DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250829001
引用格式: 郭颖, 陈国艳, 陈雪峰, 等. 电感耦合等离子体质谱法及主成分分析法研究不同产地美藤果 19 种元素的差异[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(1): 261–269.
GUO Y, CHEN GY, CHEN XF, *et al*. Study on the differences of 19 kinds of elements in *Plukenetia volubilis* Linneo from different origins by inductively coupled plasma mass spectrometry and principal component analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(1): 261–269. (in Chinese with English abstract).

电感耦合等离子体质谱法及主成分分析法研究不同产地美藤果 19 种元素的差异

郭　颖, 陈国艳, 陈雪峰, 王　忻, 孙婧涵, 和霁恬, 杨　瑾, 曾繁添, 放茂良, 陶　银, 刘付英*, 杨水艳*, 毛金蓉

[云南省粮油科学研究院(云南省粮油产品质量监督检验测试中心), 昆明　650033]

摘　要: 目的　建立电感耦合等离子体质谱法(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)测定美藤果中 19 种元素含量的分析方法, 以评价不同产地美藤果的质量差异元素分布特征与质量差异。**方法**　对云南西双版纳、红河、普洱及泰国、老挝共 33 批次美藤果样品进行微波消解, 采用 ICP-MS 测定 Co、Ni、As 等 19 种元素含量; 通过线性关系、精密度、重复性及回收率验证方法有效性, 并进行主成分和相关性分析。**结果**　方法线性关系良好(r^2>0.9990), 精密度优异(相对标准偏差小于 2%), 准确度可靠(加标回收率为 90.3%~116.8%), 主成分分析累计方差贡献率达 82.854%, 确定美藤果的特征元素为 Zn、Cd、Sr、Mn、Cr、Pb、Ti, 相关性分析可知, 元素间的相关性较强。**结论**　ICP-MS 能准确、快速地测定美藤果中 19 种元素的含量, 为评价不同产地美藤果质量提供了可靠方法, 并通过特征元素分析为完善美藤果的质量标准提供了重要参考。

关键词: 电感耦合等离子体质谱法; 美藤果; 主成分分析; 相关性分析

Study on the differences of 19 kinds of elements in *Plukenetia volubilis* Linneo from different origins by inductively coupled plasma mass spectrometry and principal component analysis

GUO Ying, CHEN Guo-Yan, CHEN Xue-Feng, WANG Xin, SUN Jing-Han, HE Ji-Tian, YANG Jin, ZENG Fan-Tian, FANG Mao-Liang, TAO Yin, LIU Fu-Ying*, YANG Shui-Yan*, MAO Jin-Rong

[*Yunnan Academy of Grain and Oil Sciences* (*Yunnan Grain and Oil Products Quality Supervision, Inspection and Testing Center*), *Kunming* 650033, *China*]

ABSTRACT: Objective　To establish an inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) for the determination of 19 kinds of elements in *Plukenetia volubilis* Linneo, evaluate the elemental distribution

收稿日期: 2025-08-29
第一作者: 郭颖(1984—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为粮油质量安全监测。E-mail: 372207062@qq.com
***通信作者:** 刘付英(1981—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为粮油质量安全监测。E-mail: 372243690@qq.com
杨水艳(1987—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为粮油质量安全监测。E-mail: 373073944@qq.com

characteristics and quality differences of quality variance element of *Plukenetia volubilis* Linneo from different producing areas. **Methods** A total of 33 batches of *Plukenetia volubilis* Linneo samples from Xishuangbanna, Honghe, Puer (Yunnan Province), Thailand and Laos were subjected to microwave digestion. The content of 19 kinds of elements including Co, Ni and As were determined by ICP-MS. The method validity was verified by linear relationship, precision, repeatability and recovery rate, and principal component analysis and correlation analysis were performed. **Results** The method showed good linearity (r^2>0.9990), excellent precision (relative standard deviation<2%) and reliable accuracy (spiked recovery rate: 90.3%–116.8%). The cumulative variance contribution rate of principal component analysis reached 82.854%, and the characteristic elements of *Plukenetia volubilis* Linneo were identified as Zn, Cd, Sr, Mn, Cr, Pb and Ti. Correlation analysis indicated strong correlations among the elements. **Conclusion** The ICP-MS method can accurately and rapidly determine the content of 19 kinds of elements in *Plukenetia volubilis* Linneo, providing a reliable approach for evaluating the quality of *Plukenetia volubilis* Linneo from different producing areas. The analysis of characteristic elements also offers important reference for improving the quality standards of *Plukenetia volubilis* Linneo.

KEY WORDS: inductively coupled plasma mass spectrometry; *Plukenetia volubilis* Linneo; principal component analysis; correlation analysis

0 引 言

美藤果(*Plukenetia volubilis* Linneo), 学名南美油藤, 又名印加花生果、印奇果等, 是大戟科多年生木质藤本植物, 原生长于海拔 80~1700 m 的南美洲安第斯山脉地区热带雨林[1–2], 已有上千年的食用历史[3–4]。2006 年由南美洲引入中国云南西双版纳[5]。目前主要种植基地在云南普洱、西双版纳和老挝的部分地区[6–7]。2013 年, 卫生部批准了美藤果油为国家新资源食品[8]。近年来, 美藤果主要集中在有机化学成分等方面的研究[9–12], 其富含多种人体必需的常量元素和微量元素, 含有维持人体骨骼健康、渗透压平衡等生理功能的重要元素。且铅、镉、砷等重金属元素是否符合限量标准也鲜有报道。目前检测无机元素的方法有原子吸收光谱(atomic absorption spectrometry, AAS)法[13–15]、原子荧光光谱(atomic fluorescence spectrometry, AFS)法[16–18]、电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)法等[19–22]。其中 AAS 法和 AFS 法主要用于重金属及有害元素的分析研究[23–24], 而 ICP-MS 法的适用范围广、检测时间短、准确度高。

本研究建立了 ICP-MS 法, 对 33 批不同产地美藤果进行 19 种元素含量测定, 评价不同产地美藤果元素含量, 了解各元素分布和重金属元素的超标情况; 结合主成分分析(principal component analysis, PCA), 探讨 19 种元素间的相关性, 为美藤果的综合开发利用提供科学依据, 也为相关产品的质量控制和安全评价提供了重要参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

美藤果样品分别是来自云南西双版纳傣族自治州(BN) 10 批次, 云南红河哈尼族彝族自治州(HH) 4 批次, 云南普洱市(PE) 7 批次、泰国(TG) 2 批次和老挝(LW) 10 批次, 共计 33 批次样品(样品均为同年收获的带壳干果, 3 kg/批次)。

钴(Co)、镍(Ni)、砷(As)、硒(Se)、镉(Cd)、铅(Pb)、钼(Mo)、铜(Cu)、锌(Zn)、锶(Sr)、铬(Cr)、锰(Mn)、镁(Mg)、铁(Fe)、钙(Ca)、钾(K)、钠(Na)、铝(Al)、钛(Ti) 19 种元素混合标准品溶液(质量浓度 100 μg/mL)、铋、锗、铟、锂、铕、铽(内标溶物, 质量浓度 10 μg/mL)(美国珀金埃尔默股份有限公司); 硝酸(优级纯, 成都市科龙化工试剂厂); 实验用水位超纯水。

1.2 仪器与设备

NEXION2000 电感耦合等离子体质谱联用仪(美国珀金埃尔默股份有限公司); UITra CLAVE V 超级微波化学系统、subPUR 超纯酸制备系统、TraceClean 全自动逆流酸清洗系统(意大利 MILESTONE 公司); EH-20B 微控数显电热板(莱伯泰科有限公司); AL204 型电子天平(精度 0.01 g, 瑞士 METTLER TOLEDO 公司); Arium® Pro 纯水超纯水系统(德国 Sartorius 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

准确称取美藤果带壳样品粉末 0.5 g(精确至 0.001 g)于超级微波消解罐中, 加入 6 mL 纯硝酸, 按照超级微波消解程序(表 1)消解, 结束后消解液全部转移至 25 mL 容量瓶, 用超纯水定容至刻度, 摇匀, 得到待测溶液。除不加样品外, 按上述方法制备空白溶液。样品现制现用。

1.3.2 ICP-MS 工作条件

ICP-MS 点矩稳定 30 min 后使用调谐液优化仪器工作参数, 使仪器达到最佳工作状态, 主要工作条件见表 2。

表 1　超级微波消解程序

Table 1　Program of ultra-microwave digestion

步骤	功率/W	温度/℃	爬升/(℃/min)	保持/min
1	1200	90	10	3
2	1200	120	5	2
3	1200	220	15	20
4	1200	230	5	10

表 2　ICP-MS 仪器工作条件

Table 2　Operating conditions of ICP-MS instrument

仪器参数	设置值	仪器参数	设置值
矩管	石英一体化, 1.5 mm 中心通道	数据采集方式	跳峰
高频发射功率/W	1550	重复次数/次	3
取样锥/截取锥	1.0/0.4 mm (Ni)锥	雾化室温度/℃	2.5
冷却器(Ar)流速/(L/min)	14.0	泵速/(r/min)	35
辅助气(Ar)流速/(L/min)	0.8	碰撞气流速(He)/(L/min)	5.075
雾化气(Ar)流速/(L/min)	1.0065	测定模式	碰撞模式

1.3.3　标准溶液和内标溶液配制

依据样品中 19 种无机元素含量, 将标准品溶液用体积分数 5%硝酸溶液梯度稀释, 配制成不同质量浓度的标准品待测溶液。

按同位素丰度表推荐的质量数选取同位素, 其中 Co、Ni、As、Se、Cd、Pb、Mo、Cu、Zn、Sr 以 In 作内标; Cr、Mn、Mg、Fe、Na、Al、Ca、K 以 Sc 作内标; Ti 以 Bi 作内标。

1.3.4　试样测定及加标回收实验

参考 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》, 采用 ICP-MS 法对 Co、Ni、As 等 19 种元素含量进行测定, 外标法定量。

对 19 种元素进行 3 水平加标回收实验, 加标水平分别为目标元素的检出限、2 倍检出限及 10 倍检出限, 重复测定 6 次, 并计算加标回收率和精密度。

1.4　数据处理

样品进行多元素含量分析后, 采用 Microsoft Excel 2024 进行数据整理, 运用 SPSS 26.0 软件对原始数据进行标准化处理后进行主成分分析, Origin 2024 软件进行相关性分析, 通过 MetaboAnalyst 6.0 (https://www.metaboanalyst.ca/) 进行偏最小二乘判别分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)等多元统计分析。

2　结果与分析

2.1　线性关系、检出限

分别以 19 种元素标准品质量浓度为横坐标(X, μg/L), 标准品溶液及内标溶液(质量浓度 50 μg/L)中各元素与对应的内标元素响应值的比值为纵坐标(Y), 绘制标准曲线, 在线性范围内各元素线性关系良好, r^2>0.9990。对空白溶液进行 11 次的连续进样, 以空白样品溶液响应值 3 倍的标准偏差为检出限, 测定结果见表 3。

表 3　各元素方法实验考察结果

Table 3　Results of methodological validation for each element

元素	线性方程	r^2	线性范围/(ng/mL)	检出限/(mg/kg)	精密度 RSDs/%	重复性 RSDs/%	平均回收率/%
Co	Y=0.0099X+0.002	0.9999	0~50	0.001	1.5	1.2	110.2
Ni	Y=0.029X–0.006	0.9999	0~50	0.241	1.7	2.4	98.9
As	Y=0.004X+0.000	0.9995	0~50	0.084	0.9	1.9	99.3
Se	Y=0.019X+0.000	0.9995	0~50	0.266	1.2	0.8	91.3
Cd	Y=0.0117X+0.002	0.9999	0~50	0.003	1.9	0.7	112.4
Pb	Y=0.386X+0.019	0.9999	0~50	0.079	1.1	1.0	95.6
Mo	Y=0.063X+0.015	0.9998	0~50	0.034	0.8	1.3	90.3
Cu	Y=0.076X+0.088	0.9999	0~500	0.424	1.1	2.8	100.3
Zn	Y=0.006X+0.018	0.9998	0~500	0.632	1.3	1.7	102.9
Sr	Y=0.025X+0.045	0.9999	0~500	0.025	0.7	2.3	111.6
Cr	Y=0.503X–0.145	0.9998	0~50	0.022	0.6	1.9	91.9
Mn	Y=0.230X+2.639	0.9996	0~500	0.015	1.5	1.4	95.6
Mg	Y=0.025X+0.402	0.9999	0~20000	0.794	1.2	0.9	116.8
Fe	Y=0.011X+0.526	0.9999	0~5000	2.021	0.9	2.5	113.2
Na	Y=0.064X+0.000	0.9995	0~20000	2.882	1.0	1.8	103.3
Al	Y=0.009X+0.000	0.9999	0~5000	1.611	1.1	1.4	100.9
Ca	Y=0.001X+0.029	0.9999	0~20000	1.662	1.4	1.1	95.8
K	Y=0.027X+0.000	0.9999	0~20000	3.954	1.7	0.9	94.7
Ti	Y=0.001X+0.019	0.9997	0~50	0.292	1.1	2.4	96.8

注: 相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)。

2.2 精密度、重复性

精确吸取质量浓度为 50 ng/mL 的混合标准溶液, 连续进样 6 次, 记录各元素响应值, 计算 6 次结果的 RSDs, RSDs 为 0.6%~1.9%, 表明仪器精密度良好。

精确称取美藤果(版纳-5)样品 0.5 g(精确至 0.001 g), 平行 6 份, 按 1.3.1 进行样品处理制备供试品溶液, 在给定仪器条件下进样, 计算 6 份样品含量的 RSDs 值, 结果见表 3。RSDs 为 0.7%~2.8%, 表明该方法重复性良好。

2.3 加标回收率

精确称取美藤果(版纳-5)样品 0.5 g(精确至 0.001 g), 平行 12 份, 测定其中 3 份来计算各无机元素本底含量, 剩余 9 份按低、中、高质量浓度梯度分别加入标准贮备液, 制备供试品溶液, 进样测定, 计算回收率。各无机元素加样回收率在 90.3%~116.8%范围内, 结果见表 3。

2.4 实际样品测定

分别准确称取各批次美藤果样品 0.5 g(精确至 0.001 g), 平行 3 份, 按 1.3.1 处理样品, 在 1.3.2 实验条件下测定, 具体结果见表 4。红河地区 Cu、Zn、Fe、Na、Al 的平均含量最高, 泰国地区 Sr、Ca、K 的平均含量最高, 老挝地区 Mn 平均含量最高。33 批次样品的常量元素 Cu 含量在 6.17~7.98 mg/kg 范围内(最高值位于红河)、Zn 含量在 26.0~45.3 mg/kg 范围内(最高值位于西双版纳), Ca 含量在 179.0~310.5 mg/kg 范围内(最高值位于红河), Fe 含量 23.3~47.5 mg/kg 范围内(最高值位于红河), Na 含量 17.1~40.6 mg/kg 范围内(最高值位于老挝), Al 含量 7.7~25.4 mg/kg 范围内(最高值位于西双版纳), K 含量 2779.0~4888.8 mg/kg 范围内(最高值位于泰国), Mg 含 1287.3~1913.1 mg/kg 范围内, 含量最高的样品产地源自普洱, 不同含量的占比见图 1。美藤果中常量元素 Mg、K、Ca、Na 含量较高, 平均含量分别为 1658.638、3846.973、232.314、26.789 mg/kg; 微量元素中 Zn、Fe、Cu 的含量较高, 平均含量分别为 32.564、35.138、6.826 mg/kg(表 4)。在现行的 GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》中规定, 美藤果若作为油料作物, 油脂及其制品 Pb ≤0.08 mg/kg, As≤0.1 mg/kg, 若作为坚果种子, 坚果及籽类 Pb ≤0.2 mg/kg, Cd≤0.5 mg/kg, 美藤果 Pb、Cd、As 污染物结果均在国家限制范围内, 均符合要求。表 4 结果表明, 在测定的 19 种元素结果中, 离散程度最高的是 As 元素, RSD 达到 139.1%, 其次是 Se 元素, RSD 达到 116.0%, 离散程度最低的是 Cu 和 Mg 依次为 7.6%和 7.9%。

表 4 样品测定结果(mg/kg)

Table 4 Measurement results of sample (mg/kg)

地区	Co	Ni	As	Se	Cd	Pb	Mo	Cu	Zn	Sr	Cr	Mn	Mg	Fe	Ca	K	Na	Al	Ti
BN-1	0.141	1.453	0.007	0.027	0.059	0.009	0.714	7.287	32.597	6.382	0.373	16.514	1670.223	38.064	217.729	3926.000	19.907	11.674	0.990
BN-2	0.267	1.024	0.003	0.003	0.076	0.029	0.293	6.907	29.432	3.235	0.437	26.508	1287.271	30.773	249.212	3635.200	22.801	11.412	1.114
BN-3	0.153	0.760	0.002	0.037	0.104	0.010	0.451	6.172	30.965	5.472	0.393	12.026	1459.463	28.957	249.205	2897.600	23.875	8.012	0.927
BN-4	0.142	0.813	0.005	0.033	0.101	0.008	0.222	6.350	26.025	4.582	0.121	20.939	1400.243	29.163	240.995	3764.200	22.655	8.898	1.747
BN-5	0.327	1.161	0.002	0.005	0.137	0.017	0.271	7.540	31.001	3.185	0.823	26.706	1552.792	38.519	204.907	3925.900	27.874	10.067	0.605
BN-6	0.104	0.438	0.031	0.001	0.085	0.016	0.457	6.387	33.909	3.323	1.403	10.601	1644.174	40.211	178.956	4286.400	29.916	10.407	0.781
BN-7	0.261	2.099	0.001	0.012	0.049	0.009	0.652	6.791	34.005	8.731	0.337	18.803	1710.399	34.678	216.579	4404.700	31.165	14.967	1.409
BN-8	0.056	0.873	0.009	0.082	0.015	0.002	0.694	6.931	26.582	7.240	0.820	11.334	1593.736	28.145	300.586	2832.800	19.370	8.200	1.619
BN-9	0.332	1.307	0.001	0.000	0.080	0.012	0.136	7.320	45.252	3.762	1.532	28.317	1437.981	43.016	225.075	3726.200	31.897	12.213	1.050
BN-10	0.344	3.272	0.003	0.006	0.054	0.057	0.497	7.479	35.525	10.200	0.848	19.104	1753.061	42.412	218.223	3774.200	35.519	25.391	0.667
LW-1	0.310	1.215	0.076	0.157	0.107	0.092	0.527	7.672	37.623	12.421	0.229	24.422	1682.413	28.173	248.313	2872.700	17.055	10.256	0.791
LW-2	0.223	1.208	0.011	0.026	0.070	0.022	0.577	7.155	40.169	7.179	0.187	17.012	1738.256	35.275	202.500	3763.900	28.742	14.199	1.272
LW-3	0.137	2.140	0.011	0.013	0.031	0.024	0.552	6.231	30.265	8.402	0.450	19.767	1651.954	34.669	216.674	3921.400	28.457	12.533	1.609
LW-4	0.191	1.289	0.008	0.027	0.069	0.017	0.667	7.427	32.014	11.639	0.565	19.985	1753.217	37.478	206.421	3711.700	22.494	12.891	1.174
LW-5	0.277	1.760	0.002	0.019	0.033	0.012	0.531	7.163	30.295	8.532	0.184	17.850	1740.377	34.909	219.696	4250.600	21.518	14.432	1.188
LW-6	0.156	2.283	0.002	0.009	0.064	0.007	0.397	6.407	29.210	11.345	0.257	22.432	1668.763	31.559	235.022	3931.300	22.589	12.303	1.577
LW-7	0.163	1.843	0.003	0.000	0.057	0.026	0.510	6.927	41.064	7.397	0.845	17.439	1812.106	43.297	208.471	4346.800	33.650	20.125	1.120
LW-8	0.126	1.580	0.002	0.031	0.044	0.018	0.636	6.275	36.369	11.296	0.421	14.905	1683.695	31.465	244.372	3217.500	25.024	15.065	1.710
LW-9	0.304	1.850	0.000	0.001	0.046	0.011	0.724	6.525	31.031	8.430	0.363	19.548	1599.424	32.237	220.130	3874.600	25.761	13.465	1.812
LW-10	0.185	1.541	0.004	0.023	0.036	0.072	0.471	6.741	34.022	6.912	1.892	23.179	1710.096	43.572	235.000	3946.500	40.646	17.513	0.390
PE-1	0.116	0.671	0.035	0.023	0.075	0.030	0.336	6.416	27.409	8.053	0.228	15.151	1652.758	27.209	271.203	3976.300	21.721	9.972	0.608
PE-2	0.142	0.850	0.035	0.115	0.074	0.029	0.377	6.396	27.224	13.886	1.084	15.829	1565.568	28.789	298.822	4652.300	25.652	10.965	2.044

表 4(续)

地区	Co	Ni	As	Se	Cd	Pb	Mo	Cu	Zn	Sr	Cr	Mn	Mg	Fe	Ca	K	Na	Al	Ti
PE-3	0.268	2.339	0.001	0.012	0.044	0.008	0.501	6.435	29.077	6.649	0.396	26.188	1869.974	30.830	183.100	3890.000	24.073	10.725	0.682
PE-4	0.133	1.001	0.038	0.041	0.085	0.029	0.393	6.346	29.543	9.450	0.445	16.885	1681.631	25.653	291.813	3623.000	21.773	10.525	1.241
PE-5	0.090	1.804	0.011	0.006	0.041	0.007	0.904	6.561	30.933	5.859	1.084	13.059	1657.814	43.280	201.648	3951.400	27.247	11.909	0.689
PE-6	0.049	1.291	0.006	0.015	0.027	0.148	0.750	6.495	33.049	5.926	0.516	12.130	1823.385	31.247	255.933	4250.300	33.188	10.782	1.286
PE-7	0.277	2.171	0.001	0.011	0.033	0.026	0.564	6.399	28.027	5.747	1.981	24.974	1913.134	39.096	180.312	4027.600	36.536	13.520	0.401
HH-1	0.338	3.170	0.026	0.041	0.052	0.041	0.555	7.982	42.590	10.112	1.068	19.768	1780.294	47.461	193.773	4270.800	24.880	20.646	1.542
HH-2	0.286	2.637	0.002	0.023	0.045	0.028	0.443	7.983	37.450	7.516	0.178	16.675	1701.123	41.724	179.183	2779.000	24.198	19.816	0.855
HH-3	0.088	0.672	0.032	0.053	0.075	0.014	0.484	6.407	33.455	7.496	1.058	11.891	1663.258	31.359	310.514	3900.900	32.104	12.535	1.834
HH-4	0.216	1.363	0.015	0.082	0.041	0.023	0.391	7.032	33.462	6.209	1.169	14.263	1709.515	42.515	232.794	3670.700	29.841	7.693	1.394
TG-1	0.155	1.186	0.003	0.147	0.039	0.016	0.915	6.679	27.374	16.053	0.311	13.341	1572.686	23.327	260.497	4058.800	23.082	11.160	1.240
TG-2	0.081	0.871	0.001	0.059	0.064	0.012	1.161	6.442	27.661	13.863	2.965	12.183	1594.276	40.482	268.691	4888.800	28.814	14.032	1.294
平均值	0.195	1.513	0.012	0.035	0.061	0.027	0.538	6.826	32.564	8.075	0.756	18.174	1658.638	35.138	232.314	3846.973	26.789	12.979	1.172
RSDs/%	46.120	46.575	139.136	115.997	43.871	108.506	38.849	7.621	14.772	39.754	83.999	27.678	7.904	17.931	15.474	12.778	20.299	30.408	37.448

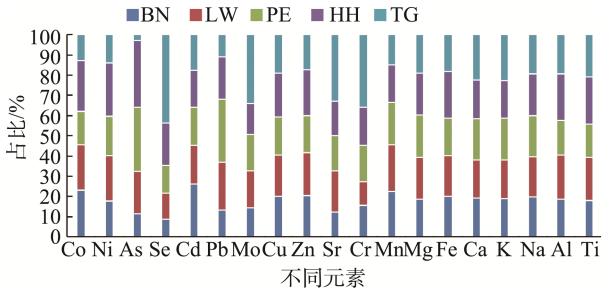


图 1　不同产地各元素含量占比图

Fig.1　Proportion diagram of the content of each element from different producing areas

2.5　主成分分析

2.5.1　主成分方差贡献率

对美藤果的 19 种元素含量的原始数据进行标准化后，利用 SPSS 26.0 软件采用 PCA 提取因子，进行因子分析，以提取特征值大于 1.0 的因子且累积方差不低于 80%的原则确定主成分，结果见表 5，提取的 7 个主成分，解释 82.854%的总方差，包含大部分指标在不同产地的原始信息。碎石图(图 2)以特征值为纵轴，成分为横轴。前面陡峭的部分特征值大，包含的信息多，后面平坦的部分特征值小，包含的信息也小。由图 2 也可以直观地看出，

表 5　主成分特征值及贡献率

Table 5　Eigenvalues and contribution rates of principal component

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差/%	累积/%	特征值	方差/%	累积/%
1	5.092	26.802	26.802	5.092	26.802	26.802
2	3.084	16.229	43.031	3.084	16.229	43.031
3	2.411	12.692	55.721	2.411	12.690	55.721
4	1.762	9.275	64.996	1.762	9.275	64.996
5	1.280	6.738	71.734	1.280	6.738	71.734
6	1.076	5.661	77.396	1.076	5.661	77.396
7	1.036	5.454	82.854	1.036	5.454	82.850
8	0.757	3.986	86.836			
9	0.541	2.846	89.682			
10	0.491	2.583	92.262			
11	0.351	1.841	94.103			
12	0.275	1.446	95.549			
13	0.227	1.195	96.745			
14	0.194	1.022	97.767			
15	0.171	0.901	98.668			
16	0.093	0.494	99.158			
17	0.086	0.455	99.613			
18	0.052	0.271	99.885			
19	0.022	0.115	100.000			

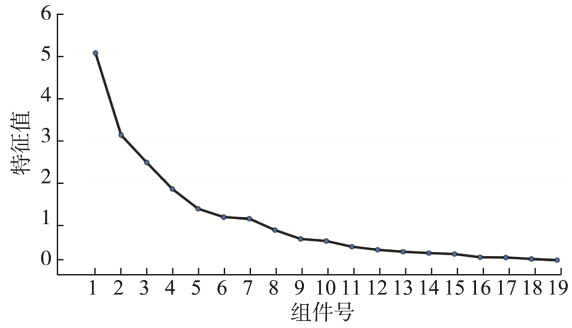


图 2 不同产地美藤果主成分碎石图

Fig.2 Crushed stone images of the main components of *Plukenetia volubilis* Linneo from different origins

成分 1 至 7 包含了大部分信息, 因此可以将 PCA 的前 7 个主因子作为评价所采集的 33 份美藤果样品的综合变量, 达到对溯源不同产地美藤果矿质元素含量指标的降维分析的目的。

2.5.2 主成分特征元素

为了更深一步分析造成质量差异的主要原因, 对美藤果 7 种主成分进行旋转平方和载入得出新的载荷矩阵, 结果见表 6。由表 6 可以看出, 在主成分 1 中 Zn 的贡献较高; 主成分 2 中 Cd 的贡献较高; 主成分 3 中 Sr 的贡献较高; 主成分 4 中 Mn 的贡献较高; 主成分 5 中 Cr 的贡献较高; 主成分 6 中 Pb 的贡献较高; 主成分 7 中 Ti 的贡献较高。因此, 分析认为美藤果的特征元素为 Zn、Cd、Sr、Mn、Cr、Pb、Ti。

2.5.3 各个指标在每个主成分中的得分系数

利用 SPSS 26.0 软件对标准化后的数据进行主成分分析, 以提取特征值大于 1.0 的因子, 得到 7 个主成分, 采用最大方差法对因子载荷矩阵旋转, 得到 19 种元素在 7 个主成分中的得分系数, 结果见表 7。

将美藤果样品的 19 个标准化后的数据分别记作 X_1~X_{19}, 7 个主成分分别记作 Y_1~Y_7。根据表 6 各个指标在每个主成分中的得分系数, 得到 7 个主成分的数学模型分别为:

$$Y_1=0.039X_1+0.007X_2+.....+0.196X_{18}+0.138X_{19}$$
$$Y_2=-0.009X_1+0.273X_2+.....+0.128X_{18}+0.004X_{19}$$
$$Y_3=0.125X_1+0.013X_2+.....+0.005X_{18}-0.044X_{19}$$
$$Y_4=0.357X_1+0.197X_2+.....+0.054X_{18}-0.013X_{19}$$
$$Y_5=0.026X_1-0.065X_2+.....+0.066X_{18}+0.004X_{19}$$
$$Y_6=-0.071X_1-0.015X_2+.....+0.035X_{18}-0.067X_{19}$$
$$Y_7=-0.011X_1+0.094X_2+.....+0.225X_{18}+0.653X_{19}$$

2.5.4 相关性分析

以元素含量为指标, 采用 Origin 2024 对 33 批不同产地美藤果进行相关性分析, 由图 3 分析可得, 元素 Co 与 Ni、Zn、Cu、Mn、Al, Ni 与 Mg、Al、Cu、Fe, As 与 Se、Cd, Se 与 Sr、Ca, Mo 与 Sr, Cu 与 Zn、Fe、Al, Zn 与 Fe、Al, Cr 与 Fe、K、Na, Mg 与 Al, Fe 与 Al、Na, Ca 与 Ti, K 与 Na 之间互为极显著或显著正相关, Co 与 Cu、Mn、Ni, Al 与 Ni, Se 与 Sr, Fe 与 Ca 存在强相关, Ca 与 Co、Ni、Cu、Zn、Mn、Mg、Fe, Mo 与 Cd, Cd 与 Ni、Mo、Mg 之间互为极显著或显著负相关, Pb 和 Cr 与其他元素相关性较弱。

表 6 旋转后的成分矩阵

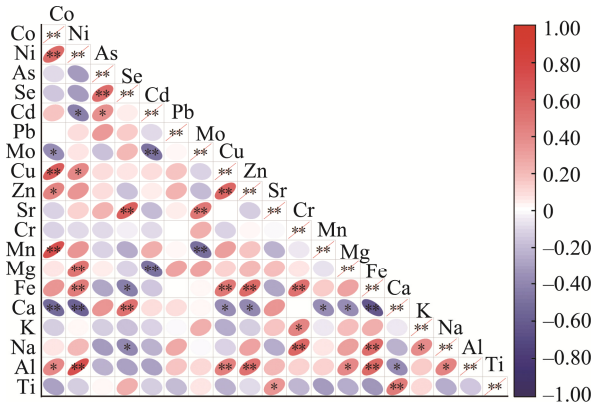
Table 6 Component matrix after rotation

元素	成分						
	1	2	3	4	5	6	7
Co	0.464	0.044	0.006	0.793	–0.078	–0.069	–0.160
Ni	0.402	0.724	–0.078	0.448	–0.023	–0.048	–0.013
As	0.052	–0.390	0.526	–0.064	–0.156	0.541	–0.061
Se	–0.075	–0.188	0.848	–0.170	–0.129	0.162	0.076
Cd	0.041	–0.804	0.062	0.277	–0.051	0.018	–0.087
Pb	0.089	0.152	0.070	0.005	0.037	0.869	–0.080
Mo	–0.079	0.526	0.407	–0.504	0.218	–0.226	–0.142
Cu	0.784	0.018	0.211	0.289	–0.218	–0.016	–0.226
Zn	0.870	0.000	–0.160	0.074	0.000	0.237	0.052
Sr	–0.050	0.340	0.829	–0.009	0.089	–0.014	0.296
Cr	0.124	–0.101	0.046	–0.190	0.859	–0.052	–0.232
Mn	0.058	–0.109	–0.144	0.894	0.012	0.005	–0.155
Mg	0.120	0.718	0.052	–0.022	0.110	0.349	–0.289
Fe	0.705	0.174	–0.292	0.027	0.465	–0.125	–0.290
Ca	–0.372	–0.349	0.364	–0.331	0.005	0.224	0.502
K	–0.174	0.174	0.036	0.075	0.780	–0.052	0.148
Na	0.186	0.200	–0.454	0.000	0.697	0.305	–0.027
Al	0.617	0.532	–0.051	0.232	0.243	0.066	0.119
Ti	–0.065	–0.012	0.182	–0.187	–0.075	–0.165	0.871

表 7　成分得分系数矩阵

Table 7　Component score coefficient matrix

元素	成分						
	1	2	3	4	5	6	7
Co (X_1)	0.039	–0.009	0.125	0.357	0.026	–0.071	–0.011
Ni (X_2)	0.007	0.273	0.013	0.197	–0.065	–0.015	0.094
As (X_3)	0.063	–0.146	0.201	–0.015	–0.004	0.297	–0.094
Se (X_4)	0.047	–0.068	0.379	–0.002	0.028	0.015	–0.081
Cd (X_5)	0.058	–0.333	0.082	0.123	0.099	–0.027	–0.058
Pb (X_6)	–0.060	0.082	–0.052	0.024	–0.014	0.600	0.010
Mo (X_7)	0.009	0.173	0.216	–0.222	0.037	–0.215	–0.239
Cu (X_8)	0.338	–0.072	0.170	–0.038	–0.105	–0.108	–0.109
Zn (X_9)	0.433	–0.106	–0.093	–0.173	–0.053	0.119	0.197
Sr (X_{10})	–0.023	0.132	0.392	0.155	0.114	–0.068	0.123
Cr (X_{11})	0.064	–0.170	0.140	–0.064	0.426	–0.100	–0.169
Mn (X_{12})	–0.197	–0.017	0.053	0.512	0.106	0.031	–0.015
Mg (X_{13})	–0.099	0.287	0.028	–0.009	–0.046	0.233	–0.194
Fe (X_{14})	0.297	–0.079	–0.029	–0.158	0.150	–0.140	–0.098
Ca (X_{15})	–0.022	–0.103	0.049	–0.031	0.077	0.164	0.303
K (X_{16})	–0.152	0.013	0.090	0.213	0.419	–0.018	0.138
Na (X_{17})	–0.001	0.000	–0.193	0.007	0.277	0.248	0.126
Al (X_{18})	0.196	0.128	0.005	0.054	0.066	0.035	0.225
Ti (X_{19})	0.138	0.004	–0.044	–0.013	0.004	–0.067	0.653



注: *表示显著相关(P<0.05), **表示极显著相关(P<0.01)。

图 3　相关性分析图

Fig.3　Chart of correlation analysis

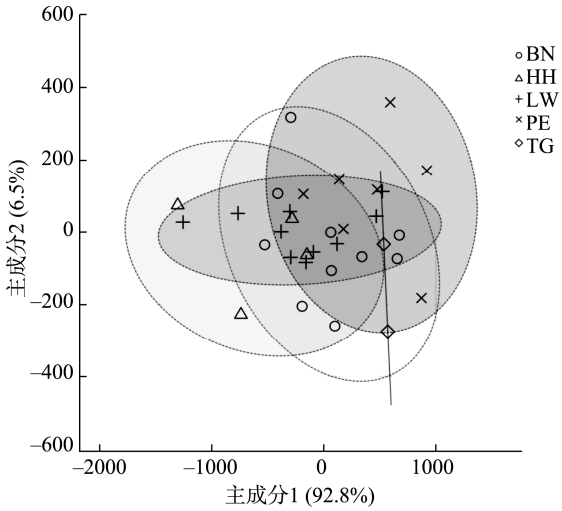


图 4　主成分分析得分图

Fig.4　Score plot of principal component analysis

2.5.5　特征差异物分析

PLS-DA 是一种常见的样本组间差异监督判别方法，此方法弱化组内样本差异，突出组间样本差异，通过偏最小二乘回归在元素表达和样本类别间建立关系模型[25–27]。美藤果中 19 种元素进行 PLS-DA。如图 4 得出的主成分得分图。直观观察不同样本组：西双版纳(BN)、红河(HH)、老挝(LW)、普洱(PE)、泰国(TG)。BN 样本点分散在中上部、中下部区域，与其他组尤其 PE、LW 有部分重叠，但在主成分 1 维度(横轴)上，部分点与 PE 区分明显，组内变异较大。HH 点集中在左侧区域(主成分 1 负半轴)，与 PE 右侧区域差异显著，与 LW、BN 有部分重叠，组内聚集性较好，可区分于 PE 组。LW 点分布较集中，与 PE、HH、BN 均有重叠，组间差异小，主成分维度上特征相似；但与 PE 组重叠最多。PE 点多分布在右侧(主成分 1 正半轴)，与 HH 差异显著，与 LW、BN 重叠少，可区分于 HH 组，与 LW 组特征接近。TG 由于样本量少，点分散在中下部，与

其他组均有重叠，组内变异大，组间差异难直接判定，下一步需结合更多样本或指标验证。综上，PE(右)与 HH(左)显著区分; LW 与 PE 特征相似。

3 结 论

本研究利用电感耦合等离子体质谱对 33 批次不同产地的美藤果中 19 种元素进行测定，该方法线性良好，加标回收率和重复性均满足实验要求。美藤果中常量元素 Mg、K、Ca、Na 含量较高，平均含量分别为 1658.638、3846.973、232.314、26.789 mg/kg(表 4)；微量元素中 Zn、Fe、Cu 的含量较高，平均含量分别为 32.564、35.138、6.826 mg/kg，从本研究结果可以看出美藤果含有丰富的元素，且这些元素对人体的健康都具有积极意义[28–30]。此外，重金属元素 Pb、Cd、As 均未超标，反映了美藤果作为新资源食品在重金属污染控制方面的安全性，为同类引种作物的安全评价提供了参考。美藤果中元素间存在显著的协同或拮抗作用，如 Co 与 Ni、Cu、Al 等元素的显著正相关，可能源于元素在植物体内的相似转运机制；而 Cd 与 Ni、Mg 等元素的显著负相关，可能与离子竞争吸收有关，这一规律符合植物矿质营养代谢的普遍特性。

本研究同时测定含 Ti、Co、Mo 等 19 种元素，相比以往多聚焦于 Pb、Cd 等少数重金属研究，提供了更系统的元素指纹数据。下一步可开展美藤果不同部位果肉、果仁、果壳的元素分布研究，通过同位素跟踪法明确元素迁移规律，并增加东南亚主要产区的样本量，结合土壤、气候数据构建更精准的产地判别模型。

参考文献

[1] 李镇灏, 谢蓝华, 陈佳, 等. 不同产地美藤果籽的物性比较[J]. 中国油脂, 2022, 47(5): 73–77.
LI ZH, XIE LH, CHEN J, *et al*. Comparison of physical properties of *Sacha inchi* seeds from different producing areas [J]. China Oils and Fats, 2022, 47(5): 73–77.

[2] 张皓. 美藤果油: 引起世界油料产品开发商的高度关注[J]. 中国科技产业, 2014(9): 30.
ZHANG H. Sacha inchi oil: Attracting great attention from global oil product developers [J]. Science & Technology Industry of China, 2014(9): 30.

[3] GUTIÉRREZ LF, ROSADAB LM, JIMÉNEZ Á, *et al*. Chemical composition of Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.) seeds and characteristics of their lipid fraction [J]. Grasas y Aceites, 2011, 62(1): 76.

[4] AMBULAY PJ, ROJAS AP, TIMOTEO SO, *et al*. Effect of the emulsion of Sacha Inchi (*Plukenetia huayabambana*) oil on oxidative stress and inflammation in rats induced to obesity [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 64: 103631.

[5] 李庆珍, 姚雯, 张珏, 等. 美藤果研究开发进展[J]. 山西化工, 2023, 43(9): 40–43.
LI QZ, YAO W, ZHANG J, *et al*. Research and development progress of *Sacha inchi* [J].Shanxi Chemical Industry, 2023, 43(9): 40–43.

[6] 朱艳琼, 陶银, 陈国艳, 等. 美藤果品质及其影响因素分析[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 123–126.
ZHU YQ, TAO Y, CHEN GY, *et al*. Analysis of *Sacha inchi* quality and its influencing factors [J]. China Oils and Fats, 2020, 45(11): 123–126.

[7] 林锦铭, 谢蓝华, 李俊健, 等. 美藤果加工与综合利用研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 335–341.
LIN JM, XIE LH, LI JJ, *et al*. Research progress on processing and comprehensive utilization of *Sacha inchi* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 335–341.

[8] 佚名. 卫生部批准茶树花等七种新资源食品[J]. 食品工业, 2013, 34(4): 102.
Anonymous. The Ministry of Health approves seven new resource foods including tea tree flowers [J]. The Food Industry, 2013, 34(4): 102.

[9] 陈颖仪, 黄俊源, 王梓宇, 等. 美藤果不同部位主要活性成分及其功效机制研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(3): 401–413.
CHEN YY, HUANG JY, WANG ZY, *et al*. Research progress on main active components and their efficacy mechanisms in different parts of *Sacha inchi* [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(3): 401–413.

[10] 牛延菲, 闫佳, 徐怡, 等. 不同产地美藤果油品质及抗氧化活性的对比[J]. 中国油脂, 2021, 46(7): 109–113.
NIU YF, YAN J, XU Y, *et al*. Comparison of quality and antioxidant activity of *Sacha inchi* oil from different producing areas [J]. China Oils and Fats, 2021, 46(7): 109–113.

[11] 张继光, 吴万富, 杨学芳, 等. 云南 9 种特种木本油脂脂肪酸组成和角鲨烯含量比较研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(11): 94–101, 109.
ZHANG JG, WU WF, YANG XF, *et al*. Comparative study on fatty acid composition and squalene content of 9 special woody oils in Yunnan [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(11): 94–101, 109.

[12] 陈佳, 杨勇福, 林茂森, 等. 美藤果蛋白加工及应用研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(9): 182–186.
CHEN J, YANG YF, LIN MS, *et al*. Research progress on processing and application of maitake protein [J]. Food Industry, 2022, 43(9): 182–186.

[13] 郭雪梅, 黄星琳. 原子吸收光谱法在食品重金属元素检测中的应用及实践探讨[J]. 现代食品, 2023, 29(5): 43–45.
GUO XM, HUANG XL. Application and practical discussion of atomic absorption spectrometry in the detection of heavy metal elements in food [J]. Modern Food, 2023, 29(5): 43–45.

[14] 曲震. 原子吸收光谱法在水质检验中的应用分析[J]. 化纤与纺织技术, 2024, 53(10): 71–73.
QU Z. Application analysis of atomic absorption spectrometry in water quality inspection [J]. Chemical Fiber & Textile Technology, 2024, 53(10): 71–73.

[15] 刘长雪, 李雪飞, 徐养吉. 原子吸收法在环境水样检测中的应用[J]. 中国资源综合利用, 2025, 43(10): 184–186.
LIU CX, LI XF, XU YJ. Application of atomic absorption spectrometry in environmental water sample detection [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2025, 43(10): 184–186.

[16] 王璐, 郭博阳, 李素芬, 等. 原子荧光光谱法同时测定生活饮用水中的砷、汞、硒[J]. 实验室检测, 2025, 3(2): 59–61.
WANG L, GUO BY, LI SF,*et al*. Simultaneous determination of arsenic,

mercury and selenium in drinking water by atomic fluorescence spectrometry [J]. Laboratory Testing, 2025, 3(2): 59–61.

[17] 黄平. 原子荧光光谱分析法在食品重金属检测中的应用及发展趋势[J]. 食品安全导刊, 2024(35): 159–161.
HUANG P. Application and development trend of atomic fluorescence spectrometry in the detection of heavy metals in food [J]. China Food Safety Magazine, 2024(35): 159–161.

[18] 高楠. 原子荧光光谱法测定农产品中总砷的湿法消解优化及回收率提升研究[J]. 农业开发与装备, 2025(7): 131–133.
GAO N. Optimization of wet digestion and recovery rate improvement for determination of total arsenic in agricultural products by atomic fluorescence spectrometry [J]. Agricultural Development & Equipments, 2025(7): 131–133.

[19] 赖志坚, 陈秋玲, 刘国伟, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定不同产地莲子心中 19 种金属元素及其主成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(4): 185–193.
LAI ZJ, CHEN QL, LIU GW, *et al*. Determination of 19 metal elements in lotus plumule from different producing areas and their principal component analysis by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(4): 185–193.

[20] 姚雪漫, 夏瑜, 张秋萍, 等. 电感耦合等离子体质谱法快速测定人血清中 40 余种矿物质元素的方法研究[J]. 分析测试学报, 2025, 44(2): 356–363.
YAO XM, XIA Y, ZHANG QP, *et al*. Study on a rapid determination method for more than 40 mineral elements in human serum by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Instrumental Analysis, 2025, 44(2): 356–363.

[21] 马鹏程, 梁卜文, 申国华, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定不同产地构树叶 22 种无机元素及健康风险评估[J]. 中国药学杂志, 2025, 60(3): 234–243.
MA PC, LIANG BW, SHEN GH, *et al*. Determination of 22 inorganic elements in *Broussonetia papyrifera* leaves from different producing areas and health risk assessment by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2025, 60(3): 234–243.

[22] 徐芝亮, 章新泉. 基于电感耦合等离子体串联质谱法分析矿物元素的江西茶叶产地溯源[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 186–193.
XU ZL, ZHANG XQ. Geographical origin traceability of Jiangxi tea based on inductively coupled plasma tandem mass spectrometry for mineral element analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(4): 186–193.

[23] 朱颖虹, 向飞军, 张毅宁. 原子荧光法测定人参中重金属的含量[J]. 广东微量元素科学, 2005(6): 35–39.
ZHU YH, XIANG FJ, ZHANG YN. Determination of heavy metal contents in ginseng by atomic fluorescence spectrometry [J]. Guangdong Trace Elements Science, 2005(6): 35–39.

[24] 陈国友, 杜英秋, 李宛, 等. 应用 ICP-MS、AFS、GF-AAS 测定食品中 As、Cd、Hg、Pb 方法的对比研究[J]. 质谱学报, 2009, 30(4): 223–228.
CHEN GY, DU YQ, LI W, *et al*. Comparative study on the determination methods of As, Cd, Hg and Pb in food by ICP-MS, AFS and GF-AAS [J]. Journal of Chinese Mass Spectrometry Society, 2009, 30(4): 223–228.

[25] KIM SY, KIM SY, LEE SM, *et al*. Discrimination of cultivated regions of soybeans (*Glycine max*) based on multivariate data analysis of volatile metabolite profiles [J]. Molecules, 2020, 25(3): 763.

[26] QIU Z, WU F, HU H, *et al*. Deciphering the microbiological mechanisms underlying the impact of different storage conditions on rice grain quality [J]. Foods, 2024, 13(2): 266.

[27] BRERETON GR, LLOYD RG. Partial least squares discriminant analysis: Taking the magic away [J]. Journal of Chemometrics, 2014, 28(4): 213–225.

[28] ANGELO MD, ANNAMARIA V, LUIGI P, *et al*. On the human health benefits of microalgal phytohormones: An explorative in silico analysis [J]. Computational and Structural Biotechnology Journal, 2023, 21: 1092–1101.

[29] 彭怡心, 唐庆, 王希, 等. ICP-MS 测定一点红中 14 种微量元素[J]. 食品与药品, 2022, 24(2): 121–126.
PENG YX, TANG Q, WANG X, *et al*. Determination of 14 trace elements in *Emilia sonchifolia* by ICP-MS [J]. Food and Drug, 2022, 24(2): 121–126.

[30] 王超, 邓新宇, 黎攀, 等. 发芽时间对美藤果营养和功能成分的影响[J]. 江苏调味副食品, 2025, 42(2): 35–40.
WANG C, DENG XY, LI P, *et al*. Effects of germination time on the nutritional and functional components of *Sacha inchi* [J]. Jiangsu Condiment and Non-staple Food, 2025, 42(2): 35–40.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)