

基于 ICP-MS 的不同产地橡胶籽无机元素含量差异分析

潘晓威¹ 孙爱娣² 潘政¹ 梁耀辉¹ 叶剑芝^{1*}

(1. 中国热带农业科学院 农产品加工研究所, 广东 湛江 524001;

2. 云南农业大学 热带作物学院, 云南 普洱 665000)

摘 要 为进一步拓展农业废弃物——橡胶籽的开发价值,通过微波消解结合电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)建立了快速分析橡胶籽中 16 种无机元素的方法,测定了我国六个产地橡胶籽中 16 种元素的含量,通过无机元素指纹图谱、主成分分析和聚类分析来筛选其特征元素,进行差异性分析。结果表明,各元素线性关系良好($r>0.999$),检出限在 0.000 7~0.53 mg/kg,加标回收率在 86.0%~96.3%,精密度符合规定($RSD<10\%$),所建立的方法可用于橡胶籽中多元素的快速检测;橡胶籽中均含有较丰富的无机元素,Mg 含量最高,均在 10 g/kg 以上;K 含量达 4 000~9 122 mg/kg;Ca 含量达 382~1 433 mg/kg;Zn 含量在 300 mg/kg 以上;Ti、Cu、Mn、Ni 含量也均在 100 mg/kg 以上;有害重金属 Pb、Cd 含量较高,橡胶籽在食用产品开发过程需注意控制。不同产地橡胶籽元素相对含量的变化趋势在一定程度上基本一致,有部分元素的不同产地相对含量存在一定差异。主成分分析选出前 4 个主成分(Co、V、Cu、Se、Ti、Pb、Cr)的累计方差贡献率为 82.69%,得出特征无机元素为 Co、V、Cu、Se、Ti、Pb、Cr;聚类分析可将 18 个橡胶籽样品分为四大类,说明无机元素的含量与环境、地域等因素具有相关性。研究结果可为橡胶籽的开发利用提供研究基础。

关键词 橡胶籽;产地;电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS);特征元素

中图分类号: O657.63 TH843 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1035(2023)10-1130-08

Difference Analysis of Inorganic Elements in Rubber Seeds from Different Producing Areas Based on ICP-MS

PAN Xiaowei¹, SUN Aidi², PAN Zheng¹, LIANG Yaohui¹, YE Jianzhi^{1*}

(1. Agricultural Product Processing Research Institute, Chinese Academy of

Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524001, China;

2. Tropical Crop College of Yunnan Agricultural University, Puer, Yunnan 665000, China)

Abstract To further expand the exploitation value of agricultural waste-rubber seeds and to understand the distribution characteristics of inorganic elements in rubber seeds from different origins. In this study, a rapid method for analysis of 16 inorganic elements(Mg, K, Ca, Zn, Ti, Cu, Mn, Ni, Cr, Ba, Co, Cd, Se, Pb, V, and As) in rubber seeds was established by microwave ablation combined with inductively coupled plasma

收稿日期: 2022-11-15 **修回日期:** 2022-12-22

基金项目: 海南省自然科学基金资助项目(321QN0927); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项项目(1630082022006)

作者简介: 潘晓威,男,助理研究员,主要从事农产品质量安全研究。E-mail: 469595092@qq.com

* **通信作者:** 叶剑芝,男,副研究员,主要从事农产品质量安全检测技术研究。E-mail: 7856108@163.com

引用格式: 潘晓威,孙爱娣,潘政,等. 基于 ICP-MS 的不同产地橡胶籽无机元素含量差异分析[J]. 中国无机分析化学, 2023, 13(10): 1130-1137.

PAN Xiaowei, SUN Aidi, PAN Zheng, et al. Difference Analysis of Inorganic Elements in Rubber Seeds from Different Producing Areas Based on ICP-MS[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2023, 13(10): 1130-1137.

mass spectrometry (ICP-MS), and the method was practically applied to determine the contents of 16 elements in rubber seeds from six origins in China. The fingerprinting, principal component analysis and cluster analysis of inorganic elements were used to screen their characteristic elements and perform the variance analysis. The results showed that the linearity of the elements was good ($r > 0.999$). The detection limits were in the range of 0.000 7—0.53 mg/kg, the spiked recoveries were 86.0%—96.3%, and the precision was as specified ($RSD < 10\%$). The established method can be used for the rapid determination of multiple elements in rubber seeds. Rubber seeds were all rich in inorganic elements, with the highest Mg content, all above 10 g/kg. K reached 4 000—9 122 mg/kg, Ca reached 382—1 433 mg/kg, and Zn reached more than 300 mg/kg. Ti, Cu, Mn, Ni content were also above 100 mg/kg. The content of harmful heavy metals Pb and Cd was high, which needed to be controlled in the process of using rubber seeds for edible product development. The trends of the relative content of elements in rubber seeds of different origins were basically the same to some extent. There were some differences in the relative contents of some elements from different origins. The cumulative variance contribution of the first four principal components (Co, V, Cu, Se, Ti, Pb and Cr) selected by the principal component analysis was 82.69%. The characteristic inorganic elements were Co, V, Cu, Se, Ti, Pb and Cr. Cluster analysis could classify the 18 rubber seed samples into four major categories, indicating that the content of inorganic elements was correlated with environmental and geographical factors. This study can provide a research basis for the development and utilization of rubber seeds.

Keywords rubber seed; origin; inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS); characteristic elements

橡胶籽(Rubber Seed)为一种橡胶树种子,由浅黄褐色并带有许多银灰色带状斑纹的硬皮质种壳和种仁构成^[1-2]。橡胶籽粕富含大量的人体必需脂肪酸和多种蛋白质及各种人体必需氨基酸,是天然热带蛋白质饲料的优质原料,橡胶种壳可以生产活性炭,木塑产品等^[3-4],具有生物可降解性和无毒特性,其壳制备的活性炭可应用于医学、食品、工业等多个领域^[5]。橡胶籽仁主要由油脂、蛋白质、纤维素、淀粉组成,其中油脂含量最为丰富,占种仁的 50% 以上^[6]。

据调查,大量橡胶籽未被有效利用而被直接丢弃, WEN 等^[7]估计亚洲每年平均生产超过 1 300 万 t 橡胶籽,胶园里生产的大量种子仅有少部分用于育种,其余大量的种子长期废弃在胶园里,造成资源的严重浪费。因此有必要加强对橡胶籽开发利用的研究。

无机元素的含量与分布关系到植物的使用功效和营养价值,具有重要的研究价值^[8]。目前,有关橡胶籽的研究多集中在橡胶籽油或者橡胶籽粕等领域的开发利用^[9-12],或关于氨基酸等植物化学成分的相关研究^[13],在无机元素含量分布领域的研究还有待进一步加强。在无机元素分析中,主要有原子吸收光谱仪、原子荧光光谱仪、电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)等设备进行检测^[14-15],其中具备准确性高、精密度好、抗干扰能力强、检出限低等优点的 ICP-MS 法在食品、环境等检测领域得到了越来越

广泛的应用^[16-17]。

数据分析中常用的主成分分析(Principle Component Analysis, PCA)和聚类分析法(Cluster Analysis, CA)等多元统计分析方法可将多个变量(多指标)的数据进行无量纲化处理,将批量数据合理地简化为少数几个综合数据^[18]。

为全面评价橡胶籽的品质,本实验以不同产地橡胶籽(海南、广东、云南、广西、台湾、福建)作为研究对象,通过微波消解法结合 ICP-MS 内标法同时检测橡胶籽中 Mg、K、Ca、Zn、Ti、Cu、Mn、Ni、Cr、Ba、Co、Cd、Se、Pb、V、As 等 16 种无机元素的含量,分析不同产地橡胶籽中元素的含量差异,通过主成分分析和聚类分析筛选其特征元素,进行橡胶籽中无机元素的差异性分析,为我国橡胶籽的进一步研究和开发利用提供有力的基础数据参考。

1 实验部分

1.1 材料与试剂

所用橡胶籽分别采自云南、广东、广西、海南、福建、台湾等 6 个产地(编 S1~S5 为云南、S6~S8 为广东、S9~S11 为广西、S12~S15 为海南、S16~S17 为福建、S18 为台湾),分别挑选饱满、无坏损的橡胶籽,充分晾干后去壳,分别捣碎、研磨成粉末,分装并贴好标签备用。

消解试剂如无特别说明,均为优级纯,实验用水为二级水, HNO_3 质量分数为 68%。

Mg、K、Ca、Zn、Ti、Cu、Mn、Ni、Cr、Ba、Co、Cd、Se、Pb、V、As 等单元素标准储备溶液(1 000 mg/L),采购于国家有色金属及电子材料分析测试中心。

1.2 主要设备

X series II 电感耦合等离子体质谱仪(美国赛默飞世尔),AUY120 电子天平(日本岛津),FW100 高速万能粉碎机(天津市泰斯特),MARS6 全自动微波消解萃取仪(美国 CEM 公司),VB24 UP 智能样品赶酸器(北京莱伯泰科)。

1.3 实验方法

准确称取 0.4 g(精确至 0.1 mg)制备好的橡胶籽粉末于消解罐中,加入 8 mL 硝酸后,预消解 2 h,待冷却后根据表 1 程序进行微波消解。

微波消解结束待冷却后拧开内外盖排除气体,此时消解液呈淡黄色,150 °C 赶酸 2 h,消解液冷却至室温,此时消解液清澈透明无沉淀,将其转移至 25 mL 比色管中,并用去离子水清洗消解管 2~3 次,定容至刻度,混匀备用,同时做空白样品实验^[19]。

表 1 微波消解程序

Table 1 Microwave digestion procedures

步骤	控制温度/°C	升温时间/min	保持时间/min
1	120	6	3
2	150	3	3
3	180	4	20

待测液在 ICP-MS 工作条件下进行测定。开机稳定 20 min,测试之前将仪器状态调至最优。测试过程中确保仪器的吸液速率是恒定的^[20]。

仪器工作条件见表 2。

表 2 ICP-MS 测定参数

Table 2 ICP-MS Measurement parameters

参数	设定值
碰撞气流量/(L·min ⁻¹)	4.5
冷却气流量/(L·min ⁻¹)	13.0
辅助气流量/(L·min ⁻¹)	0.78
雾化气/(L·min ⁻¹)	0.70
采样锥孔直径/mm	1.0
截取锥孔直径/mm	0.4
质量通道数/个	3
扫描次数/次	50
射频功率/W	1 200
蠕动泵转速/(r·s ⁻¹)	0.1
采样深度/mm	150

1.4 数据分析

采用 Excel 2010 软件建立不同产地橡胶籽样

品元素含量的原始数据文档,采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析,显著性水平为 $P < 0.05$ 。所采用的数据均为 3 次平行的测定值。

2 结果与讨论

2.1 方法的线性关系与检出限

在设定的仪器条件下测定制备好的混合标准溶液,测定结果见表 3,各元素线性相关系数 r 均在 0.999 以上,说明各元素在标准曲线浓度范围内线性关系良好。

表 3 回归方程、相关系数及检出限

Table 3 Standard curves, coefficients and detection limits of elements

元素	回归方程	r	检出限/(mg·kg ⁻¹)
Mg	$y=136.516440x+6491.886093$	0.999 8	0.14
K	$y=1815.846940x+783178.341009$	0.999 8	0.23
Ca	$y=77.350087x+38916.378308$	0.999 2	0.53
Zn	$y=66.279010x+2504.640074$	0.999 3	0.013
Ti	$y=17.865790x+235.886935$	0.999 8	0.077
Cu	$y=94.722856x+849.443826$	0.999 9	0.019
Mn	$y=425.785368x+2589.624935$	0.999 9	0.015
Ni	$y=74.561824x+468.828906$	0.999 9	0.013
Cr	$y=248.552891x+4419.589320$	0.999 4	0.012
Ba	$y=94.029367x+306.841233$	0.999 9	0.056
Co	$y=178.737861x+46.07959$	0.999 5	0.009
Cd	$y=92.558646x+2.055532$	0.999 5	0.000 7
Se	$y=64.789972x+12.406924$	0.999 8	0.013
Pb	$y=373.540949x+268.668242$	0.999 9	0.009
V	$y=145.128039x+1933.625890$	0.999 4	0.005
As	$y=36.443342x+132.649273$	0.999 4	0.006

在设定的仪器条件下,测定经处理的 11 个空白溶液,根据 11 次测定结果计算标准偏差,得到方法检出限。由表 3 可知,橡胶籽中各元素的方法检出限在 0.000 7~0.53 mg/kg,满足实验要求。

2.2 精密度与加标回收实验

按建立的检测方法进行处理并测定,平行测定 6 次,计算得到 16 种元素测定值的相对标准偏差(RSD)为 1.5%~8.9%,均小于 10%,说明该实验所用的测定方法重复性较好。

在橡胶籽中添加一定量标准溶液,按建立的检测方法进行处理并测定,计算加标回收率与 RSD,结果表明,加标回收率为 86.0%~96.3%,RSD 为 1.1%~8.8%,表明所建立的检测方法准确可靠,可用于橡胶籽中多元素的快速分析。

2.3 橡胶籽中无机元素含量

取 6 个产地样品,按照建立的检测方法进行前

处理和上机测定。根据表 3 的结果,不同产地橡胶籽中均含有丰富的 Mg、K、Ca、Ti、Mn、Ni、Zn 等无机元素,且各类元素含量也存在较大差异。我国海南、云南、广东、台湾、福建、广西等 6 个产地橡胶籽中 Mg 元素含量最高,均在 10 g/kg 以上,最高值可达 33 g/kg;K 元素含量达 4 000~9 122 mg/kg;Ca 元素含量达 382~1 433 mg/kg;Zn 元素含量在 300 mg/kg 以上;Ti、Cu、Mn、Ni 含量也均在 100 mg/kg 以上。相对于一般的食品,橡胶籽中有害无机金属 As 含量较低,均为未检出,但 Pb、Cd 等重金属含量较高,在食用产品开发过程中需注意控制,避免产品中重金属含量超过食品安全国家标准的限量值,对人体造成伤害,进而损害橡胶籽的食用产业开发前景。

表 3 各样品测定结果
Table 3 Test results of each sample($n=3$) /(mg·kg⁻¹)

元素	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Cr	9.08	7.95	5.15	6.89	8.83	8.34	5.49	7.76	6.12
Co	5.88	4.97	1.27	2.32	0.842	5.01	4.04	1.23	2.44
Cd	1.05	0.93	0.852	0.785	0.953	0.81	0.83	0.667	0.71
Ba	1.14	2.29	2.6	4.37	3.97	1.32	5.66	5.12	6.69
Pb	0.065	0.042	0.062	0.095	0.064	0.052	0.048	0.025	0.063
V	0.064	0.101	0.014	0.010	0.019	0.082	0.060	0.021	0.057
Se	0.017	0.028	0.031	0.022	0.011	0.020	0.032	0.025	0.051
Ti	237	192	185	202	174	193	278	160	326
Mn	194	220	144	132	83	334	203	128	182
Ni	187	223.3	79.9	62.1	68.9	188.4	84.2	70.4	93.1
Cu	346	317	152	148	105	426	246	163	198
Zn	250	187	558	333	336	217	558	467	654
Ca	813	1 190	488	563	833	1 433	892	802	774
K	4 228	6 122	6 912	9 122	5 607	5 588	4 832	7 382	3 998
Mg	17 234	18 887	17 165	20 592	16 917	20 973	20 111	19 880	25 452
As	-	-	-	-	-	-	-	-	-

元素	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18
Cr	4.75	3.66	5.39	5.02	3.63	5.33	7.14	7.05	6.97
Co	1.292	1.48	1.08	1.01	1.18	0.987	1.11	0.816	3.73
Cd	0.993	0.792	0.563	0.722	0.832	0.947	0.971	0.725	0.9
Ba	3.72	2.42	5.19	4.09	2.99	3.41	5.24	4.44	4.24
Pb	0.121	0.022	0.014	0.04	0.026	0.066	0.015	0.075	0.099
V	0.014	0.012	0.010	0.011	0.013	0.026	0.022	0.011	0.032
Se	0.012	0.033	0.012	0.010	0.022	0.016	0.008	0.013	0.041
Ti	178	182	174	142	184	157	191	182	269
Mn	159	159	135	142	152	142	115	124	174
Ni	71.2	111	71.8	84.5	86.2	51.2	76.2	89.2	71.1
Cu	153	135	142	143	145	83	131	134	186
Zn	376	465	574	499	407	351	407	322	534
Ca	513	523	712	698	382	642	714	676	812
K	6 912	6 712	8 443	6 332	5 632	8 404	6 098	6 831	4 190
Mg	24 795	16 324	20 484	22 398	20 932	19 889	12 341	13 012	33 023
As	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注:S1~S18 代表 18 个产地样品。

对 6 个产地橡胶籽的 15 种元素进行方差分析(表 4),结果表明,6 个产地橡胶籽样品中的 Cr、Co、Cd、Ba、Pb、V、Se、Ti、Mn、Ni、Cu、Zn、Ca、K、Mg 在地域之间存在显著差异($P<0.05$)。不同产地橡胶籽样品中的元素含量各有特点。台湾产地橡胶籽中镁元素含量显著高于其他五个产地($P<0.05$),福建镁元素最低,而钾元素低于其他五个产地($P<0.05$);广东产地钙元素最高;6 个产地中锌、钛、铜、锰、镍含量相似且锌元素明显高于其他四种元素。在广西与海南铬元素显著低于其他产地($P<0.05$),而云南、广东、福建、台湾产地铬元素含量相接近;云南钡元素显著低于其他产地($P<0.05$);云南、广东和台湾产地元素钴显著高于其他产地($P<0.05$),广东和海南镉元素含量显著低于另外 4 个

产地。因此,从橡胶籽中多元素的含量差异可以看出其无机元素含量受不同生长土壤、水文等环境因素的影响,与朱周俊等^[21-22]的研究结果基本一致。

表 4 不同产地橡胶籽测定结果

Table 4 Determination results of rubber seeds from different areas(<i>n</i> =3)							/(mg·kg ⁻¹)
元素	云南	广东	广西	海南	福建	台湾	
Cr	7.58a	7.20a	4.84b	4.84b	7.10a	6.97a	
Co	3.06a	3.43a	1.74b	1.06b	0.961b	3.73a	
Cd	0.914a	0.769b	0.832a	0.766b	0.848a	0.900a	
Ba	2.87b	4.03a	4.28a	3.92a	4.84a	4.24a	
Pb	0.066b	0.042c	0.069b	0.037c	0.045c	0.099a	
V	0.042a	0.054a	0.028b	0.015c	0.017c	0.032b	
Se	0.022b	0.026b	0.032a	0.015c	0.011c	0.041a	
Ti	198a	210a	229a	164b	187b	269a	
Mn	155b	222a	167b	143b	120b	174a	
Ni	124a	114a	92a	73b	83b	71b	
Cu	214b	278a	162b	128c	133c	186b	
Zn	333b	414b	498a	458a	365b	534a	
Ca	777b	1 042a	603b	609b	695b	812b	
K	6 398a	5 934a	5 874a	7 203a	6 465a	4 190b	
Mg	18 159b	20 321b	22 190b	20 926b	12 677c	33 023a	

注:同列中不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。

2.4 无机元素图谱

以元素种类为横坐标、相对含量为纵坐标绘制无机元素指纹图谱,由于 6 种产地橡胶籽中 16 种无机元素含量数量级差别较大,故将其调整至同一数量级(Se、V 扩大 1 000 倍,Pb 扩大 100 倍,Cd、Co 扩大 10 倍,Ti、Ni、Mn、Cu 缩小 10 倍,Ca、K 缩小 100 倍,Mg 缩小 1 000 倍)。由图 1

可知,不同产地橡胶籽元素相对含量的变化趋势在一定程度上基本一致,说明橡胶籽在元素含量分布和元素种类上整体接近,但也能看出有部分元素在不同产地的相对含量存在一定差异,不同产地的环境因素还是会导致种植物含量的差异,借此也可通过差异性信息来分析不同产地的变化情况。

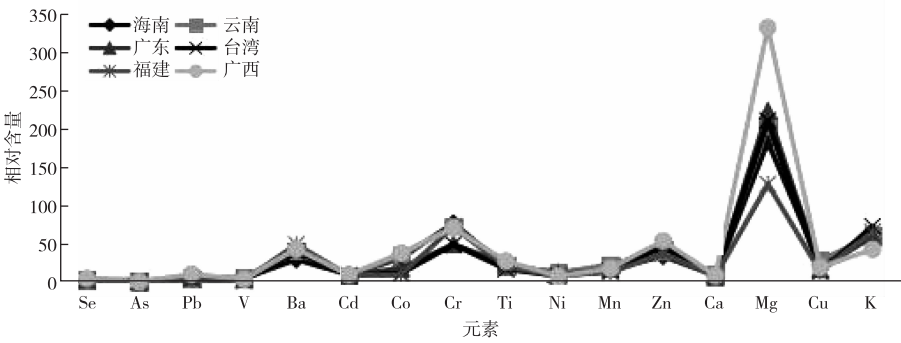


图 1 不同橡胶籽无机元素图谱

Figure 1 Inorganic element patterns of different rubber seeds.

2.5 主成分(PCA)分析

主成分分析法现广泛应用于实验数据分析,通过降低维度的作用提取出少数几个相互无关而又能够充分反映原始变量信息的综合指标(即主成分)。剔除未检出的元素 As,以不同产地 15 种无机元素的含量为指标进行主成分分析(PCA),对数据进行降维处理^[23],得到各主成分特征值、贡献率及累积

贡献率(表 5)。主成分分析结果显示,前 4 个主成分(PCA1-PCA4)的特征值分别为 6.370、3.211、1.677、1.145,方差贡献率分别 42.468%、21.403%、11.182%、7.637%,累积贡献率达 80.69%,可知前 4 个主成分即能够代表橡胶籽中无机元素的整体特征信息,故对前 4 个成分的载荷矩阵进行深入分析。由表 6 可知,前 4 个主成分与部分元素正相关性,

表 5 各主成分特征值、贡献率及累积贡献率
Table 5 The characteristic value, contribution rate and cumulative contribution rate of each principal component

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	6.370	42.468	42.468
2	3.211	21.403	63.872
3	1.677	11.182	75.054
4	1.145	7.637	82.690

表 6 主成分载荷矩阵
Table 6 Principal component loading matrix

相关系数	主成分			
	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4
Cr	0.582	-0.249	0.086	0.674
Co	0.941	0.129	0.060	-0.034
Cd	0.355	-0.281	0.727	0.078
Ba	-0.504	0.566	-0.200	0.516
Pb	0.088	0.181	0.850	-0.019
V	0.934	0.101	-0.133	0.071
Se	0.251	0.816	-0.053	-0.177
Ti	0.397	0.816	0.118	0.219
Mn	0.844	0.111	-0.175	-0.364
Ni	0.885	-0.025 7	-0.181	-0.141
Cu	0.955	-0.012	-0.147	-0.094
Zn	-0.508	0.761	-0.242	-0.029
Ca	0.818	-0.067	-0.290	0.240
K	-0.563	-0.482	-0.132	-0.194
Mg	0.123	0.681	0.309	-0.276

第 1 主成分 PCA1 与 Co、V、Cu 元素呈正相关(相关系数>0.9),第 2 主成分 PCA2 与 Se、Ti 元素呈正相关(相关系数>0.8),第 3 主成分 PCA3 与 Pb 元素呈正相关(相关系数>0.9),第 4 主成分 PCA4 与 Cr 元素呈正相关(相关系数>0.6),前 4 个主成分的累计方差贡献率为 82.69%,超过总方差的 80%,因此 Co、V、Cu、Se、Ti、Pb、Cr 这七种元素是橡胶籽的特征元素,是能显著影响橡胶籽中无机元素组成的主要综合指标。

2.6 聚类分析

对 18 批橡胶籽样品中的 16 种无机元素含量采用组间联接方法、系统聚类分析法进行聚类分析,进一步简化分析数据。当欧式距离平方和为 5 时,18 个样品可被分为 4 大类,结果见图 2。第 1 类:S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7、S8、S11、S12、S14、S15;第 2 类:S9、S10、S13;第 3 类:S16、S17;第 4 类:S18。其中,第 1 类样品分别来自于广东、广西、海南和云南;第 2 类样品分别来自于海南和广西;第 3 类样品来自于福建,第 4 类样品来自于我国台湾,显示了一定的差异性。由此也可看出,不同的种植气候、土壤、地理空间造成了土壤中微量元素的差异性,也间接影响了作物的生长状况,从而导致植物吸收的元素组成不同^[24]。

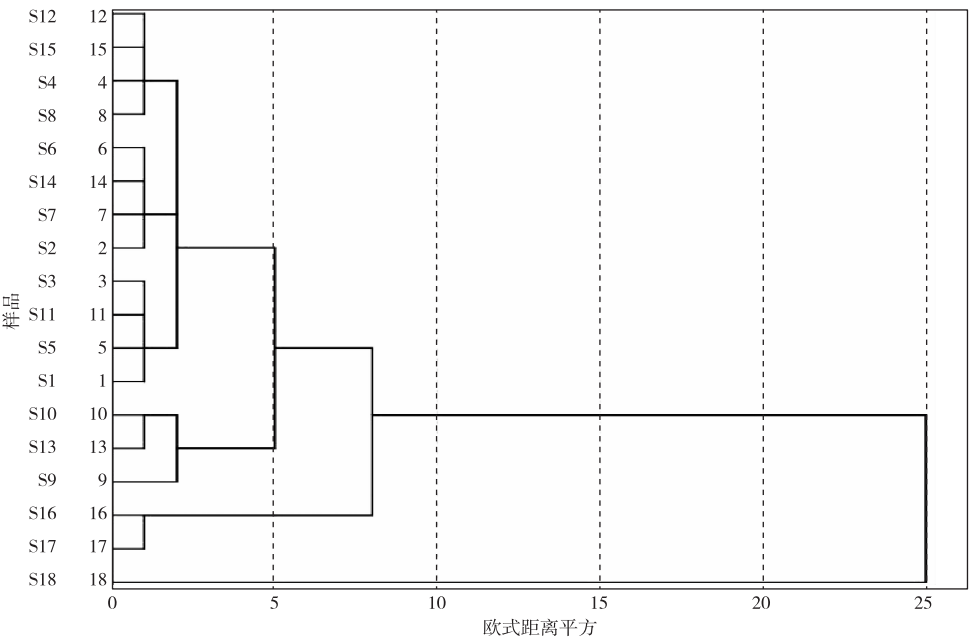


图 2 橡胶籽聚类分析结果
Figure 2 The results of cluster analysis.

3 结论

本实验建立了微波消解结合 ICP-MS 内标法同

时测定橡胶籽中的 Mg、K、Ca、Zn、Ti、Cu、Mn、Ni、Cr、Ba、Co、Cd、Se、Pb、V、As 等 16 种无机元素的检测方法。采用内标补偿法,排除基体效应对多元素

产生的抑制作用,最后,通过方法学验证了该方法的准确性和可靠性。表明该检测方法准确、可靠,适用于橡胶籽中多元素的测定。

采用建立的 ICP-MS 法测定 6 个不同产地橡胶籽中 16 种无机元素的含量,建立各产地橡胶籽中无机元素指纹图谱,通过主成分分析、聚类分析等方法对其元素分布规律进行研究。结果表明,不同产地橡胶籽中均含有丰富的 Mg、K、Ca、Ti、Mn、Ni、Zn 等无机元素,且各种元素含量存在较大差异。通过元素图谱可以看出,橡胶籽在元素含量分布和元素种类上整体趋势接近,其中有部分元素的不同产地相对含量存在一定差异,具有一定代表性。

以橡胶籽中 15 种无机元素含量进行主成分分析,前 4 个主成分(Co、V、Cu、Se、Ti、Pb、Cr)对总方差的累积贡献率达 82.69%,能够代表橡胶籽中无机元素的整体特征信息,可初步认为 Co、V、Cu、Se、Ti、Pb、Cr 是影响橡胶籽无机元素组成的特征元素,值得进一步深入探讨。通过对 18 批橡胶籽样品中 16 种无机元素含量进行聚类分析,可将 18 个样品分为 4 大类,分属于不同的地域,表明橡胶籽无机元素的含量与环境、地域等因素具有相关性。

本研究结果可为橡胶籽资源的进一步开发利用提供更多可靠的数据支撑。

参考文献

- [1] 王蕾. 橡胶籽饼粕制备多肽产品及其资源利用[D]. 北京:北京化工大学,2018.
WANG Lei. Preparation of polypeptide products from rubber seed meal and its resource utilization [D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2018.
- [2] 郭雄,彭吟雪,何东平,等. 超声波辅助提取橡胶籽粕中粗蛋白的研究[J]. 粮食与油脂,2017,30(8):55-60.
GUO Xiong,PENG Yinxue,HE Dongping,et al. Study on ultrasonic assisted extraction of crude protein from rubber seed meal[J]Cereals & Oils,2017,30(8):55-60.
- [3] 杨淼. 橡胶籽仁制备橡胶籽油及蛋白产品的研究[D]. 北京:北京化工大学,2021.
YANG Miao. Study on the preparation of rubber seed oil and protein products from rubber seed kernel[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2021.
- [4] 谢东,陶云凤,和宇娟,等. 橡胶籽油皂脚制备端环氧基脂肪酸酯的研究[J]. 中国油脂,2019,44(5):38-42.
XIE Dong,TAO Yunfeng,HE Yujuan,et al. Preparation of terminal epoxy fatty acid ester from soapstock of rubber seed oil[J]. China Oils and Fats,2019,44(5):38-42.
- [5] BORHAN A, YUSUF S. Activation of rubber-seed shell waste by malic acid as potential or emoval: I. sotherm and kinetics studies [J]. Materials (Basel), 2020,13.
- [6] 郭嵩明. 橡胶籽脱毒及资源循环利用研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.
GUO Aiming. Study on detoxification and recycling utilization of rubber seed resources [D]. Guangzhou: South China University of Technology,2016.
- [7] WEN Z G, WU Y B, QI Z G, et al. Rubber seed oil supple mentation enriches n -3 polyunsaturated fatty acids and reduces cholesterol contents of egg yolks in laying hens[J]. Food Chemistry,2019,301:125-198.
- [8] 张家旭,王信,董学风,等. 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法结合化学计量学分析比较 6 种松针中无机元素的含量[J]. 中国无机分析化学,2023,13(3):278-285.
ZHANG Jiaxu, WANG Xin, DONG Xuefeng, et al. Comparing the contents of inorganic elements in six kinds of pine needles by inductively coupled plasma mass spectrometry(ICP-MS) combined with chemometric analysis[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry,2023,13(3):278-285.
- [9] 杨晶晶,刘云,胡祥,等. 响应面法优化超声波辅助提取橡胶籽油及其脂肪酸成分分析[J]. 食品研究与开发,2020,41(21):137-144.
YANG Jingjing, LIU Yun, HU Xiang, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of rubber seed oil by response surface methodology and its fatty acid composition analysiss[J]. Food Research and Development, 2020,41(21):137-144.
- [10] 鲁琼芬,陈培富,柴艳,等. 饲粮中配合橡胶籽饼对蛋鸡蛋黄脂肪酸组成的影响[J]. 动物营养学报,2017,29(5):1739-1749.
LU Qiongfen, CHEN Peifu, CHAI Yan, et al. Effects of dietary rubberseed cake on fatty acid composition in yolk of laying hens [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2017,29(5):1739-1749.
- [11] 黄小雪,曾仕林,郭雄,等. 4 种提取工艺橡胶籽油的品质比较研究[J]. 中国油脂,2019,44(6):6-8,13.
HUANG Xiaoxue, ZENG Shilin, GUO Xiong, et al. Quality comparison of rubber seed oils by four kinds of extraction processes [J]. China Oils and Fats, 2019, 44(6):6-8,13.
- [12] PI Y, MA L, PIERCE K M, et al. Rubber seed oil and flaxseed oil supplementation alter digestion ruminal fermentation and rumen fatty acid profile of dairy cows[J]. Animal,2019(13):2811-2820.

- [13] 王震,张曦,陶琳丽,等. 橡胶籽资源的潜在开发利用价值研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2015,30(4):642-647.
WANG Zhen, ZHANG Xi, TAO Linli, et al. The potential development value of rubber seed[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2015,30(4):642-647.
- [14] 陈璐,李霞,李增梅,等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定山东小麦中铬、镍、铜、砷、镉、铅、锌的含量及质量控制[J]. 中国无机分析化学, 2020,10(3):66-70.
CHEN Lu, LI Xia, LI Zengmei, et al. Determination and quality control of chromium, nickel, copper, arsenic, cadmium, lead and zinc in wheat in Shandong province by ICP-MS with microwave digestion[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2020,10(3):66-70.
- [15] 张国香,胡秋霞,李刚. ICP-MS 测定不同产地藜麦中 27 种无机元素[J]. 食品工业,2022,43(5):318-322.
ZHANG Guoxiang, HU Qiuxia, LI Gang. ICP-MS determination of 27 inorganic elements in quinoa from different habitats[J]. The Food Industry,2022,43(5):318-322.
- [16] 兰冠宇,李鹰,俞晓峰,等. 超级微波消解-电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法测定土壤中 13 种元素[J]. 中国无机分析化学,2021,11(5):1-8.
LAN Guanyu, LI Ying, YU Xiaofeng, et al. Determination of 13 elements in soil by inductively coupled plasma mass spectrometry with Ultra-microwave digestion[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2021,11(5):1-8.
- [17] 潘晓威,杨春亮,曾绍东,等. 石墨消解-等离子体质谱法测定天然橡胶中 14 种元素的含量[J]. 热带作物学报,2021,42(8):2362-2368.
PAN Xiaowei, YANG Chunliang, ZENG Shaodong, et al. Determination of 14 elements in natural rubber by graphite digestion-inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021,42(8):2362-2368.
- [18] 张欣昕,张福金,刘广华,等. 基于 ICP-MS 分析的苜蓿矿质元素含量特征与评价[J]. 中国无机分析化学, 2022,12(1):139-145.
ZHANG Xinxin, ZHANG Fujin, LIU Guanghua, et al. Content characteristics and nutritious evaluation of elements in alfalfa based on ICP-MS analysis[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2022,12(1):139-145.
- [19] 牛延菲,曹红云,徐怡,等. ICP-MS 法同时测定辣木籽中 22 种无机元素及主成分分析和聚类分析[J]. 食品工业科技,2021,42(12):307-312.
NIU Yanfei, CAO Hongyun, XU Yi, et al. Simultaneous determination of 22 inorganic elements in moringa seeds by ICP-MS and principal component analysis and cluster analysis[J]. Science and Technology of Food Industry,2021,42(12):307-312.
- [20] 胡姝,于丽,杨沫,等. 电感耦合等离子体质谱法检测小浆果中 6 种重金属含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2021,12(5):1950-1953.
HU Shu, YU Li, YANG Mo, et al. Determination of 6 heavy metals content in small berry by inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Journal of Food Safety and Quality,2021,12(5):1950-1953.
- [21] 朱周俊,袁德义,邹锋,等. 不同锥栗农家种仁中 9 种矿质元素含量的因子分析与聚类分析[J]. 食品科学, 2019,40(2):165-170.
ZHU Zhoujun, YUAN Deyi, ZOU Feng, et al. Factor analysis and cluster analysis of contents of 9 mineral elements in seed kernels of castanea henryi from different varieties [J]. Food Science, 2019, 40 (2): 165-170.
- [22] 雷月,宫彦龙,邓茹月,等. 基于主成分分析和聚类分析综合评价蒸谷米的品质特性[J]. 食品工业科技,2021, 42(7):258-267.
LEI Yue, GONG Yanlong, DENG Ruyue, et al. Comprehensive evaluation of quality characteristics of parboiled rice based on principal component analysis and cluster analysis [J]. Science and Technology of Food Industry,2021,42(7):258-267.
- [23] 焦媛,车奇涛,薛淑娟,等. ICP-MS 法测定不同产地山茱萸中无机元素的含量[J]. 食品研究与开发,2019, 49(17):170-177.
JIAO Yuan, CHE Qitao, XU Shujuan, et al. Determination of inorganic elements in cornus officinalis from different producing areas by ICP-MS [J]. Food Research and Development,2019,49(17):170-177.
- [24] 李富荣,刘雯雯,文典,等. 基于矿质元素指纹分析的陈皮产地溯源研究[J]. 食品工业科技,2022,43(11): 295-302.
LI Furong, LIU Wenwen, WEN Dian, et al. Study on origin tracing of dried tangerine peel using mineral element fingerprints [J]. Science and Technology of Food Industry,2022,43(11):295-302.