

王卓卓, 何英彬, 罗善军, 等. 基于冠层高光谱数据与马氏距离的马铃薯品种识别[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 1036-1041.  
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.05.010

## 基于冠层高光谱数据与马氏距离的马铃薯品种识别

王卓卓<sup>1</sup>, 何英彬<sup>1,2</sup>, 罗善军<sup>1</sup>, 段丁丁<sup>2</sup>, 张远涛<sup>1</sup>, 朱娅秋<sup>1</sup>, 于金宽<sup>2</sup>, 张胜利<sup>3</sup>,  
徐 飞<sup>3</sup>, 孙 静<sup>3</sup>

(1. 天津工业大学管理学院, 天津 300387; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 吉林省蔬菜花卉科学研究院, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 为丰富高光谱数据在精细农业中的应用, 本研究基于冠层高光谱数据进行不同马铃薯品种区分研究。利用田间实测的6~8月的马铃薯原始光谱数据以及经过一阶微分、对数一阶微分、包络线去除处理后的光谱, 采用马氏距离法选择3种马铃薯光谱差异显著波段, 再利用逐步判别法检验波段识别精度。结果表明, 7月份经过对数一阶微分变换选取的特征波段识别精度最高, 达87.7%。不同生育期内, 多种预处理方法下的光谱识别能力有差异。6月份包络线去除法的识别精度最高, 7月份对数一阶微分处理下的识别精度最高, 而8月份原始光谱的识别精度最高。提取的特征波段多位于红光及近红外波段。研究结果表明基于高光谱数据, 借助马氏距离与逐步判别法可以区分马铃薯品种。

**关键词:** 高光谱; 马氏距离; 马铃薯; 品种识别

**中图分类号:** TP79      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2018)05-1036-06

## Variety identification of potatoes based on canopy hyperspectral data and Mahalanobis distance

WANG Zhuo-zhuo<sup>1</sup>, HE Ying-bin<sup>1,2</sup>, LUO Shan-jun<sup>1</sup>, DUAN Ding-ding<sup>2</sup>, ZHANG Yuan-tao<sup>1</sup>,  
ZHU Ya-qiu<sup>1</sup>, YU Jin-kuan<sup>2</sup>, ZHANG Sheng-li<sup>3</sup>, XU Fei<sup>3</sup>, SUN Jing<sup>3</sup>

(1. School of Management, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Agricultural Zoning of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 3. Academy of Vegetable and Flower Sciences of Jilin Province, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to enrich the application of hyper-spectral data in precision agriculture, this study attempts to distinguish potato varieties based on canopy spectral data. Based on the field measured data of the original spectra of potato from June to August, and the spectra processed by the first order differential, logarithmic first order differential and continuous removal, the method of Mahalanobis distance and stepwise discriminant were used to select characteristic bands for variety identification. The result showed that feature bands extracted from the spectra of the logarithmic first order differential transformation in July had the highest recognition accuracy of 87.7%. The recognition ability of different preprocessing spectra was different in growth stages. In June, the accuracy of continuous removal was the highest, and the accuracy of logarithmic first order differential treatment in July was the highest, while the original spectrum in August had the highest accuracy.

The extracted characteristic bands were mostly in red and near infrared bands. This study shows that based on hyperspectral data, potato varieties can be distinguished by Mahalanobis distance and stepwise discriminant method.

**Key words:** hyperspectral; Mahalanobis distance; potato; variety identification

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771562); 中国农业科学院创新工程项目(IARRP 2017-727-1)

作者简介: 王卓卓(1992-), 女, 宁夏固原人, 硕士研究生, 主要从事农业遥感方面的研究。(E-mail) 1040644098@qq.com

通讯作者: 何英彬, (E-mail) heyinbin@caas.cn

高光谱遥感具有波段连续、光谱分辨率高的特点,在分析植被的反射光谱差异性方面有较大的潜力<sup>[1-2]</sup>,能够更加准确地探测到植被的精细光谱信息<sup>[3-4]</sup>,从而能更准确地识别作物<sup>[5-6]</sup>,为作物的科学管理和高产高效提供技术保障<sup>[7]</sup>。目前,高光谱数据相关研究主要是通过构建植被指数与提取光谱特征参数(包括光谱反射率、吸收谷、红边参数、面积参数等),借助 BP 神经网络、判别分析法、欧氏距离等方法对具有较强相似性的草地种类<sup>[8-10]</sup>、树种<sup>[11-13]</sup>以及农作物种类<sup>[14]</sup>进行精细分类。如王崇等<sup>[15]</sup>基于光谱数据变换以及高光谱特征参数构建 BP 神经网络模型对 8 种常见农作物进行分类,张丰等<sup>[16]</sup>的研究深入到作物品种层面,基于高光谱成像光谱仪获取的数据,采用混合决策树分类算法(分类节点上综合了最大似然法、光谱角匹配、马氏距离分类以及二值编码等方法)成功对 6 种水稻进行识别分类。

马铃薯是中国继玉米、水稻、小麦之后的第四大粮食作物,对于保障国家粮食安全意义重大。目前,有关马铃薯高光谱研究多集中于成熟收获后块茎的品质鉴别<sup>[17-18]</sup>与品种分类<sup>[19]</sup>,而关于马铃薯早期植株生长方面的研究<sup>[20-23]</sup>较少。利用冠层高光谱进行马铃薯品种识别的研究鲜有报道。同种作物不同品种之间的光谱特征极为相似,它们之间的细微差别很难通过分辨率较低的常规遥感手段探测,本研究基于 3 种马铃薯关键生育期内的高光谱数据,通过微分及包络线去除等预处理,借助马氏距离选取特征波段,利用逐步判别分析法分析不同预处理方法下的马铃薯品种识别精度。研究区分不同品种健康的马铃薯植株在其关键生育期内的光谱变化特征,可以丰富作物精细分类的相关研究,为马铃薯精准田间管理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于 2017 年 6-8 月在吉林省长春市农业科技示范园区(124°99'E,43°66'N)进行。选取吉林地区广泛种植的早熟品种费乌瑞它以及中晚熟品种延薯 4 号、吉薯 1 号作为研究对象,为了研究方便分别记为:FW、JS、YS。3 种马铃薯均在 5 月 12 日播种,每个品种种植 2 组,每组 8 垄,垄宽 75~80 cm,株距 30~35 cm,小区面积 1.2 m×6.5 m。其他管理措施

同大田。

### 1.2 数据采集

反射率光谱测量采用 USB2000+便携式光谱仪测得。光谱范围为 350~1 050 nm,光谱分辨率 1.7~2.1 nm,采样间隔 0.44 nm,信噪比 250:1。选取晴朗,无风无云的天气进行数据采集。光谱采集时间 10:00-14:00(减小太阳高度角的影响),采集时传感器探头使用 25°视场角,探头垂直向下。为了保证数据准确性,测量前采取标准白板进行校正。处理时,剔除每组中的异常光谱,取平均值作为每种作物的光谱。共计得到有效数据 251 条。

### 1.3 光谱数据预处理

由于受光谱仪自身以及温度、杂散光等外界因素的影响,所测光谱数据存在各种噪声。为了得到真实的结果,消除基线漂移等影响,需要对实测光谱数据进行预处理。预处理包括数据平滑与数据变换。

数据平滑方法选取 S-G 滤波法,它是一种在时域内基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法。这种滤波器最大的特点在于滤除噪声的同时可以确保信号的形状、宽度不变。S-G 滤波采用 Origin8.0 实现。

采用包络线去除与微分进行数据变换。包络线去除法可以有效突出光谱曲线的吸收和反射特征,并将反射率归一化为 0~1.0,将光谱的吸收特征归一化到一致的光谱背景上,有利于与其他光谱曲线进行特征数值的比较,从而提取特征波段以供分类识别。包络线变化公式<sup>[24]</sup>如下:

$$R_{cj} = R_j / [R_{start} + K \times (\lambda_j - \lambda_{start})] \quad (1)$$

$$K = (R_{end} - R_{start}) / (\lambda_{end} - \lambda_{start}) \quad (2)$$

上式中, $\lambda_j$ 是波长  $j$ ;  $R_{cj}$ 是波长  $j$  去除包络线后的值;  $R_j$ 是波长  $j$  的原始光谱反射率;  $R_{end}$ 与  $R_{start}$ 是在吸收曲线里的起始点和末端点的原始光谱反射率;  $\lambda_{end}$ 与  $\lambda_{start}$ 是在吸收曲线里的起始点波长和末端点波长;  $K$ 是在吸收曲线里起始点波段与末端点波段之间的斜率。

光谱反射值经对数变换后,不仅趋向于增强可见光区的光谱差异,而且趋向于减少因光照条件变换引起的乘性因素的影响。为了取得更好的效果,光谱数据经过对数变换后进行微分处理得到对数一阶微分数据。公式如下:

$$(\lg R_{\lambda_i})' = [\lg R_{\lambda(i+1)} - \lg R_{\lambda_i}] / \Delta \lambda \quad (3)$$

式中,  $(\lg R_{\lambda_i})$  为波长  $i$  与波长  $i+1$  之间的对数一阶微分光谱;  $\lg R_{\lambda_i}$  与  $\lg R_{\lambda(i+1)}$  分别为波长  $i$  与波长  $i+1$  求对数后的光谱反射率,  $\Delta \lambda$  为波长  $i+1$  与波长  $i$  之间的波长差值。

#### 1.4 逐步判别分析法

采用 SPSS 软件进行逐步判别分析, 判别函数的系数选 Fisher 判别方程的系数, 采用 Mahalanobis 距离方法 (即马氏距离<sup>[25]</sup>) 逐步选择变量。计算公式如下:

$$MD_k = \sqrt{(X_k - \mu)^T \Sigma^{-1} (X_k - \mu)} \quad (4)$$

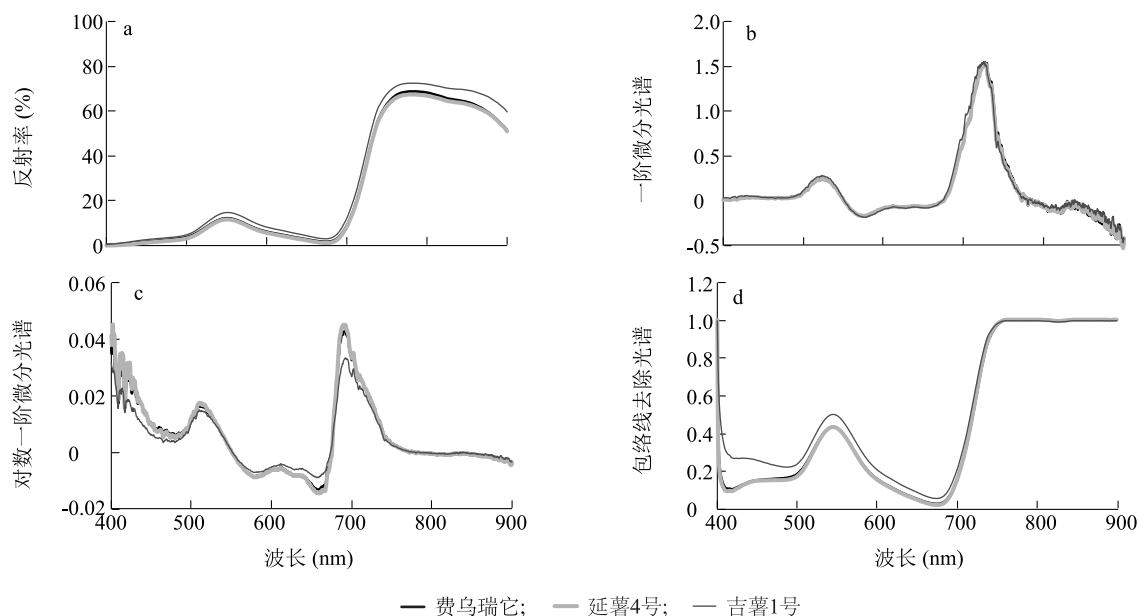
式中,  $MD_k$  为不同光谱曲线波段的马氏距离;  $X_k$  为不同光谱曲线在  $k$  波段的差值矩阵;  $k$  为均值向量;  $\Sigma^{-1}$  为协方差矩阵。

选取差异显著波段时, 为剔除差异不显著的波段, 规定马氏距离值要高于各波段的平均值。同时, 为便于地物光谱仪实测光谱数据与高光谱遥感数据相结合, 规定马氏距离值高的波段必须连续出现 10 nm 以上方可入选。

## 2 结果与分析

### 2.1 光谱数据处理分析

本研究以 2017 年 7 月光谱数据为例进行具体的描述分析。原始光谱数据 (图 1a) 中, 晚熟品种延薯 4 号 7 月份光谱与其他 2 种马铃薯的光谱差异较大。延薯 4 号的反射率光谱曲线总体上高于其他 2 种马铃薯, 在 750~850 nm 附近, 费乌瑞它反射率稍高于吉薯 1 号。一阶微分处理 (图 1b) 对于区分 3 种马铃薯曲线作用不大。总体上, 相对于费乌瑞它与吉薯 1 号, 延薯 4 号的红边位置更加靠近蓝色波段。对数一阶微分处理 (图 1c) 后 3 种马铃薯光谱曲线差异比较明显。400~500 nm 处, 延薯 4 号光谱曲线明显低于其他 2 种马铃薯, 而在 550~670 nm, 光谱曲线较高。3 种马铃薯光谱曲线均在 700 nm 左右达到峰值, 此处 3 种马铃薯的光谱曲线差异明显。由图 1d 可知, 包络线去除能够进一步增加 400~700 nm 内延薯 4 号与其他 2 种马铃薯之间的光谱差异。



a:原始光谱;b:一阶微分光谱;c:对数一阶微分光谱;d:包络线去除光谱。

图1 3种马铃薯冠层光谱数据

Fig.1 Canopy spectra of three kinds of potatoes

### 2.2 利用马氏距离法选取特征波段

特征变量的选择是农作物遥感分类的重要步骤, 有效地使用多种特征变量是提高农作物遥感分类精度的关键<sup>[26]</sup>。本研究借助马氏距离得到初步

的光谱数据差异波段。马氏距离越大, 说明 3 种马铃薯在此波段的差异性越大, 越容易区分。4 种光谱数据处理方法下的马氏距离由 SPSS 计算得到, 以 2017 年 7 月数据为例进行分析, 结果如图 2 所

示。原始光谱数据中,大于平均值的波段范围大致在 715~738 nm、760~840 nm 以及 873 nm 之后。一阶微分处理后大于均值的波段范围在 696~770 nm,770 nm 后的数据存在噪声,波动较大,因此不考虑在内。对数一阶微分处理后的光谱,在 425~447 nm 波动较大,但存在连续大于平均值的波段,520

nm 处超过平均值的波段范围小于 10 nm,忽略不计。其他波段马氏距离大于均值的波段范围处于 660~678 nm 以及 687~736 nm。包络线去除后,400~446 nm 马氏距离大于均值,大于均值的 2 个波段分别位于 655~695 nm 以及 731~748 nm。

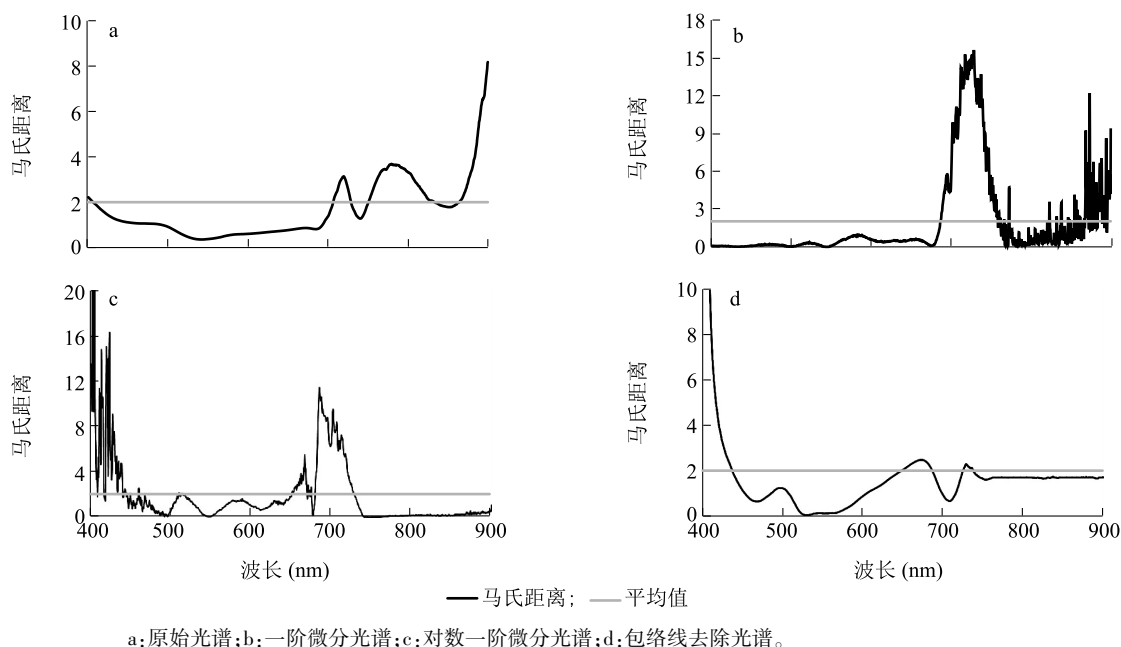


图2 不同预处理光谱的马氏距离

Fig.2 Mahalanobis distance obtained from spectra processed by different pretreatment methods

### 2.3 判别结果及精度分析

采用逐步判别法对所选取的波段进行进一步选择,得到能够成功区分3种马铃薯光谱的特征波段,具体如表1所示。逐步判别分析法选取的有效特征波段范围多集中于红光波段与近红外波段。同时,6月份数据经过对数一阶微分及包络线去除处理后,也得到了一些位于绿光波段550 nm左右的特征波段,这与其他领域已有的研究结果一致<sup>[14,24]</sup>。选取的特征波段的判别精度如表2所示。3种马铃薯光谱之间的差异程度随生育期不断变化。6月份,4种

预处理方法下的判别精度较低。包络线去除法处理后的数据判别精度最高,为75.9%,而一阶微分变换后的数据判别精度仅为46.2%;7月份,3种马铃薯的光谱数据差异开始扩大,多种方法下的判别精度均升高,其中对数一阶微分处理后的识别精度达87.7%,原始光谱识别精度次之,为76.3%,一阶微分及包络线去除后的识别精度约68.0%;8月份原始光谱处理下的识别精度为81.8%,一阶微分及对数一阶微分等其他3种方法的识别精度为60.0%左右。

表1 根据马氏距离选取的特征波段

Table 1 Characteristic bands selected by Mahalanobis distance

时间	特征波段 (nm)			
	原始光谱	一阶微分	对数一阶微分	包络线去除
6月	884~899	728~743	564~574, 680~700, 710~720, 730~740	532~542, 670~690
7月	707~717, 762~772, 792~802	718~728, 738~748, 758~772	657~667, 699~709	731~748
8月	564~581, 647~657	741~751	675~685	679~693



表 2 判别精度

Table 2 Discriminant accuracy using different methods

时间	识别精度 (%)			
	原始光谱	一阶微分	对数一阶微分	包络线去除
6 月	56.9	46.2	73.0	75.9
7 月	76.3	71.2	87.7	64.6
8 月	81.8	60.6	54.5	69.7
平均	71.67	59.33	71.73	70.07

总体上,不同预处理方法表现最佳时所对应的时间不同。包络线去除识别精度最高出现在 6 月份,一阶微分与对数一阶微分处理结果最佳识别时间为 7 月份,而 8 月份时原始光谱识别精度最高。通过计算得到 4 种预处理方法对应的平均识别精度,对数一阶微分处理与原始光谱的平均识别精度最高,分别为 71.73% 和 71.67%,其次是包络线去除法,其平均识别精度为 70.07%,一阶微分的判别精度最低仅为 59.33%。微分处理能够降低土壤等背景的影响,同时也会进一步放大光谱噪声。导致所选取特征波段不准确,判别精度降低。

### 3 讨论

马铃薯属于茄科作物,受块茎生长影响,在生长前期地下养分向上供应促进茎叶生长为马铃薯块茎形成做准备,而中后期(开花期后)主要转入供给地下茎促进果实膨大<sup>[22]</sup>,因此不能将现有的水稻、玉米等禾本科作物的相关研究成果简单地套用在马铃薯上。本研究通过研究 3 种马铃薯关键生育期内的高光谱数据,得到以下结论:(1)经过微分、包络线去除等处理后的光谱数据选取的特征波段能够提高马铃薯品种间的识别精度;(2)选取的 3 种马铃薯光谱差异显著,波段大多位于红光及近红外波段,也存在少数波段位于绿峰附近,这些可作为作物识别的重点波段;(3)3 种马铃薯光谱之间的差异程度随生育期不断变化。6 月份,4 种预处理方法下的判别精度较低。7 月份光谱数据差异开始扩大,多种方法下的判别精度均升高;(4)不同预处理方法表现最佳时所对应的时间不同。包络线去除识别精度最高出现在 6 月份,一阶微分与对数一阶微分处理结果最佳识别时间为 7 月份,而 8 月份时原始光谱识别精度最高。研究结果表明,借助高光谱数据中的特征波段可以识别不同品种的马铃薯,将作物识别

研究深入到同种作物不同品种之间,进一步丰富高光谱数据在作物识别的研究成果。

农作物遥感识别特征具有时间效应,不同作物的遥感识别特征随时间呈现动态变化的规律。根据作物之间的物候差异进行特征提取,是农业遥感中常用的方法。本研究通过分析比较多时期连续的光谱数据,找到目标作物之间差异最大的时期,对于确定最佳分类时相的遥感数据以及选择合适的数据更有实际指导意义。

不同光谱变换方法在一定程度上能消除外界扰动因素的影响,能够提高植物光谱分类识别精度。林海军等<sup>[13]</sup>将经过微分、包络线去除处理后的 4 种树种的高光谱数据用于树种识别,发现光谱变换处理可有效提高树种的识别精度。其中光谱二阶微分处理后的识别精度最高,达 95.5%;刘秀英等<sup>[27]</sup>研究发现,对数变换后取一阶微分的光谱及植被指数对杉木和马尾松的识别精度最高。本研究借鉴已有研究成果,选取表现最优的数据变换方法,即对数一阶微分与包络线去除法进行研究,得到的结果较为理想。

提取差异显著的特征波段的算法多种多样,况润元等<sup>[28]</sup>基于数据误差范围和植被光谱均值差提取湖泊湿地植被光谱差异波段;陈永刚等<sup>[29]</sup>基于均值置信区间带选择区分不同树种的特征波段,并通过 VBA 宏和 C# 开发程序筛选出最佳区分波段;胡远宁等<sup>[30]</sup>用光谱特征参量法、光谱指数法和光谱重排法提取光谱特征;王志辉等<sup>[12]</sup>利用光谱微分、相关性分析、主成分分析提取光谱特征参数。由于马氏距离在树种识别及草地分类等领域的广泛运用,同时,逐步判别分析法能够筛选出对不同作物识别能力最大的波段,并显示识别精度。因此本研究采用马氏距离法进行提取,并用逐步分析法检验识别精度。马氏距离法属于基于类间可分性选取最优区分波段的方法,这是高光谱最佳波段选择的一个方向。

张富华等<sup>[8]</sup>对草地种类进行识别,分类精度达 80%;刘秀英等<sup>[27]</sup>针对不同树种之间的识别精度均大于 81%;张丰等<sup>[16]</sup>对 6 种水稻进行识别分类,识别精度达 80% 以上。这主要是由于所研究的对象本身的光谱差异以及采用的数据变换方法、差异波段提取算法以及分类算法不同所引起的。

由于马铃薯的品种繁多,种植区域广泛以及地

区之间气候条件的差异,不同地区种植的品种不同。因此,今后的研究可以扩展到南方冬作区、中原二作区等区域。对于分类算法,相关研究结果表明,在训练样本小的情况下,神经网络法算法(NN)优于判别分析法(DA)。后续的研究也可以对比分析神经网络法算法与判别分析法波段的识别精度的差异。

## 参考文献:

- [1] ZOMER R J, TRABUCCO A, USTIN S L. Building spectral libraries for wetlands land cover classification and hyperspectral remote sensing[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(7): 2170-2177.
- [2] 孟禹弛, 侯学会, 王 猛. 不同生育期冬小麦叶面积指数高光谱遥感估算模型[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(5): 211-215.
- [3] 王秀珍, 黄敬峰, 李云梅, 等. 高光谱数据与水稻农学参数之间的相关分析[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2002, 28(3): 283-288.
- [4] 李永梅, 张立根, 张学俭. 水稻叶片高光谱响应特征及氮素估算[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(23): 210-213.
- [5] 唐延林, 黄敬峰. 农业高光谱遥感研究的现状与发展趋势[J]. *遥感技术与应用*, 2001, 16(4): 248-251.
- [6] NIDAMANURI R R, ZBELL B. Use of field reflectance data for crop mapping using airborne hyperspectral image[J]. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2011, 66(5): 683-691.
- [7] 何友铸, 张振乾, 官春云. 高光谱遥感技术在精细农业监测上的应用及展望[J]. *作物研究*, 2015, 29(1): 96-100.
- [8] 张富华, 黄明祥, 张 晶, 等. 利用高光谱识别草地种类的研究——以锡林郭勒草原为例[J]. *测绘通报*, 2014(7): 66-69.
- [9] 魏秀红, 靳瑰丽, 范燕敏, 等. 伊犁绢蒿荒漠草地物种光谱特征分析及识别初探[J]. *草业科学*, 2016, 33(10): 1924-1932.
- [10] 文畅平, 白银涌, 曾娟娟, 等. 天然草地分类的 Bayes 判别分析法[J]. *中国草地学报*, 2016, 38(3): 50-55.
- [11] 齐 浩, 王振锡, 岳 俊, 等. 基于叶片光谱特征的南疆盆地主栽果树树种遥感识别[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(12): 2141-2146.
- [12] 王志辉, 丁丽霞. 基于叶片高光谱特性分析的树种识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(7): 1825-1829.
- [13] 林海军, 张绘芳, 高亚琪, 等. 基于马氏距离法的荒漠树种高光谱识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(12): 3358-3362.
- [14] 舒 田, 岳延滨, 李莉婕, 等. 基于高光谱遥感的农作物识别[J]. *江苏农业学报*, 2016, 32(6): 1310-1314.
- [15] 王 崇, 吴 见. 农作物种类高光谱遥感识别研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(2): 29-33.
- [16] 张 丰, 熊 桢, 寇 宁. 高光谱遥感数据用于水稻精细分类研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2002, 24(10): 36-39.
- [17] 周 竹, 李小昱, 陶海龙, 等. 基于高光谱成像技术的马铃薯外部缺陷检测[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(21): 221-228.
- [18] 李小昱, 库 静, 颜伊芸, 等. 基于高光谱成像的绿皮马铃薯检测方法[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 228-233.
- [19] 王丽艳, 薛河儒, 王洪南. 高光谱数据降维对马铃薯分类的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(18): 229-232.
- [20] 胡耀华, 平学文, 徐明珠, 等. 高光谱技术诊断马铃薯叶片晚疫病的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(2): 515-519.
- [21] 何彩莲, 郑顺林, 周少猛, 等. 基于高光谱植被指数的马铃薯叶片叶绿素含量估测模型[J]. *华南农业大学学报*, 2016, 37(5): 45-49.
- [22] 孙 红, 郑 涛, 刘 宁, 等. 高光谱图像检测马铃薯植株叶绿素含量垂直分布[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 149-156.
- [23] 何彩莲, 郑顺林, 万年鑫, 等. 马铃薯光谱及数字图像特征参数对氮素水平的响应及其应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(9): 2930-2936.
- [24] 丁丽霞, 王志辉, 葛宏立. 基于包络线法的不同树种叶片高光谱特征分析[J]. *浙江农林大学学报*, 2010, 27(6): 809-814.
- [25] 钟清流, 蔡自兴. 基于统计特征的时序数据符号化算法[J]. *计算机学报*, 2008, 31(10): 1857-1864.
- [26] 贾 坤, 李强子. 农作物遥感分类特征变量选择研究现状与展望[J]. *资源科学*, 2013, 35(12): 2507-2516.
- [27] 刘秀英, 臧 卓, 孙 华, 等. 基于高光谱数据的杉木和马尾松识别研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2011, 31(11): 30-33.
- [28] 况润元, 曾 帅, 赵 哲. 基于实测高光谱数据的鄱阳湖湿地植被光谱差异波段提取[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(6): 1485-1490.
- [29] 陈永刚, 丁丽霞, 葛宏立, 等. 基于均值置信区间带的高光谱特征波段选择与树种识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(9): 2462-2466.
- [30] 胡远宁, 崔 霞, 孟宝平, 等. 甘南高寒草甸主要毒杂草光谱特征分析[J]. *草业科学*, 2015, 32(2): 160-167.

(责任编辑:陈海霞)