

化妆品中重金属检测方法的调查研究

谭景容*, 刘伟*, 张裔婷#, 李雪

南开大学滨海学院, 天津

Email: 13732576510@139.com, *123beauty@163.com

收稿日期: 2020年11月3日; 录用日期: 2020年11月23日; 发布日期: 2020年11月30日

摘要

随着生活水平的不断提高, 人们对于美开始有了更高的追求, 化妆品的使用量和使用率逐年上升, 但在其立竿见影的效果背后, 暗藏着巨大的潜在威胁。本文从化妆品中重金属的来源及其危害着手, 总结了近年来文献报道中化妆品重金属的检测方法, 为建立高灵敏度、高选择性、低成本、高效率、高通量的化妆品重金属检测方法提供理论依据。

关键词

化妆品, 重金属, 检测

Investigation on Detection Methods of Heavy Metals in Cosmetics

Jingrong Tan*, Wei Liu*, Yiting Zhang#, Xue Li

Nankai University Binhai College, Tianjin

Email: 13732576510@139.com, *123beauty@163.com

Received: Nov. 3rd, 2020; accepted: Nov. 23rd, 2020; published: Nov. 30th, 2020

Abstract

With the continuous improvement of living standards, people began to pursue beauty higher, and the usage and utilization rate of cosmetics increased year by year, but there was a huge potential threat behind its immediate effect. Based on the sources and harms of heavy metals in cosmetics, this paper summarizes the detection methods of heavy metals in cosmetics reported in recent years, and provides theoretical basis for establishing high sensitivity, high selectivity, low cost,

*第一作者。

#通讯作者。

high efficiency and high throughput detection methods of heavy metals in cosmetics.

Keywords

Cosmetics, Heavy Metal, Detection

Copyright © 2020 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

化妆品作为被人们广泛使用的日用品之一，拥有庞大的客户群体。可由于生产原料不合格、生产环境不卫生、企业监管不到位等原因，化妆品重金属含量超标导致中毒的事件仍时有发生。不少商家为了增强化妆品的功效，赚取更多利润，在生产过程中加入过量的重金属物质，如汞、铅、砷、镉等元素，对消费者健康构成严重威胁。故重视化妆品重金属检测领域的现状，提高检测化妆品中重金属含量方法的精准性、高效性，对于化妆品行业的发展以及人体健康而言都有着非常积极且重要的意义。

2. 化妆品中重金属的来源及其危害

2.1. 化妆品中重金属的来源

化妆品中重金属的来源途径大致可分为三类。第一，化妆品生产商家为了降低生产成本而非法添加。化妆品中加入廉价的氯化氨基汞以干扰黑色素的生成，迅速提升美白效果；化妆品中加入铅，促进皮肤对其它营养成分的吸收，可阻止人体黑色素的产生[1]。第二，化妆品原料中重金属物质的无意代入。由于重金属物质极难彻底去除，化妆品生产过程中使用的植株、天然矿物质、无机颜料等原材料极易携带重金属及其化合物。第三，化妆品工艺生产中重金属物质的无意代入。在化妆品生产过程中，设备质量不过关、设备清洗不达标、运输和存储过程不合格以及包装过程中使用的催化剂、氧化剂、包装袋，都有可能混入重金属杂质，导致化妆品重金属超标。

2.2. 化妆品中重金属的危害

据调查发现，有将近 20%的化妆品存在重金属超标的情况[2]，其中危害性最大的重金属主要为铅、汞和砷。

2.2.1. 铅

在化妆品的生产工艺中，铅常以氧化铅的形式被过量添加到遮瑕产品和美白产品中，重金属铅可促进皮肤对化妆品的快速吸收且在吸收后与人体内血细胞结合，危害性巨大且成本低廉[3]。研究发现，铅中毒患者轻则头晕、恶心、呕吐，重则引起神经炎、中毒性脑病、不孕不育等。此外，铅可通过母乳传播，婴儿体内铅含量超标可能引起智力和骨骼发育滞后[4]。幼儿吸收铅的能力极强、排除铅的能力弱更易受到铅超标的危害。为保障人民身体健康，《化妆品卫生标准》规定化妆品中铅含量不得超过 40 mg/kg。

2.2.2. 汞

汞离子可以介入酪氨酸的合成过程，抑制皮肤中黑色素的生成，因此氯化汞、氯化亚汞、氯化氨基汞常被添加到有美白、祛斑功效的化妆品中。硫化汞，又名朱砂，由于颜色鲜艳持久，常添加于胭脂、

口红中[5]。人体长期使用汞含量超标的化妆品会引发造成神经系统与肾脏功能受损,使人感到头晕乏力、失眠、全身酸痛,严重时出现血尿、尿毒症等症状[6]。为使消费者的安全得到保障,明确规定化妆品内汞含量不能超过 1 mg/kg。

2.2.3. 砷

砷属于类金属元素,其具备毒性且性质与金属元素类似。能促进皮肤对化妆品的吸收,具有美白淡斑的功效,因此常被过量添加到功能性化妆品中[7]。但它是人类致癌物质之一,且其化合物具有很强毒性。当人们涂抹过多的砷超标化妆品,将导致色素沉着(脱失)、角质化甚至皮肤癌;过量砷元素可导致心肌损伤和肝脏病变。此外,砷也具有神经毒性,可能导致头痛、嗜睡、记忆力下降以及不同程度的脑损伤等[8]。根据标准,化妆品中的砷含量应在 10 mg/kg 内。

3. 化妆品中重金属的检测方法

化妆品重金属检测的方法较常见的有仪器分析法、电化学法和化学比色法。

3.1. 仪器分析法

仪器分析法是化妆品重金属检测领域起步最早的一种方法(见表 1),包括荧光光谱法(AFS)、原子吸收光谱法(AAS)、电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)、电感耦合等离子体-质谱法(ICP-MS)等,这些方法因可靠性极高被普遍运用于化妆品重金属检测行业,但其所用仪器价格昂贵、不便携带。

3.1.1. 荧光光谱法(AFS)

原子荧光光谱法是 1964 年以后发展起来的一种介于原子发射和原子吸收之间的一种光谱分析技术,是我国常用的化妆品重金属检测方法之一。AFS 方法主要利用特征光源的辐射作用使气态金属原子中的部分自由原子发生外层电子跃迁,并将吸收的能量以光辐射的形式转化为具备特征波长的荧光,依据各元素发射出的不同荧光光谱及其荧光强弱,定量分析化妆品中的重金属元素。杨慧敏等采用湿式消解法对其选取的 10 种化妆品粉质原料进行样品预处理,测出 Pb、Hg、As 和 Cd 的回收率,该方法较为准确、可靠[9]。刘耀华选取膏霜、香波、粉(饼)、口红等不同种类型的化妆品共 12 种,检测结果显示砷的加标回收率为 90.7%~107.5%,检出限为 0.0084 $\mu\text{g/L}$,相对标准偏差为 1.49% [10]。该方法成本较低、灵敏度高、分析标准曲线线性范围宽,但其检测时容易受到荧光猝灭、散射光干扰从而使数据精确度下降,且该方法操作较复杂易受人为因素影响,仍待进一步提高设备的自动化水平。国外研究人员 Mauricio 等人利用微萃取-氢化物发生原子荧光光谱法测定硒和砷,实验过程中全面考量萃取剂种类、浓度、络合剂等因素,并在分光计上安装一个小型氢化物发生器使测试灵敏度显著增强[11]。

该方法成本较低、灵敏度高、分析标准曲线线性范围宽,但其检测时容易受到荧光猝灭、散射光干扰从而使数据精确度下降,且该方法操作较复杂易受人为因素影响,仍待进一步提高设备的自动化水平。

3.1.2. 原子吸收光谱法(AAS)

原子吸收光谱法又名原子吸收分光光度法,它是基于物质对光的选择性吸收而建立起来的分析方法,是最常用的化妆品重金属测定方法之一。其工作原理是通过试样蒸汽对光辐射源发出的具有待测元素特征谱线的吸收强度来检测样品中待测重金属的含量。这类方法可检测元素多、抗干扰能力强、灵敏度和精确度高,但一次只能检测一种元素。AAS 法依据不同的原子化手段主要分为石墨炉法、火焰法和氢化物法。邢旭和王丽借助原子分光光度计,采用干灰化法、湿式消解法、浸提法分别对样品进行预处理,计算检出限为 0.75 $\mu\text{g/L}$ [12]。崔新玲等采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 湿式消解法对洗发护发样品进行浓缩消解[13],张爱平等在优化实验条件的情况下,采用微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定化妆品中的铅,

检出限为 0.33 ng/ml [14], 可见原子吸收光谱法准确可靠。

3.1.3. 电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-AES)

电感耦合等离子体原子发射光谱法主要适用于对液体试样中重金属元素以及部分非金属元素进行定量检测。该方法根据不同元素的原子或离子在电感耦合等离子体激发光源的作用下, 返回基态时所发射的特征光谱线及其谱线强度, 检测化妆品中含有的重金属元素种类及其相应含量。杨永超等人检测 As、Pb、Cd 测得检出限分别为 0.0126 mg/L、0.0060 mg/L、0.0003 mg/L [15]; 宋彬彬等人通过比对不同提取温度和提取剂浓度对检测结果的影响, 利用该方法测得化妆品中可溶性镍 RSD 为 4.8%、1.5%、1.9%, 可溶性钡的 RSD 为 2.6%、0.9%、4.1% [16], 实验数据表明该方法检出限低、重复度和精密度较好。该方法具有可检测元素多, 分析速度快、检出限低等优点, 但其设备昂贵, 需要专业知识比较完备的研究人员进行检测。

3.1.4. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)

电感耦合等离子体质谱法是 20 世纪 80 年代发展起来一种高灵敏度的无机元素及同位素分析技术, 其基本原理是, 在雾化器中使样品雾化, 并在氩气流中与超高温等离子体发生相互作用释放出电离气体, 经采集进入质谱仪根据不同的质荷比进行分离, 最后根据不同元素的质量峰值强度测得样品中相应元素的含量。吴惠刚等人选取市面上的美发护发类、膏粉类、含酒精类化妆品利用电感耦合等离子体质谱法测定其中的 Pb、Cd、As 含量。测得其最低检出浓度分别为 0.006 $\mu\text{g/g}$ 、0.00008 $\mu\text{g/g}$ 、0.0003 $\mu\text{g/g}$ [17]; 赵子剑等人选取两个品牌的粉底和膏霜测得重金属元素铍、铬、砷、镉、碲、钆、铈、铅的精确度 0.43%~1.8%、重复性 0.88%~2.81%、回收率 95.62%~103.51% [18], 表明该方法适用于检测不同基质的化妆品重金属含量, 且能同时检测多种元素。该方法的优点在于测量精密度高、选择性强、能同时快速检测多种重金属元素; 但检测中用到的氩气价格比较昂贵, 因此有很大局限性。

此外, 研究人员 Shiwei Yang 等人建立固相萃取 - 高效液相色谱 - 电感耦合等离子体质谱联用技术在线检测水体中痕量铅[19], Alemayehu 等人用电感耦合等离子体质谱法同时测定 Ag、Au、Pd、Ru、Os 等重金属元素并比较了有盐酸做洗脱液和直接雾化法对检测限的影响, 发现 Ag、pd、Os、Ru 的检出限提高了 10~20 倍[20]。

Table 1. Comparison of cosmetic heavy metal detection methods

表 1. 化妆品重金属检测方法对比

仪器设备	线性范围	检出限	分析成本	同时检测元素	可检测元素	应用范围	选择性
原子荧光光谱仪	较窄	$10^{-12}\sim 10^{-10}$ g/ml	较低	4 种	11 种	较窄	较好
原子吸收光谱仪	中等	$10^{-14}\sim 10^{-10}$ g/ml	中等	1 种	70 多种	较宽	好
电感耦合等离子体质谱仪	宽	非常低	昂贵	多种	超过 75 种	很广	极好
电感耦合等离子体发射光谱仪	较宽	非常低	昂贵	多种	超过 73 种	很广	极好

3.2. 电化学法

电化学法主要包括溶出伏安法、极谱分析法、电位分析法、电导分析法、离子选择性电极法, 具有操作便捷、低检出限、高灵敏度等优点, 是一种比较经济的方法。

在检测化妆品时经常选取阳极溶出伏安法, 该方法根据每种金属特定的溶出反应电压, 利用溶出产生的电势值来进行金属物质种类的分辨, 并通过测量不同种类金属产生溶出电势差异, 来同时进行多种金属物的检测。沈美英等人选取市面上三种不同的粉质化妆品用硝酸、高氯酸进行消解, 然后用阳极溶

出伏安法测定样品中的镉含量,在六次平行测定后得出三种样品的平均值分别为 0.48 $\mu\text{g/g}$ 、0.60 $\mu\text{g/g}$ 、0.23 $\mu\text{g/g}$,在加入标准镉溶液后测得回收率为 93%、98%、91%,表明该方法测定镉元素精密度和准确度良好[21]。吴志珊等人将用金纳米粒子修饰的丝网印刷电极与方波阳极溶出伏安法相结合测定汞元素,用盐酸作为电解质在-0.20 V、3 min 的实验条件下测得该电极灵敏度为 1.48 $\mu\text{A}/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$,测出汞元素的检出限为 0.3 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (S/N = 3),该方法检出限低、重现性和灵敏度较好。电化学法选择性、重现性、精密度良好且仪器价格相对大型仪器更加便宜,但不适用于样品数量太多基质太复杂的情况下[22]。

此外,国外的电化学阳极溶出伏安法发展的较好,研究更为深入。其中 Tadeusz 等人将脲酶包埋在 pH 敏感铱氧化电极表面的 PVC 膜上,借助电势的下降的初始速率来计算抑制速率,检测汞和其他重金属离子的含量[23]。

3.3. 化学比色法

化学比色法主要包括试纸法和液相色谱法,该方法根据化学试剂与待测元素反应后的颜色变化来判断其含量。化妆品重金属检测常用试纸法,试纸法的显示剂与重金属元素结合后试纸颜色会改变再对照比色卡可推断出重金属元素的大致含量。杨慧等人利用试纸法测定镉元素,他们选取浓度 0.2%的镉试剂作为显色剂,将 2 min 作为检视时间,得到粗筛检测浓度范围与 ICP-MS 法进行比较,发现待测元素实际浓度值均落入镉试纸条粗筛范围中,其中镉试纸的最低检出限为 0.5 $\mu\text{g/ml}$,表明该方法比较实用,但某些数据显示粗筛浓度范围仍不够小[24]。寇莹莹等人用纳米金比色法快速检测铅离子得出待测水溶液中的最低检出限为 5 $\mu\text{mol/L}$,并得出结论 CTAB 纳米金溶液灵敏度较高,GSH 纳米金溶液颜色变化更加明显[25]。试纸法操作简单、成本较低、检测速度较快且对操作人员没什么专业要求,是目前最亲民的方法,但其选择性较差、精确度较低,在显色剂优化方面还有很大提升空间。

3.4. 快速检测方法

化妆品重金属快速检测方法有丝网印刷电极、激光诱导击穿光谱技术、X 射线荧光光谱法[26]。

3.4.1. 丝网印刷电极

丝网印刷电极可代替传统电化学检测仪的传感器,传统电化学传感器由于在检测中不能替换,可能对待测样品造成污染,导致实验数据的精确性和可靠性降低。利用丝网印刷技术制作的传感器具有体积小、灵敏度高、精确度高等优点,其成本较低,可在工厂大批量生产,支持一次性使用,避免污染样品。

3.4.2. 激光诱导击穿光谱法(LIBS)

激光诱导击穿光谱技术实际应用于 20 世纪 70 年代末,现今已是光谱分析应用中最热门的一种技术[27]。激光诱导击穿技术有着明显的优势和缺陷。其优点在于不用进行样品预处理,大大缩短了分析时间,和其他方法相比对样品的消耗量、损伤量更少,最重要的是这种方法可以原位分析以及远距离探测,节省了时间和人力,带来很大便利。其缺陷在于精确度、灵敏度、可重复性较差,影响因素可能是样品的性质和激光器本身参数的条件影响。此外,这种方法在实际检测中容易受到基体效应影响,也就是受分析元素以外的元素(基体元素)影响较大,这导致相同含量的重金属元素在不同物质中测得的含量完全不同[28]。为了改善这项技术,不同研究领域采用不同的数据处理方法,比如环境监测领域使用神经网络法、内标法;生物医学、食品安全、材料分析、农业生产领域选用基本定标法[29]。

3.4.3. X 射线荧光光谱法(XRF)

X 射线荧光光谱法(XRF)是 X 射线激发待测物质的原子使之产生荧光的检测方法,与大型仪器检测方法相比,该方法操作起来简便迅速,无需样品预处理以及化学试剂参与,支持现场检测,人为误差小,

是国内倍受关注的化妆品重金属检测方法之一[30]。目前 XRF 仪的市场价值呈上升趋势，研究人员正在仪器多功能化、小型与专用化、智能化方面做出提升[31]。

4. 化妆品重金属检测方法的筛选原则

现如今，针对化妆品重金属含量的检测方法主要分为两大类，即需要样品预处理的常规检测方法和无需预处理的快速检测方法。它们各有其优势与局限性，在检测前我们应尽量规避影响检测人员健康的实验方法，全面考量实验室条件、资金条件、操作人员的专业程度、待测样品的数量和基质复杂程度等各方面因素，选择最优检测方法。

1. 根据资金状况和对操作人员专业程度的要求方面选择检测方法。

当实验室条件较好、资金状况充足且操作人员专业水平较高时可以选取检测速率快、检出限低、精确度高的电感耦合等离子体质谱法或电感耦合等离子体发射光谱法；若资金不充裕则可以选择精确度高、可检测元素多的原子吸收光谱法或灵敏度高的电化学法或选择操作相对复杂但灵敏度高于原子吸收光谱法的原子荧光光谱法。

2. 根据待测样品的基质复杂程度和待检元素多少来确定检测方法。

当需要同时检测多种重金属元素时推荐选用电感耦合等离子体质谱法、X 射线荧光光谱法、激光诱导击穿技术对样品进行检测。当待测样品的基质过于复杂时不建议选择激光诱导击穿技术，该法虽然能测定不同形态的样品，但易受待测元素以外的基体元素影响从而使数据精确度下降。这时可以考虑原子吸收光谱法或电感耦合等离子体发射光谱法。

5. 化妆品重金属检测方法的发展方向

5.1. 优选样品预处理方法

样品预处理的成败直接影响到检测的精密度和回收率，因此重视预处理方法的优化十分有必要。常用的预处理方法有干法灰化法、湿式消解法、微波消解法。目前，研究人员可以根据不同的检测方法寻求最佳消解温度和酸消解体系(单一硝酸体系、硝酸-硫酸体系、硝酸-高氯酸体系等)，提升消解仪的样品的分解能力、消解速度、消解均匀度，以降低酸用量和消解成本。

5.2. 优改检测仪器

在化妆品重金属检测方法中，电化学法成本低，灵敏度高。其精确度主要受到电化学传感器的影响，研究人员可以选择纳米金属材料、石墨烯纳米材料修饰电极，用磁性材料复合改性提高实验结果准确性，或者选择丝网印刷电极进行大批量生产成本低廉，其用后即抛的特性又能避免交叉污染。此外，在丝网印刷电极制备方面研究人员可以精进网板制备、碳浆印刷等工艺条件。

5.3. 优化检测技术的速率

X-射线荧光光谱技术和激光诱导击穿技术适用于快速检测化妆品中重金属的含量，且无需预处理。可以通过特征变量的筛选和建模方法的优化建立最优模型，进一步提高X-射线荧光光谱技术的检测速率，使之更利于化妆品重金属的检测，并逐步进入国产化、小型化与智能化。而针对激光诱导击穿技术，在检测过程中易受仪器性能、基体效应等因素的影响，可以朝着优化光谱信号、降低基体效应、提高检测精确度方面等方面发展。

6. 结语

随着化妆品生产工艺的进步，消费者对化妆品的质量和功效有了更高的期待，促使化妆品的类别和

所含重金属的成分更加复杂。因此,建立一种高速率、低成本、高精度、高通量的化妆品重金属检测方法十分急切和必要。此外,消费者、生产者、政府监管部门应共同关注化妆品的质量,构建化妆品安全质量标准体系,规范化妆品买卖市场秩序。厂家生产安全合格的产品,监管者严格执法,保障消费者购买权益。

基金项目

由市级大学生创新创业训练计划项目资助,项目编号:201913660303。

参考文献

- [1] 吕金涛. 化妆品检验现状及其市场发展[J]. 广西质量监督导报, 2019(3): 155.
- [2] 沙拉·托合塔尔汗, 塔勒哈尔·库尔曼别克. 化妆品中重金属检测方法现状[J]. 科学技术创新, 2018(9): 20-21.
- [3] 刘美玲, 刘佳. 浅议化妆品中重金属元素的危害[J]. 广东化, 2015, 42(4): 64.
- [4] 董建光, 冯书芳, 李盟, 邱泽武. 铅中毒的诊断及治疗[J]. 灾害医学与救援, 2018(1): 61-64.
- [5] 肖琴. 浅析化妆品中的重金属有害物质[J]. 科技信息, 2012(8): 451-452.
- [6] 田薇. 化妆品对人体健康的影响[J]. 长沙医学院学报, 2010(2): 27-32.
- [7] 李野, 尹利辉, 曹进, 朱俐, 张学博, 孙晓翠, 朱炯, 王慧. 化妆品中重金属检测方法的现状[J]. 药物分析杂志, 2013, 33(10): 1816-1821.
- [8] 王秀红, 边建朝. 微量元素砷与人体健康[J]. 国外医学地理分, 2005, 26(3): 101-105.
- [9] 杨慧敏, 封棣, 孙丽丽, 孟伟光, 魏耀辉. 氢化物-原子荧光光谱法测定化妆品粉质原料中4种有害重金属[J]. 日用化学工业, 2016, 46(9): 539-543, 548.
- [10] 刘耀华. 微波消解-原子荧光光谱法测定化妆品中的砷[J]. 化学分析计量, 2009, 18(2): 48-49.
- [11] Llaver, M., Chapana, A.L. and Wuilloud, R.G. (2021) Simultaneous and Highly Sensitive Determination of Selenium and Tellurium Species in Environmental Samples by On-Line Ionic Liquid Based *in-Situ* Solvent Formation Microextraction with Hydride Generation Atomic Fluorescence Spectrometry Detection. *Talanta*, **222**, 121460. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.121460>
- [12] 邢旭, 王丽. 原子吸收分光光度法测定化妆品中铅含量[J]. 河北化工, 2012, 35(8): 83-84.
- [13] 崔新玲, 张金芳, 马果花, 李伟, 李善茂. 火焰原子吸收光谱法测定化妆品中痕量汞[J]. 光谱实验室, 2006, 23(4): 707-710.
- [14] 张爱平, 翁利丰, 葛红梅, 王红卫, 张文国. 微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定化妆品中痕量的铅[J]. 化学分析计量, 2013(4): 33-36.
- [15] 杨永超, 孙永泽, 张闯, 闫婧, 赵好力宝. ICP-OES 法同时测定化妆品中砷、铅和镉[J]. 日用化学工业, 2017, 47(10): 598-602.
- [16] 宋彬彬, 虞笑菲, 石文超, 倪达美. 电感耦合等离子体发射光谱法测定化妆品中可溶性钡与镍[J]. 化学分析计量, 2019(5): 68-71.
- [17] 吴惠刚, 欧阳珮珮, 黄诚, 周日东, 卢丽明. 电感耦合等离子体质谱法同时测定化妆品中的铅、镉、砷[J]. 中国卫生检验杂志, 2012(6): 1265-1267.
- [18] 赵子剑, 张伟建. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定化妆品中铍、铬、砷、镉、碲、钽、铈、铅[J]. 中国无机分析化学, 2015, 5(2): 9-11.
- [19] Yang, S.W., Song, Y.H., Ma, Q.F., Cheng, H.Y., Wang, Y.C. and Liu, J.H. (2020) Quantification of Ultra-Trace Organolead Species in Environmental Water by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry with Online Solid-Phase Extraction and High Performance Liquid Chromatographic Separation. *Analytica Chimica Acta*, **1133**, 30-38. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.07.046>
- [20] Asfaw, A., MacFarlane, W.R. and Beauchemin, D. (2020) Preconcentration of Noble Metals on Alumina Prior to Analysis by Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Application to Geological Samples. *Analytica Chimica Acta*, **1136**, 151-156. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2020.09.046>
- [21] 沈美英, 周青, 俞根发. 阳极溶出伏安法测定化妆品粉中的镉[J]. 香料香精化妆品, 1992(2): 53-54, 81.

-
- [22] 吴志珊, 宋伟, 许丹科, 钟文英. 金纳米粒子修饰丝网印刷电极测定化妆品中的汞含量[J]. 环境化学, 2017, 36(4): 885-891.
- [23] vel Krawczyk, T.K., Moszczyńska, M. and Trojanowicz, M. (2000) Inhibitive Determination of Mercury and Other Metal Ions by Potentiometric Urea Biosensor. *Biosensors and Bioelectronics*, **15**, 681-691.
[https://doi.org/10.1016/S0956-5663\(00\)00085-3](https://doi.org/10.1016/S0956-5663(00)00085-3)
- [24] 杨慧, 周淑平, 张婕, 葛永辉, 耿召良. 试纸法快速检测烟叶中的镉[J]. 烟草科技, 2018, 51(2): 34-40.
- [25] 寇莹莹, 任相浩. GSH 和 CTAB 功能纳米金比色法快速检测 Pb²⁺的研究[J]. 化学试剂, 2017, 39(12): 1301-1304.
- [26] 李心爱, 李周敏, 姚颖, 张艾彩璐, 刘晓莹. 化妆品中重金属快速检测方法现状及探讨[J]. 日用化学工业, 2018, 48(12): 711-716.
- [27] 李双艳. 基于嵌入式平台的重金属在线检测仪[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [28] 王卿, 谭娟, 吴健, 吴建强. 激光诱导击穿光谱技术在环境领域中的应用动态[J]. 中国环境监测, 2015, 31(3): 123-131.
- [29] 朱德华. 激光诱导击穿光谱技术检测物质成分的理论应用分析和实验研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [30] 沈桂华, 李华昌, 史焯弘. 激光诱导击穿光谱发展现状[J]. 冶金分析, 2016, 36(5): 16-25.
- [31] 章连香, 符斌. X 射线荧光光谱分析技术的发展[J]. 中国无机物分析化学, 2013(3): 1-7.