

刘 飞, 杨春艳, 谢建新. 傅里叶变换红外光谱结合判别分析法诊断蚕豆病虫害[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(3): 531-537.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2015.03.011

傅里叶变换红外光谱结合判别分析法诊断蚕豆病虫害

刘 飞¹, 杨春艳¹, 谢建新²

(1. 玉溪师范学院物理系, 云南 玉溪 653100; 2. 玉溪师范学院化学系, 云南 玉溪 653100)

摘要: 为建立一种基于傅里叶变换红外光谱(FTIR)结合判别分析的蚕豆病虫害诊断方法,以病虫害危害的蚕豆叶片样品 FTIR 数据为指标,采用逐步判别法,依据 Fisher 线性判别准则建立判别模型,对样品的病虫害种类和病原物类别进行诊断,比较了不同光谱范围和不同级别光谱数据以及挑选判别指标建立判别函数时 5 种方法的判别效果。结果表明,基于 FTIR 数据的判别分析能较好地诊断蚕豆病虫害种类和病原物类别,以波数 1 800~1 200 cm⁻¹的一阶导数光谱数据为判别指标进行诊断时效果较好;采用 Unexplained variance 逐步判别法对病虫害种类诊断时,正确率相对最高,为 93.1%;采用 Wilks' lambda 逐步判别法对病原物类别诊断时,正确率为 91.8%。FTIR 光谱技术与判别分析方法相结合,可为蚕豆病虫害诊断提供一种简便易行的方法。

关键词: 傅里叶变换红外光谱; 判别分析; 蚕豆; 病虫害; 诊断

中图分类号: O657.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2015)03-0531-07

Diagnosis of diseases and pests of broad bean by Fourier transform infrared spectroscopy combining discriminant analysis

LIU Fei¹, YANG Chun-yan¹, XIE Jian-xin²

(1. Department of Physics, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China; 2. Department of Chemistry, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China)

Abstract: To establish a method based on the fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) combined with stepwise discriminant analysis to diagnose the types of diseases and pests of broad bean, the spectral characteristics of the leaf samples attacked by diseases or pests were analyzed using the discriminant model based on the Fisher linear discriminant criterion. The discrimination effectiveness was compared for the range and level of spectral data, as well as the 5 discriminant indexes used for developing discriminant function. The results indicate that that the discriminant analysis based on FT-IR could diagnose the type of diseases and pests and the category of pathogens of broad bean, and the first derivative spectra data in the range of 1 800–1 200 cm⁻¹ should be selected as the discriminant index for best discrimination effectiveness. When dealing with the type identifications of diseases and pests of broad bean, the Unexplained variance method of stepwise discriminant analysis should be used, yielding a 93.1% accuracy. The Wilks' lambda method was better for the categori-

cal diagnosis of pathogens, yielding a 91.8% accuracy. As a simple and convenient method, the FTIR combined with discriminant analysis is capable of detecting the diseases and pests of broad bean.

Key words: fourier transform infrared spectroscopy; discriminant analysis; broad bean; disease and pest; diagnosis

收稿日期: 2014-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(21465024); 云南省教育厅项目(2013Y480)

作者简介: 刘 飞(1974-), 男, 云南江川人, 硕士, 副教授, 主要从事生物红外光谱分析研究。(Tel) 13987701535; (E-mail) yxtcl@163.com

蚕豆是中国重要的冷季作物,具有蛋白质含量高、易消化吸收、用途广以及深加工增值的特点,是典型的粮、菜、饲兼用型作物,具有较高经济价值^[1-2]。蚕豆的产量和品质受生产过程中生物和非生物胁迫因素的影响。生物胁迫因素包括真菌、细菌、病毒等病原物引起的病害以及农业害虫造成的虫害^[3]。在农业生产中,作物病虫害防治措施不恰当与随意使用农药现象普遍存在,这影响了作物产品质量,与国家发展绿色农业、高效农业、精细农业的目标不相符。其主要原因在于不能正确鉴别病虫害和判断病虫害的危害程度。及时诊断病虫害,判断病虫害的危害程度,采取必要措施,进行有效防治,对提高蚕豆的产量和质量具有重要意义。

目前对于作物病虫害的研究,主要包括通过农作物育种和田间管理减少病虫害以及加强病虫害监测两方面^[4]。农作物病虫害监测主要通过田间采样、生物学检测和显微镜观察等方法进行^[5-6]。生物学检测包括病原体分离、培养、接种鉴定等一系列过程;显微镜观察需经过固定、染色等较为复杂的过程,且主观性强,不能给出样品的化学信息^[5]。用于作物病虫害鉴定的方法还有生理生化测定技术、免疫血清检测技术、分子生物学手段等,这些方法同样需要分离提取,且操作繁琐,成本较高^[6-7]。近红外光谱、高光谱、多光谱成像技术已用于农作物病虫害的田间诊断研究^[8-9],但易受天气、作物覆盖程度、田间土壤、杂草等影响,不同测量条件与环境获得的检测模型不同,需要提高模型的通用性和稳定

性^[10]。傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 具有方便、快速、重复性好、取样量少等特点,已经用于真菌与细菌菌株^[11]、作物品种与产地^[12]等方面的鉴别。在蚕豆病虫害的研究方面,李志永等^[13]通过 FTIR 光谱结合主成分分析研究鉴别了蚕豆不同病害。主成分分析中通过主成分得分图进行分类鉴别,在病虫害种类较多、样品数量较大的情况下难于操作,需要在 FTIR 光谱的基础上结合其他方法继续研究。判别分析是多元统计分析中判断个体所属类型的应用性很强的统计方法^[14]。FTIR 光谱结合判别分析用于农产品分类鉴别已有报道^[15-16],但用于植物病虫害诊断鉴别的研究未见报道。本研究用蚕豆病虫害叶片样品的 FTIR 光谱及其一阶导数光谱和二阶导数光谱,结合判别分析对蚕豆病虫害种类和病原物类别进行诊断研究,同时比较挑选变量建立判别函数时不同方法的诊断效果,期望为蚕豆病虫害的诊断提供新的简便快捷方法。

1 材料与方法

1.1 材料

测试样品采自云南省陆良县、宜良县、富民县、通海县、新平县和玉溪市等地,包括结荚期正常蚕豆叶片和结荚期 11 种蚕豆病虫害叶片,共 110 个样品;11 种蚕豆病虫害的病原物涉及真菌、细菌、病毒和虫害等 4 种(表 1)。样品在自然条件下晾干待测。

表 1 试验样品名称及病原物类别

Table 1 Name and category of pathogen of each sample

样品名称	病原物类别	样品数量	样品名称	病原物类别	样品数量
正常叶片	-	8	斑潜蝇叶片	害虫	14
蚜虫叶片	害虫	9	赤斑病叶片	真菌	10
锈病叶片	真菌	14	叶烧病叶片	细菌	6
轮纹病叶片	真菌	7	黄萎病叶片	真菌	9
茎基腐病叶片	真菌	7	染色病叶片	病毒	11
黄化卷叶病叶片	病毒	6	褐斑病叶片	真菌	9

1.2 仪器与试剂

红外光谱仪为 PE 公司生产的 Frontier 型傅里叶变换红外光谱仪。采用 DTGS 检测器,光谱

分辨率为 4 cm^{-1} ,测量范围为 $4\ 000\sim 400\text{ cm}^{-1}$,扫描次数为 16 次。试验试剂溴化钾,纯度 99.9%。

1.3 试验方法和数据处理

取各样品叶片的病斑部分放入玛瑙研钵研磨成均匀细粉,再按 1 : 60 的比例加入溴化钾粉末搅磨均匀,然后压片测试。每个叶片样品压制 1 个扫描片,测试红外光谱,所有光谱都扣除背景,并在光谱软件 Omnic8.0 中进行自动基线校正、九点平滑和归一化等预处理。各样品红外光谱的一阶导数光谱和二阶导数光谱在 Omnic8.0 中计算。

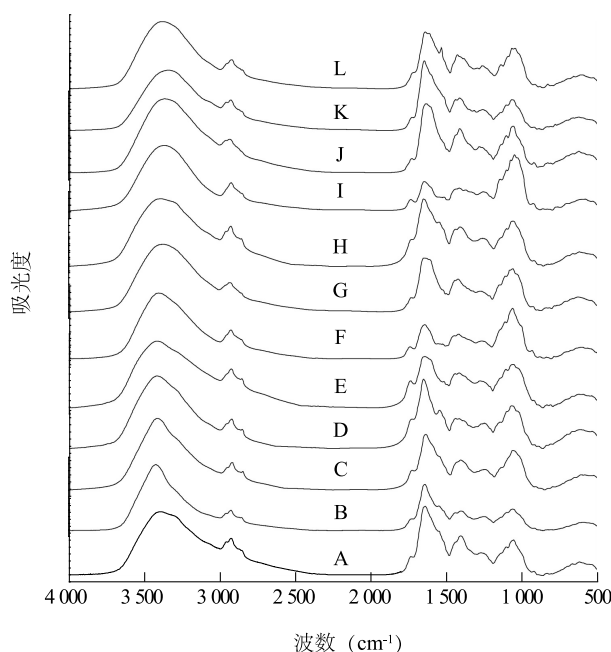
判别分析使用 SPSS V20.0 软件。以已知病虫害类别样品红外光谱数据为判别指标,采用逐步判别法,选择判别指标挑选方法,依据 Fisher 线性判别准则建立病虫害类别的判别函数,进行样品病虫害的预测诊断。在 SPSS V20.0 的判别分析模块中,判别指标挑选方法共设置有 5 种,即 Wilks' Lambda、Unexplained variance、Mahalanobis distance、Smallest F ratio 和 Rao's V。本研究中,事先将样品分为训练样本和测试样本,从病虫害样品中各抽取 5 个组成训练样本,共 60 个样品。测试样本由各种病虫害样品中余下的组成,共 50 个样品。

2 结果与分析

2.1 蚕豆病虫害叶片的红外光谱特征

图 1 为蚕豆正常叶片和病虫害叶片样品的红外光谱图。根据文献[12]、[13]将光谱中主要的光谱峰归纳如下:光谱在波数 $3\ 400\text{ cm}^{-1}$ 附近的强宽峰为 O-H 和 N-H 的伸缩振动吸收; $2\ 958\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\ 876\text{ cm}^{-1}$ 附近的弱吸收峰是甲基的 C-H 反对称和对称伸缩振动; $2\ 930\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\ 853\text{ cm}^{-1}$ 附近的弱吸收峰是亚甲基的 C-H 反对称和对称伸缩振动; $1\ 740\text{ cm}^{-1}$ 附近的弱吸收峰是脂类 C=O 的伸缩振动; $1\ 644\text{ cm}^{-1}$ 附近的强吸收峰是酰胺 I 带 C=O 的伸缩振动; $1\ 550\text{ cm}^{-1}$ 附近中等强度的吸收峰是酰胺 II 带 N-H 和 C-N 的吸收峰; $1\ 440\sim 1\ 330\text{ cm}^{-1}$ 主要为蛋白质、纤维素、木质素等受氧、氮原子影响的甲基和亚甲基对称弯曲振动以及甲基的 C-H 剪式振动; $1\ 280\text{ cm}^{-1}$ 附近出现的吸收峰是酰胺 III 带 C-N 的伸缩振动和 N-H 弯曲振动以及木质素中 C-O 伸缩振动的叠加;位于 $1\ 148\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 102\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 053\text{ cm}^{-1}$ 附近的阶梯峰,主要归属为纤维素、木质素等多糖类物质 C-O 和 C-O-C 的伸缩振动; 922 cm^{-1} 、 670 cm^{-1} 、

622 cm^{-1} 等弱峰为糖环或长链亚甲基中 C-C 的伸缩振动; 836 cm^{-1} 附近的弱吸收峰为木质素中 C-H 平面弯曲振动。上述光谱特征表明蚕豆叶片中主要含蛋白质类物质、纤维素和木质素等多糖类物质。



A: 正常叶片; B: 蚜虫叶片; C: 锈病叶片; D: 轮纹病叶片; E: 茎基腐病叶片; F: 黄化卷叶病叶片; G: 斑潜蝇叶片; H: 赤斑病叶片; I: 叶烧病叶片; J: 黄萎病叶片; K: 染色体病叶片; L: 褐斑病叶片。

图 1 蚕豆正常叶片和病虫害叶片样品的红外光谱图

Fig. 1 FTIR spectra for healthy leaves and diseases and pests-infected broad bean leaves

2.2 不同范围的红外光谱对蚕豆病虫害种类的判别分析

分别选择 $1\ 800\sim 950\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 800\sim 1\ 200\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 800\sim 1\ 500\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\ 500\sim 1\ 200\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\ 200\sim 950\text{ cm}^{-1}$ 5 个不同范围的测试样品红外光谱数据作为判别指标,按照逐步判别法,选用 Wilks' Lambda 方法挑选变量,依据 Fisher 线性判别准则建立病虫害类别的判别函数,对样品进行判别诊断。5 个不同范围的红外光谱数据对蚕豆病虫害种类的判别分析结果见表 2。由表 2 可知, $1\ 800\sim 1\ 200\text{ cm}^{-1}$ 光谱范围的数据所建立的判别函数对测试样品的诊断效果相对较好,训练样本回判的正确率为 98.3%,测试样本预测的正确率为 82.0%,总体判别正确率为 90.9%。

表 2 不同范围的红外光谱对蚕豆病虫害种类的判别分析结果

Table 2 Discriminant analysis of the category of diseases and pests of broad bean based on different range spectrum

光谱波数范围 (cm^{-1})	训练样本回判			测试样本预测			总体判别 正确率(%)
	数目	误判数	正确率(%)	数目	误判数	正确率(%)	
1 800 ~ 950	60	0	100.0	50	11	78.0	90.0
1 800 ~ 1 200	60	1	98.3	50	9	82.0	90.9
1 800 ~ 1 500	60	9	85.0	50	23	54.0	70.9
1 500 ~ 1 200	60	0	100.0	50	15	70.0	86.4
1 200 ~ 950	60	1	98.3	50	14	72.0	86.4

2.3 不同级别的红外光谱对蚕豆病虫害种类的判别分析

分别以各样品在 1 800 ~ 1 200 cm^{-1} 的红外光谱、一阶导数红外光谱和二阶导数红外光谱数据作为判别指标,按照逐步判别法,选用 Wilks' Lambda 方法挑选变量,依据 Fisher 线性判别准则建立病虫害类别的判别函数对样品进行判别诊断。3 种级别的红外光谱对蚕豆病虫害种类的判别分析结果见表 3。在表 3 中,一阶导数红外光谱数据所建立的判别函数对训练样本回判的正确率和对测试样本预测的正确率以及总体判别正确率都最高,红外光谱的次

之,且判别正确率与一阶导数红外光谱的较接近,表明红外光谱数据和一阶导数光谱数据都适合作为蚕豆病虫害诊断的判别指标。导数光谱能放大光谱特征,同时也会降低光谱的信噪比。不同病虫害的蚕豆叶片中主要物质成分差异不大,光谱信息中反映不同病虫害的信息相对较弱,导数光谱放大光谱特征的同时,也会降低甚至掩盖不同病虫害的光谱信息。因此,二阶导数光谱数据作为判别指标所建立的判别函数,诊断效果较差。相对而言,3 种级别的光谱数据中,一阶导数光谱数据更适合于用作判别指标诊断蚕豆病虫害。

表 3 不同级别的红外光谱对蚕豆病虫害种类的判别分析结果

Table 3 Discriminant analysis of the category of broad bean diseases and pests based on different level spectrum

数据类型	训练样本回判			测试样本预测			总体判别 正确率(%)
	数目	误判数	正确率(%)	数目	误判数	正确率(%)	
红外光谱	60	1	98.3	50	9	82.0	90.9
一阶导数光谱	60	0	100.0	50	8	84.0	92.7
二阶导数光谱	60	0	100.0	50	21	58.0	80.9

2.4 不同判别指标挑选方法对病虫害诊断效果的比较

以 1 800 ~ 1 200 cm^{-1} 的一阶导数光谱数据作为判别指标,采用逐步判别法,用不同方法挑选变量,按照 Fisher 线性判别准则分别建立判别函数,对样品进行诊断比较。同时采用五折交叉验证法检验不同方法所建立的判别函数的稳定性^[17]。由表 4 可知,5 种方法所建立的判别函数在 5 种训练样本情况下对训练样本的回判正确率都是 100%,但对测试样本的预测正确率差异明显。选择 Unexplained variance 方法时,预测正确率最高,为 84.8%;选择

Wilks' lambda 方法时,预测正确率次高,为 80.0%;选择 Mahalanobis distance 方法时,预测正确率最低,为 73.2%。同种方法在五折交叉验证的不同训练样本情况下,对测试样本的预测正确率差异,反映了这种方法所建立的判别函数的稳定性。选择 Wilks' lambda 方法时,5 种训练样本情况下对测试样本的预测正确率差异相对最小,说明 Wilks' lambda 方法所建立的判别函数相对最稳定。综合不同方法在 5 种训练样本情况下对测试样本预测的平均正确率、最高正确率和最低正确率考虑,在用基于一阶导数红外光谱数据的判别分析方法对蚕豆病

虫害进行诊断时,选用 Unexplained variance 逐步判别法最合适,其次为 Wilks' lambda 逐步判别法。

表 4 挑选判别指标不同方法对蚕豆病虫害种类的判别分析结果

Table 4 Discriminant analysis of the category of broad bean diseases and pests based on ways to choose discriminant indexes

判别指标挑选方法	训练样本情况 ¹⁾	训练样本回判			测试样本预测				平均总正确率 (%)
		数目	误判数	正确率 (%)	数目	误判数	正确率 (%)	平均正确率 (%)	
Wilks' lambda	1	60	0	100	50	8	84.0		
	2	60	0	100	50	8	84.0		
	3	60	0	100	50	15	70.0		
	4	60	0	100	50	10	80.0		
	5	60	0	100	50	9	82.0	80.0	90.9
Unexplained variance	1	60	0	100	50	5	90.0		
	2	60	0	100	50	5	90.0		
	3	60	0	100	50	15	70.0		
	4	60	0	100	50	11	78.0		
	5	60	0	100	50	2	96.0	84.8	93.1
Mahalanobis distance	1	60	0	100	50	13	74.0		
	2	60	0	100	50	12	76.0		
	3	60	0	100	50	16	68.0		
	4	60	0	100	50	17	66.0		
	5	60	0	100	50	9	82.0	73.2	87.8
Smallest F ratio	1	60	0	100	50	13	74.0		
	2	60	0	100	50	12	76.0		
	3	60	0	100	50	16	68.0		
	4	60	0	100	50	12	76.0		
	5	60	0	100	50	9	82.0	75.2	88.7
Rao's V (R=0)	1	60	0	100	50	6	90.0		
	2	60	0	100	50	8	84.0		
	3	60	0	100	50	14	72.0		
	4	60	0	100	50	22	56.0		
	5	60	0	100	50	15	70.0	74.0	88.2

¹⁾ 每种训练样本均由 60 个样品组成,从各种病虫害样品中各抽取 5 个;5 种样本情况中,各样品至少有 1 次作为训练样本参与建模,至少有 1 次作为测试样本进行预测。

2.5 一阶导数光谱结合判别分析对蚕豆病虫害病原物类别的诊断

以样品在 $1\ 800 \sim 1\ 200\ \text{cm}^{-1}$ 的一阶导数红外光谱数据作为判别指标,每种病虫害选择 5 个样品作为训练样本,其余样品作为测试样本,采用逐步判别法,判别指标挑选方法分别选择 Unexplained variance 和 Wilks' lambda,按照 Fisher 线性判别准则建立病虫害病原物类别判别函数,对样品病虫害病原

物类别进行诊断,结果见表 5。采用 Unexplained variance 方法时,训练样本回判正确率为 100%,测试样本预测正确率为 70.0%,总正确率为 86.4%;采用 Wilks' lambda 方法时,训练样本回判正确率为 98.3%,测试样本预测正确率为 84.0%,总正确率为 91.8%。说明通过样品的一阶导数红外光谱数据结合判别分析方法能鉴别蚕豆病虫害的病原物类别,Wilks' lambda 逐步判别法诊断效果相对较好。

表 5 一阶导数红外光谱对蚕豆病虫害原物类别的判别分析结果

Table 5 Discriminant analysis of the category the of pathogen of broad bean diseases and pests based on first derivative spectrum

判别指标的挑选方法	训练样本回判			测试样本预测			总体正确率 (%)
	数目	误判数	正确率 (%)	数目	误判数	正确率 (%)	
Unexplained variance	60	0	100.0	50	15	70.0	86.4
Wilks' lambda	60	1	98.3	50	8	84.0	91.8

3 讨论

利用 FTIR 光谱技术测试了结荚期蚕豆正常叶片和 11 种蚕豆病虫害叶片共 110 个样品的红外光谱,通过光谱软件 Omnic8.0 计算了各样品的一阶导数红外光谱和二阶导数红外光谱。以红外光谱数据为判别指标,按照逐步判别法,依据 Fisher 线性判别准则对蚕豆病虫害种类进行诊断研究,比较了 5 个不同光谱范围、3 种级别光谱、5 种判别指标挑选方法所建立的判别函数的鉴别诊断效果,同时按照 5 折交叉验证法检验了 5 种判别指标挑选方法的稳定性。结果表明,基于蚕豆病虫害叶片的一阶导数红外光谱数据结合逐步判别分析法能较好诊断样品的病虫害种类和病原物类别,以 $1\ 800 \sim 1\ 200\ \text{cm}^{-1}$ 的光谱数据为判别指标,采用 Unexplained variance 逐步判别法对病虫害种类诊断时,正确率相对最高,为 93.1%;采用 Wilks' lambda 逐步判别法对病原物类别诊断时,正确率为 91.8%。FTIR 光谱技术具有方便快捷的特点,与判别分析方法相结合,可为蚕豆病虫害诊断提供一种简便易行的方法。

逐步判别法是一种有监督的模糊识别统计方法,需要根据已经掌握的事物分类情况,对每个类别的若干样本的特征指标,按照某种挑选指标的方法将样本的变量信息逐一进行检验,筛选出对样本分类影响较大的指标建立判别函数,进行分类鉴别。因此,使用逐步判别法来对事物进行分类鉴别时,必须事先掌握一批按事物特征分类的样本。蚕豆病虫害叶片的 FTIR 光谱是叶片物质组分信息的综合反映,包含着品种、产地、栽培方式、病虫害等信息。这些信息隐藏在样品光谱中,相互交织,通过对大量样品光谱的统计分析,可以挖掘出相关特征信息用以相关的识别。基于病虫害危害叶片 FTIR 光谱进行

病虫害类别判别分析时,为了能建立好的判别模型,准确区分病虫害类别,采集样本量必须大,且同种病虫害样品覆盖的品种和产地要多,用以建立判别函数的训练样本应尽量包含各品种和各产地的样品。在 SPSS V20.0 判别分析模块的判别输出结果中,对待判样品的分类判别输出了 2 个结果,即最大可能判别结果和次大可能判别结果。本试验的判别分析结果,都是按最大可能判别结果计算的。但我们注意到最大可能判别结果和次大可能判别结果相结合,能帮助提高待判样品判别结果的相对准确性,缩小待判样品分类所属范围。例如在本研究中以 $1\ 800 \sim 950\ \text{cm}^{-1}$ 光谱数据作为判别指标,按照 Wilks' lambda 逐步判别法,依据 Fisher 线性判别准则建立病虫害种类的判别函数对样品进行诊断鉴别时,对测试样本预测的最大可能判别结果中判别错误的有 11 个,预测正确率为 78.0%,而在最大可能判别结果和次大可能判别结果中都判别错误的减少到 3 个,预测的相对正确率增加到 96.0%。

参考文献:

- [1] 吴春芳,卞晓春,曹云英,等. 设施条件对蚕豆冻害及鲜荚产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(10): 101-105.
- [2] 秀洪学,陈建斌,汤东生,等. 氮肥对蚕豆结瘤和植株生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(1): 82-83.
- [3] 王晓鸣,朱振东,段灿星,等. 蚕豆豌豆病虫害鉴别与控制技术[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [4] MAY C L, JUMEL S, SCHOENY A, et al. Ascochyta blight development on a new winter pea genotype highly reactive to photoperiod under field conditions[J]. Field Crops Research, 2009, 111(1-2): 32-38.
- [5] PORTA-PUGLIA A, ARAGONA M. Improvement of grain legumes general part: diseases[J]. Field Crops Reserch, 1997, 53(1-3): 17-30.
- [6] EGAN M J, TALBOT N J. Genomes, free radicals and plant cell

- invasion; recent developments in plant pathogenic fungi[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2008, 11(4): 367-372.
- [7] FERRER R M, ESCRIBU F, LUIS-ARTEAGA M, et al. New molecular methods for identification of broad bean wilt virus 1[J]. Molecular and Cellular Probes, 2008, 22(4): 223-227.
- [8] 陈 兵,韩焕勇,王方永,等. 利用光谱红边参数监测黄萎病棉叶叶绿素和氮素含量[J]. 作物学报,2013, 39(2): 319-329.
- [9] WIJEKOON C P, GOODWI P H, HSIANG T. Quantifying fungal infection of plant leaves by digital image analysis using Scion Image software[J]. Journal of Microbiological Methods, 2008, 74(2-3): 94-101.
- [10] 姚云军,秦其明,张自力,等. 高光谱技术在农业遥感中的应用研究进展[J]. 农业工程学报, 2008,24(7): 301-306.
- [11] AL-QADIRI H M, LIN M, CAVINATO A G, et al. Fourier transform infrared spectroscopy, detection and identification of *Escherichia coli* O157 : H7 and *Alicyclobacillus* strains in apple juice [J]. International Journal of Food Microbiology, 2006, 111(1): 73-80.
- [12] 孙素琴,周 群,陈建波. 中药红外光谱分析与鉴定[M]. 北京:化学工业出版社, 2010.
- [13] 李志永,刘 刚,李 伦,等. 蚕豆病害叶的 FTIR 研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2012,32(5): 1217-1210.
- [14] 何国民. 应用统计学案例教程[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2013.
- [15] 吴全金,董青华,孙威江. 基于傅里叶红外光谱的多茶类判别研究[J]. 茶叶科学, 2014, 34(1): 63-70.
- [16] 刘 飞,王元忠,杨春艳,等. 基于红外光谱的石斛品种判别分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(11): 2968-2972.
- [17] 张新新,李 雨,纪玉佳,等. 主成分-线性判别分析在中药药性识别中的应用[J]. 山东大学学报:医学版, 2012, 50(1): 143-147.

(责任编辑:张震林)