不同高光谱特征参数区分马铃薯品种的优劣势分析

段丁丁[1]，何英彬[1,2*]，罗善军[2]，王卓卓[2]

1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所，北京　100081
2. 天津工业大学管理学院，天津　300387

摘　要　对马铃薯关键生育期的高光谱遥感图像进行特征提取和分析，提出了一种快速区分不同马铃薯品种的方法。以两个早熟和中熟马铃薯品种为研究对象，采集其块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期的冠层反射光谱曲线，对实测反射光谱曲线进行Savitzky-Golay滤波平滑和一阶微分处理，以高光谱位置参数、振幅参数、面积参数、宽度参数和反射率参数为研究指标，根据21个高光谱特征参数的贡献率大小，评价了其区分不同马铃薯品种的优劣。结果表明：(1)同一类高光谱特征参数在不同生育期区分马铃薯品种的能力不同：高光谱位置参数、宽度参数和反射率参数在块茎膨大期区分不同马铃薯品种的能力最强，淀粉积累期次之；高光谱振幅参数和面积参数在淀粉积累期的区分能力最强，块茎膨大期次之，五类高光谱特征参数在块茎形成期的区分能力均最差。(2)同一生育期5类高光谱特征参数区分马铃薯品种的能力也存在差异。在块茎形成期，五类高光谱特征参数的区分能力从强到弱依次为：反射率参数＞振幅参数＞面积参数＞宽度参数＞位置参数；在块茎膨大期和淀粉积累期，从强到弱依次为：面积参数＞振幅参数＞反射率参数＞宽度参数＞位置参数。综合能力从强到弱依次为：面积参数＞振幅参数＞反射率参数＞宽度参数＞位置参数。

关键词　光谱特征；光谱参数；马铃薯品种；滤波处理；一阶微分
中图分类号：S127　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2018)10-3215-06

引　言

马铃薯是人类四大粮食作物之一，仅次于水稻、小麦、玉米。中国是世界上种植马铃薯面积最大的国家，年产量近9 000万吨，位居世界第一。从2015年起，中国启动马铃薯主粮化战略，推进把马铃薯加工为主食。马铃薯主粮化不仅有助于推进种植业结构调整，实现农业可持续发展，而且有助于改善和丰富我国居民膳食营养结构[1]。随着生物技术的迅速发展，马铃薯的品种日益多样化，传统的鉴别方法已经无法满足日常生产的需要，因此提出一种快速鉴别不同马铃薯品种的方法是非常有必要的。

近年来，高光谱技术迅速发展，利用高光谱既可以检测农作物的损伤[2-3]，也可以对农产品的质量和成熟度进行定量分析[4]。对于马铃薯而言，目前研究集中在利用高光谱对马铃薯的块茎进行内外部无损检测[5-6]，并且在马铃薯的病害检测方面取得了巨大进步[7]。陈争光等[8]利用可见近红外光谱分析技术对马铃薯的块茎进行了品种鉴别，识别正确率达到100%。高光谱特征参数具有易获取、准确、动态监测农作物生长状况的优势，但利用其作为评价指标对各种农作物进行品种鉴别的研究还未见报道。本工作采集不同马铃薯品种块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期的冠层反射光谱曲线，在对其进行S-G滤波后，对其进行一阶求导，以五类高光谱特征参数为评价指标，分析了不同高光谱特征参数区分不同马铃薯品种的能力，为其他作物不同种类的区分提供参考。

1　实验部分

1.1　试验区及材料

试验区位于吉林省公主岭市吉林省农业科技示范园区，试验研究的两个马铃薯品种为延薯4号和费乌瑞它，延薯4号为中熟品种，是吉林省种植最为广泛的马铃薯品种；费乌瑞它为典型的早熟品种。每个品种均设置三个试验小区，每个试验小区的水肥条件等均保持一致。

1.2　冠层光谱数据获取

分别采集两个马铃薯品种在其块茎形成期、块茎膨大期

收稿日期：2017-10-16，**修订日期**：2018-01-30
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(2016-2020，IARRP2017-727-1)资助
作者简介：段丁丁，1994年生，中国农业科学院研究生　　e-mail：1191058832@qq.com
*通讯联系人　　e-mail：heyingbin@caas.cn

和淀粉积累期的冠层光谱数据。冠层反射率光谱采集使用美国 Ocean Optics 公司的 USB2000+光谱仪，采样间隔为 0.44 nm，波段范围为 350～1 050 nm。所有光谱数据的测量均选择天气晴朗、无风的条件下进行，采集时传感器探头垂直向下，距离冠层垂直高度为 50 cm，时间范围为 10:00—14:00；每个小区观测 3 个点，每个点观测 5 条光谱曲线。剔除差异明显的光谱数据，取剩余数据的均值作为冠层光谱反射率值，测量过程中及时进行参考白板校正。

1.3 光谱数据平滑处理

在测量过程中，由于光谱仪的灵敏性及外界条件的干扰，使采集到的光谱曲线存在噪声干扰，为了后续处理，需对光谱曲线进行滤波平滑处理。Savitzky-Golay 滤波法是 Savizky 和 Golay 于 1964 年提出的，它是一种通过局部多项式回归模型来平滑时序数据的时域低通滤波方法，该方法的最大优点在于滤波噪声的同时可以确保信号的形状和宽度不变。

1.4 一阶微分处理

光谱微分技术是高光谱遥感数据最主要的分析技术之一。对光谱曲线进行微分或采用数学函数估算整个光谱上的斜率，由此得到光谱曲线斜率称微分光谱，又叫导数光谱[9]。光谱数据的微分采用差分计算(即一阶导数光谱)，计算公式如下

$$R'(\lambda_i) = \frac{R\lambda_{i+1} - R\lambda_{i-1}}{\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}}$$

式中：R'为反射率光谱的一阶导数光谱，R 为反射率，λ 为波长，i 为光谱通道。

1.5 高光谱特征参数

本文把定量描述植被光谱特征的高光谱特征参数分为 5 类：位置参数、振幅参数、面积参数、宽度参数和反射率参数。

1.5.1 位置参数

红边位置：红边范围内(680～760 nm)最大一阶微分值所对应的波长；红谷位置：波长(650～690 nm)范围内最小波段反射率值对应的波长；黄边位置：黄边范围内(560～590 nm)最大一阶微分值所对应的波长；蓝边位置：蓝边范围内(490～530 nm)最大一阶微分值所对应的波长；绿峰位置：波长(510～560 nm)范围内最大波段反射率值对应的波长。

1.5.2 振幅参数

红边振幅：红边范围内(680～760 nm)最大一阶微分值；黄边振幅：黄边范围内(560～590 nm)最大一阶微分值；蓝边振幅：蓝边范围内(490～530 nm)最大一阶微分值；最小振幅：波长(680～750 nm)范围内最小一阶微分值。

1.5.3 面积参数

红边面积：红边范围内(680～760 nm)一阶微分值的总和；黄边面积：黄边范围内(560～590 nm)一阶微分值的总和；蓝边面积：蓝边范围内(490～530 nm)一阶微分值的总和；绿峰面积：波长(510～560 nm)范围内一阶微分值的总和。

1.5.4 反射率参数

绿峰反射率 R_g：绿光波长(510～560 nm)范围内最大的波段反射率；红谷反射率 R_o：波长(650～690nm)范围内最小的波段反射率；R_g/R_o：绿峰反射率(R_g)与红谷反射率(R_o)的比值；$(R_g-R_o)/(R_g+R_o)$：绿峰反射率(R_g)与红谷反射率(R_o)的归一化值。

1.5.5 宽度参数包括常用的红边宽度

红边起点(即红谷位置)到红边位置的波段间隔；在红边宽度的基础上，构建了其他 3 个高光谱宽度参数，黄边宽度：黄边起点(560 nm)到黄边位置的波段间隔；蓝边宽度：蓝边起点(490 nm)到蓝边位置的波段间隔；绿峰宽度：蓝边位置到黄边位置的波段间隔。

根据不同马铃薯品种间高光谱特征参数的贡献率(contribution rate)的大小来评价其区分马铃薯品种的能力。对于高光谱位置和宽度参数，其贡献率(CR)的计算公式为

$$CR = \frac{|EV_i - MV_i|}{100} \times 100\%$$

对于高光谱振幅、面积和反射率参数，其贡献率(CR)的计算公式为

$$CR = \frac{|EV_i - MV_i|}{(EV_i + MV_i)} \times 100\%$$

其中 EV 和 MV 分别代表早熟品种费乌瑞它和中熟品种延薯 4 号，i 表示不同的高光谱特征参数值。

2 结果与讨论

2.1 原始冠层光谱曲线 S-G 滤波处理

图 1 为延薯 4 号和费乌瑞它块茎形成期的原始冠层反射光谱曲线，图 2 为 S-G 滤波处理后的冠层反射光谱曲线。对

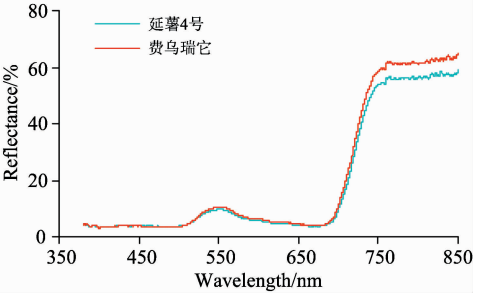

图 1 原始冠层反射光谱曲线

Fig. 1 Reflectance spectra of original canopy

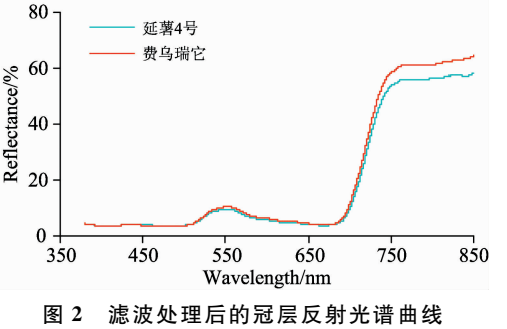

图 2 滤波处理后的冠层反射光谱曲线

Fig. 2 Canopy reflectance spectra after filtering

比图 1 和图 2 可知：S-G 滤波能够有效去除噪声，在蓝色波段、红色波段和近红外波段最为明显。

2.2　不同品种同一生育期一阶导数曲线对比

图 3 为经 S-G 滤波处理后的中熟品种延薯 4 号和早熟品种费乌瑞它在同一生育期的一阶导数光谱曲线对比。

一阶导数曲线可以抑制或去除无关信息，突出感兴趣信息。从图 3 可知：导数光谱曲线可以清楚准确的确定光谱曲线的弯曲点、最大和最小反射率的波长位置等光谱特征，在不同生育期，中熟品种延薯 4 号和早熟品种费乌瑞它的一阶导数光谱曲线均表现出“两峰”和“一谷”的特征，分别对应马铃薯的蓝边、黄边和红边位置。由于品种之间的差异，其一阶导数值即蓝边幅值、黄边幅值和红边幅值的大小不同。在块茎形成期，不同品种之间的差异均较小；在块茎膨大期，中熟品种的蓝边、黄边和红边幅值均小于早熟品种；在淀粉积累期，中熟品种的红边幅值要明显小于早熟品种，蓝边和黄边幅值的差异有所减小。

2.3　高光谱特征参数区分不同马铃薯品种的能力对比

从表 1 可知：不同马铃薯品种的高光谱位置参数在不同生育期表现出不同的差异特征。在块茎形成期，中熟品种延薯 4 号和早熟品种费乌瑞它的红谷位置和绿峰位置相同，其他位置参数差异较小；在块茎膨大期，黄边位置的差异明显，其他高光谱位置参数差异较小或不存在差异；在淀粉积累期，红谷位置相同，其他 4 个位置参数的差异均很小。在马铃薯的 3 个关键生育期，中熟品种延薯 4 号的红边位置和红谷位置均小于早熟品种费乌瑞它，黄边位置和蓝边位置均大于早熟品种费乌瑞它，绿峰位置没有表现出明显的规律。

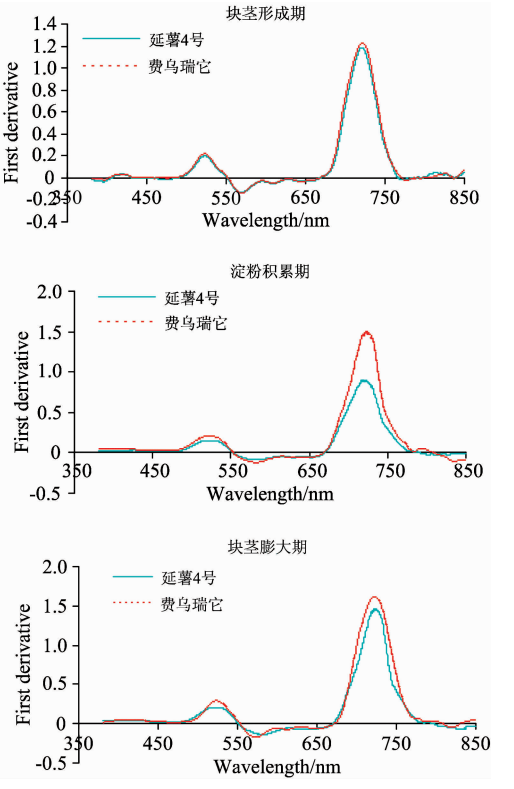

图 3　不同马铃薯品种在同一生育期的一阶导数曲线

Fig. 3　The first derivative curve of different potato varieties at the same growth period

表 1　高光谱位置参数的对比

Table 1　Comparison of hyperspectral position parameters

	块茎形成期			块茎膨大期			淀粉积累期		
延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	
红边位置	719	720	1	723	724	1	720	723	3
红谷位置	670	670	0	670	674	4	670	670	0
黄边位置	569	568	1	580	570	10	582	581	1
蓝边位置	523	521	2	523	523	0	523	520	3
绿峰位置	551	551	0	550	554	4	552	551	1
总和			4			19			8

从高光谱位置参数在不同生育期的贡献率大小可知，高光谱位置参数在块茎膨大期区分马铃薯品种的能力最优，在块茎形成期的能力最差。

从表 2 可知：在块茎形成期，中熟品种延薯 4 号和早熟品种费乌瑞它的 4 个高光谱宽度参数之间的差异均很小；在块茎膨大期，两者的蓝边宽度相同，而中熟品种延薯 4 号的红边宽度、黄边宽度和绿峰宽度均明显大于早熟品种费乌瑞它；在淀粉积累期，不同品种之间的 4 个高光谱宽度参数之间的差异又有所减小。在马铃薯的 3 个关键生育期，中熟品种延薯 4 号的黄边宽度和蓝边宽度均大于早熟品种费乌瑞它；绿峰宽度和红边宽度没有特定的规律。

高光谱宽度参数在不同生育期的贡献率的变化趋势与高光谱位置参数的相同，在块茎膨大期的贡献率最大为 23%，即区分马铃薯品种的能力最优，在块茎形成期的贡献率最小。

从表 3 可知：在马铃薯块茎形成期，中熟品种延薯 4 号和早熟品种费乌瑞它的红边振幅、黄边振幅和蓝边振幅的差异均较选，最小振幅的差异较大；在块茎膨大期，两者的黄边振幅差异最大，其次为最小振幅和红边振幅，蓝边振幅的差异最小；在淀粉积累期，差异由大到小的顺序为：红边振幅＞黄边振幅＞蓝边振幅＞最小振幅。在马铃薯的 3 个关键生育期，中熟品种延薯 4 号的红边振幅、黄边振幅和蓝边振幅均小于早熟品种费乌瑞它；中熟品种的最小振幅在块茎形成期和块茎膨大期大于早熟品种，在淀粉积累期则小于早熟品种。

表 2 高光谱宽度参数的对比

Table 2 Comparison of hyperspectral width parameters

	块茎形成期			块茎膨大期			淀粉积累期		
	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%
红边宽度	49	50	1	53	50	3	50	53	3
黄边宽度	9	8	1	20	10	10	22	21	1
蓝边宽度	33	31	2	33	33	0	33	30	3
绿峰宽度	46	47	1	57	47	10	59	61	2
总和			5			23			9

表 3 高光谱振幅参数的对比

Table 3 Comparison of hyperspectral amplitude parameters

	块茎形成期			块茎膨大期			淀粉积累期		
	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%
红边振幅	1.214	1.252	1.54	1.464	1.703	7.55	0.901	1.492	24.70
黄边振幅	0.145	0.156	3.65	0.137	0.202	19.17	0.0872	0.126	18.20
蓝边振幅	0.216	0.228	2.70	0.202	0.206	0.98	0.156	0.198	11.86
最小振幅	0.0526	0.0455	7.24	0.16	0.103	9.22	0.146	0.165	6.11
总和			15.13			36.92			60.87

高光谱振幅参数区分不同马铃薯品种的贡献率随着生育期的推进，表现出明显的增大趋势，淀粉积累期的贡献率明显大于块茎形成期和块茎膨大期，即在淀粉积累期区分马铃薯的能力最优，其次为块茎膨大期，在块茎形成期的能力最差。

从表 4 可知：在块茎形成期，不同马铃薯品种的 4 个高光谱面积参数的差异均较小；在块茎膨大期，4 个面积参数的差异均明显增大，黄边面积和绿峰面积的差异最大；在淀粉积累期，红边面积和黄边面积的差异最大，蓝边面积和绿峰面积的差异有所减小。

表 4 高光谱面积参数的对比

Table 4 Comparison of hyperspectral area parameters

	块茎形成期			块茎膨大期			淀粉积累期		
	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%
红边面积	121.99	128.11	2.52	151.99	181.96	8.97	102.35	155.09	20.49
黄边面积	7.316	7.80	3.17	8.50	11.67	15.72	5.38	7.89	19.01
蓝边面积	10.41	10.86	2.11	14.88	16.45	5.02	11.20	14.17	11.70
绿峰面积	10.86	11.73	3.84	14.11	18.75	14.13	11.21	13.68	9.91
总和			11.64			43.84			61.11

表 5 高光谱反射率参数的对比

Table 5 Comparison of hyperspectral reflectance parameters

	块茎形成期			块茎膨大期			淀粉积累期		
	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%	延薯 4 号	费乌瑞它	贡献率/%
绿峰反射率 R_g	9.522	9.362	0.85	13.039	13.592	2.08	10.604	12.704	9.01
红谷反射率 R_o	3.779	3.197	8.34	3.727	3.085	9.42	4.065	4.072	0.10
R_g/R_o	2.527	2.928	7.35	3.407	4.406	12.79	2.609	3.12	8.92
$(R_g-R_o)/(R_g+R_o)$	0.432	0.491	6.39	0.546	0.63	7.14	0.446	0.515	7.18
总和			22.93			31.43			25.21

在马铃薯的 3 个关键生育期，中熟品种延薯 4 号的 4 个高光谱面积参数均小于早熟品种费乌瑞它，同时面积参数的贡献率也随着生育期的推进明显增大，表现出与振幅参数相同的规律，即在淀粉积累期区分不同马铃薯品种的能力最优，在块茎形成期的能力最差。

对于不同马铃薯品种的高光谱反射率参数而言，在块茎形成期，中熟品种延薯 4 号和早熟品种费乌瑞它的绿峰反射率差异最小，红谷反射率的差异最大；块茎膨大期与块茎形成期相同，不同马铃薯品种的绿峰反射率差异最小，R_g/R_o 的差异最大；在淀粉积累期则不同于块茎形成期和块茎膨大期，差异最小的是红谷反射率，差异最大的绿峰反射率。在

马铃薯的 3 个关键生育期，中熟品种延薯 4 号的绿峰反射率 R_g 和红谷反射率 R_o 与早熟品种费乌瑞它相比虽无明显规律，但中熟品种延薯四号的比值 R_g/R_o 和归一化值 $(R_g-R_o)/(R_g+R_o)$ 均小于早熟品种费乌瑞它。

高光谱反射率参数区分不同马铃薯品种的贡献率表现出先增大后减小的趋势，即利用高光谱反射率参数在块茎膨大期区分马铃薯品种的能力最优，其次为淀粉积累期，在块茎形成期的能力最差。

表 6　高光谱特征参数的对比

Table 6　Comparison of hyperspectral characteristic parameters (%)

贡献率	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	总和
位置参数	4.00	19.00	8.00	31.00
宽度参数	5.00	23.00	9.00	37.00
振幅参数	15.13	36.92	60.87	112.92
面积参数	11.64	43.84	61.11	116.59
反射率参数	22.93	31.43	25.21	79.57

表 6 表明：5 类高光谱特征参数在不同生育期区分不同马铃薯品种的优劣能力存在差异。根据不同高光谱特征参数的贡献率大小，在块茎形成期，不同高光谱特征参数区分马铃薯品种的能力从强到弱依次为：反射率参数＞振幅参数＞面积参数＞宽度参数＞位置参数；在块茎膨大期和淀粉积累期，不同高光谱特征参数鉴别不同马铃薯品种的贡献率大小顺序相同，鉴别能力从强到弱依次为：面积参数＞振幅参数＞反射率参数＞宽度参数＞位置参数；在马铃薯的 3 个关键生育期，高光谱特征参数鉴别不同马铃薯品种的综合能力从强到弱依次为：面积参数＞振幅参数＞反射率参数＞宽度参数＞位置参数。

3　结　论

以高光谱位置参数、宽度参数、振幅参数、面积参数和反射率为评价指标，分析了 5 类高光谱特征参数区分不同马铃薯品种的能力。结果表明：(1)高光谱位置参数、宽度参数和反射率参数最适合在块茎膨大期区分不同的马铃薯品种，高光谱振幅参数和面积参数最适合在淀粉积累期区分不同的马铃薯品种，5 类高光谱特征参数在块茎形成期均最不适合；(2)在块茎形成期，高光谱反射率参数区分马铃薯品种的能力最强，在块茎膨大期和淀粉积累期，高光谱面积参数区分马铃薯品种的能力最强，在 3 个关键生育期，均是高光谱位置参数的区分能力最弱。综合能力从强到弱依次为：面积参数＞振幅参数＞反射率参数＞宽度参数＞位置参数。

References

[1] LU Xiao-ping(卢肖平). Journal of Huazhong Agricultural University(华中农业大学学报), 2015, (3): 1.

[2] Baranowski P, Mazurek W, Wozniak J, et al. Journal of Food Engineering, 2012, 110(3): 345.

[3] Li Jiangbo, Rao Xiuqin, Ying Yibin. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(1): 125.

[4] Rajkumar P, Wang Ning, Eimasry G, et al. Journal of Food Engineering, 2012, 108(1): 194.

[5] XU Meng-ling, LI Xiao-yu, KU Jing, et al(徐梦玲，李小昱，库　静，等). Journal of Food Safety and Quality Inspection(食品安全质量检测学报), 2015, 6(8): 2988.

[6] DENG Jian-meng, WANG Hong-jun, LI Zou-zou, et al(邓建猛，王红军，黎邹邹，等). Food and Machinery(食品与机械), 2016, 32(11): 122.

[7] XU Ming-zhu, LI Mei, BAI Zhi-peng, et al(徐明珠，李　梅，白志鹏，等). Journal of Agricultural Mechanization Research(农机化研究), 2016, 6: 205.

[8] CHENG Zheng-guang, LI XIN, FAN Xue-jia, et al(陈争光，李　鑫，范学佳，等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2016, 36(8): 2474.

[9] HUANG Wen-jiang(黄文江). Mechanism and Application of Crop Disease Remote Sensing Monitoring(作物病害遥感监测机理与应用). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press(北京：中国农业科学技术出版社), 2009. 113.

Analysis on the Ability of Distinguishing Potato Varieties with Different Hyperspectral Parameters

DUAN Ding-ding[1], HE Ying-bin[1,2*], LUO Shan-jun[2], WANG Zhuo-zhuo[2]

1. Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
2. Academy of Management, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China

Abstract In this paper, the spectral characteristics of potato key growth period are analyzed by using hyperspectral remote sensing technology, and a quick method to distinguish different potato varieties was proposed. In addition, two potato varieties with early maturity and medium maturity are taken as the research materials, and the canopy reflectance spectrum curves of tuber formation stage, tuber expansion stage and starch accumulation stage are collected, Savitzky-Golay filtering smoothing and first order differential processing are applied to the measured reflectance spectrum curve, hyperspectral position parameters, amplitude parameters, area parameters, width parameters and reflectance parameters are used as evaluation indices, according to the contribution rate of 21 hyperspectral characteristic parameters, their ability to distinguish different potato varieties is evaluated. The results show that: (1) The ability of the same type of high spectral characteristic parameters to distinguish potato varieties at different growth stages is different. Hyperspectral position parameters, width parameters and reflectance parameters have the strongest ability to distinguish different potato varieties during tuber expansion stage, followed by starch accumulation stage; high spectral amplitude parameters and area parameters have the strongest differentiation ability in starch accumulation stage, followed by tuber expansion stage, and the 5 types of hyperspectral characteristic parameters have the worst differentiation ability in tuber formation stage. (2) In the same growth stage, there are differences between the 5 kinds of hyperspectral characteristic parameters in distinguishing potato varieties. In the tuber formation stage, the ability of distinguishing 5 kinds of hyperspectral characteristic parameters from strong to weak is as follows: reflectance parameter>amplitude parameter>area parameter>width parameter>position parameter; In the period of tuber expansion and starch accumulation, the order from strength to weakness is as follows: area parameter>amplitude parameter>reflectance parameter>width parameter>position parameter. The comprehensive ability from strong to weak is as follows: area parameter>amplitude parameter>reflectivity parameter>width parameter>position parameter.

Keywords Spectral characteristics; Spectral parameters; Potato varieties; Filtering treatment; First order differential

(Received Oct. 16, 2017; accepted Jan. 30, 2018)

* Corresponding author