连续统去除法分析不同马铃薯品种高光谱差异性

罗善军[1]，何英彬[1,2*]，段丁丁[2]，王卓卓[1]，张竞珂[3]，张远涛[1]，朱娅秋[1]，于金宽[2]

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. 南京大学地理与海洋科学学院，江苏 南京 210023

摘 要 在我国实施“马铃薯主粮化”战略的背景下，加强马铃薯相关的研究显得十分有意义。比较和分析不同马铃薯品种不同时期的光谱差异性，旨在为马铃薯品种鉴定、马铃薯与其他作物的区分、马铃薯空间分布提取、马铃薯病虫害监测、马铃薯受各种胁迫的影响以及各种作物识别研究等提供理论和技术支持，也为作物高光谱相关研究提供新思路。对在吉林地区大田试验获取的马铃薯早熟品种费乌瑞它和中晚熟品种延薯4号结薯期和块茎膨大期等关键生育期的样品的冠层高光谱反射率数据，首先利用Savitzky-Golay平滑滤波进行去噪声处理，获取其连续统去除光谱并提取出最大吸收深度、总面积、左面积、右面积、对称度、面积归一化最大吸收深度6个特征参数。同时对滤波后的光谱反射率数据和连续统去除光谱反射率数据进行一阶微分处理。在对不同马铃薯品种这两种光谱反射率曲线对比分析的基础上构建反射率差异性指数、一阶导数差异性指数、连续统去除光谱特征参数差异性指数共3类8种差异性指数作为评价指标。其中反射率差异性指数和一阶导数差异性指数研究“绿峰”550 nm，“红谷”670 nm以及可见光－近红外平台760 nm附近的波段。利用这些差异性指数定量地分析了不同马铃薯品种高光谱差异性。将连续统去除法应用到植物高光谱差异性分析中来，并且深入到不同马铃薯品种以及其不同生育时期。构建的差异性指数取得了很好的评价效果，结果表明：(1)相比反射率差异性指数和最大吸收深度差异性指数，一阶导数差异性指数、总面积差异性指数、左面积差异性指数、右面积差异性指数、对称度差异性指数和归一化差异性指数都可以很好地描述不同马铃薯品种的高光谱差异性，连续统去除光谱局部放大了两个不同马铃薯品种的高光谱差异；(2)滤波光谱和连续统去除光谱反射率差异性最大的波长位置和时间都相同，均处于8月16日波长671.24 nm处；最大吸收深度差异性指数值最大仅为0.01；滤波光谱一阶导数差异性指数值在6月24日波长673.55 nm处最大达到0.977，连续统去除光谱一阶导数差异性指数在6月24日波长759.74 nm处最大达47.87，在不同马铃薯品种光谱差异性分析中作用最为明显；总面积差异性指数值、右面积差异性指数值、对称度差异性指数值和归一化差异性指数值均在6月24日最大，最大值分别为0.13，0.214，0.205和0.113，左面积差异性指数值在7月24日最大，为0.199；(3)根据所构建的差异性指数定量评价结果综合推测可知，两个不同马铃薯品种高光谱差异最大的时期处于早熟品种费乌瑞它结薯期的中晚期，中晚熟品种延薯4号结薯期的初期。

关键词 马铃薯品种；连续统去除法；关键生育期；高光谱；差异性指数
中图分类号： S532 **文献标识码：** A **DOI：** 10.3964/j.issn.1000-0593(2018)10-3231-07

引 言

在耕地总量基本稳定以及膳食结构发生变化的背景下，我国粮食自给率已由95%下降到87%左右。如何提高我国粮食安全水平已经成为政府部门和学术界共同关注的重要议题[1]。随着“马铃薯主粮化”战略的实施，马铃薯逐步成为我国继水稻、小麦、玉米之后的第四大主粮作物，这对我国农业可持续发展和保障国家粮食安全有着非常重要的意义，不断加强马铃薯的相关研究显示十分重要。高光谱遥感技术日

收稿日期： 2018-01-07，**修订日期：** 2018-05-28
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： 罗善军，1992年生，天津工业大学管理学院研究生 e-mail：872265783@qq.com
*通讯联系人 e-mail：heyingbin@caas.cn

新月异，遥感信息提取已经进入到了以波谱分析为主的精细物种识别的阶段[2]，目前，高光谱技术还主要应用于小麦、玉米、水稻等禾本科作物。包括作物生长长势监测、作物生理生化性状监测、作物产量品质监测等[3]。对于茄科作物尤其是马铃薯的研究相对较少，深入到马铃薯品种的研究更是极为鲜见。针对马铃薯，目前的相关研究主要集中在内外部缺陷监测[4-5]、种类鉴别[6]、叶绿素含量估测[7]、早晚疫病的识别和诊断[8-9]等领域，由于马铃薯需求的不断扩大以及生物技术的飞速发展，马铃薯品种也逐渐多元化。传统的马铃薯品种鉴定采用 DNA 指纹等，费时费力、步骤繁琐、破坏样品。利用高光谱分析不同品种马铃薯的研究尚未见到报道。

连续统去除法主要应用于矿物高光谱分析以及作物养分估算[10]。由于连续统去除能有效去除光谱信息噪声，消除叶肉结构参数的影响，凸显地物的吸收特征[11]，因此应用连续统去除法研究不同马铃薯品种的光谱差异具有一定的理论依据。此外，有关马铃薯不同生育期的光谱研究还少见报道，鉴于此，本工作以马铃薯结薯期和块茎膨大期等关键生育期的冠层光谱反射率数据为基础，应用连续统去除法得到连续统去除光谱并提取 6 个特征参数，最后构建了 3 类共 8 种差异性指数，定量分析了不同马铃薯品种的光谱差异性，旨在为马铃薯品种鉴定、马铃薯与其他作物的区分、马铃薯空间分布提取、马铃薯病虫害监测、马铃薯受各种胁迫的影响以及各种作物识别研究等提供理论和技术支持，也为作物高光谱相关研究提供新思路。

1 实验部分

1.1 实验设计

田间试验于 2017 年 5 月至 9 月在吉林省公主岭市范家屯镇农业科技示范园(125°00′E，43°40′N)进行。选取了吉林省广泛种植的马铃薯早熟品种费乌瑞它(FWRT)和中晚熟品种延薯 4 号(YS4)为研究对象。田间示意图如图 1 所示。每个马铃薯品种各重复 3 次，每个重复区内设置 32 个小区，共 96 个小区，每小区以行 4×列 8 形式排列，每个小区内种植 10 株马铃薯，垄宽 75～80 cm，株距 30～35 cm。马铃薯管理模式参考一般大田模式进行，肥力、排灌条件优越。

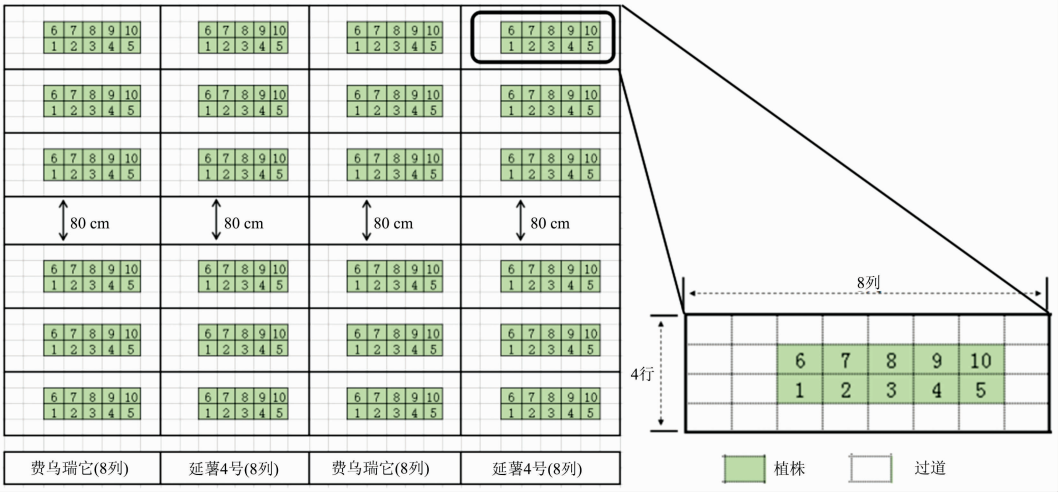

图 1 田间试验示意图

Fig. 1 Field experiment diagram

1.2 数据获取与预处理

应用美国 Ocean Optics 公司的微型光纤光谱仪 USB2000＋获取马铃薯冠层光谱反射率数据，最快采样速度是 1 ms，光谱采样间隔为 0.44 nm。光谱反射率选择在天气晴朗，无云，无风时测量，测量时段为每日 10:00—14:00。测量过程中传感器探头垂直向下，距冠层顶垂直高度约 1 m，视场角 25°，以便最大程度消除土壤背景等对马铃薯冠层光谱反射率的影响，田间采集光谱反射率数据见图 2。在视场范围内，每个小区测量 3 次，每次随机选取 3 个观测点进行测量，每个观测点测量 3 条曲线，取平均值作为该观测点的冠层光谱反射率数据。测量的时点包含马铃薯结薯期、块茎膨大期等关键生长期。

图 2 试验现场数据采集图

Fig. 2 Field data acquisition graph

Savitzky-Golay 滤波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是在滤除噪声的同时可以确保信号的形状、宽度不变[12]。为尽量减小噪声的影响，截取波长在 380～850 nm 范围内的测得的原始反射率数据并采用 Savitzky-Golay 平滑滤波方法处理得到滤波曲线。对滤波后的反射率数据进行一阶微分处理，得到马铃薯一阶导数光谱数据。

1.3　连续统去除法

连续统去除法[13]又称包络线去除法，是分析矿物质高光谱数据的一种常用方法，广泛应用在矿质和岩石光谱分析中，去除背景吸收的影响并且分离特征物质吸收特征。该方法是由 Roush 和 Clark 提出的一种对原始光谱曲线归一化处理的方法，其定义为逐点直线连接随波长变化的吸收或反射凸出的峰点，并使折线在峰值点上的外角大于 180°。该方法使得经变换后的反射率值在 0～1 之间，峰值点上的相对反射率均为 1，其他点相对反射率均小于 1。这一变换可以突出显示光谱的吸收和反射。计算公式为

$$S_{cr} = R/R_c \tag{1}$$

式(1)中，S_{cr} 为连续统去除光谱反射率，R 为原始光谱反射率，R_c 为连续统线反射率。

应用 ENVI 软件，对滤波处理后的光谱数据进行连续统去除光谱信息的提取。根据连续统去除光谱数据提取 6 类特征参数进行比较分析。连续统去除光谱的 6 类特征参数分别为：(1)最大吸收深度 D_h：吸收峰的最大吸收值；(2) 总面积 S：起始和终止波长内的波段深度的积分；(3) 左面积 S_l：总面积中最大吸收深度以左的面积；(4) 右面积 S_r：总面积中最大吸收深度以右的面积；(5) 对称度 V：左面积与右面积的比值；(6) 面积归一化最大吸收深度 W：最大吸收深度与总面积的比值。

1.4　差异性指数构建

为了定量衡量不同品种马铃薯光谱数据特征在同一测量日期某一特定波长的差异，建立马铃薯光谱数据不同的差异性指数(difference index，DI)，包括反射率差异性指数，一阶导数差异性指数，连续统去除光谱特征参数差异性指数，计算公式为

$$DI_{jk} = \frac{|A_{ij} - B_{ik}|}{A_{ij}} \tag{2}$$

式(2)中，DI_{jk} 为两个不同马铃薯品种在波长为 i 时的光谱数据差异性指数，A_{ij} 和 B_{ik} 分别为两个不同马铃薯品种在波长为 i 时的光谱反射率值(或反射率一阶导数值、连续统去除光谱特征参数值)。j 和 k 分别代表不同马铃薯品种，在本文中分别指费乌瑞它和延薯 4 号。

2　结果与讨论

2.1　滤波光谱与连续统去除光谱特征性分析

原始马铃薯冠层光谱反射率数据经过 Savitzky-Golay 平滑滤波后得到滤波光谱反射率数据，再应用 ENVI 软件得到连续统去除光谱反射率数据。选取马铃薯关键生长期为结薯期和块茎膨大期，并以这两个时期的早中期(6 月 24 日和 7 月 6 日)和中晚期(7 月 24 日和 8 月 16 日)为时间节点对早熟品种费乌瑞它(FWRT)和中晚熟品种延薯 4 号(YS4)的光谱差异性进行分析，光谱曲线对比结果如图 3 和图 4 所示。由图 3 可以看出，结薯期光谱反射率差异在可见光－近红外平台(750～850 nm)差异最为明显，在块茎膨大期，此波段范围光谱反射率随着时间变化呈逐渐增长的趋势，7 月 6 日和 7 月 24 日两个品种光谱差异在绿色波峰(550 nm)附近差异也比较明显，其他波段的差异难以直接辨别。由图 4 可以看出，叶绿素强烈吸收蓝光(450 nm)和红光(600 nm)形成的两个吸收谷，在连续统去除光谱(380～850 nm)上形成“双谷”结构，在 550 nm 附近形成的波峰比滤波光谱“绿峰”更高，整体看来，虽然连续统去除光谱在滤波光谱的基础上有了很明显的变化，但是品种之间的差异仍然难以直接观察得到，本文利用两个吸收谷中较为强烈的吸收谷作为突破口进行进一步探索。

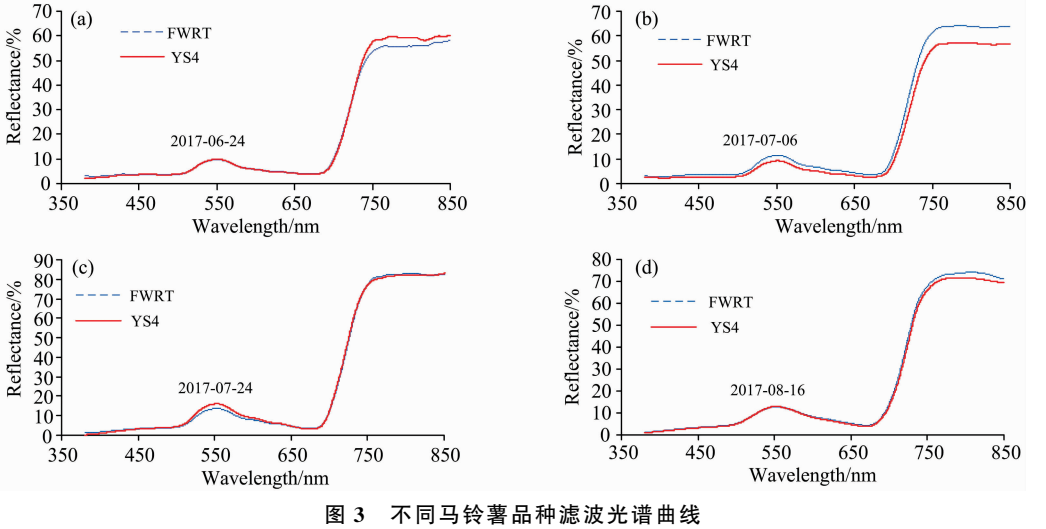

图 3　不同马铃薯品种滤波光谱曲线

Fig. 3　The filtered spectral curves of different potato cultivars

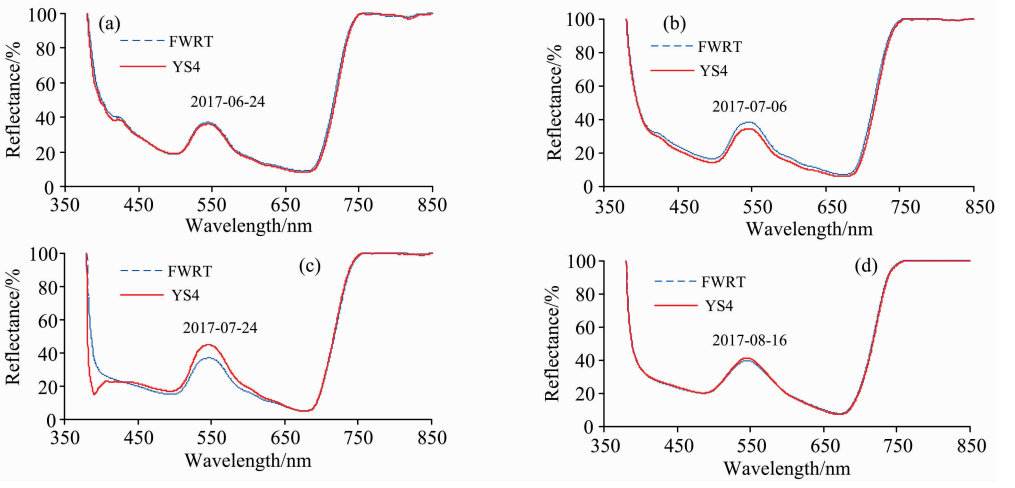

图 4 不同马铃薯品种连续统去除光谱曲线

Fig. 4 Continuum removal of the spectral curve of different potato cultivars

2.2 基于连续统去除法的特征参数分析

对连续统去除光谱的 6 个特征参数进行提取，结果如表 1 所示。可以看出：对于最大吸收深度值，同一马铃薯品种不同时间有较为明显的差异，两个品种均表现为随时间的递增先增后减，同一时间不同品种之间差别不大；对于总面积，左面积和右面积值，同一马铃薯品种不同时间值和同一时间不同品种值的差异都很大，两个品种均表现为随时间的递增先减后增，在 6 月 24 日和 7 月 24 日，延薯 4 号总面积值高于费乌瑞它，在 7 月 6 日和 8 月 16 日，费乌瑞它总面积值高于延薯 4 号，并且右面积和总面积规律一致，而在 6 月 24 日和 7 月 6 日，费乌瑞它左面积值高于延薯 4 号，在 7 月 24 日和 8 月 16 日，延薯 4 号左面积值高于费乌瑞它；对于对称度值，同一马铃薯品种不同时间和同一时间不同品种值的差异都不明显；对于面积归一化最大吸收深度值，同一马铃薯品种不同时间值和同一时间不同品种值的差异都很小。

表 1 不同马铃薯品种连续统去除光谱特征参数

Table 1 Feature parameters of continuum removal of different potato cultivars

特征参数	2017/06/24		2017/07/06		2017/07/24		2017/08/16	
	FWRT	YS4	FWRT	YS4	FWRT	YS4	FWRT	YS4
最大吸收深度	0.914 2	0.917 6	0.930 3	0.939 7	0.950 4	0.949 8	0.924 0	0.927 1
总面积	68.684 1	77.605 3	64.920 4	60.055 8	61.131 8	65.592 2	75.728 3	75.380 9
左面积	23.171 9	22.358 8	22.443 4	19.379 1	21.184 4	25.390 0	25.721 5	26.209 8
右面积	45.512 2	55.246 5	42.477 0	40.676 7	35.410 3	40.202 2	50.006 8	49.171 1
对称度	0.509 1	0.404 7	0.528 4	0.476 4	0.598 3	0.631 6	0.514 4	0.533 0
面积归一化最大吸收深度	0.013 3	0.011 8	0.014 3	0.015 6	0.015 5	0.014 5	0.012 2	0.012 3

2.3 关键生育期不同马铃薯品种光谱差异性分析

2.3.1 光谱反射率差异性分析

为了描述不同马铃薯品种光谱差异性，根据式(2)计算不同马铃薯品种的反射率差异性指数。经过光谱曲线的比较，发现光谱曲线差异最大的地方一般位于波峰、波谷以及近红外平台等位置。因此，着重研究“绿峰”550 nm，“红谷”670 nm 以及可见光-近红外平台 760 nm 附近的波段，计算的不同马铃薯品种光谱反射率差异性指数结果见表 2。由表 2 可以看出：滤波光谱反射率差异性指数值最高出现在 8 月 16 日波长 671.24 nm 处，最大值为 0.061，在 6 月 24 日波长 759.74 nm 处也比较接近，反射率差异性指数值为 0.06。连续统去除光谱反射率差异性指数值最高出现在 8 月 16 日波长 671.24 nm 处，最大值为 0.041。总体而言，滤波光谱反射率差异性指数值和连续统去除光谱反射率差异性指数值均偏小，这两个差异性指数不能很好地描述不同马铃薯品种的光谱差异性，但滤波光谱和连续统去除光谱反射率差异性最大的波长位置和时间都相同，均处于 8 月 16 日波长 671.24 nm 处。

2.3.2 光谱反射率一阶导数差异性分析

对光谱数据求取一阶导数是分析光谱数据时最常用的手段之一，一阶导数光谱在一定程度上可以放大不同作物光谱曲线的差异。因此，试图计算不同马铃薯品种滤波光谱反射率数据和连续统去除光谱反射率数据的一阶导数来分析其光谱差异。根据式(2)计算不同时间马铃薯光谱反射率的一阶导数差异性指数，结果如表 3 所示。结果表明：总体而言，相比反射率差异性指数值，滤波光谱和连续统去除光谱的一阶导数差异性指数值有了明显的提高；滤波光谱一阶导数差异性指数最大值出现在 6 月 24 日波长 673.55 nm 处，最大

值为 0.977，连续统去除光谱一阶导数差异性指数最大值出现在 6 月 24 日波长 759.74 nm 处，最大值为 47.87，在 7 月 24 日波长 546.91 nm 和 675.79 nm 处一阶导数差异性指数值也比较大，分别为 18.223 和 19.254，滤波光谱和连续统去除光谱一阶导数差异性指数最大值值均处于 6 月 24 日。整体看来，与滤波光谱一阶导数差异性指数相比，连续统去除光谱一阶导数差异性指数明显放大了不同马铃薯品种之间的差异，可以很好地描述不同马铃薯品种的光谱差异性。

表 2　不同马铃薯品种反射率差异性指数

Table 2　Difference index of reflectance of different potato cultivars

光谱类型	2017/06/24			2017/07/06			2017/07/24			2017/08/16		
	544.87 nm	673.55 nm	759.74 nm	546.57 nm	672.62 nm	756.13 nm	546.91 nm	675.79 nm	757.26 nm	545.20 nm	671.24 nm	764.08 nm
滤波光谱	0.036	0.029	0.060	0.186	0.225	0.103	0.203	0.003	0.008	0.026	0.061	0.020
连续统去除光谱	0.017	0.037	0.005	0.093	0.136	0.000	0.226	0.014	0.000	0.047	0.041	0.000

表 3　不同马铃薯品种一阶导数差异性指数

Table 3　Difference index of first derivative spectra of different potato cultivars

光谱类型	2017/06/24			2017/07/06			2017/07/24			2017/08/16		
	544.87 nm	673.55 nm	759.74 nm	546.57 nm	672.62 nm	756.13 nm	546.91 nm	675.79 nm	757.26 nm	545.20 nm	671.24 nm	764.08 nm
滤波光谱	0.126	0.977	0.971	0.115	0.076	0.172	0.187	0.560	0.160	0.033	0.137	0.033
连续统去除光谱	1.711	9.449	47.870	2.679	2.571	0.012	18.223	19.254	1.000	0.426	0.444	1.000

2.3.3　连续统去除光谱特征参数差异性分析

为了定量描述连续统去除光谱提取的 6 个特征参数在分析不同马铃薯品种差异性中的作用，根据式(2)分别计算最大吸收深度差异性指数、总面积差异性指数、左面积差异性指数、右面积差异性指数、对称度差异性指数和归一化差异性指数，结果如表 4 所示。计算结果表明：不同时间最大吸收深度差异性指数值均比较小，最大值仅为 0.01，在相同时间不同马铃薯品种差异性分析中的作用不大。总面积差异性指数值、右面积差异性指数值、对称度差异性指数值和归一化差异性指数值均在 6 月 24 日最大，分别为 0.13，0.214，0.205 和 0.113。左面积差异性指数值在 7 月 24 日最大，为 0.199。除最大吸收深度差异性指数外，其他 5 个差异性指数均可以很好地描述两个不同马铃薯品种在同一时间的光谱差异性。

表 4　不同马铃薯品种连续统去除特征参数差异性指数

Table 4　Difference index of characteristic parameters of different potato cultivars

特征参数差异性指数	2017/06/24	2017/07/06	2017/07/24	2017/08/16
最大吸收深度差异性指数	0.004	0.010	0.001	0.003
总面积差异性指数	0.130	0.075	0.073	0.005
左面积差异性指数	0.035	0.137	0.199	0.019
右面积差异性指数	0.214	0.042	0.135	0.017
对称度差异性指数	0.205	0.098	0.056	0.036
归一化差异性指数	0.113	0.091	0.065	0.008

目前农作物高光谱研究主要集中于水稻、玉米、小麦等禾本科作物及大豆等豆科作物[14]，有关茄科作物马铃薯高光谱特征的定量化研究还比较缺乏，研究马铃薯不同生育期的成果更为少见。本工作以马铃薯关键生育期——结薯期和块茎膨大期为例，选择早熟品种费乌瑞它和中晚熟品种延薯 4 号为研究对象，每个生育期选择期初和期末两天的高光谱数据进行分析，即 6 月 24 日延薯 4 号处于结薯期的初期，费乌瑞它处于结薯期的中晚期，7 月 6 日延薯 4 号处于结薯期的中晚期，费乌瑞它处于结薯期的晚期或者临近块茎膨大期的初期，7 月 24 日延薯 4 号处于块茎膨大期的初期，费乌瑞它处于块茎膨大期的中晚期，8 月 16 日延薯 4 号处于块茎膨大期的中晚期，费乌瑞它处于块茎膨大期的晚期或者临近淀粉积累期的初期。选择同一时间不同品种的光谱数据进行比较更符合吉林当地农民大田种植习惯，研究结果具有一定的现实意义。

光谱差异的比较通过反射率曲线、红边参数、一阶微分变换[15-16]等进行分析，引入连续统去除的方法，在对滤波光谱反射率及其一阶微分光谱分析同时，还对连续统去除光谱反射率及其一阶导数光谱进行分析，并构建三类八种差异性指数来定量衡量不同马铃薯品种的光谱差异性。反射率差异性指数和一阶导数差异性指数以“绿峰”550 nm，“红谷”670 nm 以及可见光－近红外平台 760 nm 附近的波段分别进行构建。连续统去除光谱可以将冠层光谱映射到局部连续统线上。归一化处理可以使得局部吸收特征之间的差异放大。本文对光谱曲线中最强的吸收谷进行特征参数提取，相比滤波光谱反射率差异性指数，连续统去除光谱一阶导数差异性指数、总面积差异性指数、左面积差异性指数、右面积差异性指数、对称度差异性指数和归一化差异性指数能更加突出描述不同马铃薯品种光谱的差异。

3 结 论

以滤波光谱和连续统去除光谱为基础，构建了反射率差异性指数、一阶导数差异性指数和连续统去除光谱特特征参数差异性指数，定量地描述早熟马铃薯品种费乌瑞它和中晚熟品种延薯 4 号的光谱差异性。结果表明：(1)反射率差异性指数不能很好地描述不同马铃薯品种的光谱差异性，但滤波光谱和连续统去除光谱反射率差异性最大的波长位置和时间都相同，均处于 8 月 16 日波长 671.24 nm 处。最大吸收深度差异性指数值最大仅为 0.01，也不能很好地描述不同马铃薯品种的光谱差异性；(2)对滤波光谱进行一阶微分处理后，其一阶导数差异性指数值在 6 月 24 日波长 673.55 nm 处最大达到 0.977，相比反射率差异性指数已经有了明显的提高。连续统去除光谱一阶导数差异性指数在 6 月 24 日波长 759.74 nm 处最大达 47.87，在不同马铃薯品种光谱差异性分析中作用最为明显。总面积差异性指数值、右面积差异性指数值、对称度差异性指数值和归一化差异性指数值均在 6 月 24 日最大，分别为 0.13，0.214，0.205 和 0.113。左面积差异性指数值在 7 月 24 日最大，为 0.199；(3)在 6 个差异性指数中，除左面积差异性指数外，一阶导数差异性指数、总面积差异性指数、右面积差异性指数、对称度差异性指数和归一化差异性指数均表明两个不同马铃薯品种光谱差异性最大的时间为 6 月 24 日，由此可以推测两个不同马铃薯品种光谱差异最大的时期处于早熟品种费乌瑞它结薯期的中晚期，中晚熟品种延薯 4 号结薯期的初期。

References

[1] MAO Xue-feng, LIU Jing, ZHU Xin-kai(毛学峰，刘 靖，朱信凯). Management World(管理世界), 2015, (3): 76.

[2] DAI Xiao-ai, YANG Xiao-xia, GAO Xiao-jie, et al(戴晓爱，杨晓霞，高孝杰，等). Remote Sensing Technology and Application(遥感技术与应用), 2015, 30(6): 1095.

[3] MAO Heng-chang(茅恒昌). China Southern Agricultural Machiner(南方农机), 2017, 48(22): 88.

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

[5] ZHAO Ming-fu, LIU Zi-di, ZOU Xue, et al(赵明富，刘自迪，邹 雪，等). Laser Journal(激光杂志), 2016, 37(3): 20.

[6] WANG Li-yan, XUE He-ru, JIANG Xin-hua, et al(王丽艳，薛河儒，姜新华，等). Journal of Inner Mongolia Agricultural University · Natural Science Edition(内蒙古农业大学学报·自然科学版), 2016, 37(2): 102.

[7] HE Cai-lian, ZHENG Shun-lin, ZHOU Shao-meng, et al(何彩莲，郑顺林，周少猛，等). Journal of South China Agricultural University(华南农业大学学报), 2016, 37(5): 45.

[8] 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, 38(6): 205.

[9] HUANG Chong, LIU Wan-cai(黄 冲，刘万才). Plant Protection(植物保护), 2016, 42(5): 142.

[10] LI Fen-ling, CHANG Qing-rui(李粉玲，常庆瑞). Transaction of the Chinese Society for Agriculture Machinery(农业机械学报), 2017, 48(7): 174.

[11] PENG Jie, CHI Chun-ming, XIANG Hong-ying, et al(彭 杰，迟春明，向红英，等). Acta Pedologica Sinica(土壤学报), 2014, 51(3): 459.

[12] LI Dang-hui, XIE Min, QIAO Feng(李党辉，谢 敏，乔 枫). Res. Soil Water Conserv.(水土保持研究), 2017, 24(3): 136.

[13] HAN Zhao-ying, ZHU Xi-cun, WANG Ling, et al(韩兆迎，朱西存，王 凌，等). Laser and Optoelectronics Progress(激光与光电子学进展), 2016, 53(2): 220.

[14] ZHOU Yang-fan, CHEN You-qi, ZOU Jin-qiu, et al(周扬帆，陈佑启，邹金秋，等). Chin. Sci. Technol. Resour. Rev.(中国科技资源导刊), 2017, 49(5): 104.

[15] QIAN Yu-rong, YU Jiong, JIA Zhen-hong, et al(钱育蓉，于 炯，贾振红，等). Acta Prataculturae Sinica(草业学报), 2013, 22(1): 157.

[16] REN Zhe, CHEN Huai-liang, WANG Lian-xi, et al(任 哲，陈怀亮，王连喜，等). Remote Sensing for Land & Resources(国土资源遥感), 2015, 27(4): 34.

Analysis of Hyperspectral Variation of Different Potato Cultivars Based on Continuum Removed Spectra

LUO Shan-jun[1], HE Ying-bin[1,2*], DUAN Ding-ding[2], WANG Zhuo-zhuo[1], ZHANG Jing-ke[3], ZHANG Yuan-tao[1], ZHU Ya-qiu[1], YU Jin-kuan[2]

1. School of Management, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China
2. Institute of Agriculture Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
3. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

Abstract Under the background of carrying out the "potato staple food" strategy in China, it is of great significance to do more related researches of the potato crop. In this paper, the comparison and analyses of spectral differences of different potato cultivars in different periods were aimed to provide theoretical and technical support to the identification of potato varieties, the distinction of potatoes and other crops, the extraction of potato spatial distribution, the monitoring of potato pests and diseases, the impacts of potato stresses as well as the various crop identification studies and provide a new idea for the crop hyperspectral correlation research. What's more, the canopy hyperspectral reflectance data of the early maturing potato cultivar (Favorite), the middle-late maturing cultivar (Yanshu 4) at the tuber stage and expansion stage were obtained through field experiments in Jilin area. Firstly, the noise was removed by the method of Savitzky-Golay filtering. Then the spectra of continuum removal were obtained by the method of continuum removal and 6 parameters (the maximum absorption depth, total area, left area, right area, symmetry and area normalized maximal absorption depth) were extracted. Meanwhile, the first-order derivatives were calculated using the filtered spectral reflectance data and the spectral reflectance data of continuum removal. On the basis of the comparison of the two spectral reflectance curves of different potato cultivars, 8 different indices of 3 groups (reflectance difference index, first order derivative difference index, spectral parameters of continuum removal difference index) were constructed as evaluation indices. The reflectance difference index and first order derivative difference index were calculated using the bands of green light at 550 nm, red light at 670 nm and near-infrared light at 760 nm. Furthermore, we quantitatively analyzed the hyperspectral differences of different potato cultivars using these difference indices. In this paper, the method of continuum removal was applied to the analyses of hyperspectral differences of different potato cultivars with different growth stages. The difference indices in the article finally achieved good evaluation performence. The results showed that: (1) Compared with the reflectance difference index and maximum absorption depth difference index, the first order derivative difference index, total area difference index, left area difference index, right area difference index, symmetry difference index and normalized difference index could show the hyperspectral difference of different potato cultivars well. The spectra of continuum removal partially magnified the hyperspectral differences of two different potato cultivars. (2) The wavelength position and growth period of the filtered spectra and the spectra of continuum removal with the largest difference were the same located at the wavelength of 671.24 nm on August 16. The value of maximum absorption depth difference index was only 0.01. The value of first order derivative difference index of the filtered spectra reached 0.977 at the wavelength of 673.55 nm on June 24. The value of the first order derivative difference index of the continuum removed spectra reached 47.87 at the wavelength of 759.74 nm on June 24, which worked the best in spectral difference analyses of different potato cultivars. Besides, the total area difference index, right area difference index, symmetry difference index and normalized difference index all reached the maximum on June 24, with the values of 0.13, 0.214, 0.205 and 0.113, respectively. The left area difference index value reached the maximum of 0.199 on July 24. (3) According to the quantitative evaluation results of the difference indices, we could see that the period with the biggest hyperspectral difference of the two different potato cultivars is in the medium-late stage of tuber stage of early-maturing variety and initial stage of tuber stage of medium-late maturing variety.

Keywords Potato cultivar; Continuum removal; Key growth period; Hyperspectral; Difference index

(Received Jan. 7, 2018; accepted May 28, 2018)

* Corresponding author