

基于主成分分析和 Fisher 判别分析的印泥检验研究

田陆川¹, 姜红^{1*}, 陈坦之¹, 王艺霖¹, 段斌², 刘峰², 徐少辉¹

(¹中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038; ²南京简智仪器设备有限公司, 南京 210049)

摘要 在公安司法实践中, 印章印泥长期在鉴别文件真伪中发挥重要作用。为判定文件真伪提供证据, 利用 SERDS Portable-Base 便携式差分拉曼光谱仪, 在激发光源 785 nm, 激光功率 380 mW, 扫描时间 10 s, 扫描范围 250~2 800 cm⁻¹ 的试验条件下, 对 36 个印泥样本进行了快速无损检测。通过分析谱图可以将样品按照特征峰位置和数目进行区分, 对于同组样品还可以通过特征峰的相对峰高比进行区分。利用主成分分析法对所得的差分数据进行降维, 将所得到的降维后的成分矩阵进行系统聚类, 所有样本被科学地分为 7 类, DP 值为 85.23%。同时利用判别分析建立了基于聚类分析的分类模型, 经交叉验证后分类正确率达 94.4%。该方法快速无损, 灵敏度高, 抗荧光干扰性强, 结合所建立模型可以科学地检验印泥样品, 为公安一线文件检验等实际工作提供帮助。

关键词 印泥; 差分拉曼光谱; 主成分分析; 系统聚类; 判别分析

中图分类号: TS802.3 文献标志码: A doi: 10.14128/j.cnki.al.20224205.151

Study on the Inspection of Inkpad Based on Principal Component Analysis and Discriminant Analysis

Tian Luchuan¹, Jiang Hong^{1*}, Chen Tanzhi¹, Wang Yilin¹, Duan Bin², Liu Feng², Xu Shaohui¹

(¹Investigation Institute, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;

²Nanjing Jianzhi Instrument and Equipment Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210049, China)

Abstract In the judicial practice of public security, seal paste is playing an important role in identifying the authenticity of documents for a long time. To provide evidence for determining the authenticity of the documents, a rapid nondestructive test was performed on 36 samples of inkpad using a SERDS Portable-Base portable differential Raman spectrometer under the test conditions of excitation source 785 nm, laser power 380 mW, scan time 10 s, and scan range 250~2 800 cm⁻¹. The samples can be distinguished according to the position and number of characteristic peaks by analyzing the spectrum, and the samples in the same group can also be distinguished by the relative peak height ratio of characteristic peaks. At the same time, the principal component analysis method is used to reduce the dimension of the difference data, and the reduced dimension component matrix is systematically clustered. All the samples are scientifically divided into 7 categories, and the DP value is 85.23%. At the same time, a classification model based on cluster analysis is established by discriminant analysis. After cross validation, the classification accuracy is 94.4%. This method is fast, nondestructive, sensitive and strong anti fluorescence interference. Combined with the established model, it can scientifically test the inkpad samples, which can provide help for the front-line document inspection of public security.

Key words inkpad; differential Raman spectroscopy; principal component analysis; system clustering; discriminant analysis

0 引言

作为文件检验的重点, 印章印泥的真伪性检验

一直是司法鉴定的难点之一。从古至今, 印章印泥等在甄别文件有效性与真实性中发挥着重要作用。

收稿日期: 2021-08-25; 修回日期: 2021-09-16

基金项目: 中国人民公安大学 2021 年度基科费重点项目 (2021JKF218); 南京简智仪器设备有限公司技术合作项目 (20191218)

作者简介: 田陆川 (2001—), 男, 本科在读。研究方向: 刑事科学技术。E-mail: 843934069@qq.com

* 通信作者: 姜红 (1963—), 女, 硕士, 教授。研究方向: 微量物证分析的教学和研究。E-mail: Jiangh2001@163.com

近年来随着经济发展,文件造假、合同诈骗等新型案件激增,对印泥的鉴定量也大大增加^[1]。目前,研究印泥成分的主要方法有光谱法与色谱法等,常见的如共聚焦显微拉曼光谱法^[2]和高效液相色谱法^[3-4]等。差分拉曼光谱相较于色谱法和普通拉曼光谱法,具有无损检材、抗荧光干扰性强、系统整体信噪比高、操作简便等优势,作为一种新兴技术,尚未见其应用于印泥的检测中。

近年来,随着大数据侦查与科技兴警战略的部署,许多研究结合了统计学的一些分类方法,取得了较好的效果。本文创新性地将传统谱图解析法与化学计量学的一些方法相结合,利用主成分分析对所得的差分数据进行降维,将提取到的特征变量进行系统聚类,并利用判别分析法建立了基于聚类分析的对未知样本的预测模型,经交叉验证后准确率达 94.4%。本文目的是提出一种区分检验印泥的新方法,同时建立区分未知来源印泥的模型,为今后文件检验和公安机关实际办案提供一种新思路。

1 试验部分

1.1 仪器及条件

试验利用 SERDS Portable-Base 型便携式差分拉曼光谱仪(图 1),采用双频光源,光源波长为(784~785) nm±0.3 nm;激光功率 380 mW;积分时间 10 s,扫描范围 180~2 800 cm⁻¹;检测次数为 3 次。

该仪器的优势在于可以直接测量高荧光物质,在保证测量准确性的前提下大幅降低光源功率,提高仪器整体可靠性。



图 1 SERDS Portable-Base 型便携式差分拉曼光谱仪
Fig. 1 SERDs Portable-Base differential Raman spectrometer

1.2 试验样本

不同来源、不同品牌、不同系列的印泥样品 36 个,样品信息表如表 1。试验时用干净的棉签将印泥涂抹在白纸上,放在激光器下待测,每个样品检测 3 次。

功率越高、积分时间越长,测试效果越好,但过高的功率和过长的积分时间则会使样品被点燃。经过优选条件后,认为激光功率 380 mW,积分时间 10 s是较为科学的。

表 1 印泥样品表
Table 1 Inkpad sample list

| Sample number | Name | Specifications | Brand |
|---------------|------------------|----------------|--------|
| 1 | Shi Cao Tang | 0515/6 | Xue Ao |
| 2 | Zhu Hong Yin Ni | 120 g | Xue Ao |
| 3 | Zhu Hong Yin Ni | 10 g | Xue Ao |
| 4 | Gong Yi Yin Ni | 0515/6 | Xue Ao |
| 5 | Gong Yi Yin Ni | 0514/12 | Xue Ao |
| 6 | Gong Yi Yin Ni | 60 g | Xue Ao |
| 7 | Zhu Hong Yin Ni | 513 | Xue Ao |
| 8 | Zhu Hong Yin Ni | 60 g | Xue Ao |
| 9 | Kuai Gan Yin Tai | 120 g | Xue Ao |
| 10 | Guo Bao Yin Ni | No. 8010/10 g | JINYU |
| 11 | Guo Bao Yin Ni | No. 8120 | JINYU |

续表

| Sample number | Name | Specifications | Brand |
|---------------|----------------------------------|----------------|---------------------|
| 12 | Kuai Gan Yin Tai | No. 9864 | DELI |
| 13 | Kuai Gan Yin Tai | No. 9863 | DELI |
| 14 | Kuai Gan Yin Tai | No. 9865 | DELI |
| 15 | Gong Yi Yin Ni | 60 g | YA Xin |
| 16 | Gong Yi Yin Ni | 10 g | YA Xin |
| 17 | Gong Yi Yin Ni | 20 g | YA Xin |
| 18 | Gong Yi Yin Ni | No. 9864 | YA Xin |
| 19 | Gong Yi Yin Ni | No. 9864(Blue) | YA Xin |
| 20 | Kuai Gan Yin Tai | AYZ97572 | M&G |
| 21 | Kuai Gan Yin Tai | AYZ97513 | M&G |
| 22 | High quality quick drying inepad | YT9122 | Guang Bo |
| 23 | High quality quick drying inepad | YT9124 | Guang Bo |
| 24 | Zhu Hong Yin Ni | 10 g | Xue Ao |
| 25 | Zhu Hong Yin Ni | 20 g | Xue Ao |
| 26 | Zhu Hong Yin Ni | 60 g | Yibao |
| 27 | Special clay for coding seal | 60 g | JLC |
| 28 | Zhu Hong Yin Ni | 120 g | Hong Cheng |
| 29 | Bei Jing Yin Ni | 10 g | unknown |
| 30 | Zhu Hong Yin Ni | 10 g | Shen MA |
| 31 | Sun Fu Yin Ni | porcelain | unknown |
| 32 | Zhu Hong Yin Ni | No. 1001/10 g | unknown |
| 33 | DAYIN | 120 g | JIN Bei |
| 34 | Zhu Hong Yin Ni | 1102 | VICTORY |
| 35 | Yuan Zi Yin Zhang | Printy46065 | trodat [®] |
| 36 | Yuan Zi Yin Zhang | Printy46060 | trodat [®] |

2 基本原理

2.1 谱图的采集和预处理

差分拉曼技术是将数学手段应用于光谱数据中的一种荧光处理方法(如图 2 所示)^[5]。首先,利用两个已知具有微小波长差异的激光光源激发样品得

到拉曼光谱,再通过归一化、重建以及基线校正等数学手段将光谱的基线对齐^[6]。理论上通过两条对齐后的谱线相减,即可得到纯净的仅包含拉曼光谱的差分信息,即差分拉曼光谱,从而有效地滤除干扰峰,实现抗荧光干扰。

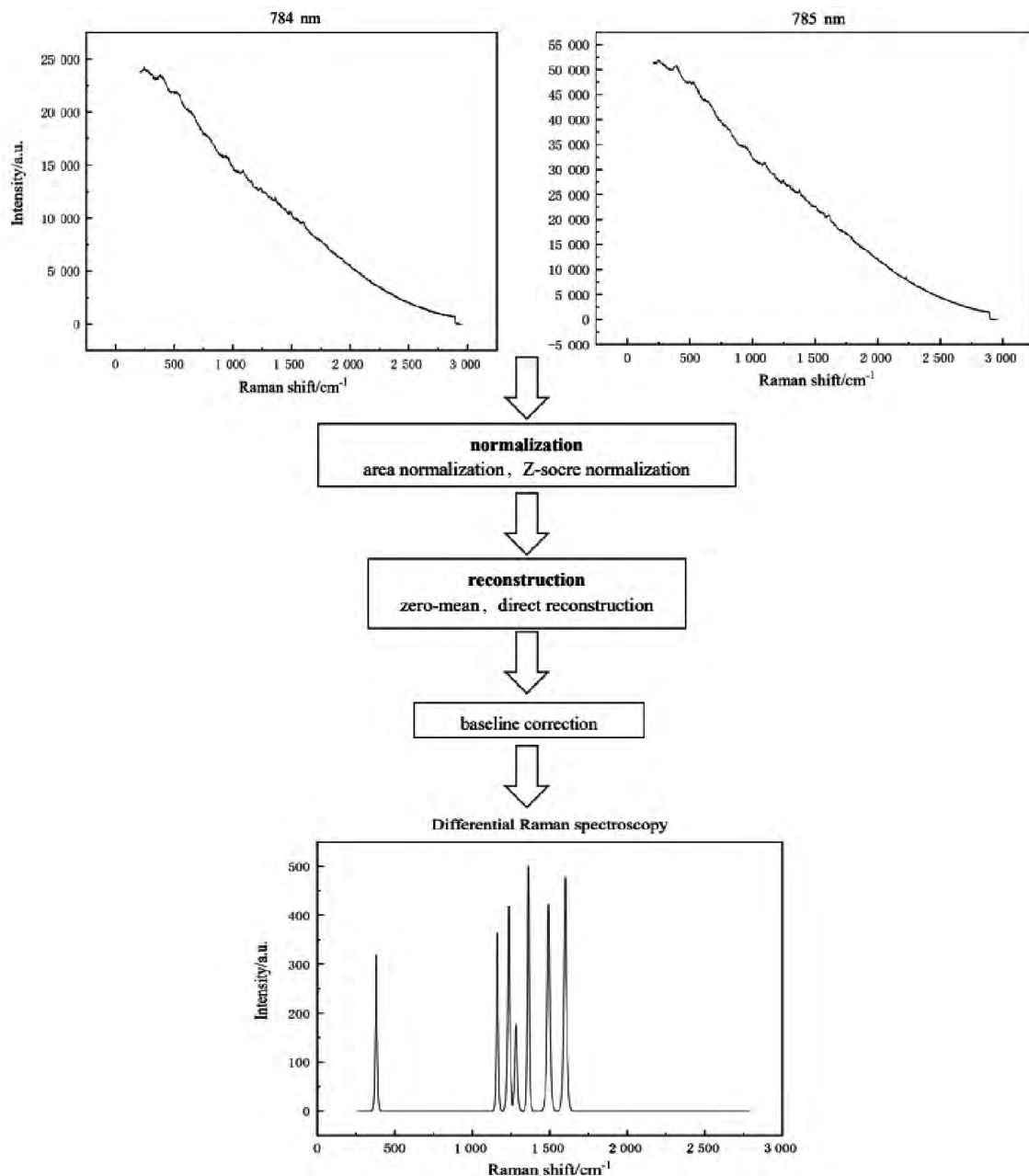


图 2 差分拉曼技术的基本原理
Fig. 2 The basic principle of differential Raman technique

以 3 号样品为例 (如图 3 所示), 拉曼光谱经差分处理后可以得到多个清晰的特征峰, 提取到了纯净的拉曼光谱。

2.2 主成分分析(PCA)

主成分分析是利用线性代换手段将高维信息转化为少数几个综合指标, 从而达到降维的目的, 其主要思想是将具有相关性的原始变量通过线性变换后, 选出较少几个重要且互相无关的变量。主成分分析的数学模型如式(1)~式(3), 其中, $u_1, u_2, u_3 \dots$

u_p 是各特征值对应的单位特征向量, z_1, z_2, \dots, z_p 为 P 个主成分, X_1, X_2, \dots, X_P 为公共因子。

$$z_1 = u_{11} X_1 + u_{12} X_2 + \dots + u_{1P} X_P \quad (1)$$

$$z_2 = u_{21} X_1 + u_{22} X_2 + \dots + u_{2P} X_P \quad (2)$$

$$z_p = u_{p1} X_1 + u_{p2} X_2 + \dots + u_{pP} X_P \quad (3)$$

PCA 是模型识别分析中最基本的多元统计分析方法, 在多元分析(multivariate analysis)、模式识别(pattern recognition)等众多领域中均得到广泛的应用^[7-8]。陆润洲等^[9]利用主成分分析对烟盒的

拉曼光谱数据进行了降维,取得了较好的效果。

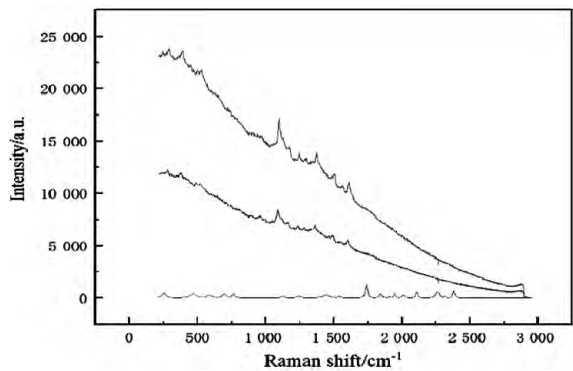


图 3 3 号样品经预处理后的差分拉曼光谱
Fig. 3 The difference Raman spectra of sample 3 after pretreatment

2.3 DP 值

DP 值是由斯马尔登和莫法特提出的一种衡量区分效果的方法^[10],其表示在某种分类方法下样品的区分效果^[11],数值越大,效果越好。计算 DP 值函数公式如下:

$$DP = \frac{A}{B} \times 100\% = \frac{2A}{X(X-1)} \quad (4)$$

式中: A 代表可区分样本对数, B 代表样本的总对数, X 代表样本总数。

2.4 系统聚类

系统聚类又称凝聚性层次聚类^[12],主要是将每个个体先视为一类,根据个体间的距离和相似性原则进行合并,将相似性最高的两类进行合并组成一个新类,然后再将新类按照相似度合并,直到所有个体都归为一个簇^[13-16]。

系统聚类被广泛地应用于人文社科、地质勘探、医药学等领域^[17]。本文将其作为分类的手段,由于系统聚类是一种无监督的统计方法,故需要借助集中计划和 DP 值来确定最合理的分类组数。

2.5 判别分析

一般判别分析是根据已有的样品分类结果建立判别式,从而实现将未知样品并入已有分类的一种多元统计分析方法^[18]。常用的分析方法有距离判别法、费希尔判别法、贝叶斯判别法等^[19]。与聚类分析不同的是,判别分析需要先对研究对象进行分类,进一步选择若干对观测对象能够较全面描述的变量,按照一定的判别准则建立一个或多个判别函数,对一个未知类别的个案,只要将其代入判别函数就可以判断它属于哪一类。

3 结果与讨论

3.1 谱图解析

印泥主要由溶剂、表面活性剂、树脂和着色剂等成分组成^[20]。不同品牌、不同产地、或同一品牌不同系列的印泥所加入的着色剂和表面活性剂种类有所不同,且所加入的填料的配比也会有所不同,这些会使拉曼光谱的特征峰峰数、峰位、峰形、峰高比有所不同。这些不同为公安机关区分和判断印泥种类提供了科学依据^[21]。

在我国,印泥染料主要由朱砂、大红粉、金光红组成^[22],部分样品还会添加苯酚作防腐剂,其对应的主要吸收峰位置见表 2。

表 2 印泥填料的主要吸收峰位置

Table 2 The main absorption peak position of inkpad filler

| Filler | Main absorption peak/cm ⁻¹ |
|----------------|--|
| Cinnabar | 163, 285 |
| Scarlet powder | 960, 1 000, 1 160, 1 285, 1 365, 1 495, 1 550, 1 598 |
| Bronze red | 1 160, 1 280, 1 405, 1 495, 1 598 |
| Phenol | 999, 1 025, 1 150, 1 250, 1 493, 1 622 |

以 4 号雪奥牌工艺印泥 0515/6 号为例(见图 4),样品在 280 cm⁻¹ 处有特征峰,说明样品含有朱砂;在 959 cm⁻¹、1 160 cm⁻¹、1 283 cm⁻¹、1 363 cm⁻¹、1 552 cm⁻¹、1 598 cm⁻¹ 处有特征峰,说明样品含有大红粉。以同一品牌不同系列的 6 号雪奥牌工艺印泥土 60 g 为例(见图 5),样品在 998 cm⁻¹ 处有特征峰,说明样品含有苯酚;在 1 160 cm⁻¹、1 282 cm⁻¹、1 495 cm⁻¹、1 599 cm⁻¹ 处有特征峰,说明样品含有金光红;在 1 362 cm⁻¹ 处有特征峰,说明样品含有大红粉。

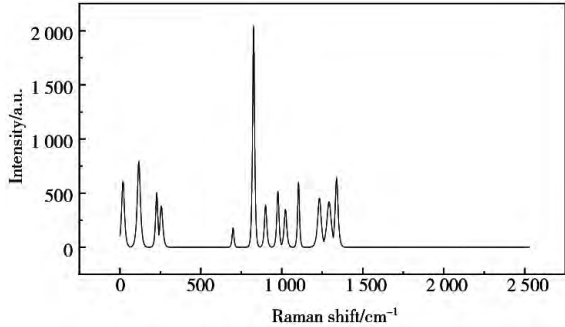


图 4 4 号样品的差分拉曼光谱
Fig. 4 The difference Raman spectrum of sample 4

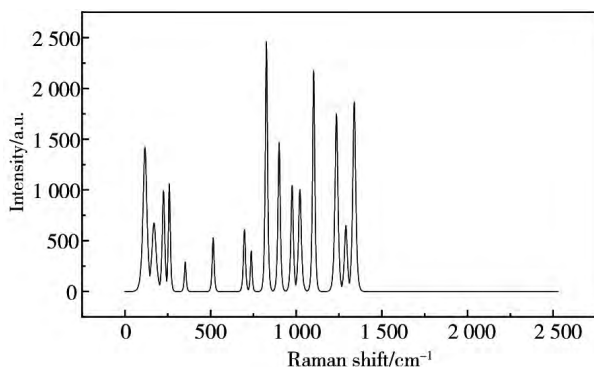


图 5 6 号样品的差分拉曼光谱
Fig. 5 The difference Raman spectrum of sample 6

以不同品牌的样品为例,17# 亚信 20 g 普通印泥样品(见图 6)在 998 cm^{-1} 、 $1\,160\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,281\text{ cm}^{-1}$ 、

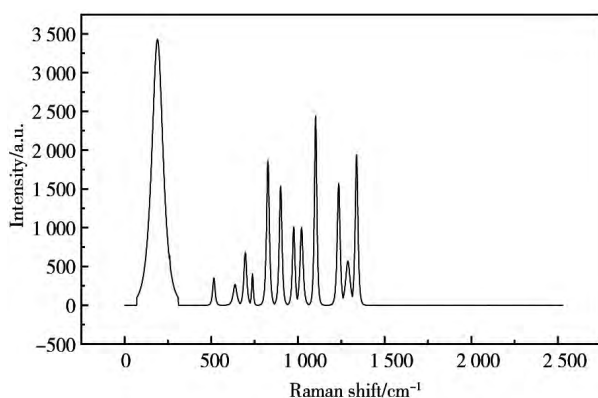


图 6 17 号样品的差分拉曼光谱
Fig. 6 The difference Raman spectra of sample 17

$1\,362\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,495\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,548\text{ cm}^{-1}$ 、 $1\,595\text{ cm}^{-1}$ 处有特征峰,说明样品含有苯酚、大红粉、金光红。根据谱图可以发现,样品在 $1\,160\text{ cm}^{-1}$ 处和 $1\,598\text{ cm}^{-1}$ 处的相对峰高比有显著不同,4 号样品的相对峰高比为 0.604;6 号样品的相对峰高比为 0.786;17 号样品的相对峰高比为 0.792。这是由于填料的配比和用量不同所导致的,这些差异为我们对所有样品进行分类并区分提供了理论依据。但这种传统的谱图解析方法耗时巨大,且人工分类会导致误差,无法使用公安机关实际办案所收集到的大量样本,因此本文引入化学计量学方法进行分类研究。

3.2 分类模型

3.2.1 主成分分析

由于差分拉曼数据维数极高,不同维度间还可能存在着线性相关,会使变量的显著性降低,导致聚类不准确,故需要对所得到的数据进行降维^[23]。在保留原数据主要信息的前提下,从多变量中提取出可以代表绝大部分原始数据的互不相关的主成分,从而有效降低多个变量之间的信息重叠,提高分析结果的准确度^[24-25]。

在样本累计方差贡献率中,累计方差贡献率一般要求大于 85%,通过处理最终提取到了 4 个主成分,累计贡献率达到了 88.38%(见表 3),成功地将 2 528 维数据降至 4 维,并将降维后得到的成分矩阵作为变量进行系统聚类。

表 3 总方差解释

Table 3 Total variance interpretation

| Component | Initial Eigenvalues | | | Extraction Sums of Squared Loadings | | |
|-----------|---------------------|-----------------------|--------------|-------------------------------------|-----------------------|--------------|
| | Total | Percent of variance/% | Cumulative/% | Total | Percent of variance/% | Cumulative/% |
| 1 | 22.402 | 62.228 | 62.228 | 22.402 | 62.228 | 62.228 |
| 2 | 5.702 | 15.839 | 78.067 | 5.702 | 15.839 | 78.067 |
| 3 | 2.091 | 5.808 | 83.875 | 2.091 | 5.808 | 83.875 |
| 4 | 1.623 | 4.507 | 88.383 | 1.623 | 4.507 | 88.383 |

3.2.2 系统聚类

根据提取到的成分矩阵重新定义各变量,将其代入 SPSS 26.0 中进行区分,测量方法为组间联接法,区间测量选择欧式平方距离,得到的聚类结果如图 7 所示。由谱系图可以得出,当并类距离为 1 时,样品被分为 15 类;当距离为 2 时,样品被分为 11

类;当距离为 4 时,样品被分为 7 类;当距离为 15 时,样品被分为 3 类;当距离最大为 25 时,样品停止凝聚被归为一类。

本文使用集中计划作为考察聚类结果的度量^[26],以集中计划中聚类阶段作为横坐标,聚合系数为纵坐标,绘制碎石图(见图 8)。

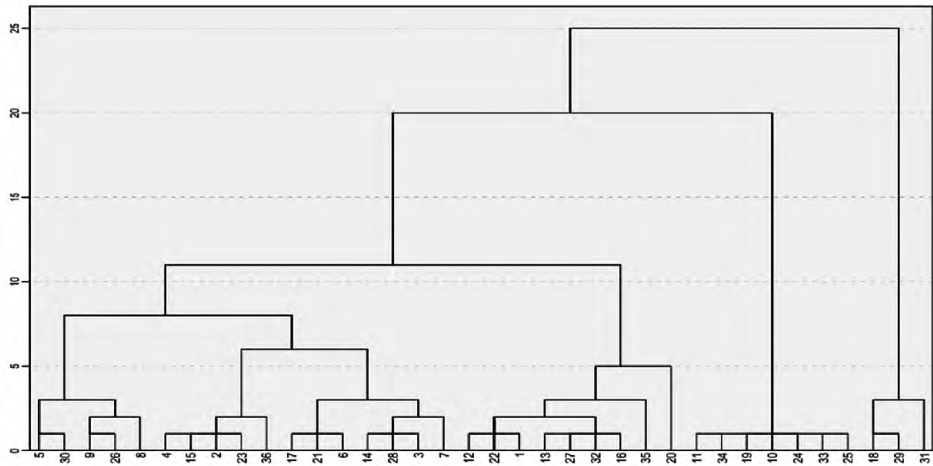


图 7 样品的系统聚类谱系图
Fig. 7 Phylogenetic analysis of samples

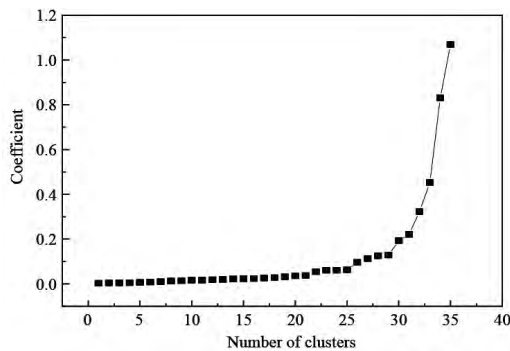


图 8 样品的系统聚类谱系图
Fig. 8 Phylogenetic analysis of samples

由碎石图可以得出,当聚类阶段小于 29 时,曲线上升缓慢,当大于 29 时,曲线陡升。因此可以认为,科学的聚类数目应该为 7 类,分类结果见表 4。

表 4 样本系统聚类结果
Table 4 Classification results of samples using Hierarchical clustering

| Classification | Label |
|----------------|------------------------|
| 1 | 5、8、9、26、30 |
| 2 | 2、4、15、23、36 |
| 3 | 3、7、6、14、17、21、28 |
| 4 | 1、12、13、16、22、27、32、35 |
| 5 | 20 |
| 6 | 10、11、19、24、25、33、34 |
| 7 | 18、29、31 |

$$Y_1 = 5.220X_1 + 11.326X_2 + 5.317X_3 - 9.023X_4 - 4.260 \quad (5)$$

$$Y_2 = -4.593X_1 + 0.152X_2 + 9.465X_3 + 5.452X_4 + 3.272 \quad (6)$$

$$Y_3 = -2.239X_1 + 2.709X_2 - 5.200X_3 + 7.803X_4 + 1.688 \quad (7)$$

$$Y_4 = 14.509X_1 + 1.295X_2 + 4.804X_3 + 4.868X_4 - 11.491 \quad (8)$$

DP 区分中,不同组的样品可以区分,同一组的样品不能区分。以表 4 中第 7 类为例,18 # ~ 29 #、18 # ~ 31 #、29 # ~ 31 # 为不能区分样品对,与其他组则为可区分样品对。最终代入函数计算出聚类结果的 DP 值为 85.23%,效果较好。

8.2.3 Fisher 判别分析

系统聚类虽可以区分样品,但无法预测新样品的类别归属。故在系统聚类结果的基础上,建立预测模型,以实现对新样本类别变量的预测。将系统聚类结果作为分组变量,定义范围为 1~7, Fisher 判别分析的结果见表 5。

表 5 典则判别函数系数
Table 5 Canonical Discriminant Function Coefficients

| Coefficient | Function | | | |
|-------------|----------|--------|--------|---------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| V1 | 5.220 | -4.593 | -2.239 | 14.509 |
| V2 | 11.326 | 0.152 | 2.709 | 1.295 |
| V3 | 5.317 | 9.465 | -5.200 | 4.804 |
| V4 | -9.023 | 5.452 | 7.803 | 4.868 |
| Constant | -4.260 | 3.272 | 1.688 | -11.491 |

四个判别函数如下,其中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 代表主成分分析中提取到的 4 个成分。

威尔克 Lambda 值(λ_i)代表函数对样本模型的影响力,其对应函数如下式(9)。由函数可以看出, λ_i 数值越小,影响力越大。

$$\lambda_i = \prod_i \frac{1}{1 + Eigenvalue_i} \tag{9}$$

一般当函数概率值小于显著性水平 0.05 时,

认为当前判别函数整体的判别能力较强,如表 6 所示,函数检验 2 直至 4,检验统计量观测值为 149.861,对应的概率值为 0。剩余的概率值都大于 0.05,因此可以考虑舍弃第三和第四判别函数^[27-29]。

表 6 威尔克 Lambda 摘要
Table 6 Wilks' Lambda abstract

| Function test | λ_i | Chi square | Degree of Freedom | Significance |
|---------------|-------------|------------|-------------------|--------------|
| 1 till 4 | 0 | 250.521 | 24 | 0 |
| 2 till 4 | 0.006 | 149.861 | 15 | 0 |
| 3 till 4 | 0.069 | 78.771 | 8 | 0 |
| 4 | 0.494 | 20.806 | 3 | 0 |

四个特征函数的函数摘要见表 7,其中典型相关性(canonical correlation)代表函数与各样本间的相关程度。由表 7 可知,第 1、第 2、第 3 特征函数的典型相关性分别为 0.983、0.954、0.927,表明其与样本间的相关性很高。

同时,前两个特征函数的累计方差贡献率(cumulative)达到了 84.6%,说明前两个函数可以解释样本分类。

故选取函数一和函数二建立联合分布图(见图 9)。如图 9 所示,7 类样品的重心分布较为分散,其中第 1、5、6、7 类区分明显,第 2、3、4 类分布较密集。经留一法交叉验证后,最终建立了正确率 94.4%的分类模型,证明了模型的可靠性和科学性。未来对于收集到的未知种类的印泥样本,可以先将其降维处理,再将光谱数据降维后得到的主成分代入到判别分类模型中,即可得出未知样本的归属。

表 7 特征函数的函数摘要
Table 7 Function summary of the characteristic functions

| Function | Eigenvalue | Variance/% | Canonical correlation | λ_i | Cumulative/% | Signification |
|----------|------------|------------|-----------------------|-------------|--------------|---------------|
| V1 | 29.333 | 62.9 | 0.983 | 0 | 62.9 | 0 |
| V2 | 10.132 | 21.7 | 0.954 | 0.006 | 84.6 | 0 |
| V3 | 6.134 | 13.2 | 0.927 | 0.069 | 97.8 | 0 |
| V4 | 1.024 | 2.2 | 0.711 | 0.494 | 100 | 0 |

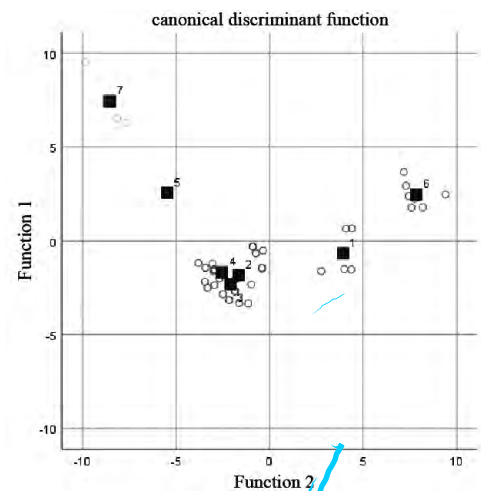


图 9 样品的联合分布图
Fig.9 Joint distribution diagram of samples

4 结论

本试验利用差分拉曼光谱对 36 个不同品牌、不同系列、不同来源的印泥样本进行了检验研究,同时结合主成分分析和判别分析建立了区分未知来源印泥样本的模型,提出了一种区分检验印泥的新思路。根据解析图谱可以发现,任何样品都可根据填料或相对峰高比进行区分,聚类分析可以将降维后的数据分为 7 类,聚类结果的 DP 值为 85.23%,说明样本的聚类结果科学有效。基于系统聚类的结果建立判别分析模型,交叉验证后准确率达 94.4%。

未来可以扩充印泥样本容量,对大量样品进行分析,得出更加准确的判别模型^[30-34]。在实际公安一线办案中,可以按照本文的方法,将样品代入到建

立好的模型中,从而快速确定样本的归属,大大缩短侦查时间和范围,可为侦查人员提供新思路。

参考文献

- [1] LIU B, ZHAO L, JIANG Y L, et al. The study of pigment classification by laser Raman spectroscopy-based on cluster analysis by software R[J]. The Journal of Light Scattering, 2017, 29(2): 153-158.
- 柳彬, 赵丽, 江沅龙, 等. 印文色料的拉曼光谱检验及基于 R 软件的聚类分析[J]. 光散射学报, 2017, 29(2): 153-158.
- [2] CHEN N. MicroRaman spectroscopy analysis red mark [J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Science and Technology), 2012, 18(3): 13-17.
- 陈宁. 显微拉曼光谱仪分析红色印迹[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2012, 18(3): 13-17.
- [3] SONG J, LI Y L, LI L, et al. Study on the selection of double extraction solvents for the identification of red ink stains by high performance liquid chromatography [J]. China Modern Educational Equipment, 2007(10): 32-34.
- 宋佳, 李玉良, 李龙, 等. 高效液相色谱对红色印泥种类识别双提取溶剂的选择研究[J]. 中国现代教育装备, 2007(10): 32-34.
- [4] ZHAO M M, DU X Y. Raman spectroscopy identification of red inkpad[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(20): 31-33.
- 赵明明, 杜星仪. 拉曼光谱技术鉴别红色印泥[J]. 广东化工, 2018, 45(20): 31-33.
- [5] LIEBER C A, MAHADEVAN-JANSEN A. Automated method for subtraction of fluorescence from biological Raman spectra [J]. Applied Spectroscopy, 2003, 57(11): 1363-1367.
- [6] FANG G, YIN L, LIU F, et al. Application research of fluorescence suppression based on differential Raman technique [J]. Laser Technology, 2019, 43(3): 359-362.
- 方刚, 殷磊, 刘峰, 等. 基于差分喇曼技术在抑制荧光中的应用研究[J]. 激光技术, 2019, 43(3): 359-362.
- [7] MCLAUGHLIN G, DOTY K C, LEDNEV I K. Discrimination of human and animal blood traces via Raman spectroscopy[J]. Forensic Science International, 2014, 238: 91-95.
- [8] BAI P L, WANG J, YIN H C, et al. Rapid qualitative identification method of species of blood based on PCA with Raman spectroscopy [J]. The Journal of Light Scattering, 2016, 28(2): 163-167.
- 白鹏利, 王钧, 尹焕才, 等. 基于主成分分析结合拉曼光谱快速识别血液归属的研究[J]. 光散射学报, 2016, 28(2): 163-167.
- [9] LU R Z, JIANG H, MAN J, et al. Classification of cigarette cases by X-ray fluorescence spectrometry combined with differential Raman spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 19-27.
- 陆润洲, 姜红, 满吉, 等. X 射线荧光光谱结合差分拉曼光谱对烟盒的分类研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 19-27.
- [10] SMALLDON K W, MOFFAT A C. The calculation of discriminating power for a series of correlated attributes[J]. Journal of the Forensic Science Society, 1973, 13(4): 291-295.
- [11] ZHANG J, JIANG H, DUAN B, et al. Differential Raman spectroscopy combined with chemometrics for lipstick test [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2430002.
- 张进, 姜红, 段斌, 等. 差分拉曼光谱结合化学计量学对口红的检验[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2430002.
- [12] WANG X, JIANG H, LIU F, et al. Rapid identification of food plastic packaging bags based on differential Raman spectroscopy[J]. Laser Technology, 2021, 45(2): 213-217.
- 王欣, 姜红, 刘峰, 等. 基于差分喇曼光谱快速鉴别食品塑料包装袋[J]. 激光技术, 2021, 45(2): 213-217.
- [13] ZHANG W T. SPSS advanced course of statistical analysis [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [14] HU L F. Five commonly used cluster analysis methods and their comparison [J]. Zhejiang Statistics, 2007(4): 11-13.
- 胡雷芳. 五种常用系统聚类分析方法及其比较[J]. 浙江统计, 2007(4): 11-13.
- [15] CHU X L. Chemometrics and molecular light spectroscopy [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 55-57.
- 褚小立. 化学计量学方法与分子光谱分析技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 55-57.
- [16] JIANG H, ZHAO Y H, ZHU X H, et al. Rapid inspection of plastic steel window with multi dimension and XRF[J]. China Plastics, 2020, 34(12): 77-81.
- 姜红, 赵艳华, 朱晓晗, 等. 多维度结合 XRF 对塑钢窗的快速检验[J]. 中国塑料, 2020, 34(12): 77-81.

- [17] KUMAR R, SHARMA V. Chemometrics in forensic science[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2018, 105: 191-201.
- [18] YAO L, ZHUO Y. Discriminant analysis wear characteristics of shoes[J]. Forensic Science and Technology, 2009(1): 13-16.
姚力, 卓玉. 判别分析法在鞋底磨损特征检验中的应用[J]. 刑事技术, 2009(1): 13-16.
- [19] LI B, YANG J M. Based on social role theory of village health positioning method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Social Science Edition), 2009, 23(2): 20-26.
李彬, 杨洁敏. 基于社会角色理论的村卫生室定位方法研究[J]. 华中科技大学学报(社会科学版), 2009, 23(2): 20-26.
- [20] HAN W, HUANG J T, WANG H. Identification of printing paste and printing oil by Raman spectroscopy[J]. Journal of People's Public Security University of China (Science and Technology), 2016, 22(2): 28-32.
韩伟, 黄建同, 王皓. 利用拉曼光谱技术对印泥和印油种类的鉴别[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2016, 22(2): 28-32.
- [21] ZHANG Y, YU J, XIE M X. Identification methods of stamp impressions[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis, 2014, 50(11): 1470-1475.
张云, 余静, 谢孟峡. 印章印文的鉴定方法[J]. 理化检验-化学分册, 2014, 50(11): 1470-1475.
- [22] LIU B, LV C, LI K K, et al. The study of Raman spectroscopic technique on the identification of pigment[J]. The Journal of Light Scattering, 2016, 28(4): 334-338.
柳彬, 吕晨, 李开开, 等. 拉曼光谱技术鉴别印文色料的分析研究[J]. 光散射学报, 2016, 28(4): 334-338.
- [23] FU J Z, ZHANG J N, JIANG H. Study on infrared spectroscopy combined with K-means clustering and neural network for beverage bottle inspection[J]. China Plastics, 2021, 35(1): 91-97.
付钧泽, 张嘉楠, 姜红. 红外光谱法结合 K-均值聚类与神经网络对饮料瓶的检验研究[J]. 中国塑料, 2021, 35(1): 91-97.
- [24] ZHU X H, HU Y N, HE X Y, et al. Detection of disposable paper cup by Raman spectroscopy and PCA[J]. China Pulp & Paper, 2020, 39(9): 38-42.
朱晓晗, 胡越宁, 何歆沂, 等. 基于主成分分析法对一次性纸杯的拉曼光谱检验研究[J]. 中国造纸, 2020, 39(9): 38-42.
- [25] ZHANG J, JIANG H, LIU F, et al. Differential Raman spectroscopy combined with stoichiometry for inspection of cigarette liner[J]. Laser Technology, 2021(1): 61-66.
张进, 姜红, 刘峰, 等. 差分喇曼光谱结合化学计量学检验烟用内衬纸[J]. 激光技术, 2021(1): 61-66.
- ZHANG J, JIANG H, LIU F, et al. Differential Raman spectroscopy combined with stoichiometry for inspection of cigarette liner[J]. Laser Technology, 2021, 45(1): 61-66.
- [26] GAUTAM R, VANGA S, ARIESE F, et al. Review of multidimensional data processing approaches for Raman and infrared spectroscopy[J]. EPJ Techniques and Instrumentation, 2015, 2: 8.
- [27] YAN W J, WEI C J, FAN L Y, et al. Study on microscopic laser Raman spectroscopy of automobile lampshade based on fisher discriminant-support vector machine[J]. China Plastics, 2021, 35(3): 124-129.
颜文杰, 卫辰洁, 范琳媛, 等. 基于 Fisher 判别-支持向量机的汽车灯罩显微激光拉曼光谱研究[J]. 中国塑料, 2021, 35(3): 124-129.
- [28] FU J Z, JIANG H, LI Y, et al. Examination of cigarette ash evidence by XRF combined with chemometrics[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(6): 0630003.
付钧泽, 姜红, 李意, 等. XRF 结合化学计量学检验香烟烟灰物证[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(6): 0630003.
- [29] ZHU X H, JIANG H, CUI A S, et al. Spectrum identification of disposable plastic gloves based on fisher discriminant analysis[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(7): 108-112.
朱晓晗, 姜红, 崔傲松, 等. 基于 Fisher 判别分析的一次性塑料手套光谱鉴别[J]. 塑料工业, 2020, 48(7): 108-112.
- [30] SUN J Z, LU R Z, JIANG H, et al. Study on kraft paper evidence by XRF combined with chemometrics[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(5): 77-82.
孙家政, 陆润洲, 姜红, 等. XRF 结合化学计量学对牛皮纸物证的研究[J]. 中国测试, 2022, 48(5): 77-82.
- [31] JIANG H, LIN F Q, MAN J. Inspection of express plastic packaging bags by X-ray fluorescence spectrometry combined with cluster analysis[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 158-165.
姜红, 林凡琦, 满吉. X 射线荧光光谱结合聚类分析检验快递塑料包装袋[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 158-165.

- [32] MA X, JIANG H, YANG J Q, et al. Research on inspecting the plastic pack belts (ropes) by Raman spectroscopy[J]. Shanghai Plastics, 2018(4): 29-35.
马泉, 姜红, 杨佳琦, 等. 拉曼光谱法检验塑料打包带(绳)的研究[J]. 上海塑料, 2018(4): 29-35.
- [33] ZHANG Z Y, GUI D D, MA Y W, et al. Evaluation on the construction and noise reduction of high-dimensional laser Raman spectroscopy[J]. Applied Laser, 2018, 38(3): 468-473.
张正勇, 桂冬冬, 马蕴文, 等. 高维激光拉曼光谱的构建与降噪处理评价研究[J]. 应用激光, 2018, 38(3): 468-473.
- [34] FAN J L, GUO S G, LIU X L, et al. Application of Raman spectroscopy in ruby identification[J]. Applied Laser, 2008, 28(2): 150-154.
范建良, 郭守国, 刘学良, 等. 拉曼光谱在红宝石检测中的应用研究[J]. 应用激光, 2008, 28(2): 150-154.