

激光与光电子学进展

拉曼光谱结合 X 射线荧光对口红的分类研究

李锦¹, 姜红^{1*}, 思沐¹, 陈敏璠²¹中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038;²北京鉴知技术有限公司, 北京 100084

摘要 建立了一种快速检验口红的方法, 并利用拉曼光谱技术结合 X 射线荧光光谱法对 28 个口红样品进行了分类研究。利用拉曼光谱技术对样品进行分析测试, 根据拉曼特征峰的不同可以有效地对其进行分类; 利用主成分分析对数据进行处理, 降维后的数据可解释全部信息的 97.545%, 结合 Pearson 相关性分析, 验证了根据拉曼特征峰分类的科学性; 结合 X 射线荧光光谱法对两类样品分组, 根据 Ca/Ti 进行组内区分。结果表明, 此方法简便快速、操作简单, 且无需特殊的前处理, 为公安机关侦查破案提供了一种新思路, 在公安实践工作中有广阔的应用前景。

关键词 光谱学; 拉曼光谱; X 射线荧光; 化学计量学; 口红

中图分类号 TQ658

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212662

Study on the Classification of Lipsticks Using Raman Spectroscopy and X-Ray Fluorescence

Li Jin¹, Jiang Hong^{1*}, Si Mu¹, Chen Minfan²¹College of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;²JINSP Co., Ltd., Beijing 100084, China

Abstract This study establishes a quick way to test lipsticks. Twenty-eight lipstick samples were classified using Raman and X-ray fluorescence spectroscopy. Using Raman spectroscopy technology to analyze and test samples, the samples can be effectively classified according to the difference in Raman characteristic peaks. A principal component analysis was used to process the data. The classification based on Raman characteristic peaks was scientifically validated when combined with Pearson correlation analysis. When combined with X-ray fluorescence spectroscopy, two types of groups were obtained, and the groups were distinguished based on Ca-Ti. The result shows that this method is simple and fast to operate and does not require special pretreatment. This study will provide a new idea for public security organs to investigate and solve cases and has broad application prospects in public security practice.

Key words spectroscopy; Raman spectrum; X-ray fluorescence; chemometrics; lipstick

1 引言

口红作为微量物证的一种, 常见于杀人、强奸、绑架等各类刑事案件现场中, 也可作为重要证据之一为公安机关侦破案件划定侦查范围, 还原案件发生经过, 在诉讼过程中起到重要作用^[1]。目前, 国内检验口红的方法有 X 射线荧光光谱法^[2]、差分拉曼光谱法^[3]、光学方法^[4]、傅里叶变换红外光谱法^[5]、薄层色谱扫描法^[6-7]、原子吸收光谱法^[8]等。

本研究利用拉曼光谱技术对收集到的 44 支口红

进行检验, 其中 28 支取得了良好的实验效果, 16 支由于荧光干扰不能分析出拉曼光谱图, 与 Salahioglu 等^[9]实验结果相符。本文结合 X 射线荧光光谱法对取得良好实验效果的 28 支口红样品进行进一步分析, 并对口红进行了准确可靠的分类研究, 为公安机关实践工作中对此类微量物证的快速认定提供了一种科学的思路, 有利于快速侦破案件、查明案情并缉拿犯罪嫌疑人, 在法庭科学领域具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力。

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-11-26; 录用日期: 2021-12-01; 网络首发日期: 2021-12-10

基金项目: 中国人民公安大学 2021 年度基科费重点资助项目(2021JKF212)

通信作者: *jiangh2001@163.com

2 实验部分

2.1 实验样品及预处理

实验样品为不同种类、不同来源的口红样品 28 支,如表 1 所示。

将收集到的口红样品涂在干净的白色“的确良”布

料上,待其自然晾干,确保其中的油性物质不会晕染或挥发,涂布大小为 1 cm×1 cm。在采集样品的拉曼光谱之前首先采集背景的拉曼光谱数据,以便在实验时降低背景对样品采集的影响,最大程度地确保了实验结果的科学性。

表 1 口红样品表
Table 1 Lipstick sample table

Sample number	Sample name	Color	Specification /g	Manufacturer
1	AINAZI	1 [#]	3.4	Guangzhou Qidie Cosmetics Co., Ltd.
2	AINAZI	3 [#]	3.4	Guangzhou Qidie Cosmetics Co., Ltd.
3	KAQILI	02 [#]	3.2	Shantou Tong Cosmetic Co., Ltd.
4	SZHO	K01 [#]	3.4	Guangzhou Yiliang Commodity Co., Ltd.
5	NANI	1 [#]	3.0	Hangzhou Junning Cosmetics Co., Ltd.
6	NANI	4 [#]	3.0	Hangzhou Junning Cosmetics Co., Ltd.
7	NANI	7 [#]	3.0	Hangzhou Junning Cosmetics Co., Ltd.
8	NANI	9 [#]	3.0	Hangzhou Junning Cosmetics Co., Ltd.
9	NANI	11 [#]	3.0	Hangzhou Junning Cosmetics Co., Ltd.
10	Balm	20 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
11	Balm	118 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
12	Balm	127 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
13	Balm	130 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
14	Balm	131 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
15	Balm	134 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
16	Balm	135 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
17	Balm	136 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
18	Balm	142 [#]	3.0	Guangdong Hengfang Biotechnology Co., Ltd.
19	NYXKISS	2 [#]	2.0	Zhejiang Yanxi Cosmetics Co., Ltd.
20	NYXKISS	5 [#]	2.0	Zhejiang Yanxi Cosmetics Co., Ltd.
21	NYXKISS	6 [#]	2.0	Zhejiang Yanxi Cosmetics Co., Ltd.
22	NYXKISS	7 [#]	2.0	Zhejiang Yanxi Cosmetics Co., Ltd.
23	NYXKISS	9 [#]	2.0	Zhejiang Yanxi Cosmetics Co., Ltd.
24	NYXKISS	11 [#]	2.0	Zhejiang Yanxi Cosmetics Co., Ltd.
25	Perfect Diary	H03 [#]	2.5	Guangzhou Yixian E-commerce Co., Ltd.
26	Sealuxe	201 [#]	3.2	Greenleaf Suzhou Inc. All Rights Reserved
27	Sealuxe	202 [#]	3.2	Greenleaf Suzhou Inc. All Rights Reserved
28	Sealuxe	203 [#]	3.2	Greenleaf Suzhou Inc. All Rights Reserved

2.2 实验仪器及参数设置

实验仪器为 RS2000 便携式拉曼光谱仪和 X-MET8000 X 射线荧光光谱仪。

参数设置如下:拉曼光谱仪设置激光功率为 220 mW,积分时间为 20 s,制冷温度为 -60 °C,测试波数范围为 3500~200 cm⁻¹,采集方式为点扫描,激发波长为 785 nm,探测器为四级深度制冷。X 射线荧光光谱仪设置测试时间为 60 s,电压为 50 kV,电流为 200 μA。

2.3 主成分分析

主成分分析(PCA)是利用较少的变量来解释原

始数据的大部分信息,以实现数据降维的一种方法,其主要计算公式^[10-11]为

$$\begin{cases} f_1 = \alpha_1^T \mathbf{X} = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2 + \dots + \alpha_{1p}x_p \\ f_2 = \alpha_2^T \mathbf{X} = \alpha_{21}x_1 + \alpha_{22}x_2 + \dots + \alpha_{2p}x_p \\ \vdots \\ f_p = \alpha_p^T \mathbf{X} = \alpha_{p1}x_1 + \alpha_{p2}x_2 + \dots + \alpha_{pp}x_p \end{cases}, \quad (1)$$

$$E_{FVE} = \frac{\sum_{i=1}^q \lambda_i}{\sum_{j=1}^p \lambda_j}, \quad (2)$$

式中： $X=(x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ 是 p 维随机向量； $\alpha_i(i=1, 2, \dots, p)$ 是函数系数； E_{FVE} 是前 q 个成分的累计贡献率； λ 是特征值。

由于拉曼数据过于庞大，本实验使用主成分分析法对数据进行降维^[12]，提取出数据中的重要信息。

2.4 Pearson 相关性分析

Pearson 相关系数是用来衡量不同变量间的相关度的一种数学参数，范围为 $-1 \sim 1$ ，其绝对值越大，表明不同变量间的相关性越强，其计算公式^[13]为

$$\gamma = \frac{\sum p q - \frac{\sum p \sum q}{N}}{\sqrt{\left[\sum p^2 - \frac{(\sum p)^2}{N} \right] \left[\sum q^2 - \frac{(\sum q)^2}{N} \right]}} \quad (3)$$

式中： r 是指 Pearson 相关系数； p, q 分别指变量； N 指变量的个数。

2.5 Fisher 判别分析

判别分析是在已知观测对象分类的基础上，建立一定的判别准则，以判断未知样品的类别的一种分析方法，主要有距离判别法、最大后验概率准则、Bayes 判别法和 Fisher 判别法等^[14-18]。计算公式为

$$g(\alpha) = \omega^T \alpha + \omega_0 \quad (4)$$

式中： α 表示特征向量， $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n]^T$ ； n 表示维度； ω 表示阈值， $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ 。

3 分析与讨论

3.1 根据拉曼特征峰对样品进行分类

根据样品拉曼特征峰的峰位、峰数、峰高等的不同，可将样品分为两类，如表 2 所示。

表 2 样品分类表

Table 2 Sample classification table

Classification	Sample number
Type I	2 [#] , 3 [#] , 5 [#] —7 [#] , 9 [#] ~15 [#] , 17 [#] , 18 [#] , 20 [#] —24 [#] , 26 [#] —28 [#]
Type II	1 [#] , 4 [#] , 8 [#] , 16 [#] , 19 [#] , 25 [#]

第一类拉曼特征峰主要集中在 $1600 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内，此范围内的特征峰与口红内的油和蜡较多有关(图 1)。第二类拉曼特征峰主要集中在 $610 \sim 200 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1600 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内，其中： $610 \sim 200 \text{ cm}^{-1}$ 的拉曼特征峰与口红内所含的抗氧化剂较多有关，如 236 cm^{-1} 和 609 cm^{-1} 处的特征峰是由氧化铁引起的； $1600 \sim 1000 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的特征峰与油和蜡有关，如 1063 cm^{-1} 处的峰对应蜂蜡中 COH 的伸缩振动， 1130 cm^{-1} 和 1171 cm^{-1} 的特征峰对应 C—C 环呼吸伸缩振动(图 2)^[19]。

3.2 主成分分析

经 KMO(Kaiser-Meyer-Olkin) 和 Bartlett 特检验，

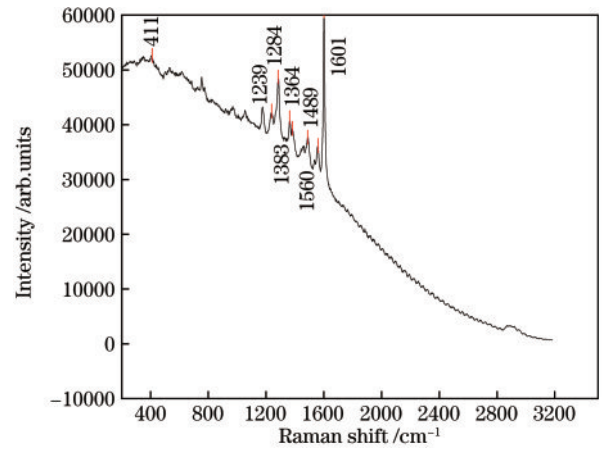


图 1 第 I 类 5[#] 样品拉曼光谱图

Fig. 1 Raman spectrum of sample No. 5 of class I

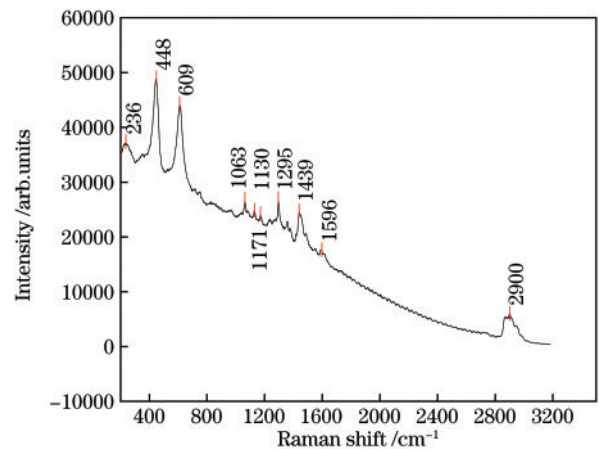


图 2 第 II 类 25[#] 样品拉曼光谱图

Fig. 2 Raman spectrum of sample No. 25 of class II

KMO 取样適切性量数达到 96%，且显著性为 0(表 3)，说明本研究所获得的数据具有极强的相关性，适用于主成分分析^[20-21]。chi-square 表示近似卡方，df 表示自由度，Sig. 表示显著性。

表 3 KMO 和 Bartlett 特检验

Table 3 KMO and Bartlett test

KMO sampling appropriateness quantity	0.951
chi-square	284376.919
Bartlett test	
df	378
Sig.	0

指定提取 2 个主成分(是指将多维、复杂的数据空间转化为 2 组可以进行线性表达的数据)，得到主成分 1、2^[22]。其中，主成分 1 能解释 84.946% 的信息，主成分 2 能解释 12.599% 的信息，两个主成分累积贡献率达 97.545%，解释力度大，具有科学性(表 4)。图 3 为二位组件图，分析可知，样品分类与上述结果基本一致，具有可靠性。

表 4 主成分贡献率表

Table 4 Principal component contribution rate

Ingredient	Initial eigenvalue			Extract the sum of squares of the load		
	Total	Percentage of variance / %	Accumulation / %	Total	Percentage of variance / %	Accumulation / %
1	23.785	84.946	84.946	23.785	84.946	84.946
2	3.528	12.599	97.545	3.528	12.599	97.545

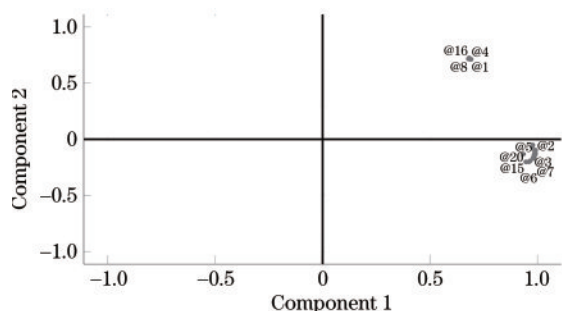


图 3 主成分分析组件图

Fig. 3 PCA component diagram

3.3 Pearson 相关性分析

对利用主成分分析降维后的数据进行相关性分析, 1[#]、17[#]、24[#]、25[#]样品的相关性如表 5 所示。其中, Sig. (2-tailed) 是指对数据进行双侧检验, 因为显著性可能过大或过小, 双侧检验更稳定。由表 5 可知: 1[#]和 25[#]、17[#]和 24[#]两个样品之间 Pearson 相关性均大于 0.9, 说明他们之间的相关性极强, 可以归为一类; 而 25[#]样品与 17[#]、24[#]样品之间 Pearson 相关性分别为 0.562、0.611, 相关性弱, 差距较大, 不能归为一类。根据拉曼特征峰进行分类的结果与相关性分析结果基本一致, 证明了以上分类方法是科学有效的。

表 5 Pearson 相关性分析

Table 5 Pearson correlation analysis

	1 [#]	17 [#]	24 [#]	25 [#]
1 [#] Pearson correlation coefficient	1	0.572	0.622	0.969
Sig. (2-tailed)		0	0	0
17 [#] Pearson correlation coefficient		1	0.963	0.562
Sig. (2-tailed)			0	0
24 [#] Pearson correlation coefficient			1	0.611
Sig. (2-tailed)				0
25 [#] Pearson correlation coefficient				1
Sig. (2-tailed)				

3.4 结合 X 射线荧光光谱法对样品进行分类

对有较多样品的第 I 类进行分组, 根据样品是否含有氯元素 (Cl) 和溴元素 (Br) 可将其分为四组 (表 6)。对已经正确分组的样品还可以根据元素的比例区分不同个体, 在本研究中, 每个样品均检出了 Ca、Ti 两种元素, 则可根据不同样品中 Ca/Ti 比例的不同来区分同一组中的不同个体, 以第 I-4 组为例, 其区分

结果如表 7^[23-24]所示。

表 6 第 I 类样品分组表

Table 6 Grouping table of type I samples

Group	Chemical element	Sample number
I-1	+Cl, +Br	3 [#] 、5 [#] 、9 [#] —13 [#] 、15 [#] 、17 [#] 、20 [#]
I-2	+Cl, -Br	7 [#] 、14 [#]
I-3	-Cl, +Br	2 [#] 、18 [#] 、21 [#]
I-4	-Cl, -Br	6 [#] 、22 [#] —24 [#] 、26 [#] —28 [#]

(note: “+” indicates that the element is included, “-” indicates that the element is not included)

表 7 第 I-4 组样品的 Ca/Ti 比值

Table 7 Ca/Ti ratio of samples of group I-4

Sample number	6 [#]	22 [#]	23 [#]	24 [#]	26 [#]	27 [#]	28 [#]
Ratio	1.60	0.26	0.86	0.54	3.14	3.06	14.00

3.5 Fisher 判别分析

为验证 3.4 节中分类方法的科学性, 在上述分类结果的基础上执行 Fisher 判别分析评价分类的有效性。Fisher 判别分析利用数据的类别信息使得不同类样品之间的距离增大, 相同类样品之间的距离减小, 求解最优投影方向, 组成散度判别矩阵, 实现对新增数据的诊断^[25-26]。

图 4 为执行 Fisher 判别后得到的第一类的四组样品在典则判别函数图中的分布情况, 分析可知, 函数 1、2 对四组样品均有十分理想的分类效果^[27]。在对第 I 类样品进行分析时提取了四个判别函数 (表 8), 分

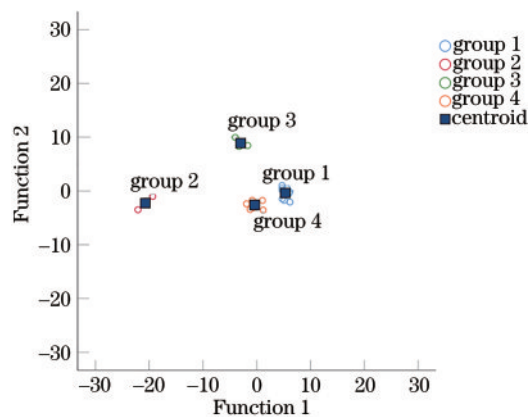


图 4 Fisher 判别分析图

Fig. 4 Graph of Fisher discriminant analysis

析可知, Fisher判别分析验证 3.4 节中分组情况正确率达 100%, 由此证明了上述分类方法和分类结果的科学性与可靠性。

表 8 分类函数系数
Table 8 Coefficient of classification function

x	I -1(y_1)	I -2(y_2)	I -3(y_3)	I -4(y_4)
x_1	8.772	-14.481	1.849	3.529
x_2	-0.621	-0.283	-1.030	-0.462
x_3	-2.172	1.689	-2.560	-1.262
x_4	1.837	-4.310	-0.463	0.750
x_5	0.905	2.258	2.810	0.812
x_6	1.413	-5.142	-2.031	0.322
x_7	1.773	2.571	4.320	1.586
x_8	-1.933	6.812	2.653	-0.278
x_9	-2.486	4.402	-0.759	-0.810
x_{10}	3.797	-10.481	-2.000	1.024
x_{11}	0.738	-1.981	-2.600	0.497
x_{12}	-2.041	2.941	-1.276	-0.827
x_{13}	4.382	-4.344	3.544	2.069
x_{14}	-1.904	3.779	0.576	-0.659
x_{15}	-2.450	5.447	0.133	-0.746
x_{16}	-0.621	1.252	-0.524	-0.099
x_{17}	0.295	-0.755	0.075	0.041
x_{18}	-0.872	-0.319	-0.511	-1.158
Constant	-57.408	-157.361	-89.787	-19.743

4 结 论

本实验建立了快速检验口红的方法。先利用拉曼光谱法结合化学计量学对数据进行初步分类, 再利用 X 射线荧光光谱法对同一类中的样品进行分组, 用 Fisher 判别加以验证, 最后根据 Ca/Ti 的比值对同组样品进行区分, 取得了良好的效果^[28]。

本研究首次将拉曼光谱技术与 X 射线荧光光谱技术结合用于对口红类微量物证的分类研究中, 二者结合克服了拉曼光谱法谱图解读需一定专业性的壁垒, 同时使此分类方法更具可行性, 在公安实战领域有广阔的应用前景。

以此方法为基础, 未来可搜集不同品牌、不同批次、不同地区的口红样品建立起包括口红主要成分、主要元素、品牌系列、发布时间等信息的数据库, 有效降低口红类物证的分析成本, 加快追诉犯罪的进程, 为案件侦破提供科学有效的帮助^[29-30]。

参 考 文 献

- [1] Sharma S, Chopi R, Kumar R, et al. Differentiation of locally manufactured Kajal by attenuated total reflectance fourier transform infrared spectroscopy supported by chemometric analysis[J]. Forensic Science International, 2019, 303: 109930.
- [2] 王欣, 习豆, 姜红, 等. X 射线荧光光谱法结合聚类分析检验口红[J]. 化学研究与应用, 2020, 32(10): 1920-1923.
Wang X, Xi D, Jiang H, et al. Detection of lipstick by XRF combined with cluster analysis[J]. Chemical Research and Application, 2020, 32(10): 1920-1923.
- [3] 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研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(20): 203000.
Zhang J, Jiang H, Duan B, et al. Differential Raman spectroscopy combined with chemometrics to test test[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(20): 203000.
- [4] 秦瑾, 杨玉柱. 红色客体表面口红唇纹光学检验[J]. 云南警官学院学报, 2018(2): 108-114.
Qin J, Yang Y Z. Optical inspection of lip print on the surface of red object[J]. Journal of Yunnan Police College, 2018(2): 108-114.
- [5] 姜红, 王洪波. 傅立叶变换红外光谱法检验口红研究[J]. 刑事技术, 2010(4): 20-24.
Jiang H, Wang H B. Analysis of lipsticks by Fourier transform infrared spectrophotometer[J]. Forensic Science and Technology, 2010(4): 20-24.
- [6] 姜红, 刘大江, 史海青, 等. 薄层色谱扫描法检验口红样品[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2009, 15(1): 9-12.
Jiang H, Liu D J, Shi H Q, et al. TLC scanning method for testing lipstick samples[J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Science and Technology), 2009, 15(1): 9-12.
- [7] Sumiyani R, Diatmika I K C, Muslimah N H, et al. Analysis of red colorants and heavy metals in lipstick at traditional market in Surabaya[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1053(1): 012083.
- [8] Munir A, Hayyat M U, Shahzad L, et al. Assessment of heavy metals concentrations in commercially available lipsticks in Pakistan[J]. Environmental Forensics, 2020, 21(3/4): 259-266.
- [9] Salahoglu F, Went M J. Differentiation of lipsticks by Raman spectroscopy[J]. Forensic Science International, 2012, 223(1/2/3): 148-152.
- [10] 王青蓉. 函数型主成分分析及函数型线性回归模型的研究及应用[D]. 重庆: 重庆工商大学, 2020.
Wang Q R. Research and application of functional principal components analysis and functional linear regression model[D]. Chongqing: Chongqing Technology and Business University, 2020.
- [11] 马泉, 姜红, 杨佳琦, 等. 基于化学计量学的一次性塑料餐盒红外光谱分析[J]. 分析科学学报, 2020, 36(2): 245-249.
Ma X, Jiang H, Yang J Q, et al. Infrared spectroscopic analysis of disposable plastic food box based on chemometrics[J]. Journal of Analytical Science, 2020, 36(2): 245-249.
- [12] 王丽君. 基于大数据的聚类算法研究及应用[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
Wang L J. Research and application of clustering algorithm

- based on bigdata[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [13] 胡添翼, 杨光, 陈波, 等. 基于 Pearson 相关性检验的 ARIMA 边坡位移监测模型[J]. 水利水电技术, 2016, 47(1): 71-75.
Hu T Y, Yang G, Chen B, et al. Pearson correlation test-based ARIMA model of displacement prediction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(1): 71-75.
- [14] 赵丽娜. Fisher 判别法的研究及应用[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
Zhao L N. Research and improvement of fisher discriminant analysis method[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2013.
- [15] 何欣龙, 马云, 王继芬, 等. 车用保险杠的中红外光谱定性定量快速检测[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5): 122-126.
He X L, Ma Y, Wang J F, et al. Rapid qualitative and quantitative identification of vehicle bumpers based on mid-infrared spectroscopy[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5): 122-126.
- [16] 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.
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.
- [17] 何莎莎, 李航, 于艳涛. SPSS 在环境检测指标多元统计分析中的应用[J]. 科协论坛(下半月), 2012(9): 120-121.
He S S, Li H, Yu Y T. Application of SPSS in multivariate statistical analysis of environmental testing indexes[J]. Science & Technology Association Forum, 2012(9): 120-121.
- [18] Sun K, Zhang Z J, Meng F, et al. Experimental verification of group non-membership in optical circuits[J]. Photonics Research, 2021, 9(9): 1745-1751.
- [19] 黄建华, 杨璐, 夏寅, 等. 古代文物表面常见天然有机物的显微共聚焦拉曼光谱研究[J]. 文物保护与考古科学, 2014, 26(3): 1-6.
Huang J H, Yang L, Xia Y, et al. The use of confocal micro Raman spectroscopy for the identification of natural organic materials used in cultural relics[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2014, 26(3): 1-6.
- [20] 刘洋, 王越, 陈威. 基于主成分-聚类分析判别分析汾河水质研究[J]. 华北科技学院学报, 2017, 14(5): 76-81.
Liu Y, Wang Y, Chen W. Research on Fenhe River water quality based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2017, 14(5): 76-81.
- [21] Yu Y, Xiao T H, Wu Y Z, et al. Roadmap for single-molecule surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. Advanced Photonics, 2020, 2: 014002.
- [22] Zhou S Y, Le V, Xiong S L, et al. Dual-comb spectroscopy resolved three-degree-of-freedom sensing[J]. Photonics Research, 2021, 9(2): 243-251.
- [23] 务瑞杰, 姜红. 扫描电镜/能谱法检验塑料拖鞋[J]. 上海塑料, 2017(1): 18-22.
Wu R J, Jiang H. A study on discrimination of plastic slipper by SEM/EDS[J]. Shanghai Plastics, 2017(1): 18-22.
- [24] 姜红, 付钧泽, 王鹏, 等. 利用拉曼光谱对塑料拖鞋鞋底样品的分类研究[J]. 化学研究与应用, 2020, 32(7): 1155-1160.
Jiang H, Fu J Z, Wang P, et al. Study on the classification of plastic slipper soles by Raman spectrum[J]. Chemical Research and Application, 2020, 32(7): 1155-1160.
- [25] 刘锋, 钟凯, 韩敏. 基于优化的多核局部费舍尔判别分析的故障分类[J]. 信息与控制, 2021, 50(5): 582-590, 601.
Liu F, Zhong K, Han M. Fault classification based on optimized multi-kernel local fisher discriminant analysis[J]. Information and Control, 2021, 50(5): 582-590, 601.
- [26] 王广斌, 刘义伦, 黄良沛. 基于核 Schur 正交局部 Fisher 判别的转子故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(5): 1005-1009.
Wang G B, Liu Y L, Huang L P. Rotor fault diagnosis based on kernel Schur-orthogonal local Fisher discriminant[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(5): 1005-1009.
- [27] 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.
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.
- [28] 朱晓晗, 姜红. 拉曼光谱法结合 X 射线荧光光谱法检验一次性塑料鞋套的研究[J]. 化学研究与应用, 2019, 31(11): 1927-1930.
Zhu X H, Jiang H. X-ray fluorescence spectrometry combined with Raman spectroscopy analysis for disposable plastic shoe covers[J]. Chemical Research and Application, 2019, 31(11): 1927-1930.
- [29] 王毅. 公安工作在大数据背景下的变革[J]. 电脑迷, 2018(3): 150.
Wang Y. The Reform of Public Security Work under the Background of Big Data[J]. PC Fan, 2018(3): 150.
- [30] 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.