

基于珠宝玉石鉴定中的微量元素分析的溯源技术研究

李婷婷*, 王兴弟, 孙志旭

(德州市产品质量标准计量研究院, 德州 253000)

摘要:近年来,微量元素分析技术因其高精度和高效率成为珠宝玉石鉴定的重要手段。然而,当前技术应用仍面临数据库覆盖范围不足、数据标准化处理缺乏以及多技术结合应用受限等问题。为此,本文提出微量元素数据标准化、建立珠宝玉石溯源数据库以及优化数据库设计等创新策略,将有效提升鉴定与溯源的科学性和准确性,为珠宝玉石行业的发展提供新思路。

关键词:珠宝玉石鉴定;微量元素分析;溯源技术

0 引言

珠宝玉石作为一种珍贵的自然资源,其原产地的溯源对于珠宝玉石的交易、鉴定以及消费者信任至关重要。近年来,随着微量元素分析技术的不断发展,珠宝玉石的原产地溯源研究逐渐成为科学研究的焦点。微量元素作为珠宝玉石的重要组成部分,其种类、含量以及分布特征可以反映出不同产地珠宝玉石的独特性质。然而,目前基于微量元素分析的珠宝玉石溯源技术仍面临一些挑战,如检测准确性不高、样品库构建不足等问题^[1]。因此,本文旨在探索一种高效、准确的珠宝玉石原产地溯源方法,以期对珠宝玉石交易市场提供科学依据。

1 珠宝玉石鉴定中的微量元素分析方法

1.1 物理特性测试

常规宝石测试包括光学和力学性质的分析,是鉴定珠宝玉石的重要基础方法。通过折射率、双折射率、密度等定量参数,可以对宝石的成分和结构进行初步评估^[2],和田玉的鉴定项目见图1。而祖母绿中的Fe、Cr、V等微量元素对折射率的影响使其产地表现出一定的规律性,哥伦比亚Coscuez矿区的祖母绿折射率较Chivor矿区稍高,体现了不同成矿环境对元素组成的影响^[3]。尽管常规方法可作为原产地溯源的辅助指标,但因复杂的成矿环境和多样的矿物成分,其局限性也较明显。

1.2 微观形态表征

微量元素对宝玉石包裹体的微观形态表征具有显著影响,不同微量元素的种类和含量会影响包裹体内矿物的晶体结构、形态和生长模式^[4]。例如,铁、钛等元素可导致包裹体边界的不规则形状或晶面生长缺陷,而锂、铝等元素则可能影响液相

包裹体的形态稳定性。此外,微量元素在包裹体中以不同形式存在,如置换或填隙,改变包裹体的光学性质或颜色特征。因此,通过分析包裹体中微量元素的分布和浓度,可以揭示形成环境中温度、压力及成矿流体化学特性的差异,进一步提高宝玉石产地溯源的准确性。

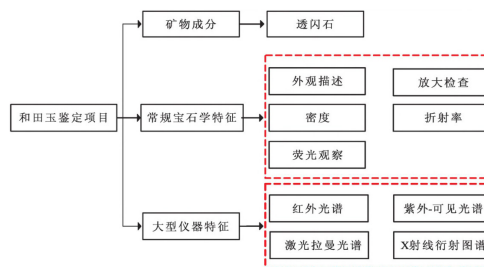


图1 和田玉的鉴定项目

通过显微镜下观察珠宝玉石的包裹体特征,能反映其成矿环境和成矿流体的特性。这种方法被广泛应用于产地溯源,特别是分析包裹体的形态、矿物组合和成分^[5]。为提高鉴别的准确性,现代分析技术可以对包裹体的化学成分进行深入解析,与数据库对比后辅助产地判断。镜下观察对于净度高或粒径小的宝玉石可能有限制,此时结合谱学或化学分析成为必要补充^[6]。

1.3 光谱学分析

1.3.1 LA-ICP-MS(激光剥蚀电感耦合等离子体质谱)技术

LA-ICP-MS由激光剥蚀系统、ICP离子源、质量分析器、真空系统、检测器及数据处理系统组成,见图2。LA-ICP-MS具有高灵敏度、无损或微损、广泛的元素覆盖范围及高空间分辨率的特点,其灵敏度可达纳克至皮克级,适用于珠宝玉石中痕量和微量元素的检测^[7-8]。利用短波长激光(如193 nm),显著降低了分馏效应,提高分析精度至1%~10%,使数据更加稳定可靠。技术

* 通信作者:李婷婷,工程师,研究方向为珠宝首饰、贵金属、建材、机械产品检验检测。E-mail: 191456413@qq.com

的微区分析能力可在微米级范围内获取样品区域的成分信息, 为珠宝玉石产地溯源、真伪鉴定和优化处理的识别提供重要依据。该技术对样品的破坏性极小, 是检测贵重样品的理想方法, 已被广泛用于珠宝玉石、贵金属和地质材料的成分分析。通过检测翡翠中微量元素 Cr、Fe 和 Mn 的含量和分布, 可区分缅甸和危地马拉产地; 在红宝石研究中, 通过分析 Ti、V 和 Ga 等元素的比例, 可有效区分莫桑比克和泰国产地^[9]。

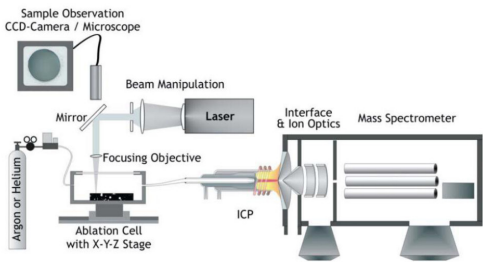


图2 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪基本组成

1.3.2 X 射线荧光光谱法(XRF)

X 射线荧光光谱法(XRF)是一种基于 X 射线激发物质产生荧光信号进行元素分析的技术, 其装置主要包括 X 射线源模块(见图3)、样品模块、探测器模块、多道脉冲幅度分析模块和主控模块。XRF 技术利用不同元素的原子在 X 射线激发下产生独特的荧光信号, 这些信号的能量与元素种类相关, 强度与元素含量相关^[9]。XRF 技术以其非破坏性、高灵敏度和广泛的元素覆盖范围广受青睐, 其非接触式分析对贵重样品的破坏极小, 可在短时间内提供从钠(Na)到铀(U)等元素的定量信息。XRF 能分析固体、液体及粉末状样品, 此外, 还具备较强的空间分辨能力, 尤其在微区分析中表现出色, 可以识别样品局部区域的成分, 具有极高的适用性。手持式 XRF 分析仪因其便携性, 被广泛用于地质勘探、冶金分析、环境检测和珠宝鉴定等领域^[10]。

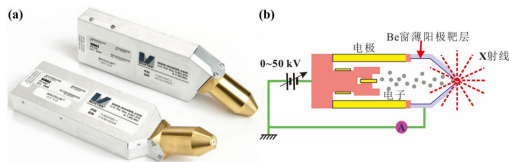


图3 X 射线源模块(a)实物图和示意图(b)

2 微量元素分析与溯源技术的挑战

2.1 数据库覆盖范围不足

珠宝玉石微量元素溯源技术的准确性和可信度依赖于广泛且高质量的指纹数据库^[11]。然而, 目前全球范围内的相关数据库覆盖范围有限, 难以满足溯源需求。一方面, 不同产地的珠宝玉石样品采集并未形成系统化, 许多重要矿区尚未进行详细研究, 导致数据库缺乏代表性和全面性^[12]。另一方面, 现有数据库中的数据多为区域性或实验室内数据, 无法满足跨区域或国际化溯源的要求^[13]。由于各实验室采用的检测技术和参数不

统一, 数据之间的互操作性较差, 数据库覆盖范围不足不仅限制了溯源的应用广度, 也对新技术的推广和验证形成阻碍。

2.2 样品数据缺乏标准化处理

在珠宝玉石微量元素分析与溯源过程中, 样品数据的标准化处理是提高结果准确性的重要环节。然而, 当前行业内数据标准化水平普遍较低, 给研究和应用带来较大挑战。一是不同实验室在样品制备、分析流程以及数据记录方式上存在显著差异, 导致同一珠宝玉石样品在不同实验室中可能产生不一致的检测结果^[14]。二是样品数据的采集和存储往往缺乏统一的格式和命名规范, 加上部分研究中未能充分考虑矿物内部的天然变化性, 分析结果可能具有较大的偏差^[15]。

2.3 多技术结合应用的局限性

微量元素分析与溯源通常需要多种技术手段的结合, 但不同技术之间的适用范围和灵敏度存在差异, 例如 LA-ICP-MS 可以提供高分辨率的元素数据, 但检测成本高且可能破坏样品, 而 XRF 虽为非破坏性技术, 但在微量元素检测的灵敏度方面有所不足。技术整合过程中, 数据的融合和互补性分析尚未完全实现, 一些复杂矿物样品中存在的冲突问题难以解决^[16]。

3 微量元素分析与溯源技术结合的创新应用

3.1 微量元素数据标准化

微量元素数据的标准化处理是珠宝玉石溯源技术的重要基础。以天然宝石为例, 某些稀有元素(如铬和铁)含量的差异可用来区分产地。标准化的过程需要明确这些元素的检测范围、单位和分析方法, 例如使用 LA-ICP-MS 进行微量元素的高灵敏度检测, 并对不同实验室间的数据误差进行校正^[17]。此外, 对于玉石的微观结构分析, 采用显微拉曼光谱技术需规定光谱扫描范围及分辨率, 以确保不同玉石样本在同等条件下进行对比。人工宝石的标准化则更多涉及其生产工艺特征的提取与分析。比如, 某些人工合成宝石中元素残留或晶体缺陷可用来区分人工与天然成因。这些数据的标准化处理要求统一样品前处理流程和显微形态分析方法, 以降低人为干扰因素对结论的影响。在微量元素数据的标准化过程中, 需制定行业内一致的技术规范, 并通过国际化的标准制定机构(如国际标准化组织或国际珠宝商联合会)加以推广, 确保珠宝玉石的鉴定与溯源具有全球认可的科学依据^[18]。

3.2 建立珠宝玉石溯源数据库

数据库的建立需覆盖全球主要产地, 收录大量已知产地的高置信度样本数据。例如, 缅甸翡翠和巴西祖母绿在微量元素和同位素组成上存在显著差异。数据库应详细记录样本的矿物组成、微量元素含量、同位素比值以及产地相关的地质环境信息, 这些信息可以为未知样品的溯源提供可靠参照。对于天然玉石, 还需增加裂隙填充物和热液作用痕迹等微观特征参数,

以提高数据库的适用性和多样性^[19]。针对人工宝石及改色玉石,数据库应包括其典型生产工艺标志及微观形态特征。例如,实验室培育的钻石在光致发光光谱中表现出的独特特征,可以用作鉴别其来源的重要数据。通过将此类信息纳入数据库,不仅有助于区分天然与人工样品,还可为行业监管提供支持。数据库建设过程中,还需设计合理的更新机制,将次级置信度数据逐步转化为高置信度数据,实现数据库的动态迭代^[20]。此外,为提高数据库的普适性,需引入智能化数据管理系统,实现跨地区、多机构的数据共享与交互。

3.3 多技术整合的优化与数据融合

为解决不同技术在灵敏度和适用范围上的差异,建议构建跨技术的标准化数据处理框架。例如,可以以 LA-ICP-MS 的高分辨率数据为基准,利用校准算法对 XRF 数据进行补偿,从而弥补其灵敏度不足的问题。此外,通过机器学习技术优化数据拟合,能够进一步增强不同技术间的互补性,同时提高分析结果的精度。对于非破坏性技术(如 XRF),改进其探测器材料或增强激发源性能,结合多次扫描叠加策略,也可以有效提升其检测微量元素的能力,在保持样品完整性的同时获取更多高质量数据^[21]。多维数据融合和冲突解决算法可应对复杂矿物样品中数据冲突的问题,通过引入贝叶斯推理或深度学习模型,综合不同技术生成的数据,能够评估结果间的相关性与权重,最大程度减少冲突并提升分析结论的可靠性。推动便携式与自动化检测设备的开发,将 LA-ICP-MS 与 XRF 的优势集成到一体化装置中,不仅降低了检测成本,还提高了现场分析的便捷性。

4 结束语

珠宝玉石微量元素分析与溯源技术作为科学鉴定与价值评估的重要工具,在行业发展中具有不可替代的作用。本文围绕珠宝玉石鉴定中的微量元素分析与溯源技术展开研究,深入探讨了物理特性测试、微观形态表征和光谱学分析等方法的应用,分析了当前技术面临的挑战,并提出了针对性创新解决方案,如微量元素数据标准化、珠宝玉石溯源数据库的建立以及多技术整合的优化与数据融合,为提升微量元素分析与溯源的科学性与准确性提供了新的思路。未来,随着高精度无损检测技术、大数据处理与人工智能技术的持续发展,珠宝玉石微量元素分析与溯源有望在效率和可靠性方面实现更大突破。

参考文献

- [1] 黄博峻,王璇,朱勇,等. LA-ICP-MS法测定高含量银饰品中的杂质元素[J]. 贵金属,2021,42(04):71-75,86.
- [2] 邱恒恒,李荣华. 光谱分析技术在珠宝检测机构中的应用评述[J]. 中国检验检测,2021,29(02):27-28,13.

- [3] 李婷婷. 珠宝检测中现代测试技术的应用[J]. 区域治理,2018,(19):170.
- [4] 夏欢,杨明星. 基于区块链技术构建湖北竹山绿松石溯源体系研究[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文),2021,23(02):46-52.
- [5] 仲源,沈锡田,张志清,等. 机器学习在橄榄石产地溯源中的应用[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文),2023,25(06):65-75.
- [6] 陈程,闫冰,尹作为,等. 基于高光谱成像技术的“达碧兹”电气石光谱与可视化研究[J]. 光谱学与光谱分析,2024,44(12):3429-3434.
- [7] 赵思艺,许博. 坦桑尼亚、缅甸和斯里兰卡宝石级绿色柱晶石的宝石矿物学特征[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文),2024,26(z1):96-98.
- [8] 邓子旭,骆郑臣,丘志力,等. 高品质危地马拉绿色翡翠的矿物学特征[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文),2024,26(z1):141-143.
- [9] 许博. 大数据背景下名贵宝石的产地鉴别[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文),2024,26(z1):61-65.
- [10] 王雪峰,何雪梅,周文博. “云南绿松石”的鉴定、颜色成因与宝石学特征研究[J]. 中国宝玉石,2023,(06):18-26.
- [11] 张誉慧,丁永康,裴景成,等. 巴西单晶蔷薇辉石的化学成分及光谱学表征[J]. 光谱学与光谱分析,2023,43(11):3504-3508.
- [12] 余炼钢,刘衍宇,陈全莉. “缅绿料”石英质玉的宝石矿物学及谱学表征[J]. 光谱学与光谱分析,2023,43(08):2543-2549.
- [13] 陈超洋,刘翠红,李志彬,等. 宝石级硬水铝石的变色成因研究[J]. 光谱学与光谱分析,2023,43(08):2557-2562.
- [14] 王敏,施加辛. 天然翡翠与染色翡翠鉴定方法研究[J]. 云南地质,2020,39(02):307-312.
- [15] 周景冬. X荧光光谱仪在珠宝玉石检测中的应用[J]. 中华手工,2022,(01):87-89.
- [16] 李辉,王璇,朱勇,等. 珠宝首饰现代分析测试关键技术研究及应用[Z]. 重庆:重庆市计量质量检测研究院,2020.
- [17] 王怡梦,陈婵,陈能香,等. 微量元素含量测定在珍珠鉴定中的应用[J]. 超硬材料工程,2023,35(05):56-60.
- [18] 胡艳秋,蒙彩珍,宁珮莹,等. 含铅元素的铍扩散处理红宝石、蓝宝石的特征研究[J]. 中国宝玉石,2024,(01):10-16.
- [19] 李鹏,王丛先,曲直,等. X射线荧光光谱分析仪在宝石鉴定中的应用[J]. 品牌与标准化,2023,(03):92-94.
- [20] 刘晋华,张俭,严雪俊,等. 多米尼加与墨西哥蓝珀光致发光-拉曼光谱及微量元素赋存特征研究[J]. 岩矿测试,2022,41(02):272-280.
- [21] 刘佳,罗恒,苏越,等. 染色透闪石玉仿墨玉的宝石学特征及其鉴定方法研究[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文),2024,26(01):22-36.