离、大范围地监测作物;传统的红绿蓝三色(RGB)成像技术和光谱仪均无法同时获取被测目标的光谱信息和空间信息,且成像数据波段多和数据量大对成像光谱仪的性能和数据处理算法提出了更高的要求,因此成像数据的处理对快速识别作物信息显得尤为重要^[3]。

基于液晶可调谐滤波器(LCTF)^[4-5]和CMOS相机组成的多光谱成像系统可以同时从光谱维和图像维获取作物信息,可以用于建立作物数据库和快速识别作物,克服了传统科学领域在目标识别方面“同色异谱”的瓶颈^[6]。多光谱成像技术以其实现简单、图谱合一等特点在信息获取与处理^[7-8]领域显得尤为重要。多光谱成像系统能够以较多的通道为作物特征识别提供丰富的光谱维和空间维信息,但波段过多往往使得数据冗余度大、波段间相关性强、计算耗时,对算法设计提出了挑战。因此,有必要从大量成像光谱数据中选择出有效的特征波段,用于对园艺作物的光谱特征信息进行快速识别和分类。

基于以上考虑,本文基于LCTF和CMOS相机组成的多光谱成像系统通过波段指数法和亮度信息法选取四季豆叶片的特征波段,主要用于对四季豆叶片的特征快速识别^[9]、聚类分析^[10]和数据库建立^[11]等方面,并从特征波段和全波段角度对四季豆叶片和白板的分类精度予以评价。

2 特征波段选取原理和分类方法

2.1 图像亮度信息法

对多光谱图像的每个波段来讲,人眼识别灰度图像的最大限度取决于灰度图像的亮度值大小和图像的灰度分布^[12]。实验用平均灰度值 I_{ave} 来衡量第 i 波段灰度图像的亮度,用图像的标准差 σ_i 来度量灰度图像的离散程度:

$$I_{ave} = \frac{\sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N I_i(x,y)}{M \times N}, \quad (1)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^M \sum_{x=1}^N [I_i(x,y) - I_{ave}]^2}{M \times N}}, \quad (2)$$

式中 $I_i(x,y)$ 是图像每个像素点的灰度值, M 和 N 是图像的纵横坐标。第 i 波段图像的亮度标准差 σ_i 取值越大,表明此波段的信息量越丰富。

一幅灰度图像的亮度最大定为255,通常情况下人眼视觉识别图像的最佳亮度为最大亮度值的一半,即越接近128越好,其接近程度用以下模型来衡量:

$$C = \begin{cases} \frac{I_{ave}}{128}, & I_{ave} \leq 128 \\ 2 - \frac{I_{ave}}{128}, & \text{else} \end{cases}. \quad (3)$$

利用亮度信息进行特征波段选择时,所选择的波段应该是参考背景值 I_b 小,通道图像的方差大,且有较好视觉效果的通道图像。综合以上因素,可以得出各波段图像的可识别度:

$$D_i = \frac{C \times \sigma_i}{I_b}, \quad (4)$$

$$I_b = \frac{1}{N} \sum_{x=i}^N I_{max}(x). \quad (5)$$

式中 D_i 值越大说明该通道具有较好的识别效果, $I_{max}(x)$ 表示图像在纵向上 $y=1,2,\dots,M$ 亮度最大的像素点。

2.2 波段指数法

波段指数^[13]是指成像光谱数据中波段的均方差与相关系数的比值,其定义为

$$P_i = \frac{\sigma_i}{R_i}, \quad (6)$$

其中 R_i 越小, 表明波段之间的独立性越高, 信息冗余度低。设 ρ_{ij} 为波段 i 和 j 之间的相关系数, 光谱数据分为 k 组, 每组的波段数分别为 n_1, n_2, \dots, n_k , 因此,

$$R_i = R_w + R_a, \quad (7)$$

$$R_w = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} |\rho_{ij}|, \quad i \neq j, \quad (8)$$

式中 R_w 为第 i 波段与所在组内其他波段相关系数的绝对值之和的平均值, R_a 为第 i 波段与所在组以外的其他波段之间的相关系数的绝对值之和。

波段指数要求按照波段均方差越大, 波段间的相关系数的绝对值越小的特点进行最佳波段选择。波段指数综合考虑了各波段的信息量及其相关性, 因此, 波段指数对特征波段的选取具有重要意义。

2.3 判别分类方法

根据近邻法决策和监督分类中距离法的原理, 对于 \mathbf{X}_i 和 \mathbf{X}_j 两个容量为 n 的样本, 每个样本点为 p 维的空间向量

$$\mathbf{X}_i = (x_{ik})_{n \times p} = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ip}), \quad (9)$$

$$\mathbf{X}_j = (x_{jk})_{n \times p} = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jp}), \quad (10)$$

式中 $(i, j = 1, 2, \dots, n)$; \mathbf{X}_i 表示标准多光谱数据所对应的类别, \mathbf{X}_j 表示未知类别的数据。

2.3.1 距离法

设 $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$ 是两个相互独立的向量, 采用监督分类中应用最广泛的欧氏距离^[14]

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p |x_{ik} - x_{jk}|^2}, \quad (11)$$

式中 d_{ij} 表示两者之间的距离, 其值越小, 说明 \mathbf{X}_i 和 \mathbf{X}_j 越相似。

2.3.2 光谱角度匹配法

光谱角度匹配(SAM)^[15]通过计算一个测量光谱与一个参考光谱之间的角度来确定二者的相似性, 这种方法需要测量光谱和参考光谱具有相同的光谱分辨率。 α_{ij} 定义为 $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_j$ 两个向量之间的夹角, 则夹角余弦为

$$\cos \alpha_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^p x_{ik} x_{jk}}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^p x_{ik}^2\right) \cdot \left(\sum_{k=1}^p x_{jk}^2\right)}}. \quad (12)$$

如果 \mathbf{X}_i 与 \mathbf{X}_j 比较相似, 则 \mathbf{X}_i 与 \mathbf{X}_j 的夹角接近于 0, 从而 $\cos \alpha_{ij}$ 接近于 1。

3 实 验

3.1 实验原理与设备

基于 LCTF 和 CMOS 黑白数字相机组成的多光谱成像系统, 选取四季豆叶片特征波段, 原理如图 1 所示。

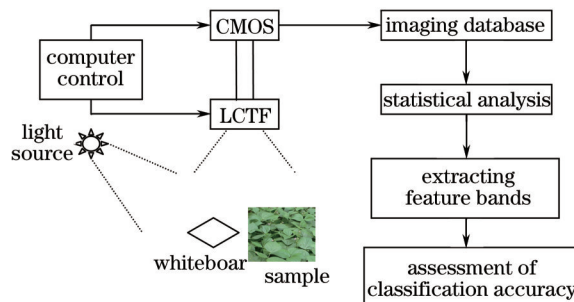


图 1 基于 LCTF 和 CMOS 相机的多成像系统选取特征波段原理图

Fig.1 Schematic of selecting feature bands based on LCTF and CMOS camera imaging system

该成像系统主要由光学镜头、LCTF、CMOS黑白数字相机和计算机硬件控制等部分组成。其中LCTF使用美国CRI公司的VariSpec™(VIS-07-20),波段范围为400~720 nm,带宽[半峰全宽(FWHM)]为10 nm,半角可视范围为7.5°,响应时间为50 ms;CMOS相机的型号为SunTime 500 B,其有效像素数为2592 pixel×1944 pixel,像素尺寸为2.2 μm×2.2 μm。

3.2 数据制备与获取

实验选取的四季豆样本来自云南省农业科学院,采集样本的环境是在室温大棚内且晴朗无风,光照均匀,平均气温和湿度分别为25.2 ℃和40%,采样时间为中午12:00左右,多光谱成像系统距离实验样本2.2 m,选取2 m×1 m的盆栽四季豆样本进行成像,四季豆生长时间为120 d。基于LCTF光谱成像系统对盆栽培养的健康四季豆(品种为美国供给者)叶片和参考白板同时进行图像采集,对400~720 nm波段范围,每隔5 nm采集一幅灰度图像传至计算机存储,采集4组,每组65个波段。其中,参考白板用于在特定场景下对样本进行定标,参考白板选用Macbeth Color Checker 19#的白色矩形区域。

为了判别所测样本的类别,实验对前期已采集的健康水稻叶片、萝卜叶片和参考白板的成像光谱数据予以使用,每种样本取50组数据,4类样本共计200组数据。然后从4种样本中随机抽取150组数据组成样本训练集,选取50组四季豆叶片数据用作对四季豆叶片进行分类。以波段720 nm处的灰度图像为例说明所选取的四季豆叶片和参考白板区域,如图2所示。



图2 四季豆叶片和参考白板选取的区域

Fig.2 Selection of imaging areas of *Phaseolus vulgaris* leaves and reference whiteboard

通过C#编写获取图像的平均灰度值算法,分别获取选定区域各波段四季豆叶片和参考白板图像的灰度值。其中,对每个波段的5个不同叶片表面选取一个矩形区域进行灰度获取,这样相当于对每个叶片选取的特定区域进行了灰度平均,消除了叶片表面亮度不均匀、光散射等因素带来的影响。参考白板和四季豆叶片选取区域的平均灰度值曲线如图3所示。

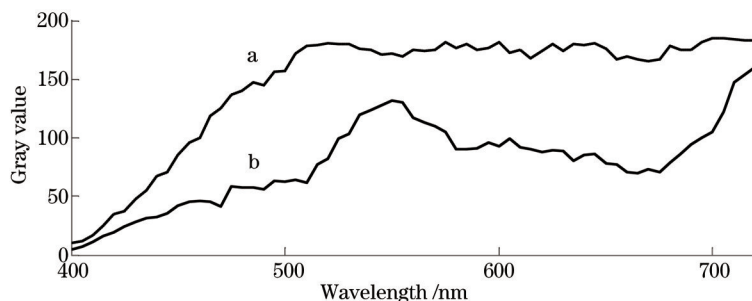


图3 平均灰度值曲线。(a)参考白板;(b)四季豆叶片

Fig.3 Curves of average gray value. (a) Reference whiteboard; (b) *Phaseolus vulgaris* leaves

4 结果与讨论

4.1 波段指数法获取的特征波段

根据波段指数原理,实验分别从所测数据的标准差和相关系数的角度进行统计分析。对实验样本的5个不同叶片表面的灰度值求标准差,得到叶片在第*i*波段的标准差,其大小可以判断各波段信息量的多少;

而相关系数的大小可以表征波段之间相关性的强弱程度。通过(2)式和(7)式计算四季豆叶片成像光谱数据的标准差和部分相关系数,分别如图4和表1所示。

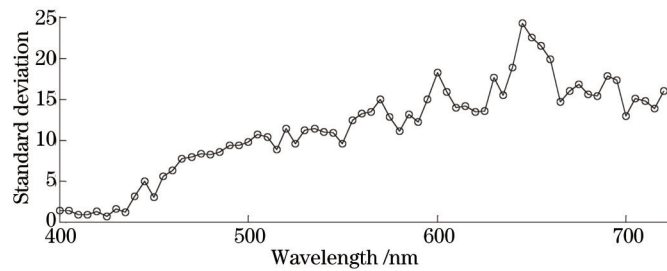


图4 四季豆叶片的各波段标准差曲线

Fig.4 Standard deviation curve of *Phaseolus vulgaris* leaves in every band

表1 四季豆叶片的部分相关系数

Table 1 Parts of correlation coefficients for *Phaseolus vulgaris* leaves

Band/nm	645	650	720	545	570	630
450	0.057	0.873	0.772	0.513	0.073	0.106
460	0.872	0.897	0.871	0.970	0.903	0.912
520	0.996	0.993	0.619	0.906	0.988	0.991
535	0.933	0.944	0.838	0.987	0.947	0.953
680	0.996	0.998	0.643	0.916	0.996	0.998
690	0.997	0.998	0.552	0.867	0.987	0.987

通过对表1和图4的数据分析可知:630 nm波段与450 nm波段的相关系数为0.106,二者的相关性很小,650 nm波段分别与680 nm和690 nm波段的相关系数均为0.998,具有较大的相关性,其他波段之间的相关系数绝对值均在0.013~1之间;645 nm波段具有最大的标准差24.26,而其他波段的标准差在0.84~21.52范围变化。

通过(6)式计算四季豆叶片的波段指数值,各波段的波段指数曲线如图5所示。

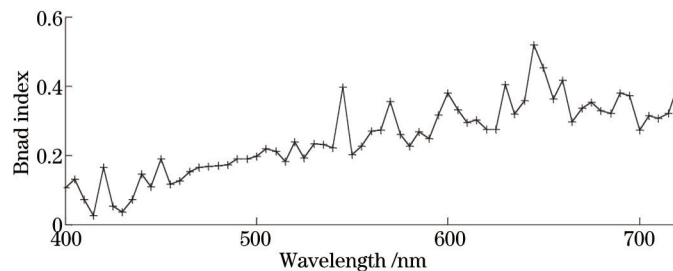


图5 四季豆叶片各波段的波段指数曲线

Fig.5 Band index curve of *Phaseolus vulgaris* leaves in every band

根据图5中波段指数大小排序可以得出:645 nm波段具有最大的波段指数值0.52,其次分别是650、545、660、630、720、690、695和570 nm。综合计算得出的相关系数和标准差,这些波段处的标准差较大、相关系数的绝对值较小,即四季豆叶片信息量丰富、波段的独立性好。

4.2 图像亮度信息法获取的特征波段

从图像的亮度信息角度对四季豆叶片数据进行定量分析,根据(4)式分别计算了5个选取样本的可识别度 D 。由于计算结果数据量大,只给出部分波段的样本较大可识别度,如表2所示。对每个样本按各波段识别度由大到小进行排序,结果如表3所示。

根据表3中可识别度排序来看,545 nm波段具有最佳的识别度,即样本的亮度信息丰富,其次分别是650、630、720、645、570、680、575和615 nm;综合所有样本而言,其他波段的 D 值较小,即可识别度均较低。

表2 5个样本部分较大识别度
Table 2 Parts of identifiability for five samples

Band /nm	1#	2#	3#	4#	5#
545	0.125	0.138	0.098	0.110	0.165
630	0.135	0.121	0.089	0.125	0.158
720	0.108	0.114	0.093	0.128	0.157
650	0.111	0.109	0.091	0.101	0.161
570	0.105	0.102	0.085	0.095	0.155
575	0.101	0.107	0.081	0.091	0.151
645	0.103	0.104	0.083	0.099	0.163
680	0.103	0.103	0.087	0.083	0.153
665	0.098	0.095	0.078	0.085	0.148
615	0.098	0.093	0.076	0.078	0.139
705	0.096	0.094	0.074	0.088	0.148

表3 5个样本较大波段识别度排序
Table 3 Order of larger band idetifiability for five samples

Identifiability	Band /nm				
	1#	2#	3#	4#	5#
High	630	545	545	720	545
	545	630	720	630	645
	650	720	650	545	650
	720	650	630	650	630
	570	575	680	645	720
	680	645	570	570	570
	645	680	645	575	680
	575	570	575	705	575
	665	615	665	670	665
	615	670	615	665	705
	705	665	670	660	655

4.3 讨 论

从以上波段指数法和亮度信息法所提取的四季豆叶片的特征波段结果分析可知:在545、630、645、720、650和570 nm波段处,四季豆叶片的灰度分布离散,与其他波段的相关系数较小,且亮度信息丰富,所以计算得出的波段指数和可识别度值相对较大。因此,根据这两种方法选取的545、630、645、720、650和570 nm波段可以作为四季豆叶片的特征波段。

为进一步从大量成像数据判断对四季豆叶片的分类精度,实验分别以欧氏距离和光谱角度匹配法为判别依据,对实验数据分为训练样本集和测试样本集,分别计算每一个测试样本与所有训练样本的欧氏距离和角度;根据最短距离和最小角度从全波段和特征波段对四季豆叶片测试样本予以分类,其分类精度如表4所示。

表4 四季豆叶片的分类精度

Table 4 The classification accuracy for phaseolus vulgaris leaves

Classification method	Full bands /%	Feature bands /%
Euclidean distance	98.00	100.00
Spectral angle match	96.00	83.33

从表4可以得出:欧氏距离和光谱角度匹配法对全波段的四季豆叶片分类精度分别为98.00%和96.00%;对于提取的四季豆叶片特征波段,欧氏距离和光谱角度匹配法的分类精度分别为100.00%和83.33%。由此可见,欧氏距离法和光谱角度匹配法对四季豆叶片的全波段和特征波段分类精度均较高。所以,综合亮度信息法和波段指数法提取的特征波段对四季豆叶片的分类精度比较理想,因此,这些特征波段可以用于四季豆叶片的快速分类和识别。

5 结 论

基于LCTF和CMOS相机组成的多光谱成像系统选取了四季豆叶片的特征波段,通过图像亮度信息法

和波段指数法两种方法进行比较,对400~720 nm波段范围的多光谱图像波段数据进行优化,选取了灰度分布离散、图像亮度信息大且与其他波段相关性小的四季豆叶片特征波段。根据各波段图像的波段指数值和可识别度,从大量波段数据中通过比较两种方法获取了四季豆叶片的特征波段,得出545、630、645、720、650和570 nm波段对四季豆叶片的分类均比较理想。因此,通过选取特征波段对快速识别四季豆叶片提供了一种方法和思路,有望应用于快速识别其他园艺作物和精细农业分类,以及高光谱遥感快速识别地物等方面。

参考文献

- 1 Feng Jie, Li Hongning, Yang Weiping, *et al.*. Horticultural plant diseases multispectral classification using combined classified methods[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(2): 426-429.
冯洁,李宏宁,杨卫平,等.园艺作物病害的多光谱组合分类[J].*光谱学与光谱分析*, 2010, 30(2): 426-429.
- 2 Lin Wenpeng, Wang Changyao, Chu Deping, *et al.*. Extraction of fall crop types based on spectral analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(9): 128-132.
林文鹏,王长耀,储德平,等.基于光谱特征分析的主要秋季作物类型提取研究[J].*农业工程学报*, 2006, 22(9): 128-132.
- 3 Guo Lin, Wang Fei, Zhang Yin, *et al.*. Design and implementation of business management system for crop remote sensing monitoring[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(3): 132-138.
郭琳,王飞,张寅,等.农作物遥感监测业务管理系统设计与实现[J].*农业工程学报*, 2013, 29(3): 132-138.
- 4 Hardeberg J Y, Schmitt F, Brettel H. Multispectral color image capture using a liquid crystal tunable filter[J]. *Opt Eng*, 2002, 41(10): 2532-2548.
- 5 Du Lili, Yi Weining, Zhang Dongying, *et al.*. Radiometric calibration of LCTF-based multispectral area CCD camera[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(1): 272-276.
杜丽丽,易维宁,张冬英,等.基于LCTF的多光谱面阵CCD相机的辐射定标[J].*光谱学与光谱分析*, 2011, 31(1): 272-276.
- 6 Zjakic I, Parac-Osterman D, Bates I. New approach to metamerism measurement on halftone color images[J]. *Measurement*, 2011, 44(8): 1441-1447.
- 7 Steidley C, Bachnak R, Dannelly R S, *et al.*. A multi-spectral imaging system for geo-spatial applications[J]. *J Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2005, 5(1 suppl): S93-S109.
- 8 Wang H C, Tsai M T, Chiang C P. Visual perception enhancement for detection of cancerous oral tissue by multi-spectral imaging[J]. *J Optics*, 2013, 15(5): 055301.
- 9 Chen Rongrong, Zhou Zhiguo, Cao Weixing, *et al.*. Spatial variability and quantitative analysis of field factors based on GIS[J]. *Chinese J Applied Ecology*, 2004, 15(9): 1678-1680.
陈蓉蓉,周治国,曹卫星,等.基于GIS的农田土壤、作物特征空间变异性及其相互关系[J].*应用生态学报*, 2004, 15(9): 1678-1680.
- 10 Ya Huiyuan, Li Weitao, Wang Weidong, *et al.*. Cluster analysis of some common gramineous plants based on the sequences of EF1-a[J]. *J Zhengzhou University*, 2012, 44(2): 108-113.
押辉远,李卫涛,王卫东,等.基于EF1-a基因对常见禾本科作物的聚类分析[J].*郑州大学学报*, 2012, 44(2): 108-113.
- 11 Jiang Lili, Qi Qingwen, Zhang An. Grid-based precision agriculture database and its demonstrative application: taking Shuangshan Farm in Heilongjiang Province as an example[J]. *J Geo-Information Science*, 2011, 13(6): 804-809.
姜莉莉,齐清文,张岸.基于网格的精准农业数据库及示范应用——以黑龙江农场双山基地为例[J].*地理信息科学学报*, 2011, 13(6): 804-809.
- 12 Feng Jie, Li Hongning, Liu Wei, *et al.*. Extract spectral feature bands of pseudoperonospora cubensis's narrow-band multispectral images using brightness[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s109003.
冯洁,李宏宁,刘微,等.用亮度信息提取黄瓜霜霉病害窄带多光谱图像特征波段[J].*中国激光*, 2011, 38(s1): s109003.
- 13 Jiang Xiaoguang, Wang Changyao, Wang Cheng. Optimum band selection of hyperspectral remote sensing data[J]. *Arid Land Geography*, 2000, 23(3): 214-220.
姜小光,王长耀,王成.成像光谱数据的光谱信息特点及最佳波段选择——以北京顺义区为例[J].*干旱区地理*, 2000, 23(3): 214-220.
- 14 Yang A, Cao T, Li R F, *et al.*. A hybrid gene selection method for cancer classification based on clustering algorithm and Euclidean distance[J]. *J Computational and Theoretical Nanoscience*, 2012, 9(4): 611-615.
- 15 Zhang Xinle, Zhang Shuwen, Li Ying, *et al.*. Extracting black soil border in heilongjiang province based on spectral angle match method[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(4): 1056-1059.
张新乐,张树文,李颖,等.基于光谱角度匹配方法提取黑土边界[J].*光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 1056-1059.