

# 基于 LIBS 的黄龙病脐橙元素检测与品质鉴别

章琳颖<sup>1,3</sup>, 黎静<sup>1,3</sup>, 饶洪辉<sup>1,3</sup>, 周华茂<sup>1,3</sup>, 黄林<sup>2,3</sup>, 刘木华<sup>1,3</sup>, 陈金印<sup>2</sup>, 姚明印<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>江西农业大学工学院, 江西 南昌 330045;

<sup>2</sup>江西省果蔬采后处理关键技术及质量安全协同创新中心, 江西 南昌 330045;

<sup>3</sup>江西省现代农业装备重点实验室, 江西 南昌 330045

**摘要** 运用激光诱导击穿光谱(LIBS)技术对赣南脐橙橙汁进行了快速绿色鉴别。实验分别测定了健康和黄龙病脐橙果汁的糖度及 Ca、K、Zn 元素含量,并分析了糖度及元素含量差异。采集了脐橙果汁的 LIBS 光谱数据,运用九点平滑(9SM)法并结合多元散射校正(MSC)对数据进行了预处理,最后运用主成分分析(PCA)法并结合多层感知器(MLP)神经网络和径向基函数(RBF)神经网络模型对健康和黄龙病脐橙进行了快速判别。结果表明,PCA-MLP 模型对健康和黄龙病脐橙的判别效果优于 PCA-RBF 模型,其训练集对健康脐橙和黄龙病脐橙的判别准确率分别为 93.8%和 93.4%,预测集对健康脐橙和黄龙病脐橙的判别准确率分别为 93.9%和 94.8%。LIBS 检测结果证明了黄龙病导致脐橙果肉品质发生了变化;进一步利用光谱预处理方法和分类模型,从品质上区分了黄龙病脐橙果汁和健康脐橙果汁,提高了出厂橙汁的产品合格率。

**关键词** 光谱学; 激光诱导击穿光谱; 黄龙病脐橙; 快速判别; 主成分分析

中图分类号 TN249 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.233002

## LIBS-Based Element Detection and Quality Identification of Huanglongbing Navel Oranges

Zhang Linying<sup>1,3</sup>, Li Jing<sup>1,3</sup>, Rao HongHui<sup>1,3</sup>, Zhou HuaMao<sup>1,3</sup>, Huang Lin<sup>2,3</sup>,  
Liu MuHua<sup>1,3</sup>, Chen JinYin<sup>2</sup>, Yao MingYin<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China;

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center of Postharvest Key Technology and Quality Safety of Fruits and Vegetables in Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330045, China;

<sup>3</sup>Jiangxi Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Nanchang, Jiangxi 330045, China

**Abstract** The laser induced breakdown spectroscopy (LIBS) method is used for the rapid and green identification of Gannan navel orange juices. The sugar contents and Ca, K, Zn element contents of healthy and Huanglongbing navel oranges are experimentally measured. In addition, the differences in sugar and element contents are analyzed. The LIBS data of navel orange juice is first collected, which is then preprocessed by the nine-point smoothing (9SM) method combined with multivariate scattering correction (MSC). Finally, the principal component analysis (PCA) method combined with the multi-layer perceptron (MLP) neural network and radial basis function (RBF) neural network model is used for rapid identification of healthy and Huanglongbing navel orange juice. The results show that the PCA-MLP model is superior to the PCA-RBF model in the identification effect of healthy and Huanglongbing navel oranges. The identification accuracies of healthy and Huanglongbing navel oranges on the training dataset are 93.8% and 93.4%, respectively. In contrast, the identification accuracies of healthy navel oranges and Huanglongbing navel oranges on the prediction dataset are 93.9% and 94.8%, respectively. The LIBS detection results confirm that the Huanglongbing results in the change in pulp quality of navel oranges. The further spectral preprocessing and the classification model are used to distinguish the juices of Huanglongbing oranges and

收稿日期: 2020-03-09; 修回日期: 2020-04-02; 录用日期: 2020-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(31772072, 31560482)、江西省教育厅科学基金项目(GJJ180188)

\* E-mail: mingyin800@126.com

healthy navel oranges in quality and thus the product qualification ratio of factory orange juices is increased.

**Key words** spectroscopy; laser induced breakdown spectroscopy; Huanglongbing navel orange; rapid identification; principal component analysis

**OCIS codes** 300.6365; 300.6190; 300.6170

## 1 引言

中国是世界上主要的脐橙生产和消费大国,但是各种病害侵扰对脐橙行业的健康发展造成了巨大威胁。柑橘黄龙病(Huanglongbing, HLB)是由韧皮部杆菌属的病原菌引起的毁灭性疾病<sup>[1]</sup>,尚未寻找到有效治愈该病的方法,一旦发现侵染,只能砍树、焚烧和就地掩埋,以阻止其进一步蔓延<sup>[2]</sup>,中国受侵害产区的脐橙产量约占总产量的85%。

快速准确的检测技术是防控柑橘黄龙病的关键。近年来,具有全光学特性的各种绿色无污染的快速无损的物质成分分析方法已成为国内外研究的热点。在柑橘黄龙病检测方面,国内外学者开展过近红外光谱<sup>[3]</sup>、拉曼光谱<sup>[4]</sup>及高光谱<sup>[5]</sup>技术研究。饶敏等<sup>[6]</sup>利用近红外光谱技术并结合偏最小二乘线性判别分析(PLS-LDA)模型,对未参与建模的黄龙病脐橙样品进行了检测,结果表明,该模型的检测结果与普通主成分分析(PCA)法的检测结果吻合很好,假阳性率小于1%。Sankaran等<sup>[7]</sup>利用近红外光谱技术并结合偏最小二乘法,建立了脐橙内部的有机物成分与特征光谱信息之间的耦合关系,实现了糖度检测。刘燕德等<sup>[4]</sup>采用拉曼光谱技术并结合PLS-LDA方法,探讨了快速诊断柑橘黄龙病及病情类别的可行性。梅慧兰等<sup>[8]</sup>基于高光谱成像研究了柑橘黄龙病的早期无损检测及病情分级,结果表明,基于多项式平滑(SG)及一阶微分预处理的模型分类效果最佳,总体预测准确率达96.4%,预测均方根误差为0.1344。马湫等<sup>[9]</sup>基于叶绿素、淀粉和可溶性糖的最优检测模型,通过结合最小二乘判别法(PLS-DA),实现了柑橘黄龙病的高光谱定量判别,建模集的相关系数为0.92,标准差(SEC)为0.32,总体判别正确率为91.3%;预测模型的相关系数为0.91,预测均方根误差(SEP)为0.30,总体判别正确率为88.6%。激光诱导击穿光谱(Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS)技术是一种用于快速检测元素成分的光谱诊断技术<sup>[10]</sup>,具有快速的分析速度和近乎无损的检测特点。国内外学者运用激光诱导击穿光谱技术对黄龙病脐橙进行了初步探究。Ranulfi等<sup>[11]</sup>运用LIBS技术并结合回归与偏最小二乘法,建立了回归模型并对健康和

黄龙病脐橙叶片进行了识别,准确率为73%。本课题组也运用LIBS技术对黄龙病脐橙果皮进行了检测判别,平均准确率达89.5%,预测集准确率达95.7%<sup>[12]</sup>。值得说明的是,以上研究主要是针对柑橘叶片或果皮,而黄龙病脐橙会引起脐橙内部矿质元素发生变化,果实品质变劣<sup>[13]</sup>。另外,市场上的橙汁产品存在橙汁品质参差不齐和误将患病橙汁包装成健康橙汁的问题。基于此,本文利用LIBS技术采集黄龙病脐橙果汁和健康新鲜脐橙果汁的光谱,运用九点平滑(9SM)法和多元散射校正(MSC)对光谱数据进行预处理,采用主成分分析(PCA)并结合多层感知器神经网络(MLP)和径向基函数神经网络(RBF)模型实现了基于果肉矿质元素的黄龙病脐橙的快速判别。

## 2 实验过程

### 2.1 实验仪器

本文所使用的实验仪器如下:LG-SY6S型匀浆机(中国力果电器有限公司);PR-101 $\alpha$ 糖度仪(日本ATAGO公司);DB-3型数显控温电热板(中国环宇科学仪器厂);AS-990原子吸收分光光度计(中国普析通用仪器有限责任公司);Vlite-200型共轴双脉冲激光器(中国Beamtech公司);2048FT-8R型八通道光谱仪(荷兰Avantes技术有限公司);DG645数字脉冲发生器(美国Stanford Research Systems);二维旋转工作台(北京Zolix, SC300)

### 2.2 实验样品

田间柑橘黄龙病的主要鉴定方法是种植者在新梢成熟期通过观察是否出现黄色的嫩芽和斑驳的叶子,若出现则将该树判断为可疑疾病树<sup>[14]</sup>。本实验在脐橙果农的指导下,于2017年11月10日在江西省赣州市信丰县实地采集了成熟期的健康和黄龙病纽荷尔脐橙(Newhall navel orange, NNO)样品。选择健康和黄龙病脐橙样品各18个,平均直径为70~85 mm,平均单果重300~350 g,采用超纯水反复冲洗脐橙表皮以去除泥垢等污渍,再放置于室温下自然晾干。将每个脐橙去皮并用匀浆机榨汁,过滤后取等分量橙汁作为实验样品。

### 2.3 脐橙糖度及主要矿质元素含量的检测

采用PR-101 $\alpha$ 手持式数字糖度计检测脐橙糖

度。取健康和黄龙病脐橙样品各 18 个进行糖度测试,对样品重复测量三次,并且记录下每个样品的测量值,取三次测量的平均值作为糖度数据。

利用标准 GB/T 18932.12-2002<sup>[15]</sup> 中的湿法消解-原子吸收光谱法对黄龙病和健康脐橙果肉中的 Zn、K、Ca 三种矿物质元素的含量进行测定。首先将 0.1000~0.5000 g(精确至 0.0001 g)黄龙病和健康脐橙果肉放入锥形瓶中,加入 15 mL 硝酸和 5 mL 高氯酸,静置约 12 h。然后将盛有测试样品的锥形瓶放在 DB-3 型数字温度控制电热板上进行加热。当锥形瓶中仅出现少量白色气体且瓶中仅有少量液体或白色晶体沉淀时,取下放在室温下进行冷却。冷却结束后加入少量质量分数为 1% 的稀硝酸溶液,若溶液澄清透明,则表明消解完成。重复洗涤锥形瓶三遍,并通过滤纸将清洁溶液过滤到 50 mL 容量瓶中,然后添加 2 mL 的质量分数为 0.2% 的氯化铯溶液和 5 mL 的质量分数为 0.5% 的

氯化铯溶液作为 K、Ca 元素的释放剂,最后加入质量分数为 1% 的稀硝酸溶液进行定容。

## 2.4 LIBS 元素测定

以共轴双脉冲激光器作为激发光源,利用 LIBS 进行元素测定,如图 1 所示。Nd:YAG 激光器作为脉冲激光发射源,可以产生具有一定时间延迟的两束(A、B 路)共轴双脉冲激光,激光经与水平方向呈 45° 安装的反射镜反射后,垂直穿过穿孔反射镜并击打在实验靶材上,进而产生等离子体。橙汁表面产生的等离子羽流透过穿孔镜并被焦距为 100 mm 的聚焦透镜反射以耦合到光纤。利用配有电荷耦合器件(CCD)的八通道光谱仪完成光谱采集和光电转换,将结果传输到计算机。DG645 数字脉冲发生器为激光器和光谱仪提供精确的外部触发时间控制信号。在 LIBS 测试期间,将样品放在匀速转动的二维旋转台上,可避免激光聚焦在样品的同一点上,从而消除了样品不均匀的影响。

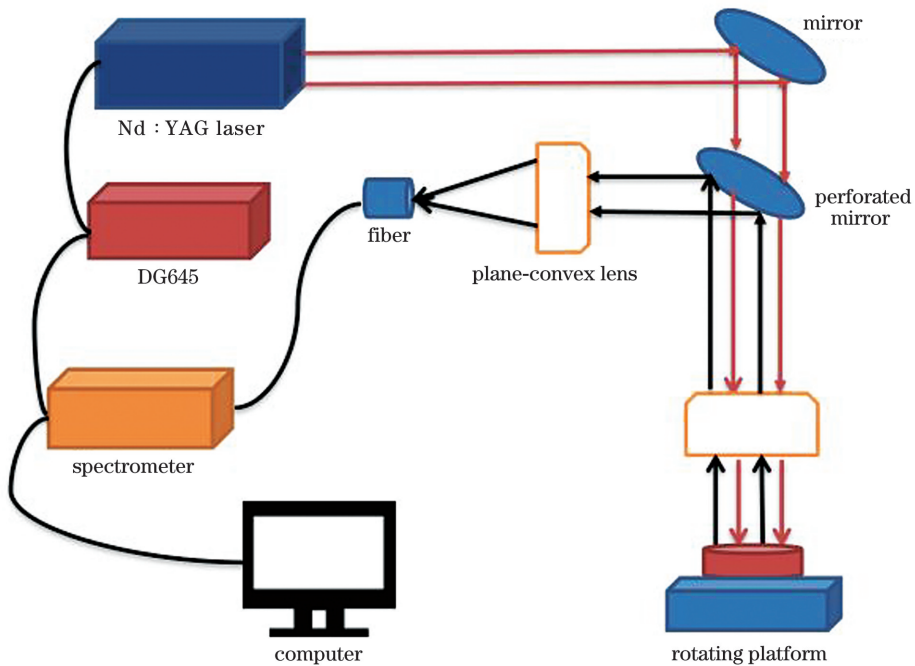


图 1 利用 LIBS 进行元素测定的示意图

Fig. 1 Schematic of element detection using LIBS

## 3 结果与分析

### 3.1 健康和黄龙病脐橙的糖度及 Ca、K、Zn 含量的差异性分析

糖度是脐橙品质的重要指标之一,而 Ca、K、Zn 等矿质元素是脐橙营养的重要表征。采用糖度计获取的样品糖度信息及利用湿法消解-原子吸收光谱法测定的元素 Ca、K、Zn 等的浓度(质量分数,全文

同)信息如表 1 所示,并利用 18 个健康脐橙和 18 个黄龙病脐橙测定的结果进行配对样品的 T 检验分析。当 p 值小于 0.01 时样品存在极显著差异,当 p 值在(0.01,0.05)区间时样品存在显著性差异,当 p 值大于 0.05 时样品无显著性差异。结果表明,相对健康脐橙,黄龙病脐橙的糖度明显减小,矿质元素的含量明显增大。这与脐橙可溶性固形物和水分等有机质成分的变化有关。

表 1 健康和黄龙病脐橙的真实浓度差异性

Table 1 Differences in true concentration of healthy and Huanglongbing navel oranges

Parameter	Huanglongbing navel orange	Healthy navel orange	T value	p value
Mass fraction of Ca/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	595.1 $\pm$ 153.5	415.6 $\pm$ 75.1	-2.952	0.016
Mass fraction of K/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	669.6 $\pm$ 146.5	575.3 $\pm$ 50.8	-1.914	0.088
Mass fraction of Zn/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )	47.0 $\pm$ 15.2	32.2 $\pm$ 11.9	2.720	0.017
Sugar content / $^{\circ}$ Brix	8.7 $\pm$ 1.8	11.4 $\pm$ 1.4	6.407	0

### 3.2 脐橙 LIBS 分析

本文使用单因素实验方法来优化 A、B 两路激光能量、两路间的激光延迟和采集延迟四个实验参数。选择在 200~1100 nm 整个光谱范围内的光谱强度的平均相对标准偏差 (Average relative standard deviation, ARSD) 作为判断参数质量的标准。ARSD 值越小, 光谱稳定性越高, 光谱质量越好。优选后的实验参数为: A 路激光能量为 171.4 mJ, B 路激光能量为 180.5 mJ, 采集延迟为 1.8  $\mu\text{s}$ , 积分时间为 2 ms, 两路间的激光延迟为 700 ns。每幅光谱累计 10 次脉冲, 对每个橙汁样品采集 10 幅光谱, 对健康和黄龙病脐橙样品分别采集 180 幅光谱。

图 2 为健康与黄龙病脐橙在 200~1200 nm 波长范围内的 LIBS 图。可以看出, 矿质元素 Ca、Na、Mg、K、Fe 及有机质元素 C、H、O 等较丰富。通过配对样本 T 检验, 比较了健康和黄龙病脐橙 LIBS 特征谱线强度的差异性, 结果如表 2 所示。数据分析表明, 健康和黄龙病脐橙中的 Ca I 422.67 nm、Mg I 794.44 nm、Mg II 821.39 nm、Mg I 844.57 nm、Na I 588.99 nm、Fe II 769.63 nm、Fe II 867.85 nm、C I 247.86 nm、H I 656.28 nm 和 O I 777.19 nm 等特征谱线强度存在极显著性差异。该结果表明, 利用 LIBS 绿色快速判别黄龙病脐橙具有一定的可行性。

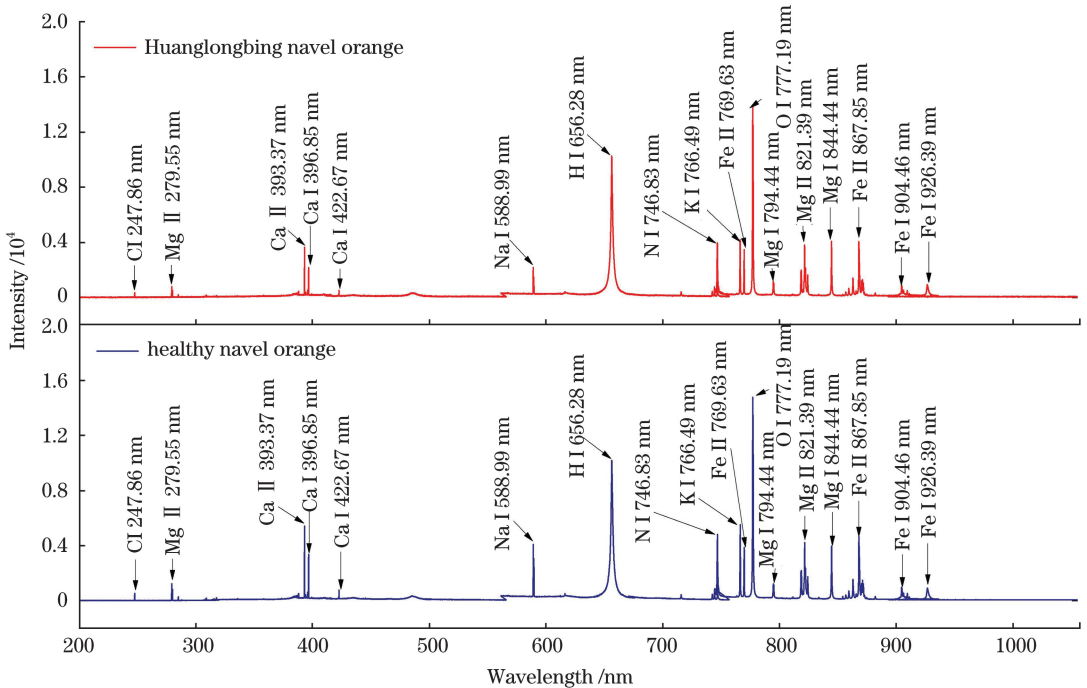


图 2 黄龙病及健康脐橙果汁的 LIBS 图

Fig. 2 LIBS images of Huanglongbing and healthy navel orange juices

### 3.3 黄龙病脐橙分类

为了消除 LIBS 噪声信号以及散射效应的干扰, 本文尝试了平滑处理、中心化预处理、多元散射校正、一阶导数和二阶导数等多种数据预处理方法

来剔除噪声信号及降低橙汁液面不平整等造成的散射效应, 以得到更高的光谱信噪比及稳定性。图 3 为黄龙病脐橙果汁的原始 LIBS 图和 9SM+MSC 光谱, 可以看出, 采用 9SM 法并结合 MSC 进行处理

后,LIBS 的整体强度略有下降,但谱线的相对强度得到了一定提高。处理后,Ca II 393.37 nm 谱线强度从 3510 增强到 5414 ,K I 766.49 nm 谱线强度从 4206 增强到 5240,光谱质量得到一定提高。

表 2 健康和黄龙病脐橙果汁的 LIBS 特征谱线强度的差异性

Table 2 Differences in LIBS characteristic spectral intensity of healthy and Huanglongbing navel orange juices

Parameter	Huanglongbing navel orange	Healthy navel orange	T value	p value
Intensity of Ca II 393.37 nm	5577.9±1435.8	4997.3±965.0	1.850	0.082
Intensity of Ca II 396.68 nm	3641.3±945.2	3136.0±591.6	2.533	0.021
Intensity of Ca I 422.67 nm	453.2±95.2	609.7±150.6	-4.877	0
Intensity of Mg II 279.55 nm	1152.2±168.5	1226.5±158.1	-1.326	0.202
Intensity of Mg I 794.44 nm	1009.9±107.7	1258.5±98.4	-9.725	0
Intensity of Mg II 821.39 nm	3255.3±391.7	4413.9±355.4	-14.620	0
Intensity of Mg I 844.57 nm	3242.3±107.7	4117.2±98.4	-11.157	0
Intensity of K I 766.49 nm	5357.4±861.8	5144.9±881.5	1.502	0.152
Intensity of Na I 588.99 nm	1112.5±201.8	2747.6±1028.9	-7.587	0
Intensity of Fe II 769.63 nm	4930.6±417.5	5778.4±430.6	-6.272	0
Intensity of Fe II 867.85 nm	3797±442.9	5004.1±361.9	-13.686	0
Intensity of C I 247.86 nm	358.3±52.5	467.0±73.1	-9.039	0
Intensity of H I 656.28 nm	9219.8±1595.8	10500.5±1961.0	-10.038	0
Intensity of O I 777.19 nm	12672.0±2218.3	15004.5±1552.1	-4.471	0

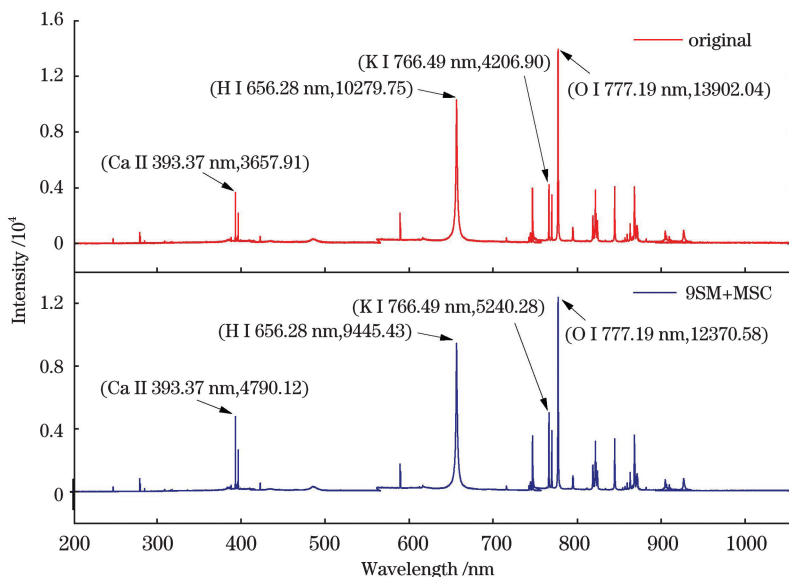


图 3 黄龙病脐橙果汁的原始 LIBS 图和 9SM+MSC 光谱

Fig. 3 Original LIBS image and 9SM+MSC spectrum of Huanglongbing navel orange juices

对于预处理后的光谱数据,采用主成分分析(PCA)法初步探究黄龙病脐橙的区分效果。每幅光谱累计 10 次脉冲,对每个橙汁样品采集 10 幅光谱,对健康和黄龙病脐橙样品分别采集 180 幅光谱。主成分分析(PCA) [16-17] 法是一种多元统计分析方法,

能够将许多相关性很高的变量进行转化,使彼此之间相互独立或不相关,最后选出变异的少数几个能够表征数据综合性能的新变量即主成分,从而有效减少数据计算量并减少无关变量的干扰。本文对健康和黄龙病脐橙果汁 LIBS 进行 9SM+MSC 预处

理后,采用 PCA 法进行鉴别。对应的二维散点图如图 4 所示。第一主成分的贡献率 (PCA 1) 为 93.44%,第二主成分的贡献率 (PCA 2) 为 5.57%,

第三主成分的贡献率 (PCA 3) 为 0.72%,前三个主成分的累计贡献率为 99.73%。从图 4 可以看出,基于 PCA 法的健康和黄龙病脐橙分类效果不佳。

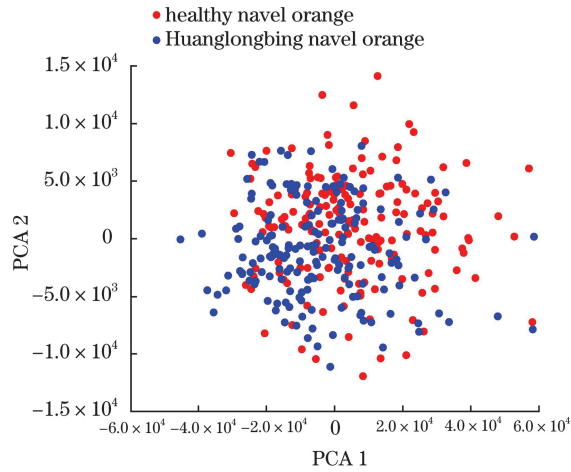


图 4 黄龙病和健康脐橙果汁的 PCA 散点图

Fig. 4 Scatter plot of Huanglongbing and healthy navel orange juices

为了提高黄龙病脐橙的判别精度,在 PCA 分类基础上,分别采用多层感知器神经网络模型和径向基函数神经网络模型进行比较。多层感知器神经网络模型<sup>[18]</sup>是一种前馈人工神经网络模型,它使用标准的反向传播算法将多个输入数据集映射到单个输出数据集中,输出节点的数量由输入元素和输出类别的数量确定。利用节点的信息来学习和预测输出,并通过网络进一步反馈预测误差以调整权重和偏差,进而使误差最小化;径向基函数神经网络<sup>[19-20]</sup>是一种三层前向网络,以 RBF 作为隐单元的“基”来构建隐含层空间,通过非线性基函数的线性组合实现从输入空间

到输出空间的非线性转换。

健康和黄龙病脐橙果汁共 360 组光谱数据经 9SM+MSC 预处理后,运用 PCA 法进行降维以减少数据量,选取前三个主成分,分别采用 MLP 和 RBF 模型进行判别分析,结果如表 3 所示。分析表明,PCA-MLP 和 PCA-RBF 模型的判别准确率均超过 90%,PCA-MLP 模型对健康和黄龙病脐橙的判别准确率均超过 93%,但 PCA-RBF 模型的假阳性辨别率高于 PCA-MLP 模型,说明利用主成分分析法并结合神经网络模型对脐橙黄龙病进行鉴别具有一定的可行性。

表 3 不同模型对健康和黄龙病脐橙的判别准确率

Table 3 Identification accuracies of healthy and Huanglongbing navel oranges using different models

Test set	Parameter	PCA-MLP		PCA-RBF	
		Healthy navel orange	Huanglongbing navel orange	Healthy navel orange	Huanglongbing navel orange
Training set	Correct number	123	114	109	124
	Error number	8	8	18	10
	Precision rate /%	93.8	93.4	85.8	92.5
Forecast set	Correct number	46	55	48	44
	Error number	3	3	5	5
	Precision rate /%	93.9	94.8	90.6	95.7

## 4 结 论

采集了健康和黄龙病脐橙果汁的糖度值、矿物

质元素含量及 LIBS 数据,比较了不同光谱预处理方法和分类模型对黄龙病脐橙的判别效果。结果表明,黄龙病会导致脐橙果肉品质发生变化;利用

9SM+MSC 对 LIBS 数据进行预处理后,运用主成分分析方法并结合多层感知神经网络模型对健康和黄龙病脐橙进行判别,效果较好,其训练集和预测集对健康和黄龙病脐橙的判别准确率均超过 93%。因此,利用 LIBS 法并结合合适的预处理方法和分类模型可以实现黄龙病脐橙的绿色快速判别,有效区分患病和健康橙汁产品,提高产品合格率。课题组将在以后的研究中对缺素脐橙进行深入探究。

### 参 考 文 献

- [1] Zhang J T, Lin G C, Chen H, et al. Experiment on temperature field distribution characteristics of citrus HLB far infrared heat treatment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 175-188.  
张建桃, 林耿纯, 陈鸿, 等. 柑橘黄龙病远红外热处理温度场分布特性试验研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 175-188.
- [2] Lu H X, Wei M M, Yang H H, et al. Detecting Huanglongbing by stacked denoising auto-encoders combined random forest [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(4): 460-466.  
路皓翔, 魏曼曼, 杨辉华, 等. 堆栈降噪自编码结合随机森林的黄龙病检测[J]. 激光与红外, 2019, 49(4): 460-466.
- [3] Xu F H, Hao Z Q, Huang L, et al. Comparative identification of citrus Huanglongbing by analyzing leaves using laser-induced breakdown spectroscopy and near-infrared spectroscopy[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics, 2020, 126: 43.
- [4] Liu Y D, Xiao H C, Sun X D, et al. Researching of non-destructive detection for citrus greening based on confocal micro-Raman[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(1): 111-116.  
刘燕德, 肖怀春, 孙旭东, 等. 基于共焦显微拉曼的柑橘黄龙病无损检测研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(1): 111-116.
- [5] Li J M, Ye X J, Wang Q N, et al. Development of prediction models for determining N content in citrus leaves based on hyperspectral imaging technology[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(1): 212-216.  
李金梦, 叶旭君, 王巧男, 等. 高光谱成像技术的柑橘植株叶片含氮量预测模型[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(1): 212-216.
- [6] Rao M, Gui J X, Lu Z J, et al. Fast determination of Huanglongbing in the field by near infrared spectroscopy[J]. Plant Protection, 2017, 43(6): 135-138.  
饶敏, 桂家祥, 卢占军, 等. 基于近红外技术柑橘黄龙病田间快速检测方法研究[J]. 植物保护, 2017, 43(6): 135-138.
- [7] Sankaran S, Ehsani R. Visible-near infrared spectroscopy based citrus greening detection: evaluation of spectral feature extraction techniques [J]. Crop Protection, 2011, 30(11): 1508-1513.
- [8] Mei H L, Deng X L, Hong T S, et al. Early detection and grading of citrus Huanglongbing using hyperspectral imaging technique[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(9): 140-147.  
梅慧兰, 邓小玲, 洪添胜, 等. 柑橘黄龙病高光谱早期鉴别及病情分级[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9): 140-147.
- [9] Ma H, Ji H Y, Won S L. Detection of citrus greening based on Vis-NIR spectroscopy and spectral feature analysis [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 2713-2718.  
马洪, 吉海彦, Won Suk Lee. 基于 Vis-NIR 光谱的柑橘叶片黄龙病检测及其光谱特性研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2713-2718.
- [10] Li J Y, Chen K, Chen G F, et al. Quantitative analysis of magnesium and titanium elements in aluminum alloy by handheld laser-induced breakdown spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 023002.  
李婧御, 陈宽, 陈国飞, 等. 手持式激光诱导击穿光谱仪对铝合金中镁钛元素的定量分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 023002.
- [11] Ranulfi A C, Romano R A, Magalhães A B, et al. Evaluation of the nutritional changes caused by Huanglongbing (HLB) to citrus plants using laser-induced breakdown spectroscopy [J]. Applied Spectroscopy, 2017, 71(7): 1471-1480.
- [12] Rao G F, Huang L, Liu M H, et al. Identification of Huanglongbing-infected navel oranges based on laser-induced breakdown spectroscopy combined with different chemometric methods[J]. Applied Optics, 2018, 57(29): 8738-8742.
- [13] Wang Q, Chen J Y, Xu M S, et al. Effect of Huanglongbing on the quality of newhall navel orange [J]. Food Science, 2019, 40(9): 48-53.  
王强, 陈金印, 徐明生, 等. 黄龙病对纽荷尔脐橙品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 48-53.
- [14] Chen X N. Progress in research on the control of

- citrus Huanglongbing [J]. *South China Agriculture*, 2019, 13(2): 23-24.
- 陈新宁. 柑橘黄龙病的防治研究进展[J]. *南方农业*, 2019, 13(2): 23-24.
- [15] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Method for the determination of potassium, sodium, calcium, magnesium, zinc, iron, copper, manganese, chromium, lead, cadmium contents in honey—atomic absorption spectrometry: GB/T 18932.12—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中华人民共和国推荐性国家标准: 蜂蜜中钾、钠、钙、镁、锌、铁、铜、锰、铬、铅、镉含量的测定方法——原子吸收光谱法: GB/T 18932.12—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- [16] Wang Z W, Luo J P, Li X S, et al. Edible oil terahertz spectral feature extraction method combining radial basis function and KPCA [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(2): 391-396.
- 王卓薇, 罗鉴鹏, 李学识, 等. 结合径向基函数和KPCA的食用油太赫兹光谱特征提取方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(2): 391-396.
- [17] Liu J X, Du B, Deng Y Q, et al. Terahertz-spectral identification of organic compounds based on differential PCA-SVM method[J]. *Chinese Journal of Laser*, 2019, 46(6): 0614039.
- 刘俊秀, 杜彬, 邓玉强, 等. 基于差分-主成分分析-支持向量机的有机化合物太赫兹吸收光谱识别方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(6): 0614039.
- [18] Liu L X, Sun L G, Li M Z, et al. Quantitative analysis of laser-induced breakdown spectroscopy of heavy metals in water based on biogeography-based optimization algorithm[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(9): 093005.
- 刘立新, 孙罗庚, 李梦珠, 等. 基于生物地理学优化算法的水体重金属激光诱导击穿光谱定量分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(9): 093005.
- [19] Tian Y, Liu X Y, Cao X Q, et al. Microwave-assisted synthesis of 1T MoS<sub>2</sub>/Cu nanowires with enhanced capacity and stability as anode for LIBs [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 374: 429-436.
- [20] Xu T Y, Yang J, Sun X R, et al. Mid-infrared spectroscopy analysis machine for rapid discrimination combined with support vector of botanical origin of honey [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 063003.
- 徐天扬, 杨娟, 孙晓荣, 等. 中红外光谱法结合支持向量机快速鉴别蜂蜜品种[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 063003.