

ICP-MS法检测化妆品包材中重金属迁移量

周约如, 王晨蕾, 李丽佳, 汪淼峰, 杨 铭

浙江方圆检测集团股份有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2026年4月27日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月28日

摘 要

建立电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定化妆品包材中铬、钴、镍、硒、锶、铅、铋、钡、铊等9种元素的迁移量的方法。采用4%乙酸、10%乙醇、90%乙醇作为化妆品模拟液进行迁移实验, 模拟液根据基质差异选择不同的前处理方式, 优化仪器参数与实验条件, 最后使用ICP-MS法测定模拟液中9种元素的含量。各元素在一定的浓度范围内线性关系良好, 相关系数均大于0.998, 4%乙酸基质模拟液方法检出限为0.1~2.0 ug/L, 样品平均加标回收率为94.6%~107.8%, 相对标准偏差为0.95%~4.07%; 乙醇基质模拟液方法检出限为0.1~2.0 ug/kg, 样品平均加标回收率为92.3%~104.8%, 相对标准偏差为0.92%~3.95%。该方法有较好的准确度和精密度, 适用于化妆品包材中9种重金属元素迁移量的检测。

关键词

化妆品包材, 电感耦合等离子体质谱法(ICPMS), 金属元素, 迁移量

Determination of Heavy Metal Migration in Cosmetic Packaging Materials by ICP-MS

Yueru Zhou, Chenlei Wang, Lijia Li, Miaofeng Wang, Ming Yang

Zhejiang Fangyuan Testing Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: April 27, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 28, 2026

Abstract

A method was established for determining the migration of nine elements (chromium, cobalt, nickel, selenium, strontium, zirconium, antimony, barium, and thallium) in cosmetic packaging materials using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Migration tests were conducted using 4% acetic acid, 10% ethanol, and 90% ethanol as cosmetic simulants. Different pretreatment methods were applied based on the simulant matrix, and instrument parameters and experimental conditions were optimized. The content of the nine elements in the simulants

was then determined by ICP-MS. All elements showed good linear relationships within their respective concentration ranges, with correlation coefficients greater than 0.998. The method detection limits for the 4% acetic acid simulant ranged from 0.1 to 2.0 $\mu\text{g/L}$, with average spiked recoveries of 94.6%~107.8% and relative standard deviations (RSDs) of 0.95%~4.07%. For the ethanol-based simulants, the method detection limits ranged from 0.1 to 2.0 $\mu\text{g/kg}$, with average spiked recoveries of 92.3%~104.8% and RSDs of 0.92%~3.95%. The method demonstrated good accuracy and precision and is suitable for detecting the migration of these nine heavy metal elements in cosmetic packaging materials.

Keywords

Cosmetic Packaging Materials, Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), Metal Elements, Migration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球化妆品安全监管体系的日益严格，其安全性越来越受到人们的关注，随着化妆品行业的蓬勃发展，消费者对产品安全性的关注已从配方本身延伸至直接接触产品的包装材料。化妆品包装不仅是保护内容物，也可能成为污染物的潜在来源。包材中含有的铅、砷、汞、铬、钴、镍、镉、锑、钡等元素，可能作为杂质存在于玻璃、金属、塑料或陶瓷釉料中，并在长期接触化妆品复杂基质时发生迁移，从而引入最终产品。这一风险已受到全球主要法规体系的严格审视：欧盟《化妆品法规》(EC) No 1223/2009 [1]明确禁止在成品中使用某些有害物质，并规定镍等致敏金属的限量；美国 FDA 虽未设定具体限量，但依据《联邦食品、药品和化妆品法案》[2]，含有有毒或有害物质的化妆品被视为掺假产品而被禁止。我国现有标准对食品接触材料的重金属含量及迁移量作出了规定，但对化妆品包装材料的标准仅验证其物理性能是否合格，并未对重金属含量及迁移量做出要求。《化妆品安全技术规范》(2015 年版) [3]规定：“化妆品的直接接触容器材料必须无毒，不得含有或释放对使用者造成伤害的有毒物质”。国家药品监督管理局发布公告《化妆品安全评估技术导则(2021 版)》[4]明确规定企业提交完整版安全评估材料时，需有包装相容性测试报告。导则中规定“包装材料测试是验证产品与其直接接触的包装材料之间可能发生互相作用，例如吸收、迁移、腐蚀和其他可能影响产品的现象”，但对于具体检测形式未作出明确规定。在化妆品备案要求中只对铅、砷、汞、镉元素限量作出了规定，而铬、钴、镍、硒、锶、镉、锑、钡、铊等元素均为化妆品禁用组分，铬、镍常作为塑料着色剂和某些催化剂；三氧化二锑可作为塑料稳定剂及阻燃剂[5]；钡、锶可作为塑料的稳定剂；钴是已知的强过敏原；硒、铊具有较高的毒性、锑化合物可能具有潜在的致癌性[6][7]，这些元素若迁出至化妆品内被人体吸收，在人体内积累到一定量后对人体神经系统、肝脏、及内分泌系统产生危害，甚至引发癌变。同时，由于化妆品成分复杂，且迁移量检测通常要求极高的灵敏度，建立科学、统一、可靠的测试方法面临诸多挑战。因此，系统研究并建立针对这九种元素迁移量的标准检测方法，不仅是响应全球监管趋同、满足法律合规要求的必要举措，更是从源头管控风险、保障消费者健康的核心技术支撑，对提升化妆品全产业链安全与行业可持续发展具有重要的意义。

目前测定微量或痕量元素的检测方法有：原子吸收光谱法[8]、原子荧光光谱法[9]、电感耦合等离子

体发射光谱法[10]和电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)等。ICP-MS 法和其他方法相比, 不仅能同时测定多种元素, 还具有实验灵敏度高、元素干扰小、检测速度快等优点, 并比电感耦合等离子体发射光谱法检出限更低, 消除干扰能力更强[11]。

基于化妆品成分将化妆品分为: 含酸产品、普通护肤品、香水类产品。对化妆品包装材料进行提取, 优化仪器条件后对化妆品塑料类和金属类包材模拟液进行检测。本文建立同时检测化妆品模拟液中铬、钴、镍、硒、锶、铅、镉、钡、铊等 9 种元素迁移量的方法, 为化妆品包装材料中多种痕量有害元素迁移量进行风险评估提供一种高效可行的手段。

2. 材料与方法

2.1. 仪器与设备

NexION2000G 型电感耦合等离子体质谱仪, 美国珀金埃尔默公司; Milli-Q 型超纯水仪, 美国密理博公司; MS204TS 型电子分析天平, 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司。电热恒温鼓风干燥箱, 上海精宏试验设备有限公司; 微控数显电热板, 广州格丹纳仪器有限公司。

2.2. 试剂与材料

硝酸(质量分数 65%), 优级纯, 国药集团化学试剂有限公司; 多元素标准溶液, 100 $\mu\text{g/mL}$, 上海安谱瑾世标准技术服务有限公司; 铅标准溶液, 1000 $\mu\text{g/mL}$, 上海安谱瑾世标准技术服务有限公司; 锆、钪、铈、铕元素单标溶液, 1000 $\mu\text{g/mL}$, 国家金属材料测试中心; 仪器调谐液, 1 $\mu\text{g/L}$, PE#: N8145051; 冰乙酸, 分析纯, 无锡市展望化工试剂有限公司; 无水乙醇, 分析纯, 安徽安特食品股份有限公司。

化妆品包装材料 10 件。其中铝制软管 2 件、气雾罐 1 件、唇彩管 2 件、塑料罐 3 件、塑料瓶 2 件, 市售。

2.3. 实验方法

2.3.1. 样品处理

选择三种模拟液(含酸产品、普通护肤品、香水产品)对不同类型的化妆品包装材料进行提取。将采购的包材按照表 1 的迁移条件, 进行浸提。浸泡方式: 将模拟液灌入化妆品包材中, 液面与封口相距 10 mm。

Table 1. Migration conditions

表 1. 迁移条件

	预期接触化妆品类型	化妆品模拟液	迁移实验温度/ $^{\circ}\text{C}$	迁移时间/d
化妆品金属、塑料包材	含酸产品	4%乙酸	60	10
	普通护肤品	10%乙醇	60	10
	香水产品	90%乙醇	60	10

4%乙酸模拟液, 取出后直接进行 ICP-MS 检测。

10%乙醇模拟液、90%乙醇模拟液, 每个样品准确吸取 10 g 于三角烧瓶中, 置于加热板上将模拟液蒸至近干, 转移并用 5%硝酸定容至 10 mL, 上机测试。

2.3.2. 仪器条件

用调谐溶液调谐仪器, 对分析条件进行优化, 使 Be 元素计数强度 > 4500 , In 元素计数强度 $> 80,000$ 、U 元素计数强度 $> 60,000$; 背景计数强度 ≤ 4 ; 氧化物值($\text{CeO} \div \text{Ce}$) $\leq 2.5\%$; 双电荷值($\text{Ce}^{++} \div \text{Ce}$) $\leq 3.0\%$ 。

优化后的主要工作参数见表 2。

Table 2. Instrument operating parameters
表 2. 仪器工作参数

工作参数	设定值
等离子气体流量	16 L/min
辅助气流量	1.2 L/min
雾化器流量	1.02 L/min
射频功率	1600 W

选择锗作为铬、钴、镍的内标；钪作为硒、锶、锆的内标；铈作为铟、钡的内标；铊作为铊的内标。内标的化学性质与对应待测元素相匹配，能够弥补分析过程中出现的信号波动。

2.3.3. 标准曲线的绘制

根据仪器条件及元素含量水平，配制铬、钴、镍、硒、锶、铈、钡、铊系列、锆系列标准溶液浓度见表 3。

Table 3. Mixed element standard series solutions
表 3. 混合元素标准系列溶液

元素名称	质量数	标准系列浓度/(ug/L)					
		系列 1	系列 2	系列 3	系列 4	系列 5	系列 6
铬(Cr)	52	0	1	5	10	50	100
钴(Co)	59	0	1	5	10	50	100
镍(Ni)	60	0	1	5	10	50	100
硒(Se)	78	0	1	5	10	50	100
锶(Sr)	88	0	1	5	10	50	100
锆(Zr)	90	0	10	50	100	200	500
铈(Sb)	121	0	1	5	10	50	100
钡(Ba)	137	0	1	5	10	50	100
铊(Tl)	205	0	1	5	10	50	100

根据不同化妆品模拟液分别用 5%硝酸，4%乙酸配制不同体系的标准曲线工作溶液，于优化条件后的 ICP-MS 上进行测定。

2.3.4. 金属迁移量

4%乙酸基质模拟液中元素含量按式(1)计算。

$$X = C - C_0 \quad (1)$$

式中 X——化妆品模拟液中待测元素含量，ug/L；

C——化妆品模拟液中待测元素的质量浓度，ug/L；

C₀——空白模拟液中待测元素的质量浓度，ug/L。

乙醇基质模拟液中元素含量按式(2)计算。

$$X = \frac{(C - C_0) \times V}{m} \quad (2)$$

式中 X——化妆品模拟液中待测元素含量, ug/kg;

C——化妆品模拟液中待测元素的质量浓度, ug/L;

C₀——空白模拟液中待测元素的质量浓度, ug/L;

V——化妆品模拟液的定容体积, mL;

m——化妆品模拟液称取的质量, g。

3. 结果与分析

3.1. 标准曲线、相关系数和检出限

测定铬、钴、镍、硒、锶、锆、铈、钡、铊的系列标准溶液,以标准溶液浓度为横坐标,以相应强度为纵坐标,绘制标准曲线。9种元素在各自的线性范围内线性良好,相关系数均大于0.998,按上述方法制备空白溶液,平行试验11次,所得到的标准偏差的3倍相对应的浓度值,即为检出限。测试两种不同体系检出限,乙醇基质线性方程、相关系数与检出限见表4;4%乙酸基质线性方程、相关系数与检出限见表5。

Table 4. Linear equations, correlation coefficients, and detection limits for 9 elements in ethanol matrix

表 4. 乙醇基质 9 种元素线性方程、相关系数和检出限

编号	元素	线性回归方程	相关系数	检出限/ug/kg
1	铬(Cr)	Y = 0.002X + 0.000	0.99998	0.5
2	钴(Co)	Y = 0.004X + 0.000	0.99999	0.1
3	镍(Ni)	Y = 0.001X + 0.000	0.99997	0.5
4	硒(Se)	Y = 4.28226X-6 + 0.000	0.99922	0.5
5	锶(Sr)	Y = 0.001X + 0.000	0.99999	0.5
6	锆(Zr)	Y = 0.002X + 0.000	0.99999	2.0
7	铈(Sb)	Y = 0.001X + 0.000	0.99998	0.1
8	钡(Ba)	Y = 0.003X + 0.000	0.99999	2.0
9	铊(Tl)	Y = 0.009X + 0.000	0.99999	0.5

Table 5. Linear equations, correlation coefficients, and detection limits for 9 elements in acetic acid matrix

表 5. 乙酸基质 9 种元素线性方程、相关系数和检出限

编号	元素	线性回归方程	相关系数	检出限/ug·L
1	铬(Cr)	Y = 0.005X + 0.000	0.99999	0.5
2	钴(Co)	Y = 0.010X + 0.000	0.99998	0.1
3	镍(Ni)	Y = 0.003X + 0.000	0.99996	0.5
4	硒(Se)	Y = 9.19651X-6 + 0.000	0.99985	0.5
5	锶(Sr)	Y = 0.002X + 0.000	0.99998	0.5
6	锆(Zr)	Y = 0.004X + 0.000	0.99900	2.0
7	铈(Sb)	Y = 0.002X + 0.000	0.99999	0.1
8	钡(Ba)	Y = 0.005X + 0.000	0.99993	2.0
9	铊(Tl)	Y = 0.019X + 0.000	0.99999	0.5

3.2. 方法精密度、回收率

为了验证该方法的精密度和准确性,在空白样品模拟液中添加铬、钴、镍、硒、锶、铈、钡、铊标准溶液达到 20 ug/L, 锆标准溶液 50 ug/L, 平行进样 6 次, 计算出 9 种元素加标测定的平均加标回收率。实验结果见表 6。

Table 6. Relative standard deviation and recovery rate of each element
表 6. 各元素相对标准偏差及回收率

编号	元素	乙醇基质相对标准偏差 RSD/%	乙醇基质平均回收率/%	乙酸基质相对标准偏差 RSD/%	乙酸基质平均回收率/%
1	铬(Cr)	1.33	95.7	0.95	95.1
2	钴(Co)	2.11	94.5	1.37	98.4
3	镍(Ni)	1.76	95.3	0.84	101.7
4	硒(Se)	3.94	103.5	4.03	103.5
5	锶(Sr)	1.73	98.6	1.59	94.6
6	锆(Zr)	3.95	92.3	3.14	107.6
7	铈(Sb)	2.53	103.9	3.67	102.7
8	钡(Ba)	2.20	104.8	4.07	107.8
9	铊(Tl)	0.92	100.2	1.08	98.3

3.3. 实际样品迁移量测试

应用上述方法对 10 批次化妆品包材分别进行含酸产品(4%乙酸)、普通护肤品(10%乙醇)、香水产品(90%乙醇)的迁移实验, 对处理后的模拟液进行 ICP-MS 上机测试。检测数据见表 7。

Table 7. Analysis of actual sample testing data
表 7. 实际样品检测数据分析表

元素	10%乙醇检出值/(ug/kg)	10%乙醇/检出批次	4%乙酸检出值/(ug/L)	4%乙酸/检出批次	90%乙醇检出值(ug/kg)	90%乙醇/检出批次
铬(Cr)	—	0/10	2.34~5.39	4/10	—	0/10
钴(Co)	—	0/10	—	0/10	—	0/10
镍(Ni)	1.64~2.58	3/10	10.23~57.81	7/10	—	0/10
硒(Se)	—	0/10	—	0/10	—	0/10
锶(Sr)	—	0/10	—	0/10	—	0/10
锆(Zr)	—	0/10	—	0/10	—	0/10
铈(Sb)	2.39~3.17	4/10	6.11~34.93	6/10	—	0/10
钡(Ba)	2.34~2.62	3/10	4.64~78.72	10/10	—	0/10
铊(Tl)	—	0/10	—	0/10	—	0/10

注: “—”表示未检出。

通过对实际样品测试数据的分析可知, 化妆品包装材料中重金属迁移风险与内容物性质密切相关。在 4%乙酸模拟液中元素迁移最为显著, 镍元素和钡是检出最为普遍且浓度较高的元素; 铈和铬在酸性条

件下也有检出。在 10%乙醇模拟液中, 仅镍、锑、钡三种元素有微量检出。而在 90%乙醇模拟液中, 所有元素均未检出。试验结果表明含酸化妆品对重金属的迁移具有显著的促进作用, 其中镍与钡的风险较为突出, 应在后续样品检测中予以关注。

4. 结论与讨论

通过对样品进行三种模拟液的提取及 ICP-MS 的条件优化, 建立了通过 ICP-MS 技术快速检测化妆品包材 9 种金属元素迁移的方法。在不同基质模拟液中 9 种金属元素均有较好的线性相关性。通过对样品进行重复性和加标实验, 结果表明该方法操作简单、准确性好、精密度高, 本研究提出的迁移测试条件为评估化妆品包材种金属元素迁移行为提供科学依据, 并为其安全评估提供了有效的试验方法。

基金项目

浙江方圆检测集团股份有限公司自立科技项目(RD2504)。

参考文献

- [1] 欧盟委员会. 化妆品法规(EC) No 1223/2009 [S]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32009R1223>, 2009-12-22.
- [2] 联邦食品、药品和化妆品法案[Z]. <https://www.fda.gov/regulatory-information/laws-enforced-fda/federal-food-drug-and-cosmetic-act-fdc-act>, 2018-03-29.
- [3] 国家食品药品监督管理总局关于发布化妆品安全技术规范(2015 年版)的公告[Z]. <https://www.nmpa.gov.cn/hzhp/hzhpfgwj/hzhpqzwj/20151223120001986.html>, 2015-12-23.
- [4] 国家药监局关于发布《化妆品安全评估技术导则(2021 年版)》的公告 [Z]. <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/ggtg/hzhpqgtg/jmhzhptg/20210419163037171.html>, 2021-04-08.
- [5] 张盛男. 玉米汁及几种瓶装水中 PAEs 和锑元素的检测研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [6] 刘东巍, 孙家新, 王伟挺, 等. 铊毒性危害及其治疗策略的研究进展[J]. 毒理学杂志, 2025, 39(3): 215-218.
- [7] 郑泽洋, 李绮敏, 杨安源. 纳米硒毒性与营养研究进展[J]. 食品安全导刊, 2021(22): 109-111.
- [8] 叶凌聪, 李达文, 梁嘉恩, 等. 运用原子吸收光谱法对化妆品中有害重金属元素的测定[J]. 化工管理, 2018(8): 90+92.
- [9] 郑伟鑫, 黄奕贤, 林杨盛, 等. 原子荧光法测定化妆品中砷汞含量的优化研究[J]. 广东化工, 2025, 52(19): 151-152+159.
- [10] 董喆, 李梦怡, 孙姗姗, 等. 电感耦合等离子体光谱法测定防晒化妆品中的二氧化钛[J]. 化学分析计量, 2025, 34(10): 89-93.
- [11] 梁媛, 张弦, 张江维, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法同时测定化妆品中 43 种元素[J]. 化学分析计量, 2024, 33(11): 122-128.