

儿童化妆品化学安全风险检测技术研究进展

王滋霖^{1,2}, 吕悦广², 尚宇瀚², 吕庆², 张庆², 孟宪双^{2*}, 郭广生^{1*}

(1. 北京工业大学 化学与生命科学学院 化学系, 北京 100124; 2. 中国质量检验检测科学研究院, 北京 100176)

摘要: 儿童皮肤屏障发育尚不完善, 对外源性化学物质的敏感性较高。儿童化妆品中激素类、抗生素类、抗感染/抗真菌类药物、防腐剂超量以及其他非法添加高风险组分的检出问题, 已成为监管关注的重点。当前, 针对儿童化妆品高风险及非法添加组分的检测技术正朝着高灵敏度、广谱筛查、快速化和智能化方向发展, 但在复杂基质适配、低浓度确证以及数据库完善等方面仍需进一步提升。该文综述了儿童化妆品化学安全风险物质筛查中样品前处理、仪器分析及数据解析技术的应用进展, 涵盖了超声辅助萃取、固相萃取、磁性固相萃取、微波消解等样品前处理技术的应用, 并归纳了色谱、质谱、光谱及传感器等仪器检测技术的适用场景与痕量分析能力, 同时探讨了机器学习在数据智能化解析中的创新性应用, 以期为儿童化妆品化学安全风险识别、技术适配与监管研究提供参考。

关键词: 儿童化妆品; 化学安全; 检测技术; 样品前处理; 仪器分析

中图分类号: O657; G353.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)11-0001-12

Advances in Chemical Safety Testing Technologies for Children's Cosmetics

WANG Zi-lin^{1,2}, LÜ Yue-guang², SHANG Yu-han², LÜ Qing², ZHANG Qing²,
MENG Xian-shuang^{2*}, GUO Guang-sheng^{1*}

(1. Department of Chemistry, College of Chemistry and Life Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Chinese Academy of Quality and Inspection & Testing, Beijing 100176, China)

Abstract: Children have an immature skin barrier, making them more susceptible to exogenous chemicals. Therefore, the detection of hormones, antibiotics, anti-infective/antifungal agents, excessive preservatives, and other illegally added high-risk components in children's cosmetics has become a major regulatory concern. Current analytical techniques targeting these high-risk and illegally added substances are advancing toward high-sensitivity, broad-spectrum screening, rapid analysis, and intelligent operation; however, further improvements are needed in adaptability to complex matrices, confirmatory analysis at low concentrations, and database refinement. This paper reviews recent progress in sample pretreatment, instrumental analysis, and data interpretation techniques for the screening chemical safety risk substances in children's cosmetics. It covers sample preparation methods like ultrasound-assisted extraction, solid-phase extraction, magnetic solid-phase extraction, and microwave digestion. It also summarizes the applicable scenarios and trace analysis capabilities of instrumental techniques, including chromatography, mass spectrometry, spectroscopy, and sensory analysis. The innovative application of machine learning in intelligent data analysis is also discussed. This review aims to provide a reference for chemical safety risk identification, technical adaptation, and regulatory research on children's cosmetics.

Key words: children's cosmetics; chemical safety; detection technologies; sample pretreatment; instrumental analysis

近年来, 随着我国居民生活水平显著提高以及育儿观念向精细化转变, 儿童化妆品市场呈高速增长态势, 产品类型已从基础护肤领域拓展至清洁、防晒、彩妆等多个领域。我国已逐步建立以《化妆

收稿日期: 2026-04-21; 修回日期: 2026-06-24

基金项目: 国家重点研发计划课题(2024YFF0618301); 消费品质量安全保障项目

* 通讯作者: 孟宪双, 博士, 副研究员, 研究方向: 产品质量安全检测新技术及风险评估研究, E-mail: mxs0128@163.com
郭广生, 博士, 教授, 研究方向: 微纳尺度分离分析; E-mail: gsguo@bjut.edu.cn

品安全技术规范(2025年版)》^[1]和《儿童化妆品监督管理规定》^[2]为核心的监管框架,对儿童化妆品原料选用和安全评估提出了更严格要求。然而,市场快速扩张带来的儿童化妆品质量参差不齐现象时有发生。2025年,国家药品监督管理局先后发布的第13^[3]、16^[4]、46^[5]号化妆品检出禁用原料通告中涉及7款儿童护肤类产品检出含特比萘芬或酮康唑等抗真菌类药物,2026年第2号化妆品检出原料通告^[6]中也涉及儿童护肤品,其添加的防腐剂成分超过标准限量值6倍。现有报道表明,2017~2024年重庆地区儿童人群的化妆品不良反应病例数逐年增加,其中接触性皮炎为最常见类型,青春期后逐渐出现痤疮样损害,较普通化妆品更易发生不良反应^[7]。尽管《已使用化妆品原料名称目录》^[8]已收录我国境内使用的8 000余种原料,但该目录未涉及原料的安全评估,生产企业在原料选用中仍需自行开展风险评估,进一步凸显了构建高效、精准检测技术体系的迫切性。

在此背景下,儿童化妆品检测研究重点已从一般性质量控制转向高风险及非法添加化学组分的精准识别与痕量确证。儿童化妆品安全风险不再局限于常规理化指标,而更集中于抗感染/抗真菌类药物、激素类物质、防腐剂超量及其他非法添加成分的检出风险,这对检测技术的灵敏度、特异性和复杂基质适配能力提出了更高要求。现阶段,我国化妆品检验检测方法体系按样品基质类型、目标化合物类别及分析技术原理构建,尚未形成儿童化妆品专属检测方法体系。相较成人产品,儿童化妆品在暴露敏感性、监管要求和风险筛查重点方面更具特殊性。因此,系统总结现有检测技术在儿童化妆品化学安全性评价中的适用性、局限性及发展方向具有现实意义。

基于儿童皮肤生理特殊性及产品基质复杂性,本文重点围绕儿童化妆品中激素类、抗生素类、抗感染/抗真菌类药物、防腐剂及其他化学风险组分的检测需求,梳理相关样品前处理与仪器分析技术的应用进展,着重分析低浓度和复杂基质条件下的方法适用性、基质效应控制、多组分筛查及可疑物识别等关键问题,以期儿童化妆品风险监测和监管技术优化提供参考。

1 样品前处理技术

儿童化妆品品类丰富,常见基质包括水剂、乳剂、膏霜、粉剂及固体蜡类等,不同基质中油脂、蜡质、色素、表面活性剂及香精等成分的含量差异较大,易在检测过程中产生显著基质干扰。尤其对于激素类、抗生素类、抗感染/抗真菌类药物及防腐剂等高风险或非法添加组分,其在样品中的含量通常较低,且常伴随复杂基质共提取问题,因此选择合适的前处理技术是实现准确性与定量分析的关键。现有研究中,儿童化妆品在样品前处理和仪器分析方法上总体沿用化妆品通用检测技术路线,方法选择主要取决于样品基质特征及目标化合物理化性质。

对于无机元素的检测,一般采用微波消解技术,然后采用光谱技术进行分析。张红梅等^[9]用微波消解法预处理样品,称取0.5 g样品,挥发性组分经20 min水浴蒸发去除有机物,膏霜类样品加少量去离子水混匀,通过硝酸和过氧化氢体系破坏样品基质,为后续无机元素分析提供稳定条件。此方法适用于膏霜、挥发性样品等不同类型基质的消解处理,表明微波消解在儿童化妆品重金属及多元素风险物质检测中通用性较好。针对儿童彩妆等复杂基质,超级微波消解等先进前处理技术更能克服干扰因素,保障检测结果的准确性。吴莉等^[10]和潘小红等^[11]采用超级微波消解结合质谱技术检测,结果显示该方法能充分分解含颜料、蜡质和无机填料多的复杂样品,适用于儿童化妆品中重金属及多元素风险物质的同步监测。总体而言,微波消解及超级微波消解更适合作为儿童化妆品中无机风险物检测的基础前处理手段,其优势是基质破坏充分、适配性好,但不适用于非法添加药物类有机目标物检测。

相较于无机元素检测,有机高风险组分的前处理更易受到样品基质复杂性和目标物理化学性质差异的影响。对于激素类、抗生素类、抗感染/抗真菌类药物、防腐剂及塑化剂等有机风险物质,常需结合目标物极性、挥发性及样品基质特征选择液液萃取^[12-18]、固相萃取^[19-21]、固相微萃取^[22]、磁性固相萃取^[23]等相分离技术结合溶剂超声波辅助^[12-18,21]等场辅助萃取技术,然后采用色谱^[12-18,20]、光谱^[22]等谱学技术及质谱^[10-14,16-18,20]技术进行分析,以提高目标物回收率、降低共提取干扰并增强痕量检出能力。Qiu等^[24]采用超声辅助液液萃取结合液相色谱-质谱分析儿童化妆品中的痕量有机风险物。该方法利用有机溶剂提取和盐析分层提高目标物从复杂基质中的释放效率,并通过浓缩步骤增强低浓度组分的检测灵敏度,适用于儿童化妆品中痕量有机风险物的提取和质谱筛查,说明超声辅助液液萃取在处理低浓

度目标物时具有较好的通用性,但对于乳液、膏霜和彩妆等基质更复杂的样品,其净化能力相对有限,后续需结合更具选择性的净化步骤或高选择性质谱检测手段,以进一步削弱基质效应。徐春丽等^[21]采用超声辅助萃取-固相萃取联用技术检测儿童化妆品中4种有机磷酸酯类阻燃剂。该方法在提取后引入弗罗里硅土小柱净化,可有效减少油脂、蜡质等共提取杂质对后续分析的干扰,在复杂基质样品中表现出较好的选择性和灵敏度,其检出限为1.0~2.0 $\mu\text{g/L}$,平均回收率为101.7%~119.0%,说明了超声辅助提取与固相净化联用更适用于儿童化妆品中低浓度半挥发性风险物质的分析,是提升复杂基质样品检测可靠性的重要优化方向。Xia等^[22]建立了膜保护微固相萃取-一步衍生化技术,用于化妆品中脂肪醛类物质的选择性测定。该方法将提取、富集和衍生化集成于同一装置,能短时间完成目标物处理,提高分析效率,增强痕量组分的检测灵敏度。与传统前处理方式相比,该技术减少了操作步骤和有机溶剂消耗,适用于复杂基质中特定痕量有机风险物的快速分析,体现了微型化、集成化前处理发展方向。Batista等^[23]引入磁性固相萃取及功能化纳米材料介导的微萃取技术,凭借其高比表面积与特异性吸附的优势,突破了传统方法在痕量风险物质(如激素、抗生素)富集倍数与选择性方面的瓶颈,通过显著减少有机溶剂消耗并简化操作流程,该技术成功应用于儿童口红样品中重金属的检测。

总体上,儿童化妆品前处理技术发展重点从常规提取转向面向复杂基质和低浓度风险组分的定向优化。对于乳液、膏霜、彩妆等样品,前处理策略选择影响后续色谱-质谱分析的灵敏度、准确性和确证能力。保证回收率的同时有效去除油脂、色素和蜡质干扰,是提升激素类、抗生素类及其他非法添加物检测准确性的关键。所以,未来需进一步发展高选择性、低溶剂消耗和高通量的前处理方法,以满足儿童化妆品风险监测对痕量分析和复杂样品检测的更高要求。

2 仪器检测技术

2.1 液相色谱及其与质谱联用技术用于儿童化妆品风险物质检测

液相色谱及其与质谱联用技术,适用于极性、热不稳定及高沸点化合物分析,是儿童化妆品中各类药物成分及非法添加物检测的关键技术^[25]。高效液相色谱(HPLC)与超高效液相色谱(UHPLC)分离度高,是复杂基质组分分离分析的核心手段。其中,高效液相色谱-二极管阵列检测器(HPLC-DAD)适用于有较强光学响应的着色剂和部分常规风险物的初步筛查,液相色谱-串联质谱(LC-MS/MS)适用于复杂基质中痕量高风险组分的靶向定量。所以,儿童化妆品检测中,液相色谱相关技术的选择应结合目标物类别、样品基质复杂程度和监管筛查需求综合考量,而非仅依据分离条件。郭紫娟等^[14]和吴旭等^[15]分别将HPLC-DAD用于儿童彩妆中着色剂及部分违禁物质检测,该类方法对有稳定紫外-可见吸收特征的目标物具有操作成熟、成本较低、适合常规批量筛查等优势,适用于口红、指甲油、眼线液及部分水剂、乳剂样品的定量分析。类似地,HPLC-DAD也可用于邻苯二甲酸酯等组分的检测^[18]。但总体而言,HPLC-DAD更适用于目标物浓度相对较高、干扰相对可控或主要用于初筛的应用场景,对于儿童化妆品中低含量非法添加药物成分的选择性和确证能力仍相对有限。

相较于传统光学检测方式,LC-MS/MS在复杂基质中具有更高的选择性和灵敏度,尤其适用于儿童化妆品中激素类、抗生素类、防腐剂及其他痕量非法添加组分的定量分析。其多反应监测模式可有效降低基质共提取物的干扰,提高低浓度目标物的定性和定量可靠性,因此在监管筛查和确证分析中具有更强的实用性。杨永超等^[17]构建了儿童化妆品中3种异噻唑啉酮类防腐剂的LC-MS/MS同步检测方法。该方法在线性范围、灵敏度和精密度等方面性能良好,3种目标物的相关系数不低于0.999 9,平均回收率为94.0%~105.6%,相对标准偏差小于5%,能满足现行法规对限量成分的检测需求。实际检测市售样品发现,部分儿童化妆品存在目标防腐剂被检出甚至超标的情况。这说明LC-MS/MS不仅能精准定量水剂、乳剂和膏霜类样品中的痕量防腐剂,还有较强的实际监管应用价值。该方法显示LC-MS/MS对儿童化妆品水剂、乳剂和膏霜类样品中痕量非法添加化学成分有较高检测灵敏度和良好基质适应性,适用于监管筛查和确证分析。

现有报道表明,液相色谱及其与质谱联用技术已覆盖防腐剂、抗生素、着色剂、塑化剂及多类非法添加药物成分的检测,方法检出限普遍可达较低水平,且具有较宽的线性范围和良好的重复性(表1)。其中,光学检测方法更适合常规筛查,质谱联用方法则在复杂基质中多组分同步分析、痕量定量

和结果确证方面表现更为突出。

表 1 液相色谱及其与质谱联用技术在儿童化妆品检测中的典型应用案例

Table 1 Typical applications of liquid chromatography and liquid chromatography-mass spectrometry in the analysis of children's cosmetics

Analytical technique	Target compound	Pretreatment	LOD	Sample matrix classification	Reference
HPLC-DAD	邻苯二甲酸二甲酯、邻苯二甲酸二乙酯、邻苯二甲酸二正丙酯、邻苯二甲酸二正丁酯、邻苯二甲酸二正戊酯、邻苯二甲酸二正己酯、邻苯二甲酸二正辛酯、邻苯二甲酸二正辛酯	油状样品：使用正己烷为提取溶剂超声 20 min 后 5 000 r/min 离心 5 min，经 0.45 μm 滤膜过滤，滤液作为待测溶液备用；非油状样品：使用甲醇为提取溶剂超声 20 min 后 5 000 r/min 离心 5 min，经 0.45 μm 滤膜过滤，滤液作为待测溶液备用。	0.2~5.0 $\mu\text{g/mL}$	水剂、乳剂、油剂	[18]
HPLC-DAD	溶剂绿 7、酸性黄 1、食品黄 3、橙黄 1、酸性橙 7、食品红 9、食品红 7、食品红 17、食品红 1、酸性红 87	使用四氢呋喃和甲醇为提取溶剂超声 20 min 后 8 000 r/min 离心 5 min，上清液经 0.45 μm 滤膜过滤，滤液作为待测溶液备用。	0.054~2.967 $\mu\text{g/g}$	水剂、粉剂、固体蜡类	[14]
HPLC-DAD	达克罗宁、新康唑	使用乙腈为提取溶剂超声 30 min 辅助萃取，冷藏 3 h 后 5 000 r/min 离心 5 min，取上清液经 0.22 μm 滤膜过滤，滤液作为供试品溶液。	0.2~0.3 $\mu\text{g/mL}$	水剂、乳剂、油剂、膏霜类	[15]
HPLC	甲基异噻唑啉酮、2-溴-2-硝基丙烷-1,3-二醇、4-羟基苯甲酸、甲基氯异噻唑啉酮、苯甲醇、苯氧乙醇、苯甲酸、4-羟基苯甲酸甲酯、氯苯甘醚、脱氢乙酸、5-溴-5-硝基-1,3-二噁烷、4-羟基苯甲酸乙酯、4-羟基苯甲酸异丙酯、4-羟基苯甲酸丙酯、4-羟基苯甲酸苯酯、4-羟基苯甲酸异丁酯、4-羟基苯甲酸丁酯、4-羟基苯甲酸苄酯、苯甲酸乙酯、4-羟基苯甲酸戊酯、苯甲酸异丙酯、苯甲酸丙酯、苯甲酸苯基酯、吡硫鎓锌、水杨酸、山梨酸、苯氧异丙醇、苯甲酸甲酯、碘丙炔醇丁基氨甲酸酯、对氯间甲酚、2,4-二氯苯甲醇、邻苯基苯酚、邻伞花烃-5-醇、氯二甲酚、氯咪巴唑、吡罗克酮乙酯醇胺盐、三氯卡班、三氯生、溴氯芬、硫柳汞钠	采用甲醇为提取溶剂超声 20 min 后 10 000 r/min 离心 5 min，上清液经 0.22 μm 滤膜过滤，取滤液作为待测溶液。粉类基质样品先加入 1 mL 水，蜡基样品先加 1~2 mL 四氢呋喃使样品均匀分散，再加入甲醇进行提取。	0.2~8.0 $\mu\text{g/g}$	文中未说明 222 批样品的基质类型	[26]
LC-MS/MS	2-甲基-4-异噻唑啉-3-酮、5-氯-2-甲基-4-异噻唑啉-3-酮、1,2-苯并异噻唑啉-3-酮	采用超纯水超声提取 2.0 min，取上清液经 0.2 μm 滤膜过滤后，待测。	0.020~0.050 $\mu\text{g/g}$	水剂、粉剂、膏霜类	[17]
HPLC-MS/MS	本维莫德、噻吗洛尔、他克莫司、毗美莫司	使用甲醇为提取溶剂进行超声波辅助液液萃取。	0.001~0.010 $\mu\text{g/g}$	水剂、乳剂、膏霜类	[13]
HPLC-MS/MS	碘丙炔醇丁基氨甲酸酯、对羟基苯甲酸甲酯、对羟基苯甲酸乙酯、对羟基苯甲酸丙酯、对羟基苯甲酸丁酯、对羟基苯甲酸异丙酯、对羟基苯甲酸异丁酯、甲基异噻唑啉酮、甲基氯异噻唑啉酮以及脱氢乙酸	使用 0.2% 甲酸甲醇溶液涡旋，经超声、离心后，取上清液于 QuEChERS 净化管中涡旋 2 min，8 000 r/min 离心 8 min，取提取液过 0.22 μm 滤膜于进样小瓶中，上机进样分析。	0.0015~0.0150 $\mu\text{g/g}$	水剂、乳剂、膏霜类	[16]
UPLC-MS/MS	新康唑、硫康唑、抑霉唑、噻康唑	经 70% 乙腈水溶液涡旋超声 15 min 后，使用强阳离子交换固相萃取小柱净化，再用 4 mL 含 10% 异丙醇的乙腈（含 2% 氨水）溶液洗脱目标物，收集洗脱液上机测试。	0.005~0.250 $\mu\text{g/g}$	水剂、乳剂、膏霜类	[20]

近年来，液相色谱-高分辨质谱(LC-HRMS)技术凭借高分辨率、精确质量数测定和全谱数据采集能力，突破传统串联质谱仅能靶向检测目标分析物的局限。对于儿童化妆品中成分来源复杂、非法添加方式隐蔽、目标物范围不断扩大的实际情况，高分辨质谱在高风险及可疑添加组分广谱筛查中的优势尤为突出。现有研究已将 LC-HRMS 应用于防腐剂、抗生素、塑化剂等多类目标物的同步筛查，主要针对已知或疑似存在于儿童化妆品中的化学物质，基于已知化合物的标准质谱信息(如精确质量数、

特征碎片离子、保留时间等)建立数据库,对样品检测数据进行匹配检索,从而快速发现目标物是否存在。LC-HRMS在化妆品风险识别中的应用进展如表 2,李若绮等^[27]采用超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱(UPLC-Q-TOF HRMS)技术,自建筛查数据库结合高分辨质谱精确质量数和碎片信息,实现了 180 种可疑违禁成分的快速筛查与确证,显著提升了儿童化妆品中多类别高风险组分的筛查效率;尹伟成等^[28]使用超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱高分辨质谱(UHPLC-Orbitrap HRMS)技术,构建了包含抗组胺类、激素类、抗感染类、局部麻醉类、前列腺素类、 β 受体激动剂、非甾体抗炎类等多种类型非法添加药物成分在内的 303 种非法添加药物组分的筛查数据库,并在市售样品中检出儿童类化妆品含他克莫司,进一步说明高分辨质谱对儿童化妆品中隐蔽性非法添加药物成分具有重要的监管应用价值。由此可见,与传统靶向方法相比,LC-HRMS 更适用于儿童化妆品中高风险及非法添加组分的广谱筛查、可疑物识别和补充确证,尤其适用于目标物范围不断扩展、标准品不完全具备及复杂基质干扰显著的应用场景。

表 2 液相色谱-高分辨质谱技术在化妆品化学安全性检测中的应用进展

Table 2 Advances in the application of liquid chromatography-high-resolution mass spectrometry in chemical safety testing of cosmetics

Analyte type	Analytes number	Pretreatment method	Analytical technique	LC elution time/min	Reference
激素类、抗感染类、抗组胺类和其他皮肤用药类	180	超声提取	UPLC-Q-TOF HRMS	26	[27]
激素、抗生素、抗组胺类、局部麻醉类药物	303	超声提取	UPLC-Q-Obitrap HRMS	20	[28]
激素、抗感染类、抗组胺类、抗精神病类药物	139	超声提取	UPLC-Q-TOF HRMS	20	[29]
邻苯二甲酸酯	14	超声提取	HPLC-LTQ/Orbitrap MS	20	[30]
紫外吸收剂	12	超声提取	HPLC-Q-TOF HRMS	17	[31]
染料	4	超声提取	UHPLC-LTQ/Orbitrap HRMS	15	[32]
抗生素类成分	36	超声提取	UHPLC-LTQ/Orbitrap HRMS	8	[33]
糖皮质激素	12	涡旋振荡提取	UHPLC-Q-Orbitrap HRMS	10	[34]
抗生素、激素、农药等	89	超声提取	UHPLC-LTQ/Orbitrap HRMS	25	[35]
人参和甘草类功效成分	5	固相萃取	HPLC-Q-TOF HRMS	10	
糖皮质激素	86	QuEChERS	HPLC-TOF HRMS	8	[36]
抗生素类、激素类等	100	分散固相萃取	UHPLC-LTQ/Orbitrap HRMS	40	[37]
				/	[38]

“/” denotes data not reported in the original literature

与此同时,国内外学者围绕儿童化妆品暴露评估与安全风险也开展了系列研究。Gomez-Berrada 等^[39]以家庭共享型化妆品为研究对象,聚焦婴儿(0~3 岁)、儿童(4~12 岁)与成人三类人群,系统开展了 10 类家庭化妆品(洗发水等)的使用量统计与概率法暴露评估。基于 87 项临床安全研究、2 994 名受试者真实使用数据,结合蒙特卡洛模拟完成单位体重暴露量核算,明确不同年龄、产品类型与使用场景下的暴露差异。研究证实婴儿的单位体重暴露远高于成人,原创暴露数据可在化妆品安全评估机构与监管部门使用,为儿童群体暴露评估提供关键数据基础,有助于筛选需优先关注的化学物。在中国,庄程元等^[40]基于福建省 209 例儿童化妆品不良反应报告,系统分析了儿童专用与成人化妆品致不良反应的分布及临床特征。结果显示,4~12 岁儿童误用成人化妆品现象突出,网络购品风险高,不良反应以接触性皮炎为主、潜伏期短,成人化妆品引发的不良反应更复杂、预后更差,且有短期集中风险信号。该研究明确了防腐剂、着色剂等核心致敏化学物质,划定重点检测品类与渠道,为筛查结果风险分级提供了依据,提升了儿童化妆品化学安全性评估的靶向性与效率。与成人化妆品相比,儿童化妆品中植物原料组分数据库的完善尤为重要。郑璇杏等^[41]以国内儿童化妆品中植物提取物为核心,梳理紫草、金盏花等 5 类主流植物提取物的功效特性与应用场景,明确高频使用种类;精准指出植物提取物在原料杂质等方面的化学安全风险点,填补了儿童化妆品天然成分安全检测研究空白;提出采用高效液相色谱-串联质谱等技术开展标识成分定量、农残与重金属检测,结合生物学指标评价功效安全性,为儿童化妆品植物提取物化学安全检测方法建立、标准制定提供了核心技术思路;有助于推动原料标准化与监管规范化,完善儿童化妆品化学安全风险防控与检测监管体系。

2.2 气相色谱及其与质谱联用技术用于儿童化妆品风险物质检测

气相色谱法基于不同物质在沸点、极性等物理性质方面的差异实现混合物的分离与分析,气相色

谱-质谱联用技术(GC-MS)整合了气相色谱的高效分离能力与质谱的结构鉴定功能,目前在儿童化妆品领域主要应用于塑化剂、有机磷酸酯类阻燃剂(OPFRs)、部分防腐剂及其他挥发性风险组分的定性定量检测。与液相色谱-质谱联用法相比,该技术对特定挥发性目标物具有更优的分离效率与定性能力,但对样品前处理的净化程度要求更高。吕稳等^[42]建立了化妆品中苯甲酸酯类与对羟基苯甲酸酯类防腐剂的GC-MS检测方法,该方法在对应线性范围内表现出良好的线性关系;研究选取3种基质并设置两个加标水平开展方法回收率与精密度验证,加标回收率为85.4%~113.8%,相对标准偏差(RSD)≤10.9%;该研究对50批次婴幼儿化妆品进行检测,对羟基苯甲酸甲酯与对羟基苯甲酸丙酯的检出频率最高,分别为50%和36%,且二者含量均符合现行相关标准的规定。此外,气相色谱-串联质谱技术(GC-MS/MS)结合了色谱的高效分离能力与质谱的精准结构解析优势,能够实现对目标化合物,尤其是痕量组分的精准识别与定量。图1为采用GC-MS/MS技术检测儿童化妆品中化学安全风险物质的常规实验流程。针对OPFRs等半挥发性有机物,超声辅助萃取结合GC-MS/MS联用技术展现出优异的分析性能,徐春丽等^[21]利用该技术建立了儿童化妆品中4种OPFRs(磷酸三丁酯、磷酸三(2-氯乙基)酯、三(1-氯-2-丙基)磷酸酯和磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯)的定量检测方法,方法检出限低至1.0~2.0 μg/L, RSD为2.1%~8.4%,平均回收率为101.7%~119.0%;将该方法应用于12种市售儿童化妆品的检测,在3批次样品中检出磷酸三(2-氯乙基)酯,含量为4 267~10 246 ng/g。该研究结果揭示了儿童化妆品中OPFRs污染的现实风险,需重点警惕此类物质在婴幼儿高频接触的膏霜类基质中的迁移与累积效应。

儿童皮肤屏障功能尚未发育完善,更为脆弱^[43],而儿童化妆品中的有机风险物质组成复杂,基质多富含大量油脂与表面活性剂^[44],且不同风险物质在挥发性、极性、热稳定性和分子量方面差异显著,因此检测技术的选择需主要依据目标物的理化性质与样品基质特征。与LC-MS常用的电喷雾电离、大气压化学电离方式不同,GC-MS通常采用电子轰击电离,该电离方式产生的碎片离子信息丰富、重现性好,且商业化质谱数据库较为完善,因此在挥发性与半挥发性化合物的定性识别、可疑物筛查及同分异构体区分方面具有显著优势;此外,GC-MS/MS结合多反应监测模式可进一步提升复杂基质中目标物检测的选择性与定量可靠性。已有研究表明,GC-MS与GC-MS/MS已广泛应用于化妆品中挥发性香料、塑化剂、防腐剂和有机磷酸酯类阻燃剂等风险物质的检测^[18];针对部分极性较强或热稳定性较差的目标物,可通过衍生化处理改善其挥发性与色谱行为^[45],进而拓展GC-MS的适用范围。综上,GC-MS与LC-MS两种技术针对不同理化性质的目标物检测可形成互补:GC-MS更适用于挥发性与半挥发性组分的分离确证,而LC-MS更适用于强极性、热不稳定与难挥发组分的靶向定量及广谱筛查。现行标准^[1]中,GC-MS/MS也在挥发性香精致敏原、塑化剂等领域形成明确的应用规范。

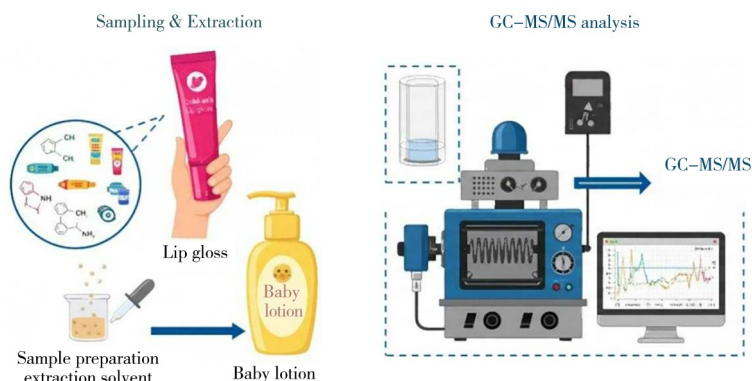


图1 GC-MS/MS技术检测儿童化妆品中化学安全风险物质的常规实验流程

Fig. 1 Routine analytical workflow for GC-MS/MS determination of chemical safety risk substances in children's cosmetics

2.3 原子吸收光谱与原子荧光光谱技术用于儿童化妆品风险物质检测

原子吸收光谱(AAS)与原子荧光光谱(AFS)作为成熟的元素分析技术,在儿童化妆品重金属等元素检测中发挥着基础作用,其技术优化方向主要聚焦于检测灵敏度提升与绿色检测体系构建。AAS和AFS在儿童化妆品化学安全风险物质检测中的应用如图2。在仪器联用与自动化方面,将AAS/AFS与流动注射、在线消解等技术结合,可显著提高检测通量与自动化水平,能够更好地满足日益增长的检

测需求^[46]。通过技术改良不仅可增强方法对铅、汞、砷等有害元素的痕量检测能力，也为构建更高效、环保的儿童化妆品元素安全监测体系提供了可靠的技术支撑。Batista 等^[23]为消除电感耦合等离子体发射光谱的干扰，采用石墨炉原子吸收光谱法对样品中铅含量进行了测定。经优化后的检测方法可靠，LOD 为 0.01~0.4 mg/kg，回收率为 80%~111%。研究发现，部分样品中铬、铅等具有致癌性，且可诱发过敏及湿疹性皮炎的有毒元素含量偏高，部分儿童用产品中上述金属元素的最高检测浓度甚至超出人体安全使用限值。该研究还采用主成分分析开展探索性分析，基于金属元素浓度差异评判样品间的相似性，并观察到镉与铅元素含量之间存在相关性。

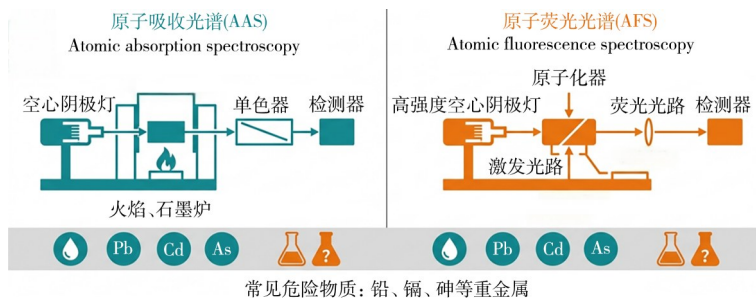


图2 AAS和AFS在儿童化妆品化学安全风险物质检测中的应用

Fig. 2 Applications of AAS and AFS in the determination of chemical safety risk substances in children's cosmetics

2.4 电感耦合等离子体质谱技术用于儿童化妆品风险物质检测

对于儿童化妆品中的重金属及多元素风险物质，电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)及相关光谱技术具有多元素同步检测、灵敏度高和线性范围宽等优势^[47]，特别适用于彩妆、粉体和膏霜类样品中无机风险物的筛查与评价。儿童化妆品中重金属污染物主要源于原料引入和生产过程的交叉污染，矿物颜料、着色剂、某些天然植物原料可能含铅、砷、镉、汞等元素，生产设备、管道或包装材料的迁移也是潜在来源。重金属可经皮肤接触被儿童吸收，因儿童皮肤屏障功能未健全、单位体表面积暴露剂量更高，面临的风险显著升高^[39]。长期低剂量暴露会引发神经发育毒性、肾脏损伤、内分泌干扰等慢性健康损害^[48]。所以，对儿童化妆品中多种重金属元素进行准确定量筛查，是把控产品安全质量的核心环节。ICP-MS技术检测儿童化妆品中化学安全风险物质的常规实验过程如图3，而近年来一些研究引入串联质谱(ICP-MS/MS)技术，通过反应池有效消除了多原子离子干扰现象，显著增强了分析方法的专属性与准确性^[49]。吴莉等^[10]建立了ICP-MS/MS同时测定儿童彩妆类化妆品中45种元素含量的方法。结果显示，所测元素在各自质量浓度范围内线性关系良好，相关系数均大于0.9917。在2个加标水平下，霜类、粉类、口红类3种化妆品基质的平均回收率分别为80.1%~116.5%、80.6%~118.3%、84.5%~113.4%，RSD分别为0.6%~6.9%、0.8%~8.9%、1.3%~5.2%。该方法的检出限低至0.0003 μg/kg，较传统ICP-MS提升2个数量级，对镉、砷等易受干扰元素定量更精准。相关研究表明，ICP-MS结合微波或超级微波消解可有效满足儿童化妆品中痕量重金属的监测需求，但其在本文所讨论的非法添加药物类高风险组分检测中并非主导技术。



图3 ICP-MS技术检测儿童化妆品中化学安全风险物质的常规实验过程

Fig. 3 Routine analytical procedure for ICP-MS determination of chemical safety risk substances in children's cosmetics

2.5 傅里叶变换红外光谱与拉曼光谱技术用于儿童化妆品风险物质检测

傅里叶变换红外光谱(FTIR)与拉曼光谱(Raman)作为互补的光谱技术，通过捕捉分子键的振动信

息,实现对儿童化妆品中特征官能团的快速定性分析。FTIR 基于偶极矩变化,对极性官能团(如 O—H、C=O)敏感,适用于检测产品中的水、甘油及部分植物活性成分^[50]。拉曼光谱则基于分子极化率变化,对非极性键(如 C—C、C=C)和芳香环结构响应强,能有效识别色素、矿物填料及某些合成聚合物。两种技术均具有快速、无损、样品前处理简单的优势,尤其适合对儿童化妆品基质中非法添加的禁用物质(如某些激素或抗生素)进行初筛。Jin 等^[51]建立了基于增强拉曼散射(SERS)快速识别和定量儿童面霜中非法添加苯海拉明(DPH)的方法,该方法利用了一种由改性的纤维素纳米纤维(CNFs)薄膜组成、具有金属有机框架-801(MOF-801)和刺猬状金纳米粒子(GHP)的多功能传感器作为 SERS 活性底物和吸附剂,制备流程如图 4。利用丰富的纳米间隙和 GHP 的尖端放大 SERS 信号,显著提高了 GHP 的检测灵敏度, SERS 强度和对数浓度之间的相关性 R 值为 0.926~0.978, LOD 低至 0.4 ppb,此外,成功将检测时间控制在 11 min 内,并将该方法应用于两个品牌的面霜样品检测。该技术的显著优势在于其极高的效率,是一种适用于检测儿童化妆品中违禁添加剂、具有良好用户体验的现场快速检测方法。通过构建特征光谱数据库,并结合化学计量学手段,能够提高对复杂样品中目标物质的识别精准度与效率,为儿童化妆品的现场快速筛查及风险监测提供了强有力的技术支撑。

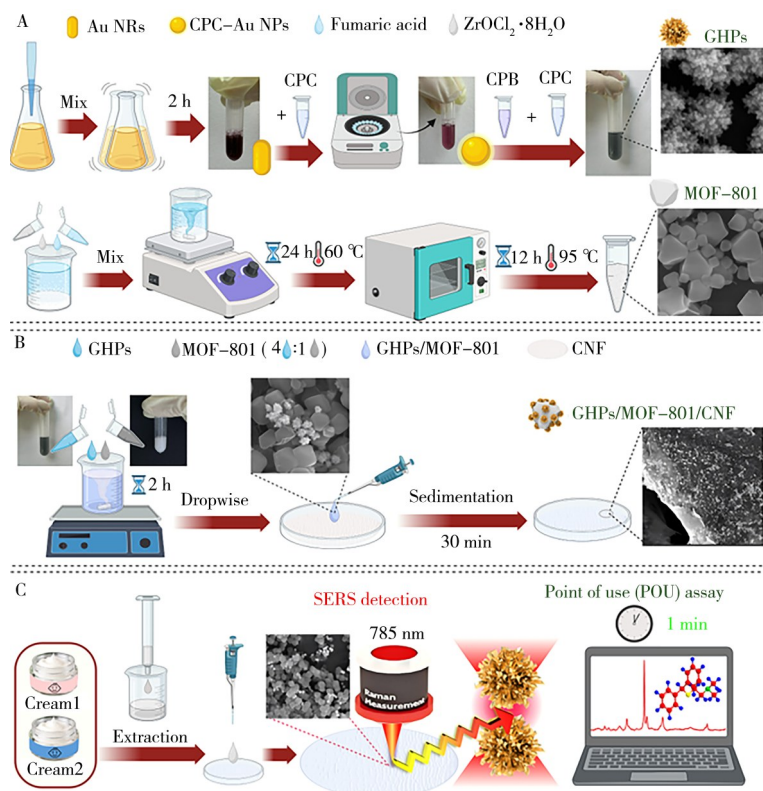


图4 制备GHP/MOF-801/CNF流程用于快速检测儿童面霜中禁用的DPH添加剂^[51]

Fig. 4 Preparation procedure of GHP/MOF-801/CNF for the rapid determination of prohibited DPH additives in children's creams^[51]

2.6 离子迁移谱技术用于儿童化妆品风险物质检测

离子迁移谱(IMS)是一种基于离子在电场中迁移速率差异实现高效分离的分析技术^[52],因其具备快速响应、便于携带和操作简便等优势在现场快速筛查领域受到广泛关注。相较于LC-MS和HRMS等实验室确证技术,IMS更适合作为快速预筛查手段,用于复杂样品中风险物质的初步识别。已有研究表明,IMS已用于化妆品中间体中的痕量杂质测定^[53]、复杂化妆品及精油中香精过敏原检测^[54]以及祛痘类化妆品中非法添加抗菌药物的快速筛查^[55],说明该技术在化妆品安全检测领域具有一定的应用基础。

从应用类型看,IMS在化妆品分析中的优势主要体现在痕量成分和快速筛查方面。Capitain等^[54]针对复杂化妆品和精油样品中的高沸点香精化合物开展研究,考察了漂移管温度对峰形和分离效果的影响。结果表明,适当优化漂移管温度有助于改善高沸点挥发性成分的响应行为,提高对香精过敏原的

识别能力。该研究提示,IMS在挥发性或半挥发性致敏物筛查中具有一定适用性。在非法添加药物筛查方面,IMS已有直接用于化妆品检测的研究报道。薛高旭等^[55]建立了固相萃取-离子迁移谱方法,用于祛痘类化妆品中14种抗菌药物的快速筛查。该方法通过样品提取和固相萃取净化降低了化妆品基质干扰,并利用IMS实现目标物的快速识别。结果表明,该方法可用于祛痘类化妆品中抗菌药物的现场初筛,且阳性样品结果与HPLC验证结果一致。此外,IMS的应用潜力还可通过技术变体和联用策略进一步拓展。例如,高场不对称波形离子迁移谱可在一定程度上提高复杂样品中痕量组分的分离选择性;IMS与质谱、色谱及高分辨质谱联用后,则有助于提升复杂基质中结构相近化合物和多组分体系的解析能力^[40]。因此,IMS及其联用技术在儿童化妆品中的潜在应用方向主要包括非法添加药物快速初筛、香精过敏原及挥发性风险物识别,以及复杂可疑样品的辅助筛查。

总体来看,IMS在儿童化妆品安全检测中的应用研究目前仍相对有限,现有应用主要集中于特定类别风险物的快速筛查。对于乳液、膏霜和彩妆等复杂基质样品,其检测效果仍较依赖前处理净化 and 条件优化,且在定量能力和结果确证方面通常难以替代色谱-质谱类方法^[55]。因此,IMS更适合作为儿童化妆品安全监管中的快速筛查和现场预警工具,其在广谱化、系统化风险检测中的应用仍需进一步研究验证。

2.7 传感器技术用于儿童化妆品风险物质检测

传感器技术为实现儿童化妆品的现场快速检测提供了新途径。电化学传感器通过测定目标物的电化学信号变化,能实现对特定防腐剂或过敏原的灵敏检测。Mok等^[56]对261份化妆品及个人护理产品样品进行了分析,其中包括40份婴幼儿护理产品,结果显示部分婴幼儿护肤品、牙膏、免洗洗手产品和沐浴产品中的总对羟基苯甲酸酯含量超过 $1.0\text{ }\mu\text{g/g}$,而甲酯、丙酯等成分在部分样品中具有较高检出率。此结果说明,儿童化妆品安全风险具有成分多样、产品类别分散和暴露途径复杂等特点,传统依赖实验室的大型仪器分析虽然具有较高准确性,但在监管时效性和现场处置能力方面仍存在一定局限。因此,发展具有高灵敏度、良好选择性和便携化优势的传感器技术,对于实现儿童化妆品中防腐剂、抗菌剂及潜在非法添加物的快速初筛具有重要意义。尤其是在基层抽检、流通环节监管和风险预警等场景中,传感器技术可作为实验室确认分析的前端补充工具,从而提升儿童化妆品安全监测的即时性与覆盖面。荧光传感器则利用特定荧光探针与目标分子结合后的信号变化实现检测,具有高灵敏度和选择性,适用于痕量有害物质的筛查。免疫传感器基于抗原-抗体特异性反应,可快速识别特定植物过敏原等成分。Adomaite等^[57]研究指出,经皮暴露于儿童化妆品中的食品来源成分可能促进致敏,并已在儿童和成人中报道了由此引发的接触性皮炎、接触性荨麻疹,甚至在后续经口摄入相应过敏原后出现全身反应的情况。进一步的产品分析表明,儿童护肤品中常见的食品来源致敏成分包括杏仁、小麦、大豆、燕麦、芝麻、乳及花生等,其中杏仁和大豆多以油脂形式存在,小麦则常以提取物或水解蛋白形式出现,燕麦多见于提取物,芝麻多以油脂形式添加。值得注意的是,宣称“天然”或“生态”的产品中,食品来源致敏成分的出现频率往往更高,提示“天然来源”并不意味着更高安全性。基于此,针对此类特定致敏成分构建免疫传感检测平台,有望实现对儿童化妆品中高风险过敏原的快速初筛与现场识别,尤其适用于复杂配方中目标成分的定向监测。该策略不仅可为监管部门开展高效筛查提供技术支持,也有助于提升产品风险预警能力,并为推动儿童化妆品中过敏原警示标识的完善提供检测依据。同时,这些传感器技术也正与微流控等平台结合,朝着集成化、便携化方向发展,有望支撑面向儿童群体的即时安全筛查^[58]。

3 发展趋势与展望

现阶段儿童化妆品的化学安全检测主要依托现行化妆品通用检测技术体系开展,尽管现有检测范围已覆盖激素类等部分药物成分,但其目标物数据库与筛查范围仍难以覆盖新型或替代性风险化学物质;同时,单一检测平台也无法对儿童化妆品中理化性质差异显著的多类风险物质实现全范围覆盖。随着LC-HRMS、GC-MS/MS及传感器阵列等技术的推广应用,高通量检测数据呈现出高维度、多源化与复杂化特征,完善相关数据库与标准化体系是提升广谱筛查能力与结果确证效能的核心基础。以往研究中,未知化合物的鉴定方法高度依赖标准品数据库与专家经验,而机器学习(ML)可作为有效辅助

工具,与质谱数据库、保留时间预测、碎片离子匹配及多变量统计分析相结合^[59],应用于非靶向筛查中的可疑化合物排序、复杂基质干扰判别、传感器响应模式识别与风险优先级评估环节。

作为面向数据的机器分析方法,机器学习主要通过计算机对采集的数据开展分析、存储与统计处理,挖掘数据内在规律以构建分析模型,进而实现对未知样本数据^[60]的推断。传统化学计量学方法已广泛应用于光谱数据的降维与分类^[50],而深度学习模型在特征自动提取与模式识别领域展现出更优异的性能。其中卷积神经网络可从高维质谱^[61]或光谱^[62]数据中自主学习潜在特征,实现对未知添加物与污染物的智能化筛查。此类算法经训练后可建立谱图指纹与化学结构之间的映射关系,进而扩大非靶向筛查的覆盖范围、提升化合物鉴定效率,为快速识别儿童化妆品中的潜在风险物质提供了新型技术路径。机器学习在儿童化妆品检测领域的监管应用仍处于初步探索阶段,其分析可靠性高度依赖高质量训练数据集、标准化样品信息、模型可解释性与跨平台验证结果,后续需在真实样品数据积累、算法模型验证与监管场景适配等方向开展更为深入的研究。

未来,儿童化妆品化学安全检测技术将朝着高灵敏度、广谱筛查、快速化、便携化与智能化方向发展:一方面,需持续推进针对乳液、膏霜、彩妆等复杂基质样品的高选择性前处理技术研发,推动 LC-MS/MS 与 LC-HRMS 的协同应用;另一方面,现场快速检测领域可重点关注集成微流控芯片与智能终端的便携式传感器平台、基于人工智能的数据分析算法,以及离子迁移谱等技术与前处理单元、小型化检测装备的耦合应用,以提升现场筛查的响应速度、设备便携性与复杂信号判读能力。同时,需强化现场快速筛查结果与实验室色谱-质谱确证分析的衔接,构建兼具快速预警、精准识别与结果确证能力的一体化检测技术体系,为儿童化妆品安全风险监测等工作提供坚实技术支撑。

参考文献:

- [1] China Food and Drug Administration. Safety and Technical Standards for Cosmetics(国家食品药品监督管理总局.化妆品安全技术规范(2025年版)). [2026-03-26]. <https://www.nmpa.gov.cn/directory/web/nmpa/images/MjAxNcTqt-doyNji6xbmrUOa4vbz+LnBkZg==.pdf>.
- [2] National Medical Products Administration. Regulations on Supervision and Management of Children's Cosmetics(国家药品监督管理局.国家药品监督管理局2021年第123号公告). [2026-03-26]. <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/gfwj/xzh-gfxwj/20211008171226187.html>.
- [3] National Medical Products Administration. No. 13 Bulletin of the National Medical Products Administration on the Detection of Prohibited Raw Materials in 18 Batches of Cosmetics. (国家药品监督管理局.国家药品监督管理局2025年第13号通告). [2026-03-26]. <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/ggtg/hzhpggtg/hzhpchjgg/hzhpcjgjj/20250414170402168.html>.
- [4] National Medical Products Administration. No. 16 Bulletin of the National Medical Products Administration on the Detection of Prohibited Raw Materials in 10 Batches of Cosmetics. (国家药品监督管理局.国家药品监督管理局2025年第16号通告). [2026-03-26]. <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/ggtg/hzhpggtg/hzhpchjgg/hzhpcjgjj/20250427162056127.html>.
- [5] National Medical Products Administration. No. 46 Bulletin of the National Medical Products Administration on the Detection of Prohibited Raw Materials in 18 Batches of Cosmetics. (国家药品监督管理局.国家药品监督管理局2025年第46号通告). [2026-03-26]. <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/ggtg/hzhpggtg/hzhpchjgg/hzhpcjgjj/20251222170549182.html>.
- [6] National Medical Products Administration. No. 2 Bulletin of the National Medical Products Administration on the Detection of Prohibited Raw Materials in 45 Batches of Cosmetics. (国家药品监督管理局.国家药品监督管理局2025年第45号通告)[2025-01-20]. <https://www.nmpa.gov.cn/xxgk/ggtg/hzhpggtg/hzhpchjgg/hzhpcjgjj/20260120173328152.html>.
- [7] Lü J, Jiang Y, Wang S, Li J J, Chen B L. *J. Diagn. Ther. Dermato-Venereol.* (吕静, 江阳, 王莎, 李佳佳, 陈保利. 皮肤性病诊疗学杂志), **2026**, 33(3): 179-185.
- [8] Liu M, Xing S X, Zhang H W, Pei X R, Sun L. *Flavour Fragrance Cosmet.* (刘敏, 邢书霞, 张慧文, 裴新荣, 孙磊. 香料香精化妆品), **2023**, (1): 18-25, 41.
- [9] Zhang H M, Zhang X H. *China Deterg. Cosmet.* (张红梅, 张小华. 日用化学品科学), **2008**, (8): 24-27.
- [10] Wu L, Zhang Z P, Ma Y, Liu X J, Feng Y L, Chen M H, Fang F. *Flavour Fragrance Cosmet.* (吴莉, 张再平, 马颖, 刘雪静, 冯有龙, 陈民辉, 方方. 香料香精化妆品), **2024**, (6): 103-112.
- [11] Pan X H, Yin S, Liu Y L, Huang H P, Zhao W. *China Surfactant Deterg. Cosmet.* (潘小红, 殷帅, 刘玉玲, 黄海萍, 赵薇. 日用化学工业(中英文)), **2023**, 53(4): 465-471.
- [12] Zhang Q Y, Huang F, Liang W W, Liao J T, Wu H Q, Luo H T. *J. Instrum. Anal.* (张秋炎, 黄芳, 梁维维, 廖均涛, 吴惠勤, 罗辉泰. 分析测试学报), **2024**, 43(5): 663-673.
- [13] Ding J J, Lü Q F, Liang Y Y, Huang S H, Zeng Z J. *Chem. Anal. Meterage*(丁佳佳, 吕琼芳, 梁郁迎, 黄少宏, 曾志坚. 化学分析计量), **2025**, 34(2): 84-88, 98.
- [14] Guo Z J, Shi B S, Zhou N L, Yu Q R, Shu J W. *Flavour Fragrance Cosmet.* (郭紫娟, 施宝顺, 周宁菱, 余祺瑞, 舒经纬. 香料香精化妆品), **2024**, (6): 90-95.

- [15] Wu X, Jin P, Liu Y, Su J. *Pharm. Clin. Res.* (吴旭, 金鹏, 刘洋, 苏晶. 药学与临床研究), **2023**, 31(4): 313–316.
- [16] Wang X J, Guo W, Chen Y X, Zheng J, Wang C, Yu M Y, Li Y Q. *J. Food Saf. Qual.* (王秀娟, 国伟, 陈云霞, 郑君, 王聪, 余梦圆, 李雅倩. 食品安全质量检测学报), **2021**, 12(19): 7667–7674.
- [17] Yang Y C, Yan J, Zhao H L B, Li J, Yu Z R, Li X Y. *J. Anal. Sci.* (杨永超, 闫婧, 赵好力宝, 李晶, 于智睿, 李学洋. 分析科学学报), **2019**, 35(1): 80–84.
- [18] Yang Y C, Yan J, Zhao H L B, Li X Y, Zhang Y, Zhou L. *China Surfactant Deterg. Cosmet.* (杨永超, 闫婧, 赵好力宝, 李学洋, 张园, 周磊. 日用化学工业), **2019**, 49(3): 203–208.
- [19] Xia L, Chen X, Xiao X, Li G. *J. Sep. Sci.*, **2018**, 41(19): 3733–3741.
- [20] Wang Y, Nie M X, Jia F, Liang W Y, Li X Y, Wen J L, Xia Z M, Tan J H. *J. Instrum. Anal.* (汪毅, 聂明霞, 贾芳, 梁文耀, 李鑫宇, 文嘉林, 夏泽敏, 谭建华. 分析测试学报), **2022**, 41(12): 1746–1750.
- [21] Xu C L, Jia Z F, Qiu H D, Liu E Y, Huang Y Y, Su X D. *China Surfactant Deterg. Cosmet.* (徐春丽, 贾振福, 邱会东, 刘恩余, 黄瑶瑶, 苏小东. 日用化学工业), **2022**, 52(5): 572–576.
- [22] Xia L, Du Y, Xiao X, Li G. *Talanta*, **2019**, 202: 580–590.
- [23] Batista É F, Augusto Ados S, Pereira-Filho E R. *Talanta*, **2016**, 150: 206–212.
- [24] Qiu F, Han F, Hong Y. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **2021**, 937: 022–023.
- [25] Tang J, Ding Y C, Fei X Q, Wu B, Qian Z J, Chen S D, Li B. *J. Instrum. Anal.* (汤娟, 丁友超, 费晓庆, 吴斌, 钱志娟, 陈山丹, 李柏. 分析测试学报), **2024**, 43(4): 649–653.
- [26] Zhao Q R, Meng Y P, Liu H, Gao R F, Wei X H, Li X S. *Guangdong Chem. Ind.* (赵倩茹, 孟雅萍, 刘骅, 高瑞芳, 卫星红, 李祥胜. 广东化工), **2024**, 51(20): 165–167.
- [27] Li R Q, Su Y, Wu Y, Liu T, Zhou M M, Guo C H, Li G N. *J. Chin. Mass Spectrom. Soc.* (李若琦, 孙莺, 武悦, 刘甜, 周敏敏, 郭朝晖, 李广宁. 质谱学报), **2026**, 47(2): 228–249.
- [28] Yin W C, Zhang W, Wu Z S, Wu J J, Wang Y C, Yin S, Cao Y. *Chem. Anal. Meterage* (尹伟成, 章为, 吴志珊, 吴姣娇, 王彦超, 殷帅, 曹艺. 化学分析计量), **2025**, 34(3): 32–43.
- [29] Dong Y L, Lin S J, Zhang W Q, Huang C F, Li L, Wang H Y. *Anal. Instrum.* (董亚蕾, 林思静, 张伟清, 黄传峰, 李莉, 王海燕. 分析仪器), **2023**, (2): 33–42.
- [30] Li Z Y, Wang F M, Niu Z Y, Luo X, Chen J H, Wang X R. *J. Anal. Sci.* (李兆永, 王凤美, 牛增元, 罗忻, 陈军辉, 王小如. 分析科学学报), **2015**, 31(2): 171–177.
- [31] He Y L, Wang Z, Yan X H. *Chin. J. Health Lab. Technol.* (何燕莉, 王自, 严小红. 中国卫生检验杂志), **2017**, 27(22): 3221–3224.
- [32] Wang F M, Li Z Y, Niu Z Y, Luo X, Chen J H. *Chin. J. Anal. Lab.* (王凤美, 李兆永, 牛增元, 罗忻, 陈军辉. 分析试验室), **2014**, 33(6): 702–705.
- [33] Wang F M, Niu Z Y, Luo X, Li Z Y, Ye X W, Zhang H W, He J C. *J. Food Saf. Qual.* (王凤美, 牛增元, 罗忻, 李兆永, 叶曦雯, 张鸿伟, 何京澄. 食品安全质量检测学报), **2014**, 5(12): 3911–3921.
- [34] Li Q, Zhang X G, Ma J M, Li R Y, Fan S F, Zhang Y. *J. Instrum. Anal.* (李强, 张晓光, 马俊美, 李润岩, 范素芳, 张岩. 分析测试学报), **2016**, 35(2): 179–184.
- [35] Niu Z Y, Luo X, Wang F M, Zhang L, Li Z Y, Chen J. *J. Chin. Mass Spectrom. Soc.* (牛增元, 罗忻, 王凤美, 张丽, 李兆永, 陈静. 质谱学报), **2016**, 37(3): 201–212.
- [36] Xi S F, Li H Y, Tan J H, Xu H H, Wang J C, Xiong X T, Zhao Y T, Xian Y P, Guo X D. *J. Chin. Mass Spectrom. Soc.* (席绍峰, 李慧勇, 谭建华, 徐汉虹, 王继才, 熊小婷, 赵田甜, 洗燕萍, 郭新东. 质谱学报), **2015**, 36(4): 341–349.
- [37] Luo H T, Huang X L, Wu H Q, Zhang Q Y, Zhu Z X, Huang F, Lin X S. *Chin. J. Anal. Chem.* (罗辉泰, 黄晓兰, 吴惠勤, 张秋炎, 朱志鑫, 黄芳, 林晓珊. 分析化学), **2017**, 45(9): 1381–1388.
- [38] Meng X, Bai H, Ma Q. *13th CCS National Conference on Analytical Chemistry*. Shaanxi: Xi'an (孟宪双, 白桦, 马强. 中国化学会第十三届全国分析化学年会. 陕西: 西安), **2018**.
- [39] Gomez-Berrada M P, Fichoux A S, Dahmoul Z, Roudot A C, Ferret P J. *Food Chem. Toxicol.*, **2017**, 103: 56–65.
- [40] Zhang C Y, Chen L, Ke Y. *China Food & Drug Adm. Mag.* (庄程元, 陈莉, 柯颖. 中国食品药品监管), **2025**, (12): 102–113.
- [41] Zheng X X, She Y B, Cai X Z, Wang Y Y, Liu Y N. *Shandong Chem. Ind.* (郑璇杏, 余溢彬, 蔡杏粧, 王彦瑶, 刘燕妮. 山东化工), **2023**, 52(4): 151–153.
- [42] Lü W, Zhang J Y, Hu B, Liu H, Huang W. *China Surfactant Deterg. Cosmet.* (吕稳, 张静雅, 胡贝, 刘红, 黄伟. 日用化学工业(中英文)), **2023**, 53(2): 239–244.
- [43] Ma Z Y. *Pop. Stand.* (马章沓. 大众标准化), **2026**, (4): 25–27.
- [44] Li M, Chen Y Y, Wen W Z, Chen L C, Hu J Q. *Fine Spec. Chem.* (李敏, 陈宇宇, 温文忠, 陈来成, 胡建强. 精细与专用化学品), **2014**, 22(9): 16–19.
- [45] Zhang X X, Xue Y, Zuo L J, Zhang Y F, Zhang G J, Liu W Q, Yang Y Q, Du L J. *Chem. Anal. Meterage*. (张鑫鑫, 薛颖, 左立娟, 张艺凡, 张谷佳, 刘文倩, 杨燕强, 杜利君. 化学分析计量), **2026**, 35(6): 139–146.

- [46] Guo X Y, Chen M, Meng X S, Lü Y G, Zhang N, Lian X H, Wang C, Gao H Y, Ma Q. *Chin. J. Chromatogr.* (郭项雨, 陈萌, 孟宪双, 吕悦广, 张楠, 连显会, 王春, 高海燕, 马强. 色谱), **2020**, 38(2): 151–161.
- [47] Luo N, Gan N. *Chin. J. Public Health Eng.* (罗娜, 甘宁. 中国卫生工程学), **2021**, 20(1): 22–24.
- [48] Pan S X. *Effects of Environmental Heavy Metals Exposure on Children's Neurodevelopment and Early Kidney Damage in An Industrial Area in Southern China*. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (潘尚霞. 南方某工业区环境重金属暴露对儿童神经和肾脏早期影响. 广州: 中国科学院大学(中国科学院广州地球化学研究所)), **2017**.
- [49] Wu L, Pang Q L, Zhang Y L, Geng Y, Chen M H. *China Surfactant Deterg. Cosmet.* (吴莉, 庞庆林, 张好琳, 耿悦, 陈民辉. 日用化学工业(中英文)), **2025**, 55(1): 98–103.
- [50] Li G P, Meng X S, Ma L, Chen M, Lian X H, Bai H, Lei H M, Ma Q. *J. Instrum. Anal.* (李国萍, 孟宪双, 马麟, 陈萌, 连显会, 白桦, 雷海民, 马强. 分析测试学报), **2019**, 38(12): 1516–1525.
- [51] Jin M, Gao G, Liu Z Y, Meng X, Wei H, Chen W, Pan H, Zhang M, Jia Q, Wang C. *Sens. Actuators B*, **2026**, 447(P2): 138883.
- [52] Sorribes-Soriano A, de la Guardia M, Esteve-Turrillas F A, Armenta S. *Anal. Chim. Acta*, **2018**, 1026: 37–50.
- [53] Zamora D, Alcalà M, Blanco M. *Anal. Chim. Acta*, **2011**, 708: 1–2.
- [54] Capitain C C, Zischka M, Sirkeci C, Weller P. *Talanta*, **2023**, 257: 124397.
- [55] Xue G X, Wang Q Y, Cao L, Sun J, Yang G J, Feng Y L, Fang F. *Chin. J. Chromatogr.* (薛高旭, 王沁怡, 曹玲, 孙晶, 杨功俊, 冯有龙, 方方. 色谱), **2022**, 40(12): 1119–1127.
- [56] Mok S, Lim J E, Lim M, Park J Y, Lee K, Moon H B. *Environ. Int.*, **2025**, 199: 109476.
- [57] Adomaite I, Vitkuvienė A, Petraitiene S, Rudzeviciene O. *Contact Dermat.*, **2020**, 83(4): 271–276.
- [58] Ye J X, Zhang J, Zhang Z L, Sha L F, Ge J J, Chen Z Z, Zhang J, Gu Z Z. *China Cosmet. Rev.* (叶洁欣, 张静, 张子霖, 沙利烽, 葛健军, 陈早早, 张娟, 顾忠泽. 中国化妆品), **2023**, (3): 104–108.
- [59] Du J, Hu B L, Liu Y Z, Wei C Y, Zhang G, Tang X J. *Spectrosc. Spectral Anal.* (杜剑, 胡炳樑, 刘永征, 卫翠玉, 张耿, 唐兴佳. 光谱学与光谱分析), **2018**, 38(5): 1514–1519.
- [60] Fulkerson B. *Technometrics*, **2012**, 37(4): 459.
- [61] Ngan H L, Turkina V, van Herwerden D, Yan H, Cai Z, Samanipour S. *Anal. Chem.*, **2025**, 97(33): 18028–18035.
- [62] Mou C N, Wang H P, Zhou P Y, Hou X X. *J. Comput. Appl.* (牟长宁, 王海鹏, 周丕宇, 侯鑫行. 计算机应用), **2021**, 41(9): 2773–2779.

(责任编辑: 丁 岩)