

# 基于随机森林利用差分拉曼光谱对塑料食品包装瓶的分类研究

周贯旭<sup>1</sup>, 万婕<sup>2</sup>, 姜红<sup>3,4\*</sup>, 周飞翔<sup>1</sup>, 倪婷婷<sup>5</sup>, 黄凯<sup>5</sup>

(1.中国人民公安大学 侦查学院, 北京 100038; 2.广西警察学院, 南宁 530000; 3.万子健检测技术(北京)有限公司司法鉴定中心, 北京 100141; 4.食品药品安全防范山西省重点实验室, 太原 030006; 5.南京简智仪器设备有限公司, 南京 210049)

**摘要:** **目的** 建立一种快速无损的检验塑料食品包装瓶的分析方法, 提供一种快速分类模型。**方法** 利用差分拉曼光谱对 100 个塑料食品包装瓶样品进行检验, 根据样品的差分拉曼特征峰可以对样品进行分类, 样品可被分成聚对苯二甲酸乙二醇酯和聚丙烯两大类, 对其中数目较多的第 I 类继续根据样品中所含填料的不同进行分类。利用贝叶斯判别、多层感知器和随机森林算法分别构建分类模型对继续分类结果进行分析验证。**结果** 第 I 类样本可继续被分为 4 类, 贝叶斯判别结合留一交叉验证法分类正确率为 71.7%, 多层感知器神经网络分类模型的训练集和测试集分类正确率分别为 100%和 86.2%, 随机森林分类模型的训练集和测试集分类正确率分别为 100%和 96.5%。通过比较发现, 差分拉曼光谱与随机森林算法相结合可以对塑料食品包装瓶实现有效的分类。**结论** 该方法简单快速, 样品用量少且无损样品, 可为塑料食品包装品的物证鉴定提供科学依据。

**关键词:** 差分拉曼光谱; 塑料食品包装瓶; 人工神经网络; 随机森林算法

中图分类号: TB484 文献标志码: A 文章编号: 1001-3563(2024)09-0164-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2024.09.021

## Classification of Plastic Food Packaging Bottles by Differential Raman Spectroscopy Based on Random Forest

ZHOU Guanxu<sup>1</sup>, WAN Jie<sup>2</sup>, JIANG Hong<sup>3,4\*</sup>, ZHOU Feixiang<sup>1</sup>, NI Tingting<sup>5</sup>, HUANG Kai<sup>5</sup>

(1. College of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China; 2. Guangxi Police College, Nanning 530000, China; 3. Judicial Appraisal Center of Wanzijian Testing Technology Co., Ltd., Beijing 100141, China; 4. Shanxi Key Laboratory of Food and Drug Safety Prevention and Control, Taiyuan 030006, China; 5. Nanjing Jianzhi Instrument and Equipment Co., Ltd., Nanjing 210049, China)

**ABSTRACT:** The work aims to establish a fast and non-destructive analysis method for inspecting plastic food packaging bottles and provide a fast classification model. 100 plastic food packaging bottle samples were tested by differential Raman spectroscopy. The samples were classified based on their differential Raman characteristic peaks and divided into two categories of polyethylene terephthalate and polypropylene. The Class I samples in a larger number were further classified based on the different fillers contained. The classification model was constructed by Bayesian discriminant analysis, multi-layer perceptron, and random forest algorithm to analyze and verify the continued

收稿日期: 2023-09-01

基金项目: 食品药品安全防范山西省重点实验室开放课题资助(202204010931006); 广西警察院校级科研重点项目(2021KYA05)

\*通信作者

classification results. The Class I samples were further divided into four categories. The classification accuracy of Bayesian discriminant combined with left one cross validation method was 71.7%, the classification accuracy of the training and testing sets of the multi-layer perceptron neural network classification model was 100% and 86.2%, respectively, and the classification accuracy of the random forest classification model was 100% and 96.5%. Through comparison, it was found that the combination of differential Raman spectroscopy and random forest algorithm could effectively classify plastic food packaging bottles. This method is simple and fast, requiring a small sample size but not damaging samples, which can provide scientific basis for the identification of physical evidence in plastic food packaging products.

**KEY WORDS:** differential Raman spectroscopy; plastic food packaging bottles; artificial neural network; random forest algorithm

塑料食品包装瓶存在于生活的方方面面。在许多案发现场, 常常能够提取到塑料食品包装瓶的物证, 对该未知信息的物证及碎片进行检验分析, 并对其进行准确快速分类, 有助于判断该物证来源以及主要运输途径。可为侦查破案提供线索, 缩小侦查范围<sup>[1]</sup>。

目前用于塑料物证检验的方法主要有红外光谱法、X 射线荧光光谱法、扫描电镜/能谱法、拉曼光谱法、差分拉曼光谱法等方法。陈壮等<sup>[2]</sup>利用 X 射线荧光光谱对塑料包装材料进行了检验。胡利芬等<sup>[3]</sup>利用扫描电镜/能谱仪对汽车中挡封条进行检验, 分析其发白原因。杨思节等<sup>[4]</sup>利用拉曼光谱对海水中微塑料进行了检验。李锦等<sup>[5]</sup>利用差分拉曼光谱法对药品塑料包装瓶进行了检验。苏东斌等<sup>[6]</sup>利用红外光谱法对包括食品饮料包装瓶在内的塑料包装材料进行了检验。差分拉曼光谱是一项新兴技术, 它可以克服荧光干扰, 有效消除干扰峰, 保留纯净的拉曼特征峰<sup>[7]</sup>, 目前在检验纸质材料、毒物毒品、食品安全、塑料材料等领域有一定研究。笔者<sup>[8]</sup>利用差分拉曼光谱对纸质快递文件袋进行检验, 实现了纸张类物证的分类。田陆川等<sup>[9]</sup>差分拉曼光谱法对 7 种芬太尼类新精神活性物质进行了检验, 实现了分类的目的。孙家政等<sup>[10]</sup>利用差分拉曼光谱法结合 K-means 对牙膏进行检验, 实现了快速分类。姜红等<sup>[11]</sup>利用差分拉曼光谱法结合聚类分析对食品塑料包装盒进行检验, 对样本进一步实现区分。利用差分拉曼结合化学计量学对塑料食品包装瓶的相关研究尚未见报道。本实验采用便携式差分拉曼光谱仪对收集到 100 个不同品牌的塑料食品包装瓶样品进行检验, 依据样品的差分拉曼特征峰对其进行分类, 借助贝叶斯判别模型、多层感知器神经网络模型和随机森林模型对上述分类结果进行验证, 进而优选出最适合此类样品的分类方法。

## 1 实验

### 1.1 实验仪器及条件

SEDRS Portable-BASE 型便携式差分拉曼光谱仪

(南京简智仪器设备有限公司); 光源波长为 785 nm; 激光功率 250 mW, 积分时间 3 s, 测试波数范围为 250~2 800  $\text{cm}^{-1}$ 。

### 1.2 实验样本

来自不同品牌的塑料食品包装瓶 100 个(样品表略)。

### 1.3 实验方法

分别剪取约 0.5 cm×0.5 cm 大小的样品, 用 75% 酒精棉进行擦拭, 待样品晾干后, 利用差分拉曼光谱仪在上述实验条件下, 对实验样品进行测试。

重现性实验: 随机选取 10<sup>#</sup>样品, 对其同一部位进行 5 次平行实验; 并对其左上、左下、右上、右下、中心 5 个部位进行测试, 并对 2 次实验分别计算相对标准偏差 (Relative Standard Deviation, RSD)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重现性实验结果分析

为验证仪器的精密度和样品的均匀性, 确保实验结果准确可靠, 对样品进行了重现性实验。10<sup>#</sup>样品同一部位的 RSD 结果如表 1 所示, 不同部位的 RSD 结果如表 2 所示。在 10<sup>#</sup>样品同一位置以及不同位置处的实验结果显示相对标准偏差均低于 10%, 说明仪器具有较好的精密性, 样品的均匀性较好。因此, 利用该实验方法对塑料食品包装瓶进行检验结果准确可靠。

表 1 同一位置的 RSD 结果  
Tab.1 RSD results at the same location

实验次数	690 $\text{cm}^{-1}$	1 285 $\text{cm}^{-1}$	1 613 $\text{cm}^{-1}$
1	221.41	769.17	2 146.35
2	243.21	704.72	2 059.35
3	204.8	711.37	2 092.85
4	197.6	703.32	2 030.13
5	239.47	734.35	2 085.39
RSD 值/%	9.1	3.8	2.1

表2 不同位置的RSD结果  
Tab.2 RSD results at different locations

实验位置	690 cm <sup>-1</sup>	1 285 cm <sup>-1</sup>	1 613 cm <sup>-1</sup>
左上	219.06	765.84	2 173.16
左下	252.08	649.19	2 074.54
中心	228.62	689.47	2 070.11
右上	196.34	747.54	2 020.87
右下	205.2	705.61	1 920.62
RSD 值/%	9.8	6.5	4.5

## 2.2 人工分类

将样品的差分拉曼谱图与已知塑料成分的拉曼谱图进行比较,通过查阅相关文献可得,626、858、999、1 091、1 285、1 614、1 727 cm<sup>-1</sup>处特征峰可作为识别PET类塑料的拉曼特征峰,其中在1 727 cm<sup>-1</sup>对应C=O的伸缩振动,在1 614 cm<sup>-1</sup>对应苯环的C—C的伸缩振动,在1 285 cm<sup>-1</sup>对应CH<sub>2</sub>的弯曲振动,1 091 cm<sup>-1</sup>处的振动峰由苯环与—COOH间相连的3个碳原子间伸缩振动引起,在999 cm<sup>-1</sup>处对应苯环的三角形环呼吸振动,在858 cm<sup>-1</sup>为1,4-二取代苯环的定位峰,在626 cm<sup>-1</sup>处的振动峰由苯环内C—C对称弯曲振动引起。399、529、810、842、973、1 147、1 330、1 459 cm<sup>-1</sup>处的特征峰可作为识别PP类塑料的拉曼特征峰,其中在1 459、1 330 cm<sup>-1</sup>处对应CH<sub>2</sub>的弯曲振动,在1 147、973、810 cm<sup>-1</sup>处对应C—C的伸缩振动,在842 cm<sup>-1</sup>处对应CH<sub>3</sub>的弯曲振动,806 cm<sup>-1</sup>处和836 cm<sup>-1</sup>处的振动峰均由C—H间摇摆振动引起,836 cm<sup>-1</sup>处的振动峰由C—C非对称伸缩振动引起<sup>[12-14]</sup>。通过对比拉曼位移,可将样品初步分为两大类,除3#样品为聚丙烯(PP)类塑料外,其余都是聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)类塑料,将PET类划分为第I大类,将PP类塑料划分为第II大类。

在生产过程中,生产厂家为满足不同塑料的性能

要求常常会添加不同的填料。常见的填料主要有如纤维素、滑石粉、硫酸钡、碳酸钙等。456、996、1 094、1 118、1 294、1 338、1 409 cm<sup>-1</sup>处特征峰,可作为识别纤维素的拉曼特征峰,464、790、1 048、1 096 cm<sup>-1</sup>处特征峰,可作为识别滑石粉的拉曼特征峰,461、619、988、1 138 cm<sup>-1</sup>处特征峰可作为识别硫酸钡的拉曼特征峰,其281、710、1 085 cm<sup>-1</sup>可作为识别碳酸钙的拉曼特征峰<sup>[15]</sup>。根据第I大类塑料内的填料区别对其继续分类,可将其分成4类,第I大类的分类结果见表3。

第I-1、I-2、I-3、I-4、II类样品的差分拉曼光谱图见图1。

第I大类样品是PET类塑料。第I-2类中主要填料是碳酸钙,—CO<sub>3</sub>在696 cm<sup>-1</sup>处会发生面内弯曲,产生特征峰。在280、695、725 cm<sup>-1</sup>处特征峰与碳酸钙在280、696、710 cm<sup>-1</sup>处特征峰相对应。第I-3类中主要填料是滑石粉,其在788 cm<sup>-1</sup>处特征峰与滑石粉在790 cm<sup>-1</sup>处特征峰相对应。第I-4类中主要填料是硫酸钡,其在270 cm<sup>-1</sup>处的特征峰与硫酸钡在277 cm<sup>-1</sup>处特征峰相对应。II类样品是PP类塑料。

## 2.3 数据预处理

样品在不同的拉曼位移处的峰强度差别较大,在做数据分析时,这些峰强度之间的差异会在整个分析过程使计算权重发生变化,进而制造很多麻烦,故在数据分析前通过python中的sklearn.preprocessing函数对差分拉曼数据进行z-score标准化,进而保证数据之间具有可比性<sup>[16]</sup>。

## 2.4 贝叶斯判别分析

鉴于人工进行分类可能会存在误差的情况,利用贝叶斯判别分析对分类结果进行验证,以经过z-score标准化后的变量为研究对象,建立贝叶斯判别函数<sup>[17]</sup>。判别函数的摘要统计见表4。

贝叶斯判别分析模型提取了3个判别函数<sup>[18]</sup>,对模型的3个判别函数建绘制联合分布散点图(见图2)。

表3 第I大类样品分类结果  
Tab.3 Classification results of Class I samples

分类	填料	样品编号
I-1	无	11 <sup>#</sup> 、14 <sup>#</sup> 、28 <sup>#</sup> 、31 <sup>#</sup> ~33 <sup>#</sup> 、36 <sup>#</sup> 、43 <sup>#</sup> 、44 <sup>#</sup> 、46 <sup>#</sup> 、49 <sup>#</sup> 、50 <sup>#</sup> 、52 <sup>#</sup> 、53 <sup>#</sup> 、57 <sup>#</sup> 、59 <sup>#</sup> 、62-67、70 <sup>#</sup> 、71 <sup>#</sup> 、74 <sup>#</sup> 、75 <sup>#</sup> 、77 <sup>#</sup> 、78 <sup>#</sup> 、80 <sup>#</sup> 、81 <sup>#</sup> 、83 <sup>#</sup> ~85 <sup>#</sup> 、86 <sup>#</sup> 、89-97、99 <sup>#</sup>
I-2	碳酸钙	1 <sup>#</sup> 、2 <sup>#</sup> 、4 <sup>#</sup> ~8 <sup>#</sup> 、10 <sup>#</sup> 、17 <sup>#</sup> ~19 <sup>#</sup> 、21 <sup>#</sup> 、22 <sup>#</sup> 、24 <sup>#</sup> 、26 <sup>#</sup> 、27 <sup>#</sup> 、29 <sup>#</sup> 、30 <sup>#</sup> 、34 <sup>#</sup> 、35 <sup>#</sup> 、37 <sup>#</sup> ~40 <sup>#</sup> 、42 <sup>#</sup> 、45 <sup>#</sup> 、47 <sup>#</sup> 、48 <sup>#</sup> 、51 <sup>#</sup> 、54 <sup>#</sup> 、56 <sup>#</sup> 、58 <sup>#</sup> 、60 <sup>#</sup> 、61 <sup>#</sup> 、68 <sup>#</sup> 、72 <sup>#</sup> 、73 <sup>#</sup> 、76 <sup>#</sup> 、79 <sup>#</sup> 、82 <sup>#</sup> 、87 <sup>#</sup> 、88 <sup>#</sup> 、98 <sup>#</sup> 、100 <sup>#</sup>
I-3	滑石粉+碳酸钙	12 <sup>#</sup> 、15 <sup>#</sup> 、16 <sup>#</sup> 、25 <sup>#</sup> 、55 <sup>#</sup> 、69 <sup>#</sup>
I-4	硫酸钡	9 <sup>#</sup> 、13 <sup>#</sup> 、20 <sup>#</sup> 、23 <sup>#</sup> 、41 <sup>#</sup>

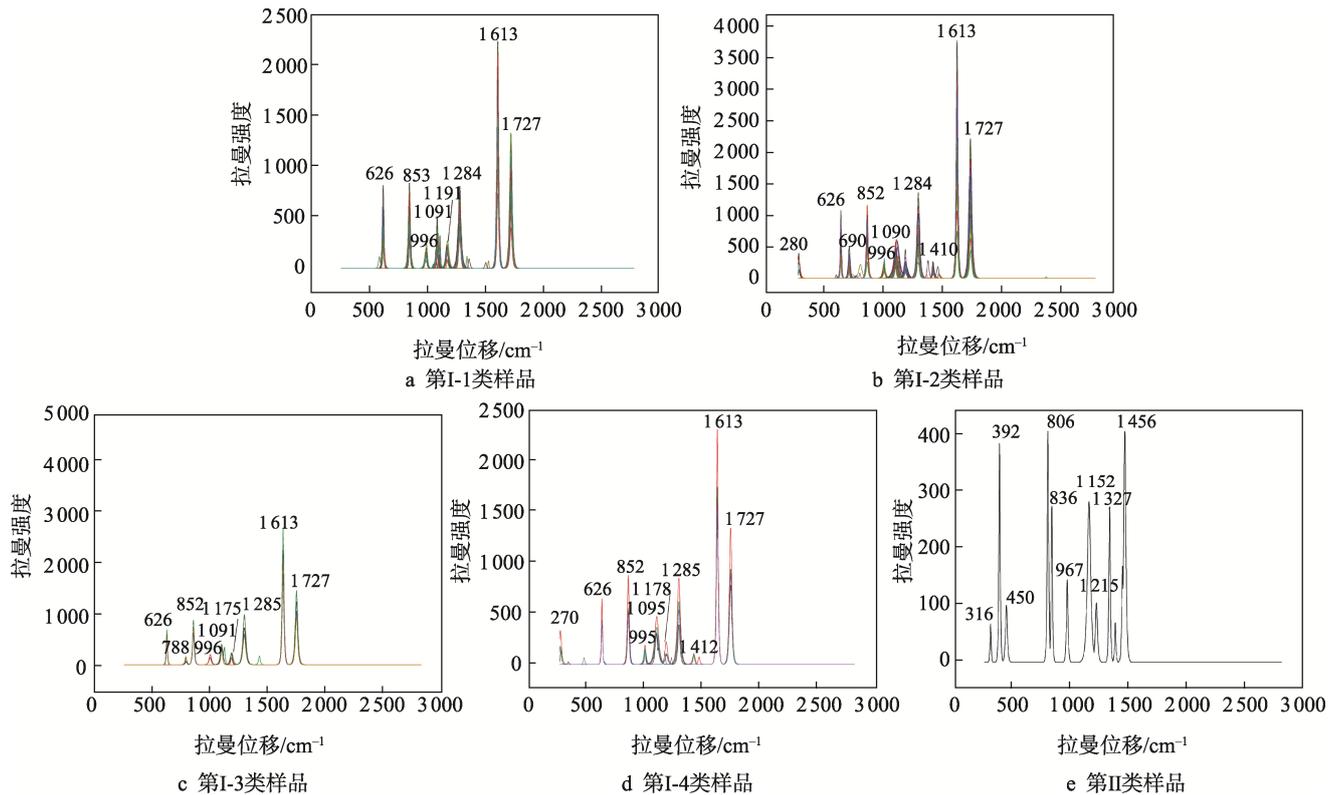


图 1 5 类样品的差分拉曼光谱图

Fig.1 Differential Raman spectra of the 5 categories of samples

表 4 判别函数的摘要统计

Tab.4 Summary statistics of discriminant function

函数	特征值	方差百分比/%	累计百分比/%	典型相关性
1	6.299	56.4	56.4	0.929
2	2.696	24.1	80.5	0.854
3	2.180	19.5	100.0	0.828

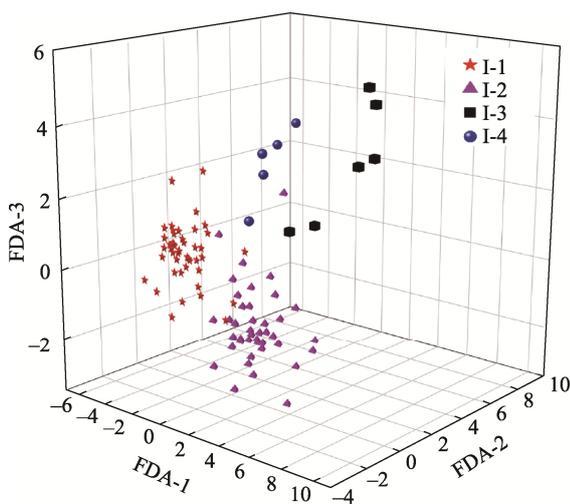


图 2 样品联合分布散点图

Fig.2 Scatter diagram of joint distribution of samples

由图 2 可知, 通过人工区分的第 I-1~I-4 类, 在散点图上相对分离, 其中第 I-3 类和第 I-4 类的分类

效果尤其显著, 其他 2 组组分离效果较好, 可以证明人工分类具有一定的准确性和科学性。通过贝叶斯判别模型的留一交叉验证法对分类结果进行预测(见表 5)。贝叶斯判别对原始已分组的分类正确率为 95.9%, 但通过留一交叉验证法对其进行验证的正确率为 71.7%, 正确率突然下降, 分析其原因可能是由于贝叶斯判别没有划分训练集与验证集而导致其在分类过程中造成过拟合现象。

## 2.5 多层感知器神经网络

人工神经网络是一种监督学习算法的模型, 其与贝叶斯判别不同之处便是对样品划分训练集与测试集, 可以有效避免过拟合的现象, 故通过建立多层感知器 (Multilayer Perceptron, MLP) 神经网络对第 I 大类的分类结果进行检验分析, 同时建立对于未知样本的分类模型。

以 99 个样品的差分拉曼光谱数据为基础, 对经过预处理后的数据建 MLP 分类模型, 将样本按照 70%和 30%的比例划分为训练集和测试集, 即 70 个样品作为训练集, 29 个样品作为测试集<sup>[5]</sup>。在 MLP 模型对该类样品的测试中, 将每个样品的波长作为输入层神经元, 隐藏层数设定为 1 层, 其中隐藏层中包含 3 个神经元, 选择双曲正切函数为输入函数, 令 Softmax 函数作为输出层激活函数。MLP 模型分类结果见表 6, 其中训练集的正确率为 100%, 测试集的正确率为 86.2%, 其总体正确率 95.9%。

表5 贝叶斯判别模型分类结果  
Tab.5 Classification results of Bayesian discriminant model

样本	真实值	预测值			
		I-1	I-2	I-3	I-4
未留一交叉	I-1	93.2%	6.80%	0	0
	I-2	2.30%	97.70%	0	0
	I-3	0	0	100%	0
	I-4	0	0	0	100.00%
留一交叉	I-1	80%	13.30%	2.20%	4.40%
	I-2	18.20%	63.60%	6.80%	11.40%
	I-3	0	33.30%	66.70%	0
	I-4	20%	0	0	80%

注：第1个数据表示预测值为 I-1 的数量占原始标签就为 I-1 数量的百分比，其他数据以此类推。

表6 MLP 模型分类结果  
Tab.6 Classification results of MLP model

样本	真实值	预测值			
		I-1	I-2	I-3	I-4
训练集	I-1	100%	0	0	0
	I-2	0	100%	0	0
	I-3	0	0	100%	0
	I-4	0	0	0	100%
测试集	I-1	85.71%	7.1%	0	7.1%
	I-2	15.38%	84.61%	0	0
	I-3	0	0	100%	0
	I-4	0	0	0	100%

注：第1个数据表示预测值为 I-1 的数量占原始标签就为 I-1 数量的百分比，其他数据以此类推。

## 2.6 随机森林

随机森林 (Random Forest, RF) 模型是一种基于自主重采样技术的非线性数据处理技术算法, 利用 Bagging 方法构建回归树分类器。RF 模型会在原始数据中随机选择部分变量, 构成若干个不同的回归树分类器, 通过对每组数据建立决策树模型, 所有的决策树组合成随机森林模型, 根据这些个不同的分类器模型的平均值确定最终的结果<sup>[19]</sup>。本文将 42 个样本按

照 7 : 3 的比例划分训练集和测试集, 即 70 个样本作为训练集, 29 个样本作为测试集, 建立 RF 分类模型, 其中 trees 为最大决策树数量, 本文设置为 200; p\_train 和 t\_train 分别为 99 个高光谱样本数据和该样本所属的类别; 通过袋外数据 (Out of Bag, OOB) 对 RF 分类模型的误差率进行评价<sup>[20]</sup>; minleaf 是模型中的最小叶子数, 本文设置为 1。分类结果见图 3, 其中图 3a 为训练集分类结果, 图 3b 为测试集分类结果。

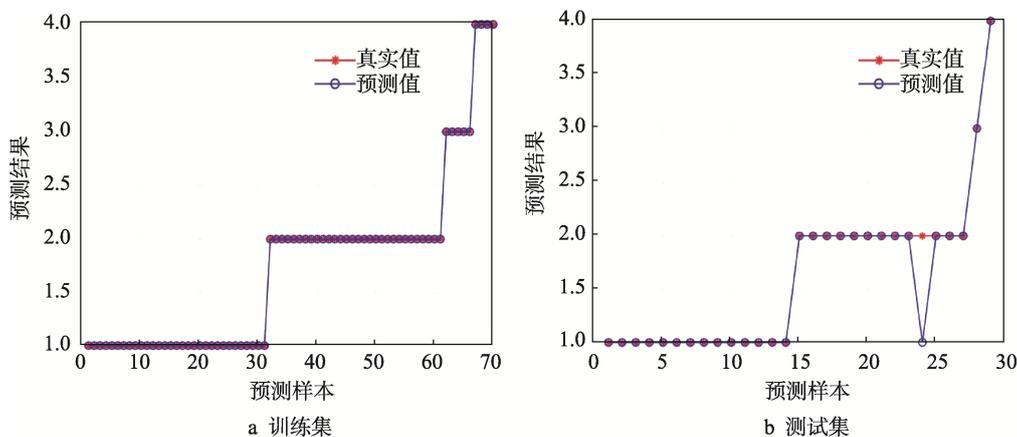


图3 随机森林分类模型的样本分类结果  
Fig.3 Classification results of RF Model

从分类结果图中可以看出, 样本在训练集中的分类准确率为 100%, 70 个样本在训练集中得到了较好的分类, 在测试集中, 样本的分类准确率只有 96.5%, 只有第 II 类中的一个样本被误判为第 I 类。通过 RF 误差曲线 (见图 4) 可以看出, 当模型中决策树数量较少时, 模型整体的误差率偏高, 随着决策树的数量增加, 模型的误差率趋于平稳, 处于 0.09 以下, 表明该模型的误差率偏低, 模型泛化能力较强。MLP 神经网络属于数据饥饿性方法, 当数据量较小时容易存在类别不均衡的现象, 容易导致模型分类效果较差, 而随机森林模型属于 bagging 类型, 通过组合多个弱分类器来提高模型的准确度和泛化能力。

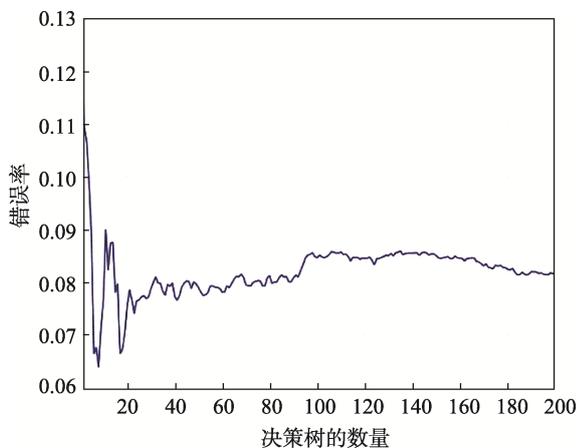


图 4 随机森林模型的误差率曲线

Fig.4 Error rate curve of random forest model

### 3 结语

通过差分拉曼光谱法对食品塑料包装瓶进行检验分析, 依据主要塑料成分不同, 可将原样品数据分为 PET 类和 PP 类, 对 PET 类塑料进行填料分析, 可以将第 I 类 (PET 类) 继续分为 4 类。利用贝叶斯判别模型、MLP 神经网络分类型和 RF 分类模型对分类结果分别进行检验, 其正确率为 71.7%、87.1% 和 95.6%。随机森林模型具有更高的准确率, 可以通过建立 RF 模型对未知样品进行检验。在未来的研究工作中, 将结合 X 射线荧光对塑料食品包装瓶进行更进一步的分组, 以至于达到区分每个样品的目标。该方法简单快速, 可以对塑料食品包装瓶样品进行快速无损的检测, 为公安机关实际办案提供帮助。

#### 参考文献:

[1] 杨梦恩, 姜红, 陈琿, 等. 差分拉曼光谱和统计学方法在食品包装纸分类中的应用[J]. 理化检验-化学分册, 2022, 58(11): 1303-1308.  
YANG M E, JIANG H, CHEN H, et al. Application of

Differential Raman Spectroscopy and Statistical Methods in Food Packaging Paper Classification[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2022, 58(11): 1303-1308.

- [2] 陈壮, 姜红, 罗鸿斌, 等. X 射线荧光光谱法结合 HCA-PCA-BPNN 实现塑料快递包装袋识别分类[J]. 塑料工业, 2022, 50(11): 138-144.  
CHEN Z, JIANG H, LUO H B, et al. Identification and Classification of Plastic Express Bags by X-Ray Fluorescence Spectrometry Combined with HCA-PCA-BPNN[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(11): 138-144.
- [3] 胡利芬, 徐晓强. 汽车挡风条发白原因分析[J]. 塑料工业, 2021, 49(7): 104-107.  
HU L F, XU X Q. Reasons on the Whitening of the Wind Strip[J]. China Plastics Industry, 2021, 49(7): 104-107.
- [4] 杨思节, 冯巍巍, 蔡宗岐, 等. 基于拉曼光谱技术的海水微塑料快速识别技术研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2469-2473.  
YANG S J, FENG W W, CAI Z Q, et al. Study on Rapid Recognition of Marine Microplastics Based on Raman Spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(8): 2469-2473.
- [5] 李锦, 姜红, 杨俊, 等. 差分拉曼光谱结合神经网络对药品塑料包装瓶的分类研究[J]. 塑料工业, 2022, 50(8): 101-107.  
LI J, JIANG H, YANG J, et al. Classification of Plastic Pharmaceutical Packaging Bottles Based on Differential Raman Spectroscopy and ANN[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(8): 101-107.
- [6] 苏东斌, 李开开, 高飞龙, 等. 红外光谱结合化学计量学对塑料包装材料的检验[J]. 上海塑料, 2022, 50(4): 49-56.  
SU D B, LI K K, GAO F L, et al. Inspection of Plastic Packaging Materials by Infrared Spectroscopy Combined with Chemometrics[J]. Shanghai Plastics, 2022, 50(4): 49-56.
- [7] 付钧泽, 姜红, 刘峰, 等. 差分拉曼光谱结合系统聚类检验香烟水松纸[J]. 化学研究与应用, 2020, 32(11): 1973-1978.  
FU J Z, JIANG H, LIU F, et al. Discrimination of Cigarette Tipping Paper by Differential Raman Spectroscopy Combined with System Clustering[J]. Chemical Research and Application, 2020, 32(11): 1973-1978.
- [8] 周贯旭, 姜红, 胡晓光, 等. 基于差分拉曼光谱法和化学计量学的纸质快递文件袋的分类研究[J/OL]. 理化检验-化学分册: 1-5[2023-09-23]. <http://kns.cnki.net/>

- kcms/detail/31.1337.TB.20230828.1624.002.html.  
ZHOU G X, JIANG H, HU X G, et al. Study on Classification of Paper Express Document Bags Based on Differential Raman Spectroscopy Combined with Chemometrics[J/OL]. Physical Testing and Chemical Analysis(Part B: Chemical Analysis): 1-5[2023-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1337.TB.20230828.1624.002.html>.
- [9] 田陆川, 姜红, 杨俊, 等. 差分拉曼光谱检验7种芬太尼类新精神活性物质的研究[J/OL]. 中国测试: 1-11[2023-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.tb.20220831.1702.002.html>.  
TIAN L C, JIANG H, YANG J, et al. Detection of Seven New Psychoactive Substances of Fentanyl by Differential Raman Spectroscopy[J/OL]. China Measurement & Test: 1-11[2023-09-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.tb.20220831.1702.002.html>.
- [10] 孙家政, 姜红, 刘新磊, 等. 差分拉曼光谱技术结合 K-means 聚类法对牙膏的快速分类[J]. 理化检验-化学分册, 2022, 58(1): 84-89.  
SUN J Z, JIANG H, LIU X L, et al. Rapid Classification of Toothpaste by Differential Raman Spectroscopy Combined with K-Means Clustering Method[J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2022, 58(1): 84-89.
- [11] 姜红, 田陆川, 王艺霖, 等. 差分拉曼光谱法结合聚类分析检验食品塑料包装盒[J]. 包装工程, 2021, 42(15): 85-93.  
JIANG H, TIAN L C, WANG Y L, et al. Differential Raman Spectroscopy Combined with Cluster Analysis for Inspection of Food Plastic Packaging Box[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(15): 85-93.
- [12] 陈丽萍, 唐宇璇, 姜红, 等. 差分拉曼光谱对眼药水塑料瓶的分类研究[J]. 包装工程, 2023, 44(5): 196-202.  
CHEN L P, TANG Y X, JIANG H, et al. Classification of Plastic Bottles of Eye Drops by Differential Raman Spectroscopy[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5): 196-202.
- [13] 董鹄, 饶之帆, 杨晓云, 等. 几种塑料的拉曼光谱检测[J]. 塑料工业, 2011, 39(6): 67-70.  
DONG K, RAO Z F, YANG X Y, et al. Determination of Several Plastic by Raman Spectroscopy[J]. China Plastics Industry, 2011, 39(6): 67-70.
- [14] 张愚若, 姜红, 刘奎江, 等. 食品塑料包装袋的拉曼光谱分析[J]. 上海塑料, 2020(1): 30-34.  
ZHANG Y R, JIANG H, LIU K J, et al. Raman Spectroscopy Analysis of Food Plastic Packing Bags[J]. Shanghai Plastics, 2020(1): 30-34.
- [15] 李锦, 姜红, 思沐, 等. 手持式差分拉曼光谱对纸张物证的分类研究[J]. 化学研究与应用, 2021, 33(10): 1883-1888.  
LI J, JIANG H, SI M, et al. Research on Classification of Paper Evidence by Handheld Differential Raman Spectroscopy[J]. Chemical Research and Application, 2021, 33(10): 1883-1888.
- [16] 陈壮, 姜红, 郝丁成, 等. 基于 K-means 和簇内误差平方和的塑料快递包装袋 X 射线荧光光谱检验[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(11): 1130001.  
CHEN Z, JIANG H, HAO D C, et al. X-Ray Fluorescence Spectral Inspection of Plastic Express Packaging Bags Based on K-Means and Within-Cluster Sum of Squared Errors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(11): 1130001.
- [17] ZHANG J, GAO P Y, WU Y, et al. Identification of Foodborne Pathogenic Bacteria Using Confocal Raman Microspectroscopy and Chemometrics[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 874658.
- [18] ZHANG J, JIANG H, DUAN B, et al. A Rapid and Nondestructive Approach for Forensic Identification of Cigarette Inner Liner Papers Using Shift-Excitation Raman Difference Spectroscopy and Chemometrics[J]. Journal of Forensic Sciences, 2021, 66(6): 2180-2189.
- [19] 陈玥瑶, 夏静静, 韦芸, 等. 近红外光谱法无损检测平谷产大桃品质方法研究[J]. 分析化学, 2023, 51(3): 454-462.  
CHEN Y Y, XIA J J, WEI Y, et al. Research on Nondestructive Quality Test of Pinggu Peach by Near-Infrared Spectroscopy[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2023, 51(3): 454-462.
- [20] 姚锐, 惠萌, 李俊, 等. 基于随机森林的局部放电特征提取和优选研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2021, 48(4): 63-72.  
YAO R, HUI M, LI J, et al. Feature Extraction and Optimal Selection Based on Random Forest for Partial Discharges[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2021, 48(4): 63-72.