

# X 射线荧光光谱结合多元线性回归对橡胶鞋底的分类研究

张岚泽<sup>1</sup>, 姜红<sup>1\*</sup>, 刘津彤<sup>1</sup>, 王嘉庚<sup>2</sup>, 满吉<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国人民公安大学侦查学院, 北京 100038;

<sup>2</sup>北京市公安局丰台分局, 北京 100071;

<sup>3</sup>北京华仪宏盛技术有限公司, 北京 100123

**摘要** 建立一种对橡胶鞋底的分类研究方法。利用 X 射线荧光光谱仪, 在电压为 45 kV, 电流为 40  $\mu$ A, 功率为 1.8 kW, 检测时间为 60 s 的条件下, 对 40 个不同种类、不同品牌的橡胶鞋底样本进行检验。以鞋的种类作为被解释变量, 建立多元线性回归模型, 计算得分评级。同时, 依据标准化偏相关系数筛选出特征元素。所设计模型可依据元素含量对橡胶鞋底进行分类, 为侦查工作提供线索和方向。

**关键词** 光谱学; 橡胶鞋底; X 射线荧光光谱法; 多元线性回归; 得分评级; 特征元素; 分类

中图分类号 O657.34

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1430002

## Classification of Rubber Soles by X-ray Fluorescence Spectrometry Based on Multiple Linear Regression

Zhang Lanze<sup>1</sup>, Jiang Hong<sup>1\*</sup>, Liu Jintong<sup>1</sup>, Wang Jiageng<sup>2</sup>, Man Ji<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Investigation, People's Public Security University of China, Beijing 100038, China;

<sup>2</sup>Fengtai Branch of Beijing Municipal Public Security Bureau, Beijing 100071, China;

<sup>3</sup>Beijing Huayi Hongsheng Technology Co., Ltd., Beijing 100123, China

**Abstract** The purpose of this study is to establish a classification method of rubber soles. An X-ray fluorescence spectrometer was used with the settings as follows: voltage 45 kV, current 40  $\mu$ A, power 1.8 kW, and detection time 60 s. Forty samples of different types and brands of rubber soles were tested. Taking the type of shoes as the explained variable, a multiple linear regression model was established to calculate the score rating. Simultaneously, according to the standardized partial correlation coefficient, the characteristic elements can be screened out. Based on the above results, rubber soles can be classified according to the element content, providing clues and direction for the investigation work.

**Key words** spectroscopy; rubber sole; X-ray fluorescence spectrometer; multiple linear regression; score rating; characteristic element; classification

**OCIS codes** 300.6560; 300.6280; 290.5820

## 1 引言

橡胶类检材常见于强奸、抢劫、杀人、纵火等案

件现场中。鞋底橡胶残留物是犯罪现场中常见的微量物证之一, 其具有分布广泛、量小体微的特点, 不易被犯罪分子察觉, 经过现场勘查人员提取, 可作为

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-11-24; 录用日期: 2020-12-03

基金项目: 中国人民公安大学 2019 年基科费重点项目(2019JKF222)

通信作者: \*jiangh2001@163.com

进一步理化物证检验的检材。

橡胶鞋底的主要成分有乙烯-醋酸乙烯共聚物(EVA)、天然橡胶(NR)、聚氯乙烯(PVC)、顺丁橡胶(BR)等。在鞋底的生产过程中,厂家为了提高鞋底性能、降低成本,通常会根据不同的需求和用途,使用不同种类和配比的填料。橡胶鞋底中常见的填料有补强剂(主要成分为炭黑、碳酸钙、白炭黑、碳酸镁、氧化锌等)、橡胶表观性能改性剂(主要成分为含镍的氧化齐聚戊二烯)、填充剂(高岭土、滑石粉、氧化铝粉、玻璃粉、石棉粉、碳纤维、金刚砂)等。不同品牌、不同系列的橡胶鞋底成分及配比均可能存在一定差异,因此可作为利用 X 射线荧光光谱法检验鉴别的依据。通过将光谱所反映的元素含量作为多元线性回归的解释变量,分析预测结果可对犯罪现场鞋底橡胶的来源实现倾向性认定,从而为侦查工作的开展提供线索。

目前法庭科学中对橡胶制品的检验主要是检验其中的有机成分,方法有傅里叶变换拉曼光谱法(FT-Raman)<sup>[1]</sup>、红外光谱法(ATR)<sup>[2]</sup>和裂解气相色谱法(PGC)<sup>[3]</sup>等。X 射线荧光光谱法(XRF)具有分析灵敏度高、分析元素范围广、分析精度高、分析速度快的优点,在法庭科学领域的应用广泛<sup>[4-9]</sup>。本实验利用 X 射线荧光光谱法检测 40 个不同种类、不同品牌的橡胶鞋底中的重金属元素,建立多元线性回

归模型来计算各样本的得分评级,并根据偏相关系数筛选出具有较强种属差异性、可作为鞋底分类指标的特征元素 Ca、Ti、Zn 进行交叉验证。同时,为检验所设计模型在真实案件中的分类效果,分别对皮鞋、休闲鞋等橡胶鞋底进行燃烧,沾染血渍、土壤、油墨和油漆的单因素影响实验,再次测得各元素含量后代入回归模型进行计算。

相比于传统的 K-means 聚类方法,多元线性回归方法具有更广泛的适用范围,通过样本数据训练得到的回归方程,可应用于不同案件中鞋底橡胶的倾向性认定,从而提高公安机关的办案效率;同时,利用基于  $t$  分布的假设检验,可筛选出对鞋底橡胶种类影响较为显著的特征元素,有一定的数据降维功能,从而提高了分类的准确度。

## 2 实验部分

### 2.1 实验器材及条件

实验器材:X-Met 7500 能量色散型 X 射线分析仪(牛津仪器)。

实验条件:Rh 作为阳极靶,电压为 45 kV,电流为 40  $\mu$ A,功率为 1.8 kW,检测时间为 60 s。

### 2.2 实验样本

40 个不同种类、不同品牌的橡胶鞋底样本的相关信息见表 1。

表 1 橡胶鞋底样本的相关信息列表

Table 1 List of relevant information of rubber sole samples

No.	Brand	Shoe type	Male or female
1	AOKANG	Leather shoe	Female
2	YONGLIANG	Leather shoe	Male
3	NIKE	Casual shoe	Male
4	Unknown	Running shoe	Male
5	Crocodile	Leather shoe	Male
6	Louis	Leather shoe	Male
7	YONGLIANG	Leather shoe	Male (special sole material)
8	PLOVER	Leather shoe	Male
9	GA	Leather shoe	Male (military sole material)
10	Camel	Leather shoe	Male
11	SHEN TA	Casual shoe	Female
12	JRV NALI	Leather shoe	Male
13	DAPHNE	Leather shoe	Female
14	People's Public Security University of China	Leather shoe	Male
15	DAPHNE	Leather shoe	Female

续表

No.	Brand	Shoe type	Male or female
16	Z. Suo	Casual shoe	Male
17	Warrior	Casual shoe	Male
18	LiNing	Basketball shoe	Male
19	ANTA	Basketball shoe	Male
20	OLUNPO	Leather shoe	Male
21	361°	Basketball shoe	Male
22	NIKE	Basketball shoe	Male
23	Unknown	Leather shoe	Male
24	AOKANG	Leather shoe	Female
25	YANG DA	Casual shoe	Male
26	NIKE	Running shoe	Male
27	361°	Casual shoe	Male
28	NIKE	Slipper	Male
29	YINGYUEGU	Leather shoe	Male
30	MISTRAL	Casual shoe	Male
31	PUMA	Casual shoe	Male
32	SENDA	Leather shoe	Male
33	NIKE	Soccer shoe	Male
34	NiuAiKe	Leather shoe	Male
35	AOKANG	Leather shoe	Male
36	AOKANG	Leather shoe	Male
37	Adidas	Casual shoe	Male
38	People's Public Security University of China	Leather shoe	Male
39	People's Public Security University of China	Leather shoe	Male
40	People's Public Security University of China	Leather shoe	Male

### 2.3 实验方法

首先,用手术刀在 40 个不同种类、不同品牌的橡胶鞋底样本中切割面积约 1 cm×1 cm 的橡胶鞋底碎块,用酒精棉签擦拭晾干,待检。其次,利用 X 射线荧光光谱分析法在上述实验条件下,对橡胶鞋底样本进行测量。每个样本测量 3 次,取平均值作为最终的测量结果<sup>[10]</sup>。

## 3 分析与讨论

### 3.1 变量的描述与分析

为筛选出可作为区分不同种类鞋底橡胶的特征元素,以“鞋的种类”作为被解释变量,以“元素含量”和“鞋型”作为解释变量建立多元线性回归模型(变量说明见表 2)。

表 2 变量说明

Table 2 Variable description

Variable	Explanation of variables
Kind	Leather shoes are marked as 1 and other types of shoes are marked as 0
Gender	1 for men's shoes and 0 for women's shoes
Element	Seven kinds of elements in rubber sole

设定鞋的种类为虚拟变量,进行描述性统计, Proportion 为占比, Cumulative proportion 为统计  
统计结果见表 3 (其中 Frequency 为频率, 占比)。

表 3 鞋的种类描述性统计结果

Table 3 Descriptive statistical results of types of shoes

Kind	Frequency	Proportion / %	Cumulative proportion / %
Leather shoe	23	57.5	57.5
Casual shoe	9	22.5	80.0
Basketball shoe	4	10.0	90.0
Running shoe	2	5.0	95.0
Football shoe	1	2.5	97.5
Slipper	1	2.5	100.0

皮鞋鞋底是常见的检材之一,因此本实验的重 全文同)进行统计分析,结果见表 4,其中 Mean 为元  
点在于筛选出可区分皮鞋与其他鞋种的特征元 素含量的平均值, Std. Dev. 为标准偏差, Min 和  
素<sup>[11-14]</sup>。对元素含量(即样品中该元素的质量分数, Max 分别表示元素含量的最大值和最小值。

表 4 样本元素含量统计分析

Table 4 Statistical analysis of sample element content

Element	Mean / 10 <sup>-6</sup>	Std. Dev. / 10 <sup>-6</sup>	Min / 10 <sup>-6</sup>	Max / 10 <sup>-6</sup>
Ca	22572.8	29050.95	135	128227
Ti	6010.625	11462.14	0	49237
Zn	9464.025	6429.343	32	26219
Pb	386.525	1372.053	0	7975
Fe	605.175	1027.582	0	4959
Cu	69.25	55.83802	0	201
Sb	69.575	53.30747	0	285

根据标准差可初步筛选出具有较强种属差异性的  
的特征元素 Ca、Ti、Zn,但其能否作为区分鞋底橡胶  
种属来源的显著性指标,以及其对于被解释变量的  
可解释性大小,这还需要验证<sup>[15-16]</sup>。

### 3.2 多元线性回归模型的建立

建立多元线性回归模型,比较各显著性指标的  
偏相关系数,选取出兼具显著性和可解释性的特征  
元素。多元线性回归方程为

$$N_{\text{KIND}} = \beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i \times N_{\text{ELE}} + \lambda \times N_{\text{TYPE}} + \mu, \quad (1)$$

式中:  $N_{\text{KIND}}$  为鞋的种类;  $N_{\text{ELE}}$  为鞋底橡胶所含元  
素种类;  $N_{\text{TYPE}}$  代表鞋的款式;  $\beta_i$  和  $\lambda$  为指标的偏相  
关系数;  $\mu$  为扰动项;  $\beta_0$  表示多元线性回归方程中

的常数项。  $N_{\text{KIND}}$ 、 $N_{\text{ELE}}$ 、 $N_{\text{TYPE}}$  的定义和赋值见  
表 2。由于  $N_{\text{ELE}}$  包含所有 XRF 检验出的元素,且  
选取的解释变量较为全面,因此扰动项  $\mu$  与核心  
解释变量不具有相关关系,满足无内生性的回归  
条件。

为衡量偏回归系数的稳健性,将被解释变量和  
解释变量分别定义为  $y$  和  $X$ , 得到残差平方和  
 $C_{\text{SSR}}$ , 即

$$C_{\text{SSR}}(\tilde{\beta}) = (y - X\tilde{\beta})'(y - X\tilde{\beta}), \quad (2)$$

式中:  $\tilde{\beta}$  为偏相关系数的预测值;  $(y - X\tilde{\beta})'$  为预测  
残差。由(2)式可知,  $C_{\text{SSR}}$  为关于偏回归系数的二  
次方程。对  $C_{\text{SSR}}$  求偏导并令其为 0, 可得  $\beta$  向量(该  
向量包含所有指标  $X$  的偏相关系数)在最小二乘法  
(OLS)下的估计值  $\tilde{\beta}$

$$\tilde{\beta} = \operatorname{argmin}_{\beta} \left[ \sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2 \right] \Leftrightarrow \frac{\delta C_{\text{SSR}}}{\delta \tilde{\beta}} = -2X'y + 2X'X\tilde{\beta}, \quad (3)$$

式中:  $\arg \min_{\beta}$  函数表示表达式取最小值时  $\beta$  的取值。

为避免异方差造成偏回归系数显著性失效,并保证 OLS 为最优无偏估计量,对回归结果进行怀特检验。即在原假设“理论值方差和样本方差一致”的前提下,检验稳健的协方差矩阵和普通的协方差矩阵满足一致性的条件,其表达式为<sup>[17]</sup>

$$\hat{S} - s^2 S_{XX} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i^2 - s^2) x_i x_i' \xrightarrow{P} 0_{k \times k}, \quad (4)$$

式中:  $e_i^2$  为随机误差项的方差;  $s^2$  为样本方差。同时, (4) 式不满足一致性的概率大于 5% 时, 则可得出结论: 在出错概率不超过 5% 的前提下, 拒绝原假

设。对上述回归方程进行怀特检验, 结果为

$$P \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i^2 - s^2) x_i x_i' \xrightarrow{P} 0_{k \times k} \right] < 95\%。 \quad (5)$$

因此, 在出错概率不超过 5% 的前提下, 回归方程存在异方差的干扰。为避免异方差对回归模型的影响, 引入稳健标准差, 其对于异方差的干扰不敏感, 从而使模型仍然服从  $t$  分布, 对样本元素含量进行再次回归分析, 结果见表 5, 其中 Robust 表示稳健性, Gender 表示男鞋或女鞋,  $\eta_{\text{Coef}}$  表示偏相关系数,  $E_{\text{Std}}$  表示标准误,  $t$  为变量的显著性,  $P$  表示回归结果的显著性, 95% Conf. Interval 表示 95% 置信区间, Cons 表示表示回归方程的常数项。

表 5 样本元素含量的再次回归分析结果

Table 5 Re-regression results of sample element content

Variable	Robust					[95%Conf. Interval]
	$\eta_{\text{Coef}}$	$E_{\text{Std}}$	$t$	$P$		
Gender	-0.2304934	0.2608486	-0.88	0.384	-0.7624976	0.3015108
Ca	$-4.44 \times 10^{-6}$	$1.68 \times 10^{-6}$	-2.65	0.013	$-7.86 \times 10^{-6}$	$-1.02 \times 10^{-6}$
Zn	$6.05 \times 10^{-6}$	0.0000129	0.47	0.641	-0.0000202	0.0000323
Fe	0.0001524	0.00008	1.91	0.066	-0.0000107	0.0003154
Sb	0.0010258	0.0006019	1.7	0.098	-0.0002018	0.0022534
Cu	-0.0022586	0.0012021	-1.88	0.07	-0.0047104	0.0001931
Ti	-0.0000199	$4.46 \times 10^{-6}$	-4.46	0	-0.000029	-0.0000108
Pb	-0.0000317	0.0000385	-0.82	0.417	-0.0001103	0.0000469
Cons	0.9443076	0.3006426	3.14	0.004	0.3311431	1.557472

如表 5 所示, 当显著性水平  $\alpha = 0.1$  时, 通过  $t$  分布假设检验的元素为 Ca、Cu、Ti、Fe、Sb。Ca、Cu、Ti 的偏相关系数均为负, 即相比其他鞋种, 皮

鞋的橡胶鞋底中上述元素的含量较少, 而 Fe、Sb 含量相对较多。上述元素在不同鞋种的平均含量见表 6。

表 6 不同鞋种的平均元素含量

Table 6 Average element content of different shoes

Variable	Element content / $10^{-6}$				
	Ca	Cu	Ti	Fe	Sb
Others	28689.18	80.35	12992.82	170.53	58.06
Leather shoe	18052.00	61.04	849.87	926.43	78.09

由表 6 可知, 不同元素含量的相对关系与回归结果相吻合。剔除对解释变量相对显著性不足的元素 Sb ( $P = 0.098$ ), 为反映鞋底橡胶含量的相对关系, 并且得出特征元素之间对于皮鞋种属认定的权重, 对剩余元素含量标准化后再次进行回归分析, 得到的标准化回归系数见表 7, 其中  $\alpha$  为标准化后的回归系数。

元素 Fe 和 Ti 的标准化偏回归系数分别为 0.369 和 -0.452, 相比于其他元素更具有可解释性, 因此将 Fe 和 Ti 选为特征元素。所设计的多元回归模型为

$$N_{\text{KIND}} = \beta_0 + \beta_1 \times R_{\text{Ca}} + \beta_2 \times R_{\text{Cu}} + \beta_3 \times R_{\text{Ti}} + \beta_4 \times R_{\text{Fe}}, \quad (6)$$

式中:  $R_{\text{Ca}}$ 、 $R_{\text{Cu}}$ 、 $R_{\text{Fe}}$  分别为对应元素的含量。

表 7 样本中各元素的标准化回归结果

Table 7 Standardized regression results of each element in the sample

Variable	$\eta_{\text{Coef}}$	$E_{\text{Std}}$	$t$	$P$	$\alpha$
Ca	$-4.45 \times 10^{-6}$	$2.18 \times 10^{-6}$	-2.04	0.049	-0.2581123
Cu	-0.0022486	0.0011303	-1.99	0.055	-0.2507974
Ti	-0.0000198	$5.51 \times 10^{-6}$	-3.59	0.001	-0.4522083
Fe	0.0001799	0.0000635	2.83	0.008	0.3693422
Cons	0.8409447	0.1178095	7.14	0	

当某一解释变量与其余变量线性相关时,则称解释变量之间存在“多重共线性”,其会使不同变量的可解释性难以区分,为检验建立的多元线性回归模型是否存在上述影响,建立方差膨胀因子  $F_{\text{VIF}}$ ,

$$F_{\text{VIF},m} = \frac{1}{1 - R_{1-k \setminus m}^2}, \quad (7)$$

式中: $R_{1-k \setminus m}^2$  为  $k-1$  个解释变量相对于第  $m$  个自变量回归后的拟合优度,与  $F_{\text{VIF}}$  呈正相关。根据经验,若  $F_{\text{VIF},\text{max}} > 10$ ,则存在严重的多重共线性,检验结果见表 8。

表 8 多重共线性的检验结果

Table 8 Test results of multicollinearity

Variable	$F_{\text{VIF}}$	$1/F_{\text{VIF}}$
Fe	1.11	0.897329
Ca	1.05	0.95281
Ti	1.04	0.958093
Cu	1.04	0.958947
Mean $F_{\text{VIF}}$	1.06	

表 8 中解释变量的  $F_{\text{VIF}}$  均小于 10,不存在多重共线性的影响。同时,将 40 个样本数据代入回归方程,计算结果如图 1 所示。

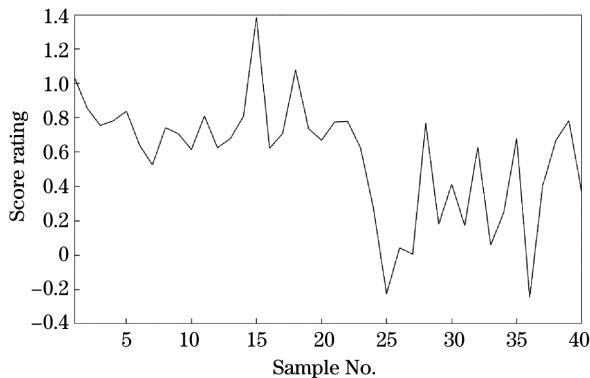


图 1 鞋的种类得分

Fig. 1 Score of shoe types

为了便于与实际鞋的种类进行比对,将样本中

的 23 个皮鞋划归为前 23 号。如图 1 所示,得分评级均大于 0.5,则可做出“样本为皮鞋”的倾向性认定,但 28、32、35、38、39 号并不是皮鞋,其得分评级也大于 0.5。

### 3.3 误差分析与回归模型的推广

28、35、38 号为休闲鞋,32、39 号分别为篮球和足球鞋,上述误分样本的元素含量见表 9。

表 9 误分样本指标元素含量

Table 9 Element content of misclassified samples

Sample No.	Element content / $10^{-6}$			
	Ca	Fe	Cu	Ti
28	1261	0	30	0
32	2285	0	72	2074
35	21528	1170	123	0
38	16272	0	24	2394
39	2934	0	8	1365

元素 Fe 和 Ti 是区分皮鞋的重要指标元素,其偏相关系数分别为 0.369 和 -0.452,样本 28、32、38、39 中,Fe 元素含量较少或 Ti 元素含量较多,与偏相关系数反映出的相关关系不符,可作出“样本并不是皮鞋”的认定;同时,35 号样本的 Fe 元素含量较多,是错误分类的主要原因。因此,经过校正后的分类结果精度为 97.5%。

为检验回归模型在真实案件中的分类效果,随机对皮鞋、休闲鞋鞋底橡胶分别进行燃烧,沾染血渍、土壤、油墨和油漆的单因素影响实验。再次利用 XRF,得到此时的样本元素含量检测结果,并通过回归方程进行分类,结果如表 10 所示。

前 4 个样本的得分评级接近于 1,可做出“样本为皮鞋”的倾向性认定;同理,后 5 个样本的得分远小于 1,可做出“样本不是皮鞋”的倾向性认定,分类精度为 100%。综上所述,多元线性回归模型仍可在燃烧、血渍、土壤、油漆、油墨等干扰因素下实现对

表 10 模拟案件真实情况的样本回归结果

Table 10 Sample regression results of simulating the real situation of cases

Variable	Element content / $10^{-6}$				Score rating
	Ca	Cu	Ti	Fe	
Yongliang leather shoe	2172	0	0	647	0.947675
Yongliang leather shoe (combustion group)	2312	0	0	601	0.938776
Crocodile leather shoe	17573	0	0	888	0.922496
Crocodile leather shoe (bloodstain group)	16326	0	0	828	0.917251
Z. Suo casual shoe	80073	0	21045	0	0.067929
Z. Suo casual shoe (soil group)	79074	0	20315	0	0.086828
Huili casual shoe (paint group)	854	0	23679	0	0.3683
Yangda casual shoe (control group)	107806	47	9354	0	0.070315
Yangda casual shoe (ink group)	109634	60	9706	0	0.025979

样本的分类。

### 3.4 基于多元线性回归分类方法的提炼与总结

图 2 为所提多元线性回归分类方法的流程图。所提方法可以客观、准确地筛选出解释力强的特征元素,同时综合考量了不同指标对分类的贡献,使结果更加科学准确。相比于依靠指标元素分类和 K-means 分类的方法,所提方法将科学的数理统计作为依据。

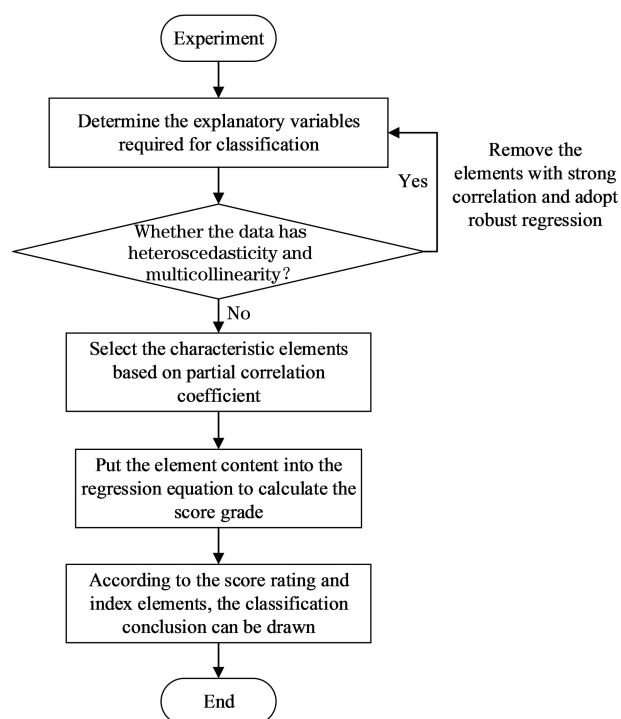


图 2 多元线性回归分类方法流程图

Fig. 2 Flow chart of multivariate linear regression classification method

## 4 结 论

利用 X 射线荧光光谱法可检测出不同橡胶鞋底的元素及含量,并建立多元线性回归模型来计算得分评级,并依据标准化回归系数筛选出特征元素,综合上述两个因素,可对不同鞋种做出准确分类,精度可达 97.5%;同时,分类结果不受燃烧、血渍、土壤、油墨和油漆等因素的影响,可准确筛选出加入上述影响因素后的皮鞋样本。依据上述分类方法,可为犯罪现场鞋底橡胶种属分类的倾向性认定提供帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Z G, Wang C H, Sun S Q, et al. On the examination of rubber with Fourier transform Raman spectroscopy[J]. Journal of Chinese People's Public Security University (Science and Technology), 2002, 8(3): 14-17.  
王志国,汪聪慧,孙素琴,等. 橡胶的傅立叶变换拉曼光谱法检验[J]. 公安大学学报(自然科学版), 2002, 8(3): 14-17.
- [2] Yuan L F, Yu X F, Wang Q. Identification of a kind of synthesized rubber by IR spectrometry and X-ray fluorescence spectrometry [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2005, 22(4): 704-706.  
袁丽凤,俞雄飞,王谦. 红外光谱结合 X 射线荧光光谱分析鉴定合成橡胶粒子[J]. 光谱实验室, 2005, 22(4): 704-706.
- [3] Liu D X, Zhao M M, He J N. Component inspection the rubber in automobile tire by pyrolysis gas chromatography-mass spectrometry method [J].

- China Synthetic Resin and Plastics, 2015, 32(6): 49-52.
- 刘冬娴, 赵明明, 贺江南. 裂解气相色谱-质谱法检验汽车轮胎橡胶[J]. 合成树脂及塑料, 2015, 32(6): 49-52.
- [4] Jiang H, Fan Y, Wang J G, et al. Study on the test of rubber soles by X-Ray fluorescent spectrum [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(10): 319-324. 姜红, 范焯, 王嘉庚, 等. X 射线荧光光谱法检验橡胶鞋底的研究[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(10): 319-324.
- [5] Zhu Z X, Feng J, Li C, et al. Application of XRFs without using standard samples to inspection of mineral products in exits and entrances at customs [J]. Physical Testing and Chemical Analysis, 2009, 45(7): 832-835. 朱志秀, 冯健, 李晨, 等. X 射线荧光光谱无标样分析技术在出入境矿产品检验中的应用[J]. 理化检验-化学分册, 2009, 45(7): 832-835.
- [6] He X L, Wang J F, Wang F, et al. Rapid identification of rubber particles based on second derivative infrared spectra [J]. China Measurement & Test, 2019, 45(9): 60-64, 83. 何欣龙, 王继芬, 王飞, 等. 二阶导数红外光谱快速鉴别轮胎橡胶颗粒[J]. 中国测试, 2019, 45(9): 60-64, 83.
- [7] Han P, Wang J H, Lu A X, et al. Analysis of heavy metal in soil with portable X-ray fluorescence spectrometry [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(3): 826-829. 韩平, 王纪华, 陆安祥, 等. 便携式 X 射线荧光光谱分析仪测定土壤中重金属[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(3): 826-829.
- [8] Campos P H O V, Appoloni C R, Rizzutto M A, et al. A low-cost portable system for elemental mapping by XRF aiming *in situ* analyses [J]. Applied Radiation and Isotopes, 2019, 152: 78-85.
- [9] Li D, Tan L C, Guo F, et al. Application of Avaatech X-ray fluorescence core-scanning in Sr/Ca analysis of speleothems [J]. Science China Earth Sciences, 2019, 62(6): 964-973.
- [10] Jiang H, Xu L L, Fu J Z. Classification of rubber soles based by XRF [J]. Chemical Research and Application, 2020, 32(5): 832-834. 姜红, 徐乐乐, 付钧泽. X 射线荧光光谱法对橡胶鞋底的分类[J]. 化学研究与应用, 2020, 32(5): 832-834.
- [11] Zhang J, Jiang H, Liu F, et al. Differential Raman spectroscopy visualization and rapid identification of shoe sole materials [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress [2020-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200924.1448.003.html>. 张进, 姜红, 刘峰, 等. 鞋底材料的差分拉曼光谱可视化快速鉴别 [J/OL]. 激光与光电子学进展 [2020-10-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200924.1448.003.html>.
- [12] Wang L Y, Jiang H. Determination of car lampshade samples by X-ray fluorescence [J]. Shanghai Plastics, 2019(3): 23-26. 王凌云, 姜红. X 射线荧光光谱法检验轿车车灯灯罩的研究 [J]. 上海塑料, 2019(3): 23-26.
- [13] Zhao A H, Hua L, Chi L S. Multielement analysis of rubber material by X-ray fluorescence spectroscopy [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2001, 10(5): 23-24. 赵爱华, 华兰, 迟令生. 橡胶材料的 X 射线荧光多元素分析 [J]. 化学分析计量, 2001, 10(5): 23-24.
- [14] Fu J Z, Jiang H, Li Y, et al. Examination of cigarette ash evidence by XRF combined with chemometrics [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress [2020-11-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200812.1012.006.html>. 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/OL]. 激光与光电子学研究进展 [2020-11-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200812.1012.006.html>.
- [15] Li C Y, Liu J K, Jiang H, et al. Study on the identification of X-ray fluorescent spectral paper ashes based on Support Vector Machine algorithm [J/OL]. Laser & Optoelectronics Progress [2020-11-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200812.1012.002.html>. 李春宇, 刘金坤, 姜红, 等. 基于支持向量机算法的 X 射线荧光光谱纸张灰烬识别研究 [J/OL]. 激光与光电子学研究进展 [2020-11-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20200812.1012.002.html>.
- [16] Ma X, Jiang H, Yang J Q. Examination of plastic pack belts (ropes) via X-ray fluorescence spectrometry combined with multivariate statistical analysis [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(22): 223005. 马泉, 姜红, 杨佳琦. X 射线荧光光谱结合多元统计分析塑料打包带(绳) [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(22): 223005.
- [17] Hayashi F. Economics [M]. Ran Q K, Zhu B H, Transl. Shanghai: Shanghai University of Finance and Economics Press, 2005: 10-15. 林文夫. 计量经济学 [M]. 冉启康, 朱保华, 译. 上海: 上海财经大学出版社, 2005: 10-15.