

超级微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法定量测定骆驼乳粉中 9 种矿物质元素

何国彪^{1*}, 何梓钰², 张娟¹, 梁祖培¹

(1. 广东产品质量监督检验研究院, 佛山 528300; 2. 广东省生产许可证审查服务中心, 广州 510000)

摘要: **目的** 建立超级微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法定量测定骆驼乳粉中 9 种矿物质元素的方法。**方法** 使用超级微波消解法以优化条件硝酸:水=2:1 作为酸体系, 消解温度为 220 °C, 对骆驼乳粉进行前处理, 同时对比普通微波消解的消解效果, 再采用电感耦合等离子体发射光谱仪测定样品的 9 种矿物质元素含量。以有证标准物质考察方法的准确性。**结果** 数据表明 9 种元素的线性关系良好, 曲线线性相关系数在 0.9998 以上, 标准物质的回收率为 98.6%~102.0%, 且质控样品的 9 种元素含量测量结果均在标准值范围内。**结论** 超级微波消解法和普通微波消解法相比, 超级微波消解法消解效果更好, 同时也更环保、高效、可行。

关键词: 超级微波消解; 骆驼乳粉; 矿物质元素; 电感耦合等离子体发射光谱法

Quantitative determination of 9 kinds of mineral elements in camel milk powder by super microwave digestion-inductively coupled plasma optical emission spectrometry

HE Guo-Biao^{1*}, HE Zi-Yu², ZHANG Juan¹, LIANG Zu-Pei¹

(1. Guangdong Testing Institute of Product Quality Supervision, Foshan 528300, China;
2. Guangdong Province Product License Review Services Centre, Guangzhou 510000, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method for the determination of 9 kinds of mineral elements in camel milk powder by super microwave digestion inductively coupled plasma emission spectroscopy. **Methods** The camel milk powder was pretreated by super microwave digestion method with the optimized conditions of nitric acid:water=2:1 as the acid system, and the digestion temperature was 220 °C. At the same time, the digestion effect of ordinary microwave digestion was compared, and then the content of 9 kinds of minerals in the samples was determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. The accuracy of the method was examined with certified reference material. **Results** The data showed that the linear relationship between the 9 kinds of elements was good, with a linear correlation coefficient of 0.9998 or above. The recoveries rate of the standard substance were 98.6%~102.0%, and the content measurement results of the 9 kinds of elements in the quality control samples were

基金项目: 广东省市场监督管理局科技项目(2022CZ03)

Fund: Supported by the Guangdong Provincial Market Supervision Administration Project (2022CZ03)

*通信作者: 何国彪, 工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 280538163@qq.com

*Corresponding author: HE Guo-Biao, Engineer, State Key Laboratory of Food Quality and Safety, Guangdong Testing Institute of Product Quality Supervision, Foshan 528300, China. E-mail: 280538163@qq.com

all within the standard value range. **Conclusion** Compared with ordinary microwave digestion method, super microwave digestion method has better digestion effect, and is also more environmentally friendly, efficient, and feasible.

KEY WORDS: super microwave digestion; camel milk powder; mineral elements; inductively coupled plasma optical emission spectrometry

0 引言

近年来人们在食品消费上从吃饱到吃好,从海吃胡喝到健康饮食。乳制品在消费者的角度正是健康饮食的选择,乳制品消费进入多元化和市场细分化的新阶段,除了常见的牛奶、羊奶外,骆驼奶及其乳制品作为新势力也逐渐家喻户晓^[1]。

骆驼奶有“沙漠白金”的称号,其中的价值不言而喻,被产地人民视为珍宝。随着互联网时代的渗透,逐渐地骆驼奶的大量优点引起了消费者的关注^[2],骆驼奶除了含有丰富的优质蛋白、乳脂以及各种维生素和 K、Na、Ca、Mg、P 等矿物质营养成分外^[3],还含有各种小分子蛋白如免疫球蛋白、乳铁蛋白、溶菌酶和过氧化物酶等保护性蛋白^[4]。适合免疫力低下人群食用,具有极高的营养保健价值^[5]。

骆驼乳粉中含有多种营养物质,其蛋白质、乳脂、矿物质元素含量高^[6],研究发现骆驼乳中的蛋白质含量(3.72 g/100 g)和乳脂含量(5.39 g/100 g)比牛乳、山羊乳高^[7-8]。由于骆驼乳粉基质相对复杂,目前大多数实验室是基于经济成本、便捷程度而采用普通微波消解法消解处理样品,但普通微波消解的功率有限,难以将乳粉中有机成分彻底消解完全成无机态,消解后会残留大量的 C、N 等共存元素,产生的基体抑制效应,影响元素测定的准确性^[9-10]。而采用更为高效的超级微波消解技术能合理解决消解难、消解不完全的问题^[11],该技术采用的预加压消解技术能够实现高温、高压的工作条件,即使是难消解的样品也能够完全消解。超级微波消解优点在于运转过程安全、加酸少、消解效果好、空白污染小等,在无机元素的分析检测过程体现出其特有的价值。同时大通量的反应腔体,也能帮助实现批量化的处理。

本研究结合实际应用和样品基质,选用成分较为复杂且常见的骆驼乳粉作为对象,在分析其矿物质营养成分的同时,又创新性地采用超级微波消解平台解决复杂成分样品消解效果不好的问题。通过优化酸消解体系,以及消解温度建立一个适用于超级微波消解-电感耦合等离子体发射光谱仪(inductively coupled plasma optical emission spectromete, ICP-OES)测定骆驼乳粉中 9 种矿物质元素含量的方法,选择 ICP-OES 对 K、Na、Ca、Mg、Fe、Cu、

Zn、P、Mn 进行检测^[12],为开展科学检测与评价骆驼乳粉中矿物质元素的含量以及营养价值,提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料、试剂与仪器

4 款不同品牌的纯骆驼乳粉购于网上平台,分别编号为样品 A、样品 B、样品 C、样品 D。

脱脂奶粉成分分析标准物质(标准物质编号: NIM-RM2900,中国计量科学研究院); IV-16658 多元素混合标准溶液: K (5000 mg/L)、Na (3750 mg/L)、Mg (1000 mg/L)、Ca (3750 mg/L)、P (1000 mg/L)、Fe (125 mg/L)、Zn (75 mg/L)、Cu (30 mg/L)、Mn (30 mg/L)(美国 Inorganic Ventures 公司); 硝酸、盐酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司); 实验室用水为 Millipore Milli-Q Academic 超纯水器生产的去离子水(18.2 MΩ/cm)。

VDV 5800 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Agilent 公司); ML204/02 万分之一电子天平(瑞士 Mettler Toledo 公司); Ultra Clave 超级微波化学平台(意大利 Milestone 公司); Mars Xpress 微波消解仪(美国 CEM 公司); VB Clave A 赶酸器(北京莱伯泰科仪器有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 样品前处理

超级微波消解法:称取 0.5 g(精确至 0.0001 g)样品,于 15 mL 石英超级微波消解管中,分别加入 2.5 mL 硝酸、2.5 mL 超纯水,放置好聚四氟乙烯盖子,将样品放入 Ultra Clave 超级微波消解仪的反应釜腔内,启动程序,在腔体锁紧的状态下向其注入氮气直至压力达 40.0 bar,开始进行升温消解程序。待消解结束,冷却完成后,开始缓慢泄压,直至压力释放完全,反应釜自动开启,取出整个样品架,观察消解效果。将消解液转移至 50 mL 容量瓶中,并用超纯水定容、摇匀,观察消解效果。待测,同时做空白实验。超级微波消解参数见表 1。

普通微波消解法:称取 0.5 g(精确至 0.0001 g)样品聚四氟乙烯消解管内,加入 8 mL 硝酸(过量),于 100 °C 可调式控温电热板上预消解 0.5 h,放置常温后,旋紧管盖,放入 Mars Xpress 微波消解仪中进行消解。冷却后取出,

缓慢打开管盖排气, 用少量去离子水冲洗内盖, 将消解管放在控温电热板上, 于 160 °C 加热赶酸至干, 将消解液转移至 50 mL 容量瓶中, 并用超纯水定容、摇匀, 观察消解效果。待测, 同时做空白实验。微波消解参数见表 2。

表 1 超级微波消解参数

Table 1 Parameters of supermicrowave digestion

程序	消解温度/°C	升温时间/min	保持时间/min	功率/W
1	80	5	0	1000
2	130	8	0	1200
3	180	5	0	1200
4	220	10	15	1200

表 2 微波消解参数

Table 2 Parameters of microwave digestion

程序	消解温度/°C	升温时间/min	恒温时间/°C
1	120	5	5
2	150	5	15
3	190	10	30

1.2.2 标准曲线的配制

标准曲线法标准曲线的配制: 精确吸取多元素混合标准溶液(标准溶液中各待测元素质量浓度 K: 5000 mg/L、Na: 3750 mg/L、Mg: 1000 mg/L、Ca: 3750 mg/L、P: 1000 mg/L、Fe: 125 mg/L、Zn: 75 mg/L、Cu: 30 mg/L、Mn: 30 mg/L) 0.0、0.1、0.2、0.4、0.8、1.0、2.0 mL 于 50 mL 容量瓶中, 以 5% 硝酸定容, 即为标准系列 A 工作溶液。标准液浓度见表 3。

精确吸取多元素混合标准溶液 5 mL 于 50 mL 容量瓶中, 配制成多元素混合中间液, 再精确吸取多元素混合中间液 0.0、0.1、0.2、0.4、0.8、1.0、2.0 mL 于 50 mL 容量瓶中, 以 5% 硝酸定容, 即为标准系列 B 工作溶液。标准液浓度见表 4。

表 3 标准浓度系列 A(mg/L)

Table 3 Series A of standard concentration (mg/L)

元素	STD1	STD 2	STD 3	STD 4	STD 5	STD 6	STD 7
Ca	0	7.5	15	30	60	75	150
K	0	10	20	40	80	100	200
Mg	0	2	4	8	16	20	40
Na	0	7.5	15	30	60	75	150
P	0	5	10	20	40	50	100
Zn	0	0.15	0.3	0.6	1.2	1.5	3

表 4 标准浓度系列 B(μg/L)

Table 4 Series B of standard concentration (μg/L)

元素	STD1	STD 2	STD 3	STD 4	STD 5	STD 6	STD 7
Cu	0	6	12	24	48	60	120
Fe	0	25	50	100	200	250	500
Mn	0	6	12	24	48	60	120

1.2.3 实验优化条件

(1) 谱线波长的选择

基于 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准食品中多元素的测定》第二法中 ICP-OES 测定元素使用的分析谱线波长推荐^[13], 选出了适合乳粉基质, 灵敏度高、检出限低、稳定性好、附近干扰元素少、对称性高的谱线。研究证明 Ca、Fe、Zn、Na、K、Mg、P、Cu 和 Mn 含量同时达到高浓度的极端情况下依旧能够保证较好的准确度, 测定相对误差均在 5.0% 以内^[14]。本研究中 9 种矿物质元素间的波普干扰误差可忽略不计^[15-16]。

最终选定谱线波长为: Ca: 317.933 nm; Cu: 324.754 nm; Fe: 259.940 nm; K: 766.491 nm; Mg: 279.078 nm; Mn: 257.610 nm; Na: 589.592 nm; P: 213.618 nm; Zn: 206.200 nm。

(2) ICP-OES 仪器条件

ICP-OES 仪器条件工作条件为: 射频功率 1200 W; 等离子体气流量 12.0 L/min; 辅助气流量 1.0 L/min; 雾化器流量 0.70 L/min; 读取时间 5 s; 重复项次数 3 次。

(3) 仪器观测方式的选择

本研究使用的 ICP-OES 有 2 种观测方式, 分别是径向、轴向。径向观测通常采用垂直炬管从侧面观测。分析复杂的高浓度基质样品, 可有效降低信号过高造成的漂移现象; 轴向观测通常采用水平炬管进行端点观测, 可实现更高的灵敏度^[17-18]。奶粉中 Ca、Cu、Fe、Zn、Mg、K、Na、Mn、P 这 9 种元素浓度相差很大^[19], 因此根据样品不同浓度的范围下 K、Na、Ca 选用径向观测, Fe、Mn、Cu、Zn、Mg、P 选用轴向观测较为适合。

(4) 消解液比例条件优化选择

称取 0.5 g (精确到 0.0001 g) 骆驼乳粉样品 A 多个平行, 分别加入 5 mL 不同比例的消解液(硝酸:超纯水分别为 1:1、1.5:1、2:1、2.5:1、3:1), 按表 1 参数进行消解, 通过上机测定样品各元素含量, 比较不同比例的消解液对消解效果的影响^[20]。

(5) 最大消解温度条件优化选择

称取 0.5 g (精确到 0.0001 g) 骆驼乳粉样品 A 多个平行, 加入 5 mL 硝酸:超纯水=2:1 的消解液, 研究不同最大消解温度对消解效果的影响。超级微波消解仪最高工作温度可达 270 °C, 工作载入压力 40.0 bar, 消解时长 40 min。本研究对象为食品, 在合理范围内设置梯度消解温度分别为 190、210、220、230、240 °C。测定对应元素含量分析其消解效果^[21]。

1.3 数据处理

每个实验平行 3 次, 结果以平均值表示。采用 WPS 365 软件处理数据, 运用 Origin 2022 绘制柱状图。

2 结果与分析

2.1 超级微波消解条件优化

纯骆驼乳粉基质复杂, 其成分中蛋白质和脂肪含量较高, 为了避免最终消解效果不佳, 导致实验数据出现

偏差^[22], 本研究将对超级微波消解法的条件进行优化, 选取消解液比例和消解温度作为探讨最佳消解效果的影响条件。

2.1.1 消解液比例对消解效果的影响

观察消解样液发现, 在硝酸:超纯水=1:1 时, 样液微微泛黄且不透亮; 当硝酸:超纯水比例在 2:1 以上时, 样液完全澄清透亮。由此推断该现象是因为消解液体系中硝酸含量不足导致部分有机物消解不完全而导致。如图 1 所示, 当硝酸:超纯水=1:1~1.5:1 时, 骆驼乳粉消解液中 9 种被测元素含量水平平均偏低 3.2%~4.9%, 在硝酸:超纯水=2:1~3:1 时消解液元素含量基本达到同一水平。因此选择硝酸:超纯水=2:1 的比例消解纯骆驼乳粉满足本研究需求, 同时也符合环保、节约的原则。

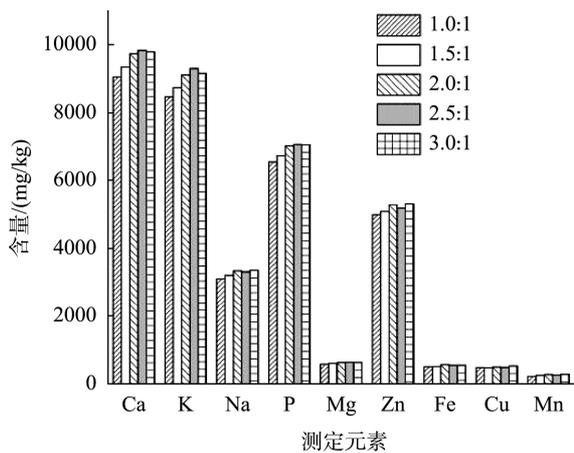


图 1 骆驼乳粉中 9 种元素在不同消解液比例中的含量

Fig.1 Content of 9 kinds of elements in camel milk powder in different proportion of digestion solution

2.1.2 最大消解温度对消解效果的影响

结果显示, 在硝酸:超纯水=2:1 的消解液比例下, 当消解温度达到 220 °C 以上时, 消解液澄清透亮; 如图 2 所示, 在最大消解温度为 190~220 °C 时, 消解液中 9 种元素

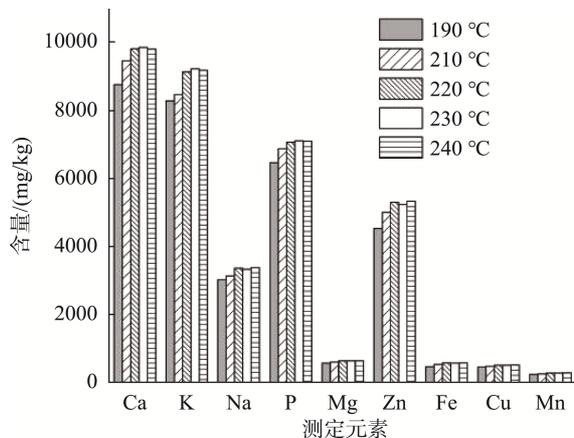


图 2 骆驼乳粉中 9 种元素在不同消解温度中的含量

Fig.2 Content of 9 kinds of elements in camel milk powder at different digestion temperatures

的含量水平随着消解温度的每增加一个梯度而增大 6.2% 左右; 在 220~240 °C 之间, 各元素的含量基本在同一水平。即可认为样品在 220 °C 时已被完全消解, 样品的元素离子已完全被释放。

综上所述, 结合日常工作场景, 考虑维护仪器使用寿命, 采用硝酸:超纯水=2:1 的消解液、220 °C 的消解温度作为本实验的消解条件较为合适。

2.2 前处理方式对比和优化条件的方法回收率试验

采用 190 °C 普通微波消解法^[23-24]和 190 °C 超级微波消解法以及 220 °C 优化条件下的超级微波消解法分别对脱脂奶粉成分分析标准物质进行前处理, 各做 3 个平行试样作为实验测量结果的平均值, 经不同消解条件获得消解液待测^[25]。在同一实验环境和同一分析方法下进行上机分析, 经对比脱脂奶粉成分分析标准物质的标准值计算得出各元素回收率。不同消解条件下标准物质各元素回收率见表 5。

另称取 3 个骆驼乳粉 A 做加标回收试验, 经超级微波消解仪在 220 °C 的优化条件下消解, 获得消解液上机测试。各个元素加标回收率及如表 6 所示, 其平均回收率为 95.8%~103.0%, 各元素相对标准偏差为 0.61%~1.88%, 表明该优化方法具有较好的准确性。

考虑到不同实验室在对纯骆驼乳粉中无机元素的含量检测时, 会根据场地条件的设备进行, 不同微波消解平台的消解效果会直接导致数据结果出现偏差^[26], 本研究采用了两种不同的消解平台在相同温度、相同消解平台不同温度对比消解效果的影响, 探索最佳消解途径。

对比发现, 标准物质样品经普通微波消解后的各元素含量回收率在 91.5%~97.7% 之间, 而相同温度条件下超级微波消解法其回收率则在 95.2% 到 101.3% 之间, 在优化条件下超级微波消解法得回收率达 98.6%~102.0% 之间, 3 种消解条件下的回收率都满足 GB/T 27404—2008 《实验室质量控制规范食品理化检测》中的要求^[27], 通过数据可以看出, 相对于普通微波消解, 超级微波消解法回收率更接近 100%。

对此现象, 分析其原因是超级微波消解的消解温度、反应压力都远大于普通微波消解, 相比普通微波没有额外加氮气增压的消解环境而言, 样液的残余有机物质更少, 金属离子被释放地更完全, 故结果回收率高。而且超级微波消解法操作便捷, 所用时间短、完全, 测定结果更准确。

2.3 标准曲线的回归方程、线性关系以及检出限

使用 ICP-OES 对目标元素 Ca、K、Na、Mg、P、Zn、Fe、Cu、Mn 进行检测。以信号强度为纵坐标, 标准溶液质量浓度为横坐标, 绘制标准曲线, 得到各元素浓度范围内线性回归方程和线性相关系数^[28]。通过重复测定 12 次样品空白溶液, 计算标准偏差, 用标准偏差的 3 倍所对应浓度值(S/N)作为检出限^[29]。线性方程、相关系数、检出限结果见表 7。

表 5 不同消解途径下脱脂奶粉成分分析标准物质的含量及其回收率($n=3$)Table 5 Content and recoveries of reference materials for composition analysis of skimmed milk powder under different digestion methods ($n=3$)

元素		标准浓度系列 A					标准浓度系列 B			
		Ca	K	Mg	Na	P	Zn	Fe	Cu	Mn
标准物质	标准值	13100	1850	1270	4500	10600	39.5	2.07	0.31	0.27
	/(mg/kg)	±600	±600	±40	±250	±300	±2.2	±0.12	±0.02	±0.04
普通微波消解 (190 °C)	测定值	12519.3	18060.8	1235.4	4309.3	10353.4	37.41	1.983	0.296	0.247
	回收率/%	95.6	97.6	97.3	95.8	97.7	94.7	95.8	95.5	91.5
超级微波消解 (190 °C)	测定值	12864.2	18733.9	1249.6	4362.4	10318.2	38.81	2.024	0.301	0.257
	回收率/%	98.2	101.3	98.4	96.9	97.3	98.3	97.8	97.1	95.2
超级微波消解 (220 °C)	测定值	13028.6	18402.3	1278.7	4534.6	10674.5	40.3	2.04	0.314	0.273
	回收率/%	99.5	99.5	100.7	100.8	100.7	102.0	98.6	101.3	101.1

表 6 骆驼乳粉中 9 种元素的加标回收试验($n=3$)Table 6 Experimental study on recovery of 9 kinds of elements from camel milk powder ($n=3$)

元素		标准浓度系列 A					标准浓度系列 B			
		Ca	K	Mg	Na	P	Zn	Fe	Cu	Mn
超级微波消解 (220 °C)	测定值	9836.2	9207.1	644.9	3389.1	7111.4	53.88	5.776	0.507	0.282
	/(mg/kg)									
	加标量	750	1000	200	750	500	15	2.5	0.6	0.6
	/(mg/kg)									
	加标测定值	10558.1	10224.2	836.9	4131.2	7605.7	68.52	8.35	1.093	0.857
	值/(mg/kg)									
	回收率/%	96.3	101.7	96.0	98.9	98.9	97.6	103.0	97.7	95.8
	相对标准偏差/%	0.61	0.87	1.05	0.83	0.92	1.37	1.08	1.88	0.96

表 7 各元素回归方程与相关系数以及检出限

Table 7 Regression equations, correlation coefficients and limits of detection each element

元素	线性方程	相关系数	检出限/(mg/kg)	国标 GB 5009.268—2016 方法检出限/(mg/kg)
Ca	$Y=6640.76X+1931.52$	0.99995	0.048	5
K	$Y=613.96X-103.53$	0.99998	0.072	7
Na	$Y=2814.22X+581.77$	0.99991	0.024	3
P	$Y=1338.12X+29.85$	0.99997	0.010	9
Mg	$Y=2069.19X+225.22$	0.99990	0.074	5
Zn	$Y=6379.47X+68.13$	0.99988	0.002	0.5
Fe	$Y=13.84X+30.78$	0.99999	0.006	1
Cu	$Y=39.19X+535.71$	0.99999	0.003	0.2
Mn	$Y=1160.55X+71.44$	0.99995	0.001	0.1

从表 7 中可以发现, 各元素线性关系良好, 相关系数均大于 0.9998, 方法检出限范围 0.001~0.074 mg/kg, 各元素检出限值低于标准 GB 5009.268—2016 中的检出限标示值, 依照本仪器条件可满足本研究检测监控的需要。

2.4 实际样品的测定

利用上述超级微波消解分析方法对网络平台上购

买到的 4 个不同品牌的纯骆驼乳粉样品(A、B、C、D)中元素含量进行测定, 数据结果见表 8。数据结果表明: 同为纯骆驼乳粉当中的矿物质营养成分含量差异不大。相比市场常见的牛乳粉和各种配方牛乳粉, 纯骆驼乳粉的 Ca、K 含量更高, 具有一定的营养价值^[30]。同时根据骆驼奶粉的矿物质元素差异特性, 可以作为辨别奶源真伪的依据之一。

表 8 4 款纯骆驼乳粉中 9 种元素的测定结果($n=3$, mg/kg)
Table 8 Determination of 9 kinds of elements in 4 pure camel milk powder ($n=3$, mg/kg)

元素	样品 A	样品 B	样品 C	样品 D
Ca	9836	11303	11402	10624
K	9207	8753	9261	10049
Na	3389	3471	3697	4192
P	7111	7725	7801	7974
Mg	645	702	651	718
Zn	53.88	69.81	58.53	43.82
Fe	5.776	3.833	3.486	4.973
Cu	0.507	0.411	0.495	0.411
Mn	0.282	0.287	0.298	0.386

3 结 论

相较于普通奶粉, 纯骆驼乳粉的成分结构更为复杂, 因此采用常规的微波消解技术往往难以达到理想的消解效果。本研究引入了一种先进的超级微波消解-ICP-OES 技术, 用于测定纯骆驼乳粉中的 K、Na、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn、P 等元素含量。该方法不仅提高了回收率, 还确保了高精密度和低检出限, 从而实现了高脂高蛋白乳粉基质食品中多种元素含量的快速测定。这满足了检测行业中批量检测的需求, 并显示出其在实际应用中的巨大潜力和参考价值。同时也为骆驼乳粉的开发应用, 价值研究提供了基础的实验数据依据。

参考文献

- [1] SATTAROVA B, ISMOILOVA F. Studying the composition, healing properties and diversity of cow, goat, and camel milk [J]. Am J Appl Sci Technol, 2023. DOI: 10.37547/ajast/volume03issue02-07
- [2] 胡定寰, 杨伟民, 方成, 等. 全球及中国骆驼乳制品的经济与市场分析[J]. 中国乳业, 2021(8): 40-48.
HU DH, YANG WM, FANG C, *et al.* Economic and market analysis of global and chinese camel dairy products [J]. China Dairy, 2021(8): 40-48
- [3] AL-AWADI FM, SRIKUMAR TS. Trace elements and their distribution in protein fractions of camel milk in comparison to other commonly consumed milks [J]. J Dairy Res, 2001, 68(3): 463-469.
- [4] 梁春明, 操礼军. 新疆骆驼奶产业发展现状及对策[J]. 今日畜牧兽医, 2022, 38(9): 80-81.
LIANG CM, CAO LJ. The current situation and countermeasures of camel milk industry development in Xinjiang [J]. Today Anim Hus Vet, 2022, 38(9): 80-81.
- [5] 云振宇, 蔡晓湛, 张和平. 骆驼乳产业的发展分析[J]. 农产品加工, 2008(11): 49-51.
YUN ZY, CAI XZ, ZHANG HP. Development analysis of camel milk industry [J]. Agric Prod Pro, 2008(11): 49-51
- [6] ALJUBOORI AT, MOHAMMED M, RASHID J, *et al.* Nutritional and medicinal value of camel (*Camelus dromedarius*) milk [J]. WIT Trans Ecolg Environ, 2013. DOI: 10.2495/FENV130201
- [7] WANG FG, CHEN MQ, LUO RB, *et al.* Fatty acid profiles of milk from Holstein cows, Jersey cows, buffalos, yaks, humans, goats, camels, and donkeys based on gas chromatography-mass spectrometry [J]. J Dairy Sci, 2022, 105(2): 1687-1700.
- [8] 褚楚, 张依, 向世馨, 等. 山羊奶、牦牛奶、马奶和骆驼奶中营养成分含量的比较研究[J]. 中国奶牛, 2022(3): 34-39.
CHU C, ZHANG Y, XIANG SX, *et al.* Comparative study on nutrient content in goat milk, yak milk, mare milk, and camel milk [J]. Chin Dairy Catt, 2022(3): 34-39.
- [9] 陈晓敏, 吴嘉文, 胡雯艳, 等. 超级微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定婴幼儿奶粉中钙和磷的含量[J]. 中国乳品工业, 2024, 52(2): 55-58, 64.
CHEN XM, WU JW, HU WY, *et al.* Determination of calcium and phosphorus in infant milk powder by super microwave digestion inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. China Dairy Ind, 2024, 52(2): 55-58, 64.
- [10] 陈晓, 张晓文, 赵广才. 三种不同前处理方法对标准奶粉中锰含量测定的影响[J]. 广东微量元素科学, 2015, 22(11): 27-29.
CHEN X, ZHANG XW, ZHAO GC. The influence of three different pretreatment methods on the determination of manganese content in standard milk powder [J]. Guangdong Trace Element Sci, 2015, 22(11): 27-29.
- [11] MICHEL T. 打破样品预处理的瓶颈——种微波消解新技术[J]. 生命科学仪器, 2011, 9(2): 16-19.
MICHEL T. Breaking the bottleneck of sample pretreatment-a new microwave digestion technology [J]. Life Sci Inst, 2011, 9(2): 16-19
- [12] 耿鑫, 闫晓梅, 杨翰南, 等. ICP-OES 测定原料乳中 8 种营养元素含量[J]. 辽宁化工, 2019, 48(5): 493-494.
GENG X, YAN XM, YANG HN, *et al.* ICP-OES determination of eight nutrients in raw milk [J]. Liaoning Chem Ind, 2019, 48(5): 493-494.
- [13] 占文慧, 刘琼, 吕昭玮, 等. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法同时测定铁罐装食品中锡和 9 种矿物质元素[J]. 现代食品, 2022, 28(21): 212-219.
ZHAN WH, LIU Q, LV ZW, *et al.* Simultaneous determination of tin and nine mineral elements in iron canned food by microwave digestion inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. Mod Food, 2022, 28(21): 212-219.
- [14] 乔晴, 李辰, 宋菲菲, 等. 超级微波消解-ICP-OES 法测定婴幼儿配方食品中 8 种营养元素[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(12): 51-55.

- QIAO Q, LI C, SONG FF, *et al.* Determination of 8 nutrients in infant formula food by super microwave digestion ICP-OES method [J]. *China Dairy Ind*, 2021, 49(12): 51–55.
- [15] 陈嘉勋. ICP-OES 替代国标法对食品中 8 种金属元素检测的适用性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- CHEN JX. Study on the applicability of ICP-OES as a substitute for national standard method for the detection of 8 metal elements in food [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [16] 李樾, 邓文娟, 陈景周, 等. 超级微波消解-ICP-OES/ICP-MS 测定特殊医学用途配方食品中 13 种元素[J]. *广东化工*, 2020, 47(13): 157–160.
- LI L, DENG WJ, CHEN JZ, *et al.* Determination of 13 elements in special medical formula foods by super microwave digestion ICP-OES/ICP-MS [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2020, 47(13): 157–160.
- [17] 贡慧, 杨震, 窦培谦, 等. ICP-OES 法测定不同水源地饮用水中 35 种矿物质元素[J]. *化学试剂*, 2022, 44(2): 293–297.
- GONG H, YANG Z, DOU PQ, *et al.* Determination of 35 mineral elements in drinking mineral water from different water sources by ICP-OES method [J]. *Chem Reagent*, 2022, 44(2): 293–297.
- [18] 毛云中, 孟元华, 刘文卫. 饮用水中钾、钠、钙和镁含量的 ICP 轴向和径向观测方式检测法[J]. *职业与健康*, 2011, 27(24): 2878–2879.
- MAO YZ, MENG YH, LIU WW. ICP axial and radial observation method for detecting potassium, sodium, calcium, and magnesium content in drinking water [J]. *Occup Health*, 2011, 27(24): 2878–2879.
- [19] CHEN L, LI X, LI Z, *et al.* Analysis of 17 elements in cow, goat, buffalo, yak, and camel milk by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) [J]. *RSC Adv*, 2020, 10(12): 6736–6742.
- [20] 何霜, 寻知庆, 黄少漫, 等. 超级微波消解-ICP-MS 法快速测定不同基质化妆品中 8 种重金属元素[J]. *日用化学工业*, 2017, 47(10): 593–597.
- HE S, XUN ZQ, HUANG SM, *et al.* Rapid determination of 8 heavy metal elements in different matrix cosmetics by super microwave digestion ICP-MS method [J]. *Daily Chem Ind*, 2017, 47(10): 593–597.
- [21] 何兵兵, 乔晴, 王向军, 等. 超级微波消解-ICP-MS 法测定食用油中铅、砷、铜[J]. *中国油脂*, 2018, 43(11): 133–136.
- HE BB, QIAO Q, WANG XJ, *et al.* Determination of lead, arsenic, and copper in edible oil by super microwave digestion ICP-MS method [J]. *Chin J Oil Fat*, 2018, 43(11): 133–136.
- [22] 潘煜辰, 陈贵宇, 李清清, 等. 酸及其残留量对微波消解-电感耦合等离子体原子发射光谱法测定添加不同铁营养强化剂的婴幼儿配方奶粉和米粉中铁的影响[J]. *理化检验(化学分册)*, 2017, 53(8): 958–961.
- PAN YC, CHEN GY, LI QQ, *et al.* Effect of acid and its residues on the determination of iron in infant formula milk powder and Rice noodles added with different iron nutrition fortifiers by microwave digestion inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. *Phy Chem Test (Chem Vol)*, 2017, 53(8): 958–961.
- [23] 许文琪, 赵华楠, 刘华, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定婴幼儿配方奶粉中 9 种元素[J]. *中国乳品工业*, 2024, 52(2): 59–64.
- XU WQ, ZHAO HN, LIU H, *et al.* Simultaneous determination of 9 elements in infant formula milk powder by microwave digestion inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *China Dairy Ind*, 2024, 52(2): 59–64.
- [24] 黄晓燕, 宁月莲, 刘丽君, 等. 前处理过程对电感耦合等离子体-质谱法测定乳粉中多种元素含量准确性的影响[J]. *乳业科学与技术*, 2022, 45(2): 13–17.
- HUANG XY, NING YL, LIU LJ, *et al.* The influence of pretreatment process on the accuracy of inductively coupled plasma mass spectrometry for determining the content of multiple elements in milk powder [J]. *Dairy Sci Technol*, 2022, 45(2): 13–17.
- [25] 胡亚滢, 叶为果, 刘辉. 电感耦合等离子体发射光谱仪标准加入法测定婴幼儿配方奶粉中矿物质元素[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(12): 3122–3127.
- HU YL, YE WG, LIU H. Determination of mineral elements in infant formula milk powder by inductively coupled plasma emission spectrometer standard addition method [J]. *J Food Saf Qual*, 2018, 9(12): 3122–3127.
- [26] 杜娟, 李亮, 郑许召, 等. 乳粉中钙、铁、钠消解方法比较及摄入量评估[J]. *食品工业*, 2023, 44(1): 313–317.
- DU J, LI L, ZHENG XZ, *et al.* Comparison of digestion methods and intake assessment of calcium, iron, and sodium in milk powder [J]. *Food Ind*, 2023, 44(1): 313–317.
- [27] 姜杰, 张慧敏, 林凯, 等. 水果中 9 种矿物质元素含量的电感耦合等离子体发射光谱测定法及其分布[J]. *职业与健康*, 2015, 31(14): 1900–1902.
- JIANG J, ZHANG HM, LIN K, *et al.* Determination and distribution of nine mineral elements in fruits by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [J]. *Occup Health*, 2015, 31(14): 1900–1902.
- [28] 古元梓, 邓玲娟, 魏永生. 微波消解-电感耦合等离子体发射光谱法测定陕西产地芝麻酱中的矿质元素[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(8): 260–264.
- GU YZ, DENG LJ, WEI YS. Determination of mineral elements in sesame sauce from shaanxi province by microwave digestion inductively coupled plasma emission spectroscopy [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(8): 260–264.
- [29] 唐柏杨, 汪佳林, 吴恋, 等. ICP-OES 和 ICP-MS 测定川芎中 20 种元素的含量[J]. *广东化工*, 2024, 51(18): 170–173.
- TANG BY, WANG JL, WU L, *et al.* ICP-OES and ICP-MS determination of 20 elements in Chuanxiong [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2024, 51(18): 170–173.
- [30] 李超, 方晨璐, 贾亦森, 等. 乳粉中 8 种常量微量元素含量分析与评价[J]. *食品安全导刊*, 2022(32): 64–66.
- LI C, FANG CL, JIA YS, *et al.* Analysis and evaluation of eight common trace elements in milk powder [J]. *Chin Food Saf Magaz*, 2022(32): 64–66.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

作者简介



何国彪, 工程师, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: 280538163@qq.com