

透闪石玉研究中LA-ICP-MS技术的应用现状与展望

王梅蓉

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年5月14日; 录用日期: 2026年6月17日; 发布日期: 2026年6月26日

摘要

激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)技术凭借原位微区、近无损、高灵敏度及多元素同步检测的优势,有效克服了透闪石玉矿物组成复杂、副矿物颗粒细小及珍贵样品难以破坏性测试等分析瓶颈,已成为透闪石玉研究的核心手段。本文首先阐述了该技术的仪器原理及其在分析点位精准选择、基体效应校正方面的应用难点与解决方案。在此基础上,从三大研究方向综述典型应用:成矿年代与矿床成因研究中,利用锆石U-Pb定年结合CL/BSE成像,成功约束了从古元古代至晚白垩世的多期成玉事件,建立了区域变质型、镁质砂卡岩型等成因模型;产地鉴别与古玉溯源研究中,基于微量元素及稀土元素地球化学指纹,结合多元统计与机器学习判别模型,实现了多产地玉料的精准区分,并为三星堆、金沙、齐家文化、徐州楚王陵等重要遗址出土古玉的玉料来源提供了科学证据;颜色成因研究中,通过定量测定不同颜色区域Fe、Mn、Cr、V等痕量致色元素含量,联合紫外-可见吸收光谱、光致发光光谱及电子顺磁共振等多种谱学手段,揭示了Mn²⁺致灰紫色、Cr³⁺致翠绿色、Fe³⁺协同Ti⁴⁺致黄色等致色机制。

关键词

LA-ICP-MS, 透闪石玉, 成矿年代, 古玉溯源, 颜色成因

The Application Status and Prospect of LA-ICP-MS Technology in the Study of Tremolite Jade

Meirong Wang

School of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: May 14, 2026; accepted: June 17, 2026; published: June 26, 2026

Abstract

LA-ICP-MS, with its advantages of *in-situ* micro-area analysis, near-non-destructiveness, high sensitivity and simultaneous multi-element detection, has effectively overcome the analytical bottlenecks in tremolite jade research caused by complex mineral composition, fine-grained accessory minerals, and the difficulty of performing destructive tests on precious samples. It has thus become a core analytical tool in the study of tremolite jade. This paper first describes the instrumental principle of LA-ICP-MS, as well as the challenges and corresponding solutions in precise selection of analytical spots and matrix effect correction. On this basis, typical applications are reviewed from three major research directions. In the study of mineralization age and deposit genesis, zircon U-Pb dating combined with CL/BSE imaging has successfully constrained multiple tremolite jade-forming events from the Paleoproterozoic to the Late Cretaceous, establishing genetic models such as the regional metamorphic type and the magnesian skarn type. In the study of provenance identification and ancient tremolite jade tracing, based on trace element and rare earth element geochemical fingerprints combined with multivariate statistical and machine learning discriminant models, accurate discrimination of tremolite jade materials from multiple provenances has been achieved, providing scientific evidence for the source of tremolite jade materials unearthed from important archaeological sites such as Sanxingdui, Jinsha, the Qijia Culture, and the Chu King's Mausoleum in Xuzhou. In the study of color genesis, through quantitative determination of trace chromogenic elements (e.g., Fe, Mn, Cr, V) in different color zones and combination with various spectroscopic techniques including UV-Vis absorption spectroscopy, photoluminescence spectroscopy, and electron paramagnetic resonance, the color-causing mechanisms have been revealed, including the gray-purple color induced by Mn^{2+} , the emerald-green color induced by Cr^{3+} , and the yellow color induced by Fe^{3+} - Ti^{4+} synergistic effect.

Keywords

LA-ICP-MS, Tremolite Jade, Mineralization Age, Provenance Tracing of Ancient Tremolite Jade, Color Genesis

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

透闪石玉，即“软玉”，从新石器时代的玉器文明初现，到商周以降的礼玉制度成熟，软玉始终深嵌于中华文明的物质与精神脉络之中。软玉在全球范围内分布广泛。中国境内，传统软玉产区以新疆和田、青海格尔木、辽宁岫岩及江苏溧阳等地为代表；近年来，贵州罗甸、四川龙溪、广西大化等地也陆续探明有透闪石玉矿床。境外重要产地则包括俄罗斯贝加尔湖地区、韩国春川和加拿大不列颠哥伦比亚等地。软玉颜色种类丰富，依据国家标准《和田玉 鉴定与分类》(GB/T 38821—2020)，将软玉按颜色划分为白玉、青白玉、青玉、碧玉、墨玉、糖玉及黄玉等亚类(和田玉) [1]。

近年来，随着矿床学、考古学与宝石学交叉研究不断深入，现代透闪石玉研究内容已高度聚焦于三大核心科学问题：其一为矿床成因，侧重成矿物质来源、成矿流体演化与成矿时代厘定；其二为古玉溯源，主要依托微量元素地球化学指纹、同位素(如 Sr-Nd-Hf)示踪及无损光谱技术，开展古玉产地的精准判别与早期文化交流路线的重建；其三为颜色成因，着重解析过渡金属赋存状态、价态、含量与颜色之间

的定量关系。

传统分析方法存在明显局限, 主量元素、微量元素和同位素测试分析依赖溶液雾化进样的电感耦合等离子体质谱(ICP-MS), 这类方法要求将样品彻底消解, 对珍贵文物或宝石标本构成不可逆的损伤。而电子探针(EPMA)虽具有微区分析的能力, 但其检出限较高, 难以胜任超痕量元素的精确测定。因此激光剥蚀技术与单接收电感耦合等离子体质谱法联用(LA-ICP-MS)技术以其原位、实时、快速、宏观无损的分析优势及其高空间分辨率、高灵敏度、多元素同时测定并能提供同位素比值信息等优点, 为软玉研究带来了方法论层面的突破[2]。

2. LA-ICP-MS 技术原理与透闪石玉研究的适用性

2.1. 仪器组成及工作原理

激光剥蚀电感耦合等离子体质谱是一种联用仪器, 简称 LA-ICP-MS, 是将单接收(ICP-MS)与激光取样相结合而形成的一种高灵敏度的多元素快速分析技术。它可以对固体样品直接进行整体分析, 是一种功能强大的微区痕量原位分析手段。工作流程可概况为:

- (1) 激光光子以微米级束斑聚焦于样品表面, 在极短时间内产生高温(可达上万度), 使微区样品瞬间熔融、蒸发、爆破, 形成由微粒和蒸气组成的气溶胶;
- (2) 气溶胶通过载气(Ar 或 He)传输至电感耦合等离子体, 高温使其完全电离;
- (3) 离子按照质荷比进行分离, 由检测器接收并转换为信号, 最终获得样品的元素含量或同位素比值信息[3] [4]。

2.2. LA-ICP-MS 在透闪石玉研究中的应用难点及其解决方案

透闪石玉矿物组成的不均匀性以及古玉、馆藏珍品与稀有标本的珍贵性, 给原位微区分析带来了一系列技术挑战。本节从分析点位选择、基体效应校正两个维度, 系统阐述上述挑战的成因及当前学术界的最佳实践方案。

2.2.1. 分析点位精准选择

透闪石玉是一种以透闪石 - 阳起石为主要矿物成分的隐晶质集合体, 常含少量透辉石、绿泥石、蛇纹石、磁铁矿、石墨、磷灰石等副矿物, 矿物组成复杂[5]。不同矿物相之间的化学组成差异显著, 激光剥蚀微区的选择直接决定分析结果的代表性。因此, 在 LA-ICP-MS 测试分析前, 可以借助以下高分辨率显微成像技术对目标区域进行精细表征, 以指导剥蚀点位选择:

- (1) 背散射电子成像(BSE): 基于平均原子序数差异, BSE 图像可清晰区分主晶透闪石(灰阶中等)与高原子序数杂质(如黄铁矿、磁铁矿, 呈亮白色)或低原子序数杂质(如方解石、石墨, 呈暗黑色)。分析时应优先选择灰阶均匀、无亮暗斑点的区域。
- (2) 阴极发光成像(CL): 虽然透闪石本身的 CL 信号较弱, 但 CL 能有效揭示不同世代的透闪石生长环带及后期热液脉体的充填痕迹, 有助于避开交代残留或蚀变区域。

2.2.2. 基体效应校正与标准物质选择

LA-ICP-MS 的剥蚀、气溶胶传输及电离效率均强烈依赖于样品基体。使用非基体匹配的标准物质(如 NIST SRM 610 玻璃标样)校正硅酸盐矿物(如透闪石)时, 会产生显著的元素分馏效应及基体依赖性偏差, 尤其对于轻元素(Li、B)和高能元素(如 Th、U)影响更为明显。现阶段常采用的方案包括:

- (1) 首选基体匹配标准物质: 目前通常采用 USGS 系列玄武岩玻璃(如 BCR-2G、BHVO-2G)或天然角闪石单晶标样。

(2) 外标 - 内标法校正：这是目前最通用的定量策略。以基体匹配标样为外标，同时选择样品中含量恒定的元素作为内标，以校正仪器漂移及剥蚀效率差异。对于透闪石，通常以化学计量式中含量稳定的 Si (约 59% SiO₂) 或 Ca (约 13% CaO) 为内标。具体操作中，可先使用电子探针(EPMA)准确测定样品主量元素(尤其是 Si)，然后在 LA-ICP-MS 数据处理时将该值固定为内标。

(3) 二级标准物质验证：每批次样品分析中，应插入一个或多个二级标准物质(如天然橄榄石、角闪石标样或 BCR-2G)作为未知样品测试，以监控数据质量。仅当二级标样的测定值与推荐值在误差范围内一致时，样品数据方可采纳。

3. LA-ICP-MS 在透闪石玉研究中的典型应用

本节将以当前透闪石玉研究中的三大核心课题为案例，分别从微区分析点位的精准遴选、微区无损检测及痕量元素准确定量三个技术层面，对第 1.2 节所提出的难点及其解决方案的实际应用进行系统阐述。

3.1. 成矿年代与矿床成因研究

在现代透闪石玉矿床成因研究中，成矿年代的精准厘定是关键环节。目前，成矿年代研究主要依赖于锆石、榍石等共生副矿物的高精度微区 U-Pb 定年，并辅以透闪石单矿物的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 定年。其中，利用 LA-ICP-MS 做锆石 U-Pb 定年已成为约束成矿时代、揭示多阶段成矿过程及厘定矿床成因类型的核心技术手段。对透闪石玉中锆石或榍石开展微区原位分析时，需先通过机械破碎与矿物分选从玉石中分离目标矿物颗粒(如锆石)，进而制成矿物靶；在此基础上，结合 BSE 或 CL 成像技术，指导微区分析点位的精准优选。

综合近年研究成果：黄勇[6]通过 LA-ICP-MS 定年发现贵州罗甸玉存在晚二叠世(~255 Ma)与晚白垩世(~86 Ma)两期岩浆事件，早期基性岩浆奠定交代岩基础，晚期热液叠加方形成高品质软玉，修正了单一期次成矿的认识；安雯静等[7]对吉林“磐龙墨玉”获得原岩岩浆锆石年龄(331.3 ± 2.3 Ma)与热液相关年龄(228.1 ± 0.7 Ma)，由此建立“沉积 - 区域变质 - 热液交代”多阶段演化模型；邹好[8]对辽宁桑皮峪玉获得变质锆石年龄 1851 ± 7 Ma 与榍石年龄 1848 ± 17 Ma，结合 CL 图像及低 Th/U 比值(0.03~0.07)有效排除继承锆石干扰，将其成因归为古元古代区域变质型，并证实岫岩地区存在 1.85 Ga 与 220 Ma 两期成玉事件；郑奋等[9]对岫岩河磨玉获得岩浆锆石年龄 220.8 ± 7.6 Ma，结合氢氧同位素(δ¹⁸O = 8.00‰~10.60‰, δD = -94.95‰~-75.20‰)证明成矿流体以岩浆水为主，否定其来源于原生老玉的传统认识，确立为独立成矿的大理岩型矿床；张勇等[10]对新疆奥米夏玉获得三个年龄谱(324~526 Ma)，以 411~489 Ma 为成矿上限，揭示多期热液活动，结合低 Fe、Ni、Cr 及 Eu 负异常论证其为镁质矽卡岩型；雷成等[11]等对东昆仑小灶火青玉中与成矿同生的热液锆石直接定年获得 416.4 ± 1.5 Ma，与围岩黑云二长花岗岩年龄(415.8 ± 1.7 Ma)高度一致，首次证明岩浆侵入与软玉成矿为同构造事件，且围岩锆石 ε_{Hf}(t)正值(1.5~6.6)指示新生地壳物质部分熔融源区；徐立国和王时麒[12]通过辉绿岩围岩锆石定年间接约束广西大化玉成矿年龄约 260 Ma，综合多维度数据将其确定为“层控性接触交代型岩浆热液矿床”；张勇等[13]对青海纳赤台软玉获得约 240 ± 3 Ma 的成矿年龄，排除多期继承锆石干扰，建立“原岩沉积 - 区域变质 - 热液交代”模型。

上述研究共同表明，锆石 U-Pb 定年不仅为透闪石玉提供了成矿时代上限约束，更通过区分继承、变质与岩浆锆石、识别多期年龄谱系、联合 Hf 同位素及流体地球化学指标，系统约束了成矿物质来源、流体性质及构造背景。

3.2. 产地鉴别与古玉溯源研究

研究古玉玉料的来源，对于探究中国古代先民的活动区域、开采加工与运输能力等区域科技生产力

状况,以及物品交换模式与贸易网络,均具有关键的指示意义。该研究因此被列为 21 世纪东亚考古的核心课题之一[14][15]。然而,古玉样品极为珍贵,难以采用破坏性测试手段。LA-ICP-MS 技术的引入,从根本上解决了古玉溯源研究中“无损”与“原位”难以兼得的技术瓶颈,将玉料产地研究从以经验为主的矿物学鉴定,推进至基于微量元素与同位素地球化学指纹的精准溯源新阶段。

综合前人研究文献可知,学者们多利用 ICP-MS 对多产地现代玉料进行分析,不同产地透闪石玉的稀土元素配分模式往往具有显著的差异性,这为产地判别提供了直观的地球化学指纹。本文以青海大灶火、广西大化、贵州罗甸三地透闪石玉为例,具体说明稀土元素配分模式对产地鉴别的应用。如图 1 所示,三产地稀土元素球粒陨石标准化配分曲线呈现明显不同的形态特征:广西大化透闪石玉样品表现为轻微的轻稀土元素富集,重稀土元素相对平坦,二者分异不明显;贵州罗甸透闪石玉样品轻、重稀土分异明显,轻稀土富集;大灶火透闪石玉样品具左倾的重稀土元素富集模式;此外,贵州罗甸和广西大化透闪石玉均显示 Ce 负异常,而青海大灶火透闪石玉显示 Ce 正异常。因此,稀土元素球粒陨石标准化配分模式的差异可作为透闪石玉产地判别的重要地球化学指纹依据。

近年来,随着人工智能的快速发展,部分学者进一步利用化学成分数据库通过机器学习构建多元判别模型。崔中良等[16]基于 5 个产地 68 件软玉的 14 种稀土元素数据,发现多元 Logistic 判别与 MLP 神经网络模型的回代准确率达 100%,证实稀土元素可有效用于软玉产地溯源。苏越[17]利用新疆、青海、辽宁等多产地样品的微量元素及稀土元素数据,建立地球化学指纹,综合运用主成分分析、Fisher 判别、神经网络等化学计量学方法,构建了高准确率的产地判别模型。

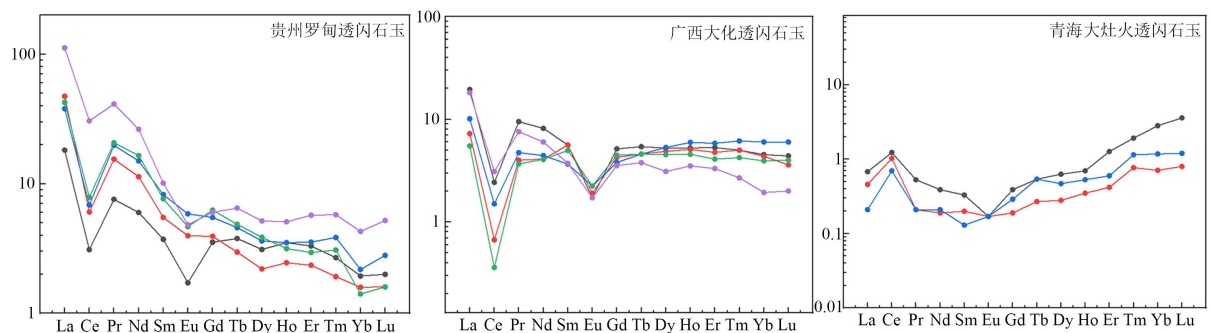


Figure 1. Chondrite-normalized REE distribution patterns of tremolite jade from Luodian (Guizhou), Dahua (Guangxi), and Dazaohuo (Qinghai). ICP-MS data sources: Luodian tremolite jade from Guizhou (Zhang Yadong [18], 2015), Dahua tremolite jade from Guangxi (Lan Ye [19], 2022), Dazaohuo tremolite jade from Qinghai (Yu Haiyan *et al.* [20], 2018).

图 1. 贵州罗甸、广西大化和青海大灶火透闪石玉稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图。ICP-MS 数据来源: 贵州罗甸透闪石(张亚东[18], 2015), 广西大化透闪石玉(蓝叶[19], 2022), 青海大灶火透闪石玉(于海燕等[20], 2018)

基于前人根据 ICP-MS 分析建立的现代玉料数据库、激光剥蚀系统(LA)与 ICP-MS 的联用(即 LA-ICP-MS),以及人工智能判别模型的发展,出土古玉溯源研究取得一系列成果。张钰岩等[21]利用 LA-ICP-MS 对甘肃马衔山软玉进行分析,获得高 Th/U、低 Cu,稀土总量低且配分模式呈“海鸥式”独特的化学指纹,显著区别于新疆、青海、辽宁等产地,为齐家文化玉器溯源提供了关键依据。谷娴子等[22]利用 LA-ICP-MS 对徐州狮子山楚王陵出土玉片进行分析,稀土配分特征排除了辽宁岫岩、四川龙溪、河南栾川等产地;低 Cr、Ni、Co 含量指示玉料来自镁质大理岩型矿床,排除了新疆玛纳斯软玉;低 Sr 含量与江苏溧阳小梅岭高 Sr 特征区分;结合多技术手段,最终认定玉料主要来自新疆和田地区,表明西汉早期和田软玉已成为楚王宫廷主流玉料。苏越[17]基于元素地球化学建立的产地溯源模型应用于龙王山墓地、穆林头遗址、曾侯乙墓及熊家冢冢陪葬墓等,揭示了不同遗址玉料来源的多样性:龙王山墓地玉料与辽东成矿带相关;穆林头遗址玉料类型多样(透闪石玉、阳起石玉、萤石、云母质玉等),呈现多源性;曾侯乙

墓玉料主要指向西北地区(新疆及甘肃);熊家冢陪葬墓玉料与敦煌-北山及中祁连成矿带关系密切。

综上所述,基于 LA-(MC)-ICP-MS 的微量元素与稀土元素分析已发展成为透闪石玉产地溯源的核心技术手段。通过建立多产地现代玉料地球化学指纹数据库,并结合多元统计与机器学习判别模型,该方法在考古出土古玉来源研究中取得了显著成效,为揭示古代资源流通网络与文化交流提供了重要科学证据。

3.3. 微量元素与颜色成因研究

软玉颜色通常由多种过渡金属离子的协同作用产生,但这些致色元素在隐晶质集合体中含量极低且分布不均。LA-ICP-MS 技术凭借微区原位、近无损、高灵敏度及多元素同步检测等优势,可精准定位特定颜色区域,测定低至 $\mu\text{g/g}$ 级甚至更低的痕量致色元素(Fe、Mn、Cr、V、Ni、Cu、Ti 等),从而有效克服上述分析难题。

基于该技术,近年来学者们在透闪石玉颜色成因研究中取得了一系列量化成果:罗泽敏等[23]利用 LA-ICP-MS 对透闪石玉不同颜色深度区域(浅色与深色)进行微区原位微量元素定量分析,排除了 Fe、Cr、V 等元素的致色贡献,指出 Mn 元素含量随紫色加深呈明显递增规律,结合光致发光光谱(PL)和电子顺磁共振(EPR)等谱学手段验证,最终确认 Mn^{2+} 是导致青海三岔河灰紫色软玉呈现紫色调的主要致色离子。刘虹靓等[24]利用 LA-ICP-MS 对渐变色调的翠青玉样品进行微区原位微量元素定量分析,指出 Cr^{3+} 离子的质量分数与翠绿色的深浅程度呈严格的正相关关系,结合紫外-可见吸收光谱证实 Cr^{3+} 是翠青玉的主导致色离子,并据此推断 Cr 来源于成矿母体中的基性岩浆岩,为揭示翠青玉颜色成因及物质来源提供了关键地球化学依据。杜杉杉等[25]通过挑选颜色具有深浅变化特征的透闪石玉切块样品,利用 LA-ICP-MS 测定其微量元素组成,结合红外光谱确认主要矿物为透闪石;进而定量分析 Fe、Mn、Ti 等元素含量,并结合紫外-可见吸收光谱,揭示了 Fe^{3+} 为主导致色元素、 Mn^{2+} 抑制黄绿色、Ti 元素辅助影响的三元协同致色机制。韩文等[26]选取颜色不均匀、具有从黄白到黄再到黄褐色渐变特征的样品,针对三个颜色深度不同的区域进行 LA-ICP-MS 点测,定量测定 Fe 元素含量。指出 Fe 含量与黄褐色调呈明显正相关,颜色越深 Fe 含量越高;结合 X 射线粉晶衍射、拉曼光谱及高分辨率透射电子显微镜进一步确认,Fe 元素以纳米级针铁矿的云状集合体形式赋存于透闪石颗粒间及微裂隙中,是糖玉黄褐色形成的主要矿物载体,少量金红石仅贡献部分颜色。

综上,LA-ICP-MS 微区原位分析技术与多光谱方法的联合应用,为定量解析软玉颜色成因、识别主控致色离子及建立多元素协同致色模型提供了关键地球化学证据。

4. 总结与展望

LA-ICP-MS 技术凭借其原位微区、近无损、高灵敏度及多元素与同位素同步检测的独特优势,已成为透闪石玉成矿年代与矿床成因、产地鉴别与古玉溯源、微量元素与颜色成因研究领域的重要分析方法。基于上述认识,现对 LA-ICP-MS 技术在透闪石玉研究中的应用现状作出如下总结与展望:

(1) 成矿年代与矿床成因研究:目前主要采用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年法,通过精确约束成矿年龄并结合区域地质背景,可有效重建成矿过程。需要指出的是,该方法仍需对样品进行破坏性前处理(如破碎分选或制靶)。值得注意的是,当前广泛使用的电子探针 CL 成像主要记录锆石黑白结构,而 Schertl 和李旭平[27]指出,彩色阴极发光技术可在数秒内识别矿物内部的彩色环带生长特征,显著提升锆石(及榍石等副矿物)内部结构的分辨率与判识效率,可作为上述定年研究中精准选取剥蚀点位的理想辅助手段。

(2) 产地鉴别与古玉溯源研究:古玉溯源已从定性对比发展为定量判别,并尝试引入人工智能方法构建统计判别模型。然而,当前仍面临产地地球化学数据库不完整的瓶颈:已知产地的标准样品覆盖范围

有限, 尤其缺乏对古代可能存在的“失落”矿点数据; 此外, 古玉在长期埋藏过程中产生的次生蚀变(沁蚀作用)可能对微量元素指纹的溯源判别产生干扰。

(3) 微量元素与颜色成因研究: LA-ICP-MS 能够对颜色不均匀的透闪石玉样品进行微区原位直接分析, 有效避免了传统方法中对颜色均匀部位进行切割、粉末研磨等复杂制样工序。但需强调, 颜色成因研究仍需联合光谱学(如 UV-Vis)、岩相等多种分析手段进行综合研判。

综上, LA-ICP-MS 已成为透闪石玉研究不可或缺的核心技术, 未来将在资源勘探、文物溯源、产地鉴别及品质评价中发挥更重要的作用。需指出的是, 任何单一技术均存在局限性, 现代科学检测结果的可靠性仍依赖于多种分析仪器的相互验证与综合判别。此外, LA-ICP-MS 是在传统溶液雾化 ICP-MS(需将样品研磨成粉末并经酸溶后测试)基础上发展而来的技术改进, 而非完全替代。综合文献可知, 目前仍有大量学者采用常规 ICP-MS 方法进行全岩溶样分析。因此, 根据具体研究目的选择最适配的测试技术, 是当前透闪石玉研究的合理策略。

参考文献

- [1] 申晓萍, 李新岭, 魏薇. GB/T 38821-2020《和田玉鉴定与分类》中和田玉的定义及颜色特征解读[J]. 中国质量与标准导报, 2021(6): 37-38+41.
- [2] 蒋少涌, 陈唯, 赵葵东, 等. 基于 LA-(MC)-ICP-MS 的矿物原位微区同位素分析技术及其应用[J]. 质谱学报, 2021, 42(5): 623-640.
- [3] 陈意, 胡兆初, 贾丽辉, 等. 微束分析测试技术十年(2011-2020)进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(1): 1-35+253.
- [4] 余晓艳, 龙政宇, 张艺, 等. 基于 LA-(MC)-ICP-MS 的宝石原位微区分析技术及其应用[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 2022, 24(5): 134-145.
- [5] 李娅莉, 薛秦芳, 李立芳. 宝石学教程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2016: 288-295.
- [6] 黄勇. 贵州罗甸玉矿床成因研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [7] 安雯静, 白峰, 刘孟松, 等. 吉林“磐龙墨玉”的宝石矿物学、年代学及成因研究[J]. 现代地质, 2025, 39(1): 183-193.
- [8] 邹好, 李鹏, 吴之瑛, 等. 辽宁岫岩县桑皮峪透闪石玉成矿年龄研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(4): 825-834.
- [9] 郑奋, 刘琰, 张红清. 辽宁岫岩河磨玉岩石地球化学组成及锆石 U-Pb 定年研究[J]. 岩矿测试, 2019, 38(4): 438-448.
- [10] 张勇, 魏华, 陆太进, 等. 新疆奥米夏和田玉矿床成因及锆石 LA-ICP-MS 定年研究[J]. 岩矿测试, 2018, 37(6): 695-704.
- [11] 雷成, 杨明星, 钟增球. 东昆仑小灶火软玉中热液锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征: 对成矿时代的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(1): 108-125.
- [12] 徐立国, 王时麒. 广西大化玉的宝石学特征和矿床成因[J]. 岩石矿物学杂志, 2016, 35(S1): 1-11.
- [13] 张勇, 刘琰, 陆太进, 等. 青海纳赤台软玉中锆石年龄及其成矿过程[C]//中国矿物岩石地球化学学会矿床地球化学专业委员会, 中国地质学会矿床地质专业委员会, 矿床地球化学国家重点实验室. 第八届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要文集. 2017: 647.
- [14] 周安丽, 蒋金花, 孙春晓, 等. 基于多元素含量的统计学方法鉴别不同产地和田玉[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(10): 3174-3178.
- [15] 钟友萍, 丘志力, 李榴芬, 等. 利用稀土元素组成模式及其参数进行国内软玉产地来源辨识的探索[J]. 中国稀土学报, 2013, 31(6): 738-748.
- [16] 崔中良, 黄怡祯, 郭心雨. 闪石玉研究进展的文献计量学分析[J]. 宝石和宝石学杂志(中英文), 2022, 24(5): 155-169.
- [17] 苏越. 基于元素地球化学的透闪石玉产地溯源方法研究及应用[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2024.
- [18] 张亚东. 贵州罗甸软玉矿地质地球化学特征及成矿规律研究[D]: [硕士学位论文]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [19] 蓝叶. 广西大化透闪石玉的地球化学特征及成因初探[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.

-
- [20] 于海燕, 阮青锋, 廖宝丽, 等. 青海不同矿区软玉地球化学特征及 Ar-Ar 定年研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2018, 37(4): 655-668.
- [21] 张钰岩, 丘志力, 杨江南, 等. 甘肃马衔山软玉成矿及玉料产地来源地质地球化学特征分析[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(2): 1-11.
- [22] 谷娴子, 李银德, 丘志力, 等. 徐州狮子山楚王陵出土金缕玉衣和镶玉漆棺的玉料组分特征及产地来源研究[J]. 文物保护与考古科学, 2010, 22(4): 54-63.
- [23] 罗泽敏, 沈锡田, 杨明星. 青海三岔河灰紫色软玉颜色定量表达与紫色成因研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(3): 822-828.
- [24] 刘虹靓, 杨明星, 杨天翔, 等. 青海翠青玉的宝石学特征及颜色研究[J]. 宝石和宝石学杂志, 2013, 15(1): 7-14.
- [25] 杜杉杉, 杨明星, 冯晓燕, 等. 软玉“黄口料”的宝石学特征及颜色成因分析[J]. 宝石和宝石学杂志, 2017, 19(S1): 1-8.
- [26] 韩文, 洪汉烈, 吴钰, 等. 和田玉糖玉的致色机理研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1446-1450.
- [27] Schertl Hans-Peter, 李旭平. 变质矿物内部结构研究——彩色阴极发光研究的地质意义[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 1-14.