

· 宝玉石矿物学 ·

高品质危地马拉绿色翡翠岩石矿物学特征及其产地标型

邓子旭¹, 骆郑臣¹, 丘志力¹, 陈松军², 杨炯^{1,3}, 侯舜瑜⁴, 陈珊⁵, 徐志⁴,
张跃峰¹, 彭雨帆¹

(1. 中山大学地球科学与工程学院, 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 2. 鑫彩珠宝科技(广东)有限公司, 广东 广州 511400; 3. 泰山学院旅游学院, 泰山研究院, 山东 泰安 271000; 4. 广东省珠宝玉石及贵金属检测中心, 广东 广州 510080; 5. 广东省金银珠宝检测中心, 广东 广州 510062)

摘要: 危地马拉新发现的高品质绿色翡翠的品质可与缅甸高端绿色翡翠媲美, 逐渐成为国内珠宝市场重要的高品质绿色翡翠首饰主要材料来源, 但业内对其岩石矿物学特征及产地标型的研究仍较为薄弱。选取中国市场上已大量出现的高品质危地马拉绿色翡翠及成品为研究对象, 通过显微观察、激光拉曼光谱、电子探针等测试手段, 对其矿物组合和成分特征进行了系统分析。结果表明“玛雅绿”翡翠主要由绿辉石矿物组成, 次要矿物包括金云母、多硅白云母、黝帘石等。绿辉石分为 Omp-I、Omp-II、Omp-III 这 3 个不同的形成期次, 其中 Omp-III 为该翡翠的主体矿物, 其成分具有低 Mg(平均 7.59%) 和 Fe(平均 1.57%)、低 Cr(平均 0.24%)、端员硬玉组分 $X_{\text{Jd}} > 0.5$ (平均 0.53) 等特点。现有研究显示, 危地马拉莫塔瓜断层带不同区段的翡翠有各具特色的矿物组合, 但本文研究的国内市场上高品质危地马拉绿色翡翠成品的矿物较为单一, 主要由较纯的绿辉石所组成, 可含有辉铜矿和红砷镍矿两种特殊的金属矿物包体, 端员组分和矿物成分特征与其他产地的高绿翡翠具有较为明显的不同, 可以为有效区分高品质危地马拉绿色翡翠和缅甸传统绿色翡翠以及其他产地高品质绿色翡翠提供岩石矿物学标型的重要特征参考。

关键词: 翡翠; 绿辉石; 岩石矿物学; 产地标型; 危地马拉

中图分类号: P578.954; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2025)04-0981-14

Petromineralogy and typomorphic characteristics of high-quality Guatemalan green jadeite jade

DENG Zi-xu¹, LUO Zheng-chen¹, QIU Zhi-li¹, CHEN Song-jun², YANG Jiong^{1,3}, HOU Shun-yu⁴,
CHEN Shan⁵, XU Zhi⁴, ZHANG Yue-feng¹ and PENG Yu-fan¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Sun Yat-sen University; Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 2. Xincai Jewelry Technology (Guangdong) Co., Ltd., Guangzhou 511400, China; 3. School of Tourism, Taishan University; Taishan Research Institute, Taian 271000, China; 4. Guangdong Provincial Gem & Precious Metal Testing Center, Guangzhou 510080, China; 5. Guangdong Provincial Jewelry Testing Center, Guangzhou 510062, China)

Abstract: The newly discovered high-quality green jadeite in Guatemala is comparable to the high-end green jadeite from Myanmar, gradually becoming an important source of high-quality green jadeite jewelry materials in the

收稿日期: 2024-06-08; 接受日期: 2024-09-10; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41673032, 42073008); 中山大学科研基金项目(71020025); 泰山学院科研基金项目(2022HX453)

作者简介: 邓子旭(1999-), 男, 硕士生, 主要从事实验岩石学模拟蛇纹石玉次生变化研究工作, E-mail: dengzx35@mail2.sysu.edu.cn; 通讯作者: 丘志力(1963-), 男, 教授, 主要从事岩石学、宝石学和古玉文化方面的教学与研究工作, E-mail: qiuizhili@mail.sysu.edu.cn。

domestic jewelry market. However, research on its petromineralogy and typomorphic characteristics remains relatively weak. This study selects a large number of Guatemalan high-quality green jadeite materials and jewelry that have appeared in the Chinese market as research subjects. Through microscopic observation, laser Raman spectroscopy, EMPA, and other testing methods, a systematic analysis of their mineral assemblages and compositional characteristics was conducted. The research findings indicate that the high-quality Guatemalan green “Mayan Green” jadeite materials appearing in the market are primarily composed of omphacite minerals, with secondary minerals including phlogopite, phengite, zoisite. Omphacite can be classified into three different formation stages, Omp- I, II, and III, based on its mineral assemblages and their interrelationships. Among them, the high-quality Guatemalan green jadeite jewelry are mainly composed of omphacite formed in the Omp-III stage, characterized by relatively low Mg (average 7.59%) and Fe (average 1.57%) contents, relatively high Cr content (average 0.24%), and a jadeite component $X_{jd} > 0.5$ (average 0.53). Existing research indicates that the jadeites in different segments of the Motagua Fault System in Guatemala possess distinct mineral assemblages. However, the high-quality green jadeite jewellerys studied in this paper exhibit a relatively uniform mineral composition in the domestic market, primarily composed of pure omphacite. They may contain two specific metal mineral inclusions: chalcocite and nickeline. The endmember composition and mineralogical characteristics show significant differences compared to other sources of high-quality green jadeite, enabling effective differentiation between high-quality Guatemalan green jadeite, traditional Myanmar green jadeite, and high-quality green jadeite from other origins by providing essential reference characteristics in petrology and mineralogy.

Key words: jadeite; omphacite; petromineralogy; typomorphic characteristics; Guatemala

Fund support: National Natural Science Foundation of China(41673032, 42073008); Sun Yat-sen University Scientific Research Fund Project(71020025); Taishan University Scientific Research Fund Project(2022HX453)

翡翠是自然界产出的主要由硬玉、绿辉石、钠铬辉石组成,具有美观、耐久、稀少性和工艺价值的玉石,主要存在于蛇绿混杂岩体中,目前全球发现的翡翠矿点共20多个(Tsujimori and Harlow, 2012; Harlow *et al.*, 2015)。危地马拉是世界上仅次于缅甸的第二大宝石级翡翠产出国,具有较大的规模和经济价值。随着缅甸高档翡翠资源储量的日益减少,行业内对新的优质翡翠产地和新品种的关注度提升,开始逐渐寻找缅甸翡翠的替代品。危地马拉作为近年间急速发展起来的另一个具有商业意义的翡翠产地,在翡翠市场中的占比逐渐上升。

危地马拉翡翠出露在危地马拉莫塔瓜断层(MFS)南北两侧的蛇绿岩带中,学者们对危地马拉翡翠地质环境、岩石矿物学、地球化学等方面进行了大量研究(Harlow, 1994; 欧阳秋眉, 1999; 严若谷等, 2009; Sorensen *et al.*, 2010; Harlow *et al.*, 2011; 陈晶晶等, 2012; 邢碧倩等, 2021; 王礼胜等, 2022; 甄翠玲等, 2023)。早期市场上的危地马拉翡翠有硬玉型的蓝水料和绿辉石型的永楚料两种类型。蓝水料主要由硬玉组成,存在明显的绿辉石

与硬玉交织共生现象,CaO、FeO含量要明显高于缅甸翡翠。永楚料具有均匀的墨绿色,含少量的钠长石,属于较纯的绿辉石质翡翠(徐泽斌等, 2014; 何立言等, 2018; 薛皓予等, 2020)。随着危地马拉翡翠资源勘查工作的进一步开展,新发现了绿色高品质翡翠矿床,玉质可媲美市场上的缅甸高端绿色翡翠,目前已进入国内翡翠市场,被称为玛雅绿翡翠。玛雅绿翡翠以绿辉石为主要矿物,属于绿辉石质翡翠或硬玉与绿辉石过渡类型,具有浓郁的绿色,为翡翠产业注入了新的活力。但业内针对这种新发现的危地马拉高品质绿色翡翠研究甚少,虽然其具有巨大的市场潜力,但在价值上仍和同级别的缅甸翡翠有较大距离。随着市场上危地马拉翡翠占比的逐渐提升,一些不良商家用危地马拉高品质绿色翡翠冒充同级别缅甸翡翠的现象比比皆是,因此需要有更科学、严谨的方式来区分高品质危地马拉绿色翡翠和其他产地的翡翠。

本文依托《玛雅绿翡翠分级》团体标准的制定,对新发现的大量高品质危地马拉绿色翡翠开展了系统的岩石矿物学分析,同时收集了大量前人研究的

其他各个产地宝石级翡翠的矿物组合和化学成分数据进行了对比,为危地马拉高品质绿色翡翠的产地判别、规范翡翠市场提供科学依据。

1 地质背景

危地马拉翡翠矿床位于加勒比海地区北美板块(玛雅地块)和南部加勒比板块(科提斯地块)交汇处

(图1a)。除了危地马拉,加勒比海地区古巴东部和多米尼加北部也有翡翠产出,矿点沿着危地马拉西部到北美-加勒比板块边界的安的列斯弧北部边界区域分布。加勒比北部板块的构造事件导致的 HP/LT 岩石剥露发生在白垩纪晚期至始新世阶段 (García-Casco *et al.*, 2009), 该地区的硬玉岩大多形成于该阶段, 具有相似的构造背景。从具体矿点来看, 多米尼加翡翠位于北部 Hispaniola 岛的 Jagua Clara 杂岩体中, 古巴

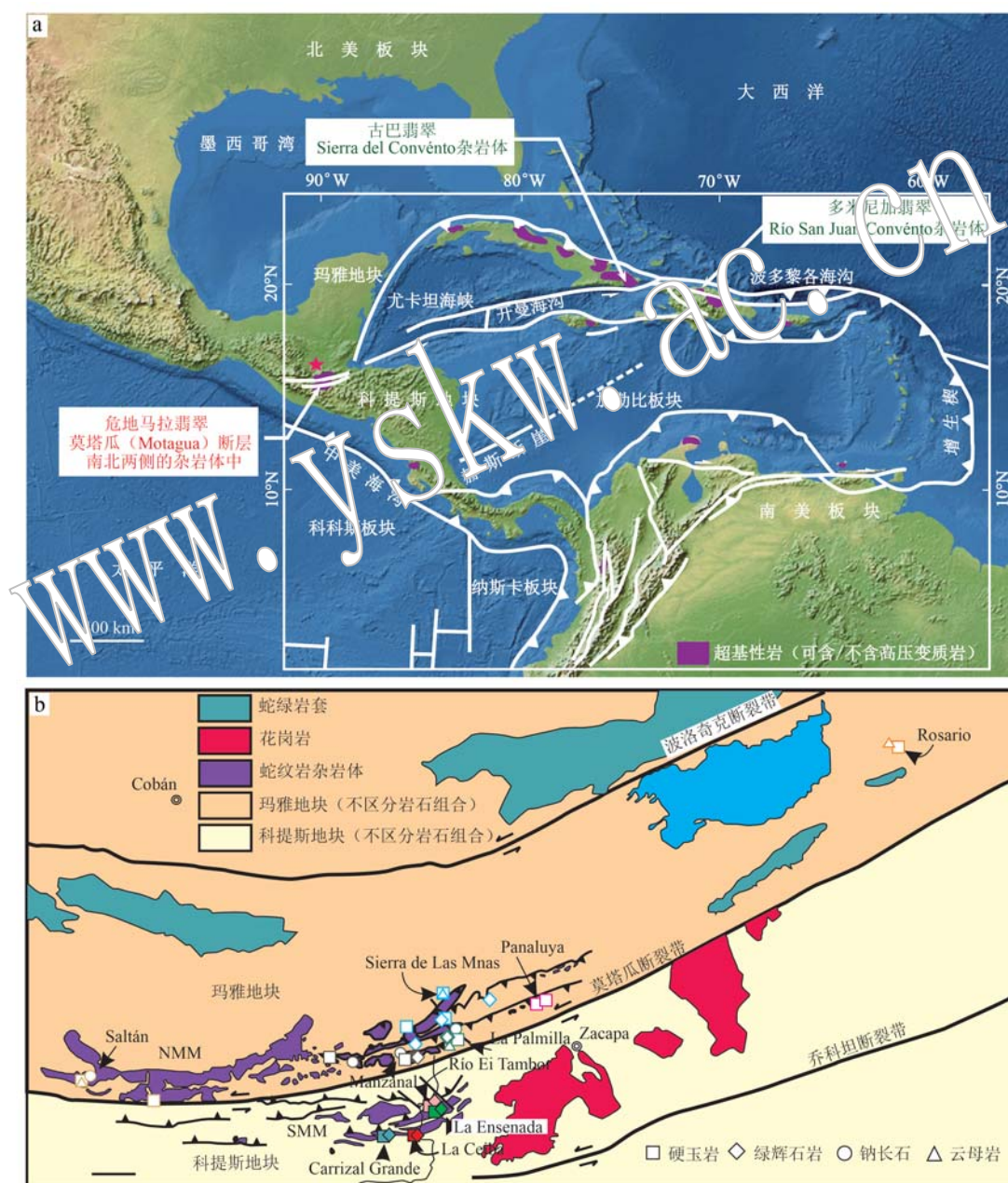


图1 中美洲加勒比海区域构造单元图及翡翠矿点分布(a)和危地马拉中部缝合带(GSZ)的简化大地构造图(b)

[据 Harlow 等(2011)、Knaf 等(2021)修改]

Fig. 1 Structural unit map and distribution of jadeite deposits in the Caribbean region of Central America(a) and simplified tectonic map of the Central Guatemala Suture Zone (GSZ)(b) (according to Harlow *et al.*, 2011; Knaf *et al.*, 2021)

翡翠位于东部 Sierra del Convento 蛇绿混杂岩体中,危地马拉翡翠则出现在莫塔瓜断层带(Motagua fault system)南北两侧的蛇绿混杂岩体中,且南北两侧的翡翠在岩石、矿物类型和成矿年龄上均存在差异(Halow *et al.*, 2011; 邢碧倩等, 2021; Knaf *et al.*, 2021)。

危地马拉北部矿区的翡翠玉矿自西向东分布,长度超过 230 km(图 1b),硬玉岩矿点由西至东分别为 W-jadeitite(西部硬玉岩共有 3 个矿点,以 Saltán 地区最为特征)、Manzanal、Sierra de Las Minas、Lapalmilla、Panaluya 和 E-jadeitite(东部硬玉岩以 Rosario 地区最为特征)。MFS 北部的蛇纹岩杂岩体含有各种变基性岩块,硬玉岩、钠长石岩、钠长石-云母岩、多硅白云母岩和绿辉石岩通常出现在蛇纹岩基质中,另外绿铁闪石-绿辉石变基性岩、绿辉石-石榴石-斜黦帘石角闪岩或斜黦帘石榴辉岩也通常与硬玉岩关联出现(Harlow, 1994; Harlow *et al.*, 2011)。南部矿区的翡翠产于哈拉帕省和萨卡帕省(Jalapa and Zacapa)的 3 个独立的蛇纹岩块体中(Carrizal Grande、La Ceiba、La Ensenada),南部翡翠共生的岩石组合多为高级变质岩,如硬柱石榴辉岩、蓝片岩、蚀变榴辉岩、硬柱石岩、绿辉石蓝闪石蓝片岩等 HP-LT 岩石,石榴石石英多硅白云母片岩和石墨含石英云母片岩在南部翡翠矿区也有出现(Harlow

et al., 2011)。

2 样品和测试方法

2.1 样品

本文样品由鑫彩珠宝科技(广东)有限公司提供,为 36 颗圆弧形高品质危地马拉绿色翡翠成品样品(图 2a)[该样品曾用于《玛雅绿翡翠分级》(T/GDSHJXH005-2023 和 T/GAGP002-2023)团体标准制定相关工作]以及若干成品样品加工后剩余的原料(MYG 系列)(图 2b)。高品质危地马拉绿色翡翠样品根据《玛雅绿翡翠分级》团体标准分为帝王绿(G1~G3)、阳绿(G4~G6)和雅绿(G7~G9)3 个类型,其中雅绿级别的样品多带灰黑色调,透明度一般,阳绿样品略微带灰或黄色调,而帝王绿级别样品品质上可以媲美市场上的缅甸高绿翡翠(图 2b)。MYG 系列样品为成品高品质绿色样品加工后剩下的原料,多为浅绿-深绿色,部分区域颜色鲜艳,结构细腻,且多裂,且大多含有黑色点状金属矿物和白色絮状物(图 2b)。

2.2 测试方法

通过超景深显微镜、偏光显微镜、扫描电镜、激光拉曼光谱、电子探针等手段对 MYG 系列样品的矿

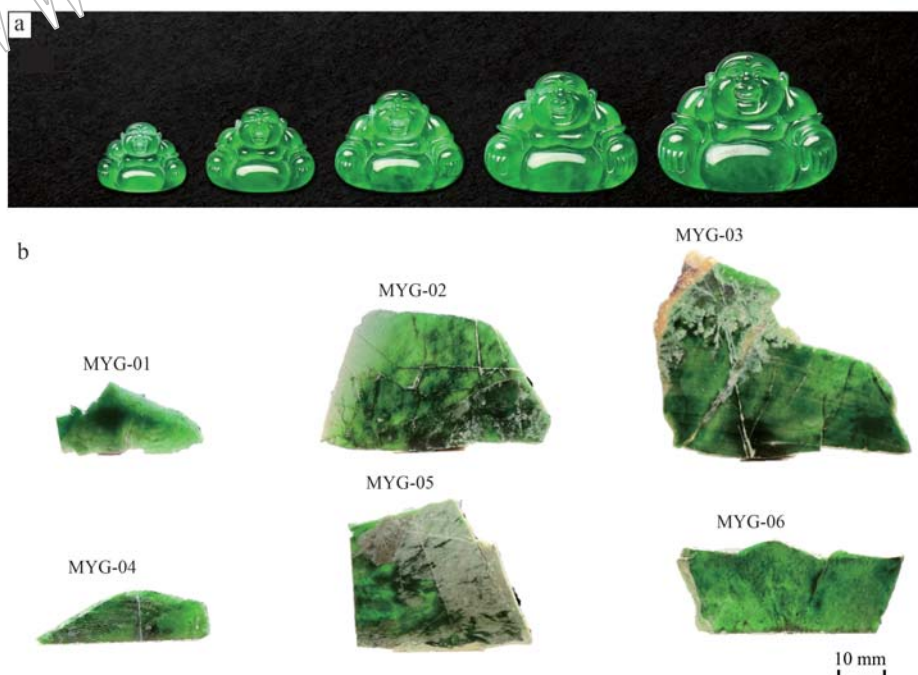


图 2 高品质危地马拉绿色翡翠成品(a)和原料样品(b)照片

Fig. 2 Photos of products (a) and raw material (b) samples of high-quality green jadeite from Guatemala

物组成、结构及化学成分进行分析。样品的显微特征观察通过中山大学地球科学与工程学院显微镜实验室的基恩士 VHX-5000 超景深三维显微系统完成。薄片观察和激光拉曼光谱测试均在中山大学地球科学与工程学院光谱实验室完成,采用 BX51 型偏光显微镜对薄片样品进行观察和拍摄。采用 ThermoFisher 公司的 DXRTM2xi 显微拉曼成像光谱仪对样品主体矿物的拉曼光谱进行测试,激光波长 532 nm,扫描范围 $50 \sim 1\,800\text{ cm}^{-1}$,光谱分辨率 1 cm^{-1} ,激光能量 36 mW,曝光时间 0.1 s,扫描次数 20,测试前使用单晶硅监测仪器状态。样品的背散射图像观察和成分分析均在南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)的海洋元素与同位素平台完成,背散射图像观察和能谱测试采用 Zeiss sigma300 型

扫描电镜进行。矿物定量分析采用的电子探针仪器型号为 JEOL JXA-iSP100,工作条件为加速电压 15 kV,电流 20 nA,束斑 $5\text{ }\mu\text{m}$,并使用 ZAF 校正程序对分析结果进行校正。

3 实验结果

3.1 显微结构

对部分具有代表性的高品质危地马拉绿色翡翠原料样品(MYG-01~06)进行显微特征观察,发现多数样品的绿色基质部分结构细腻,颜色均匀(图 3a),部分“漂浮”有翠绿色团块和细脉(图 3b、3c),经拉曼光谱和电子探针确认为绿辉石。多数样品表面覆盖有云雾状、团状分布的白色、浅绿色不透

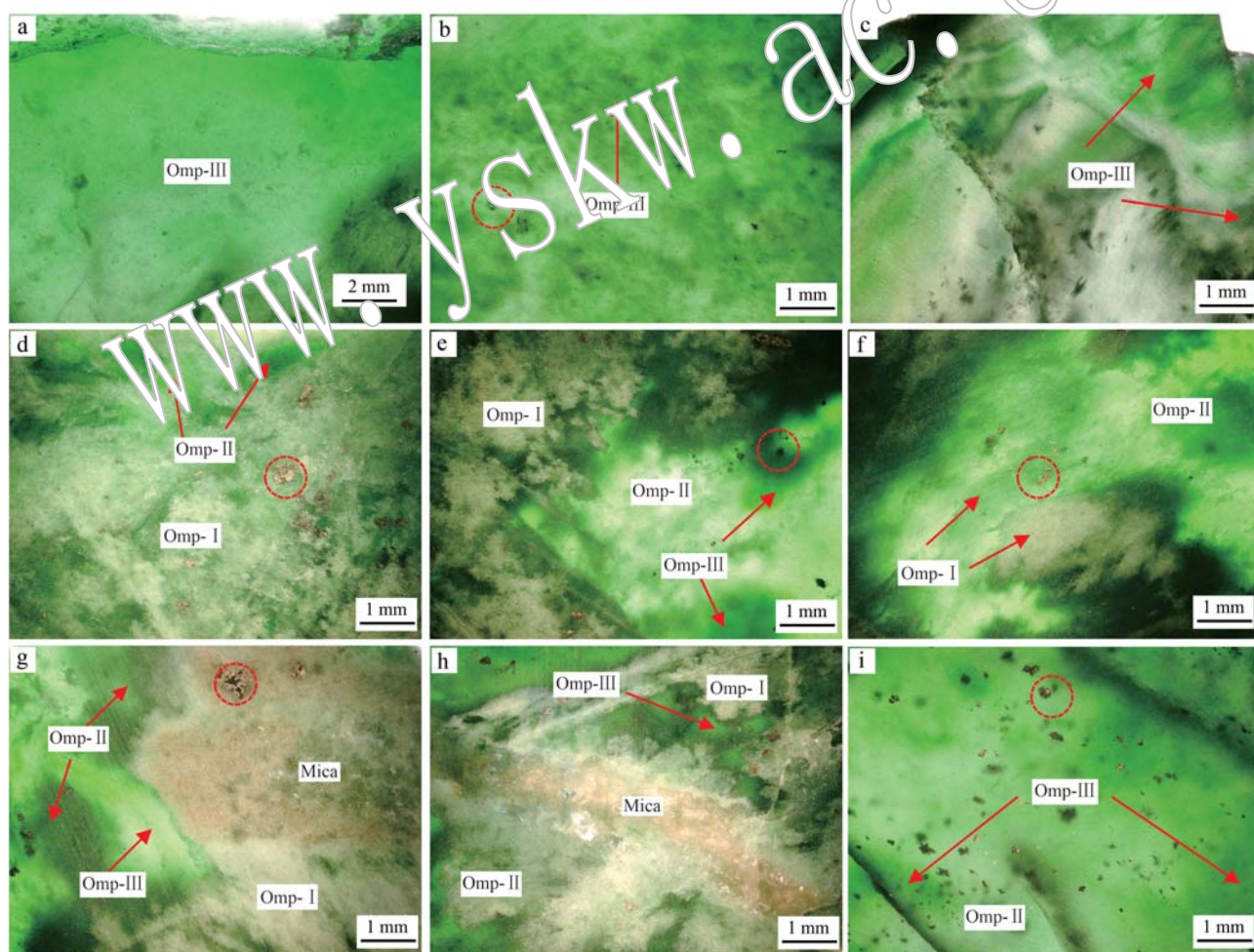


图 3 危地马拉高品质绿色翡翠样品原料的显微结构特征

Fig. 3 Microstructural characteristics of high-quality green jadeite samples from Guatemala

Omp- I 、Omp- II 、Omp- III—绿辉石形成的 3 个期次; Mica—云母(未分类); 圆圈中为暗色金属矿物

Omp- I , Omp- II , Omp- III—three stages of the formation of omphacite; Mica—muscovite; circle shows dark metallic mineral

明矿物(图3d~3f),经测试分析其可能为早期绿辉石的残余,与内部包裹的绿色透明部分绿辉石交织在一起,边缘可见二者的交代关系。在这些早期浅色绿辉石中还充填有一些无色脉状的云母矿物(图3g、3h)。绿辉石基质中分布大量的片状、块状的暗色金属矿物(图3i),经过EDS能谱确认为辉铜矿和红砷镍矿。

利用偏光显微镜和扫描电镜对具有绿色脉状绿辉石以及覆盖浅色不透明绿辉石和云母矿物的样品(MYG-02、03、05)的结构特征进一步分析,结果表明高品质危地马拉绿色翡翠样品的主要矿物为绿辉石,次要矿物为金云母、多硅白云母、黝帘石,另外具有辉铜矿和红砷镍矿两种金属矿物包体。通过绿辉石的形态和矿物反应关系将绿辉石的形成分为3个期次:Omp-I、Omp-II和Omp-III。第1期的绿辉石(Omp-I)具有纤维状、岛状的交代残余结构(图4g、4h),多已被第2期的绿辉石(Omp-II)交代,在样品中主要表现为白色-浅绿色不透明的覆盖层。Omp-II有两种类型:其一具有纤维交织结构,与Omp-I呈交代关系,两者常交织在一起(图4c、4g、4h);其二为镶嵌结构,多呈自形程度高的棒状、纤维状或片状晶体包裹于云母中,与云母共生(图4e、4f、4j、4k),晶形完整,边缘平直,形成的时间比云母略早。背散射图像与薄片观察的结果一致,即Omp-II包裹在云母中,整体镶嵌在Omp-I蚀变留下的裂隙中。最晚期的Omp-III具有纤维交织结构,为高品质绿色翡翠的主体,颜色鲜艳,结构细腻(图4a、4b、4d)。

偏光显微镜和背散射图像共观察到两种云母矿物,通过成分计算为高压的多硅白云母和富Mg的金云母。金云母通常呈片状,脉状充填于Omp-I蚀变留下的裂隙中,内部包裹Omp-II,边缘常被更晚期的Omp-III交代(图4j、4k),多硅白云母主要与Omp-II交织出现,内部可见Omp-I残留的细脉(图4i),另外在MYG-02的薄片中发现黝帘石(图4l)呈孤岛状,部分被绿辉石交代。对于包裹于Omp-III中的化学成分为 Cu_2S 和NiAs的两种金属矿物包体(图4d、图5),结合EDS能谱分析以及前人研究结果(Harlow *et al.*, 2011; 王礼胜等, 2022),确认其分别为辉铜矿和红砷镍矿。

3.2 拉曼光谱

原料样品的矿物组成拉曼光谱分析结果显示,基质部分和棒状/纤维状矿物具有典型的绿辉石的

拉曼光谱(图6a)。裂隙中大面积充填的片状矿物在700、400、269、201 cm^{-1} 的特征拉曼峰与RRUFF库中标准矿物的拉曼光谱对比,发现存在3种云母矿物,分别为钠云母、白云母和金云母,其具体类型需要通过后续的成分分析确认。

对样品MYG-02、03、05的不同颜色部分(白色-浅绿色矿物、绿色基底、翠绿色脉、深绿色团块)分别进行测试,综合测试结果显示,4个区域矿物都存在144、339、377、516、683和1 017 cm^{-1} 的拉曼位移峰(图6b),经确定为绿辉石的拉曼位移峰组合(陈全莉等, 2012),a~d点位分别代表不同期次的绿辉石组合,其在200~400 cm^{-1} 和400~600 cm^{-1} 范围内峰位组合略有不同。

3.3 电子探针

利用电子探针对高品质危地马拉绿色翡翠成品和原料(MYC02-06)进行了矿物化学成分定量分析,结果见表1、2。Omp-I中FeO含量较高(4.69%~7.28%,平均6.21%),MgO含量为6.69%~9.31%,平均7.80%,根据阳离子数计算的硬玉端员组分 X_{jd} 为0.27~0.47(>0.8为硬玉),霓石端员组分 X_{Ac} 为0.07~0.34,且发现其中含有霓辉石。Omp-II中MgO含量为7.9%~10.07%,平均8.86%,较Omp-I有所增长, X_{jd} 为0.41~0.53, X_{Ac} 为0.03~0.05。Omp-III基本都为纯的绿辉石,样品中翠绿色脉状或结构细腻的绿色玉质部分, $X_{\text{Ac}} < 0.02$, X_{jd} 为0.38~0.50,部分样品向硬玉端员靠近,其FeO范围为1.26%~3.05%,平均为1.88%,MgO平均为7.59%,整体Mg、Fe含量相对较低,少部分样品MgO与Omp-II相当。对比3期绿辉石成分特征,发现越晚期形成的绿辉石的成分分布越均匀。

根据绿辉石的成分特征推测早期的成矿流体富Fe,因此形成的绿辉石中对应的霓辉石端员组分更高,偏晚期的成矿流体中可能富Mg、贫Fe,该阶段形成Omp-II和富Mg的金云母,但是随着矿物结晶过程中Mg的进一步消耗,绿色基质部分的Omp-III(加工的成品样品)的Mg含量较低,成分较为均匀,但是Omp-III的边缘部分由于部分交代富Mg金云母,对金云母成分有一定继承性,因此原料中部分测得的Omp-III具有高Mg的特征,这与成品样品中Omp-III普遍低Mg的现象并不冲突。

通过电子探针定量分析计算发现,高品质危地马拉绿色翡翠原料的次要矿物包括多硅白云母、金云母、黝帘石和方沸石等以及由EDS能谱发现的两

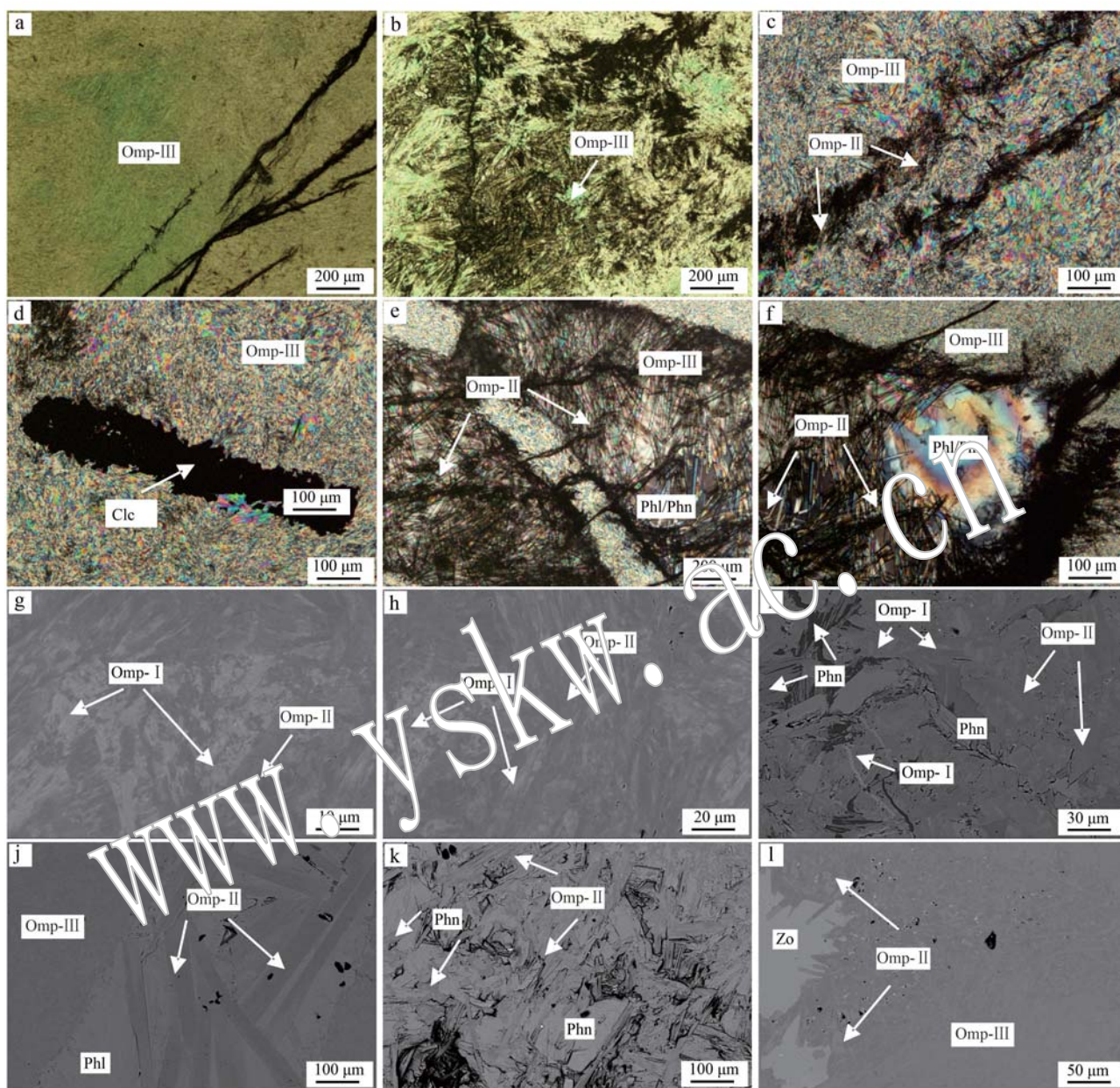


图 4 危地马拉高品质绿色翡翠样品原料显微特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of high-quality green jadeite samples from Guatemala

a—呈纤维交织结构的 Omp-Ⅲ,绿色部分对应原料中的绿色团块,单偏光;b—呈交代残余结构的 Omp-Ⅱ,绿色团块为 Omp-Ⅲ,单偏光;c—呈纤维交织结构的 Omp-Ⅲ,裂隙中残余部分为 Omp-Ⅱ,正交偏光;d—包裹于 Omp-Ⅲ中的辉铜矿,正交偏光;e、f—Omp-Ⅱ包裹于金云母/多硅白云母中,整体镶嵌在 Omp-Ⅰ残余的裂隙中,正交偏光;g、h—Omp-Ⅱ(灰黑色)与 Omp-Ⅰ(灰白色)存在交代关系,二者交织在一起,背散射;i—多硅白云母与 Omp-Ⅱ交织出现,内部可见 Omp-Ⅰ的细脉和交代残余,背散射;j—Omp-Ⅱ包裹于金云母中,边缘的 Omp-Ⅲ与金云母存在交代关系,背散射;k—纤维状的 Omp-Ⅱ与多硅白云母交织出现,背散射;l—Omp-Ⅲ中可见黝帘石与 Omp-Ⅱ的残余,背散射;Omp—绿辉石;Phl—金云母;Phn—多硅白云母;Zo—黝帘石;Clc—辉铜矿

a—Omp-III with a fiber interwoven structure, the green portion corresponding to the green clumps in the raw material, single polarized; b—Omp-II with residual structure, green clusters as Omp-III, single polarized; c—Omp-III with a fiber interwoven structure, residual Omp-II in the cracks, orthogonal polarization; d—chalcopyrite encapsulated in Omp-III, orthogonal polarization; e, f—Omp-II is encapsulated in phlogopite/phengite and embedded as a whole in the residual cracks of Omp-I, orthogonal polarization; g, h—Omp-II (gray black) and Omp-I (gray white) are intertwined, BSE; i—phengite interweaves with Omp-II, with fine veins and residual metasomatism of Omp-I visible inside, BSE; j—Omp-II is encapsulated in phlogopite, and the edge Omp-III has a metasomatic relationship with phlogopite, BSE; k—fibrous Omp-II interweaves with phengite, BSE; l—remnants of sepiolite and Omp-II can be seen, BSE; Omp—omphacite; Phl—phlogopite; Phn—phengite; Zo—zoisite; Clc—chalcocite

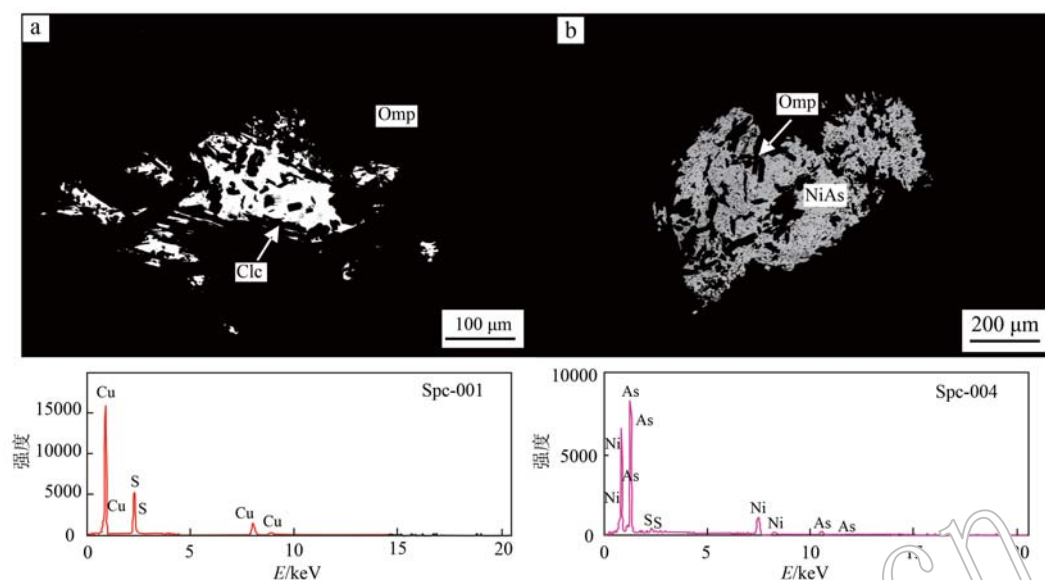


图5 金属矿物包体辉铜矿(a)和红砷镍矿(b)的BSE图像及EDS能谱图
Fig. 5 BSE images and EDS spectra of chalcocite (a) and nickel arsenide (b) from metal mineral inclusions
Omp—绿辉石; Clc—辉铜矿; NiAs—红砷镍矿
Omp—omphacite; Clc—chalcocite; NiAs—nickel arsenide

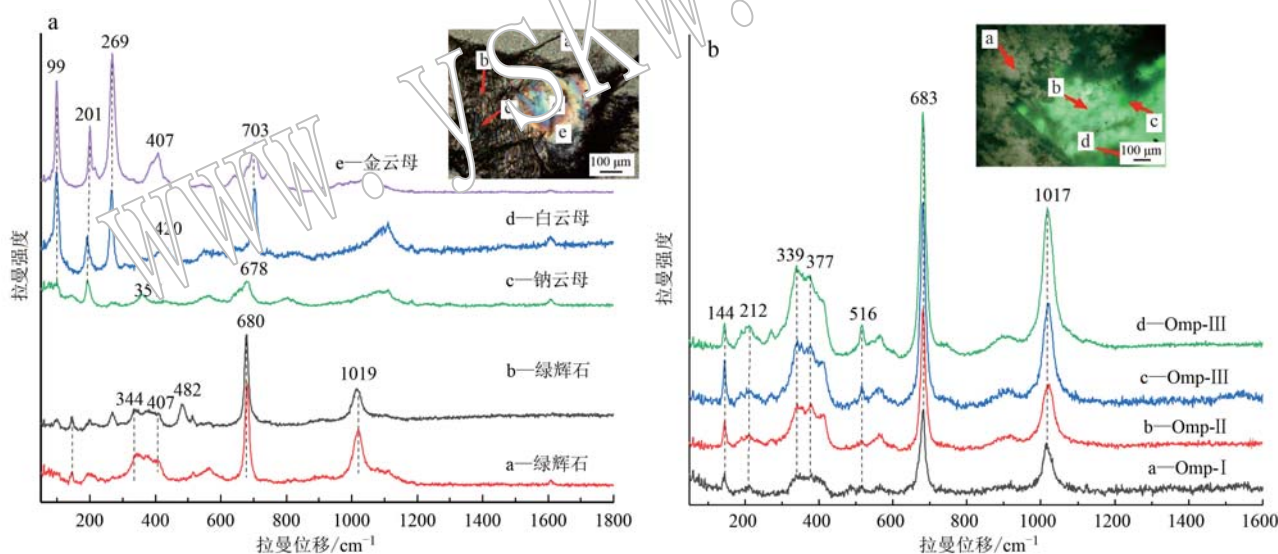


图6 MYG-03的白色-浅绿色不透明部分(a)和原料样品不同绿色区域(b)的拉曼光谱图
Fig. 6 Raman spectra of the white-light green opaque part of MYG-03 (a) and different green regions in raw material samples (b)

种金属矿物包体辉铜矿和红砷镍矿,而拉曼光谱中识别出的钠云母和白云母通过成分分析并未发现,即云母矿物主要为多硅白云母和金云母两种。

4 讨论

4.1 翡翠的矿物组合及其成分对于产地来源的指示

翡翠的矿物组合具有产地标型意义,可以帮助

区分翡翠产地(严若谷等, 2009)。翡翠(硬玉岩、绿辉石岩等)的矿物组成受到多种因素制约,如翡翠的成因类型(流体沉淀或交代成因)、成矿流体的化学成分、所处大地构造背景和变质温压条件等(Harlow, 1994; Hughes *et al.*, 2000)。虽许多产地具有类似的成因类型,但各产地翡翠所处的成矿背景有较大区别,这也导致了不同产地翡翠大多具有各自特征的矿物组合(表3),如缅甸有特征的钠铬辉石型

表 1 高品质危地马拉绿色翡翠绿辉石的电子探针测试结果
Table 1 EMPA testing results of omphacite in high-quality green jadeite from Guatemala

 $w_B/\%$

样品号	MYG-02		MYG-03		MYG-04			MYG-05				MYG-06				
	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ
SiO ₂	56.77	57.66	56.77	56.84	56.44	57.45	57.54	57.07	56.56	57.26	57.01	56.24	55.62	56.73	57.03	56.57
TiO ₂	0.09	0.02	0.07	0.09	0.32	0.12	0.18	0.17	0.09	0.08	0.08	0.05	0.02	0.20	0.10	0.04
Al ₂ O ₃	10.79	10.95	11.04	9.65	9.59	12.41	11.70	11.98	8.60	11.67	11.55	9.35	8.73	10.70	10.96	10.01
Cr ₂ O ₃	0.34	0.14	0.03	0.01	0.23	0.27	0.41	0.00	0.25	0.10	0.12	0.05	2.00	0.43	0.15	0.17
FeO	2.74	2.88	1.89	2.01	4.62	1.86	1.77	1.87	3.05	1.42	1.93	6.66	7.28	4.69	4.22	2.86
MnO	0.03	0.00	0.02	0.09	0.02	0.11	0.04	0.00	0.00	0.08	0.04	0.07	0.00	0.05	0.09	0.05
MgO	8.59	8.49	9.26	10.07	8.22	7.90	8.52	8.29	10.10	9.02	8.72	7.76	6.69	7.57	7.68	9.31
CaO	12.69	12.89	13.29	14.41	13.04	11.79	12.57	12.23	15.41	13.05	12.78	11.93	10.76	11.58	12.13	13.97
Na ₂ O	7.33	7.26	7.37	6.63	7.02	8.39	7.38	7.92	5.96	7.34	7.71	7.85	8.72	7.93	7.71	6.93
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.01	0.02	0.02
总量	99.38	100.28	99.73	99.78	99.50	100.30	100.11	99.53	100.01	100.03	99.96	99.97	99.81	99.89	100.10	99.92
Si	2.02	2.03	2.00	2.01	2.02	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.01	2.02	2.02	2.02	2.02	2.01
Al ^Ⅳ	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al ^Ⅵ	0.45	0.45	0.46	0.40	0.40	0.51	0.48	0.50	0.36	0.48	0.48	0.40	0.37	0.45	0.46	0.42
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Cr	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.01	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.01	0.00	0.05	0.04	0.02	0.04	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.15	0.21	0.03	0.03	0.06
Fe ²⁺	0.07	0.08	0.01	0.02	0.11	0.02	0.05	0.04	0.07	0.04	0.01	0.05	0.01	0.08	0.09	0.03
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.45	0.44	0.49	0.53	0.44	0.41	0.44	0.44	0.54	0.47	0.45	0.42	0.36	0.40	0.41	0.49
Ca	0.48	0.49	0.50	0.55	0.50	0.44	0.47	0.46	0.59	0.49	0.48	0.46	0.42	0.44	0.46	0.53
Na	0.50	0.49	0.50	0.45	0.49	0.57	0.51	0.51	0.41	0.50	0.53	0.55	0.61	0.55	0.53	0.48
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总量	4.00	3.99	4.02	4.01	4.01	4.01	3.98	4.01	4.01	4.00	4.01	4.05	4.07	4.02	4.01	4.02
Quad	0.50	0.51	0.50	0.55	0.52	0.45	0.43	0.46	0.59	0.50	0.48	0.46	0.39	0.46	0.48	0.52
Ae	0.01	0.00	0.05	0.04	0.03	0.04	0.00	0.02	0.02	0.00	0.05	0.20	0.34	0.07	0.04	0.06
Jd	0.49	0.49	0.45	0.41	0.45	0.53	0.51	0.52	0.38	0.50	0.48	0.34	0.27	0.47	0.49	0.41
名称	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Agt	Omp	Omp	Omp
加工的成品样品																
样品号	Ⅱ		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ		Ⅲ	
SiO ₂	57.28		57.68		57.49		57.73		57.70		57.27		57.01		57.11	
TiO ₂	0.12		0.15		0.09		0.08		0.14		0.14		0.06		0.09	
Al ₂ O ₃	13.65		15.28		12.85		15.18		12.95		13.32		10.60		12.55	
Cr ₂ O ₃	0.22		0.02		0.17		0.32		0.57		0.58		0.02		0.18	
FeO	1.31		1.26		1.70		1.42		1.69		1.53		1.59		2.07	
MnO	0.00		0.04		0.06		0.02		0.08		0.12		0.13		0.02	
MgO	7.60		6.71		7.99		6.49		7.43		7.22		9.48		7.85	
CaO	10.57		9.71		11.69		9.22		10.89		10.78		13.79		11.32	
Na ₂ O	8.79		9.40		8.14		9.60		8.32		8.83		6.78		8.21	
K ₂ O	0.01		0.01		0.01		0.02		0.00		0.01		0.01		0.01	
总量	99.56		100.26		100.19		100.10		99.77		99.79		99.48		99.42	
Si	2.00		2.00		2.01		2.00		2.02		2.01		2.01		2.01	
Al ^Ⅳ	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
Al ^Ⅵ	0.56		0.62		0.53		0.62		0.53		0.55		0.44		0.52	
Ti	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
Cr	0.01		0.00		0.00		0.01		0.02		0.02		0.00		0.01	
Fe ³⁺	0.02		0.01		0.00		0.01		0.00		0.02		0.00		0.01	
Fe ²⁺	0.02		0.03		0.05		0.03		0.05		0.02		0.05		0.05	
Mn	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
Mg	0.40		0.35		0.42		0.34		0.39		0.38		0.50		0.41	
Ca	0.40		0.36		0.44		0.34		0.41		0.40		0.52		0.43	
Na	0.60		0.63		0.55		0.65		0.56		0.60		0.46		0.56	
K	0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00		0.00	
总量	4.01		4.00		4.00		4.00		3.98		4.01		4.00		4.00	
Quad	0.41		0.37		0.45		0.35		0.43		0.40		0.53		0.44	
Ae	0.02		0.01		0.00		0.01		0.00		0.02		0.00		0.01	
Jd	0.58		0.63		0.55		0.64		0.57		0.58		0.47		0.55	
名称	Omp		Omp		Omp		Omp		Omp		Omp		Omp		Omp	

以 6 个氧原子为标准计算阳离子；Jd—硬玉；Ae—霓石；Quad—Ca-Mg-Fe 辉石系列；Agt—霓辉石；Ⅰ—Omp-Ⅰ；Ⅱ—Omp-Ⅱ；Ⅲ—Omp-Ⅲ。

表 2 高品质危地马拉绿色翡翠原料次要矿物电子探针测试结果

$w_B/\%$

Table 2 EMPA test results of secondary minerals in Guatemalan high-quality green jadeite raw materials

样品号	MYG-03				MYG-04		MYG-05	MYG-02	MYG-05
序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	39.80	55.47	51.67	39.46	39.21	38.90	53.07	38.67	56.57
TiO ₂	0.31	0.03	0.09	0.25	0.24	0.24	0.16	0.12	0.00
Al ₂ O ₃	19.01	21.37	25.13	18.73	17.21	16.59	24.21	30.04	21.66
FeO	6.07	0.75	1.09	6.22	7.06	7.06	1.23	2.95	0.06
MnO	0.13	0.03	0.09	0.03	0.06	0.06	0.00	0.07	0.00
MgO	19.44	6.28	5.05	19.37	19.77	19.81	4.80	0.06	0.00
CaO	0.01	0.01	0.00	0.00	0.04	0.04	0.02	22.78	0.04
Na ₂ O	0.25	0.22	0.24	0.46	0.47	0.47	0.23	0.01	9.95
K ₂ O	10.31	11.48	11.42	10.39	9.81	9.81	11.33	0.00	1.02
总量	95.33	95.63	94.78	94.91	93.88	92.97	95.04	94.87	89.32
Si	2.83	3.67	3.47	2.83	2.85	2.86	3.54	6.13	2.10
Al ^{IV}	1.17	0.33	0.53	1.17	1.15	1.14	0.46	0.00	0.00
Al ^{VI}	0.42	1.33	1.45	0.41	0.32	0.29	1.45	0.61	0.95
Ti	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Fe ³⁺	0.16	0.04	0.06	0.12	0.11	0.10	0.07	0.01	0.00
Fe ²⁺	0.20	0.00	0.00	0.25	0.32	0.34	0.00	0.39	0.00
Mn	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Mg	2.06	0.62	0.51	2.07	2.14	2.17	0.48	0.01	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.87	0.00
Na	0.03	0.03	0.03	0.05	0.07	0.07	0.03	0.00	0.72
K	0.94	0.97	0.98	0.95	0.91	0.92	0.96	0.00	0.05
总量	7.84	7.00	7.04	7.86	7.89	7.90	7.00	16.06	3.82
名称	Phl	Phn	Phn	Phl	Phl	Phl	Phn	Zo	Anl

云母、黝帘石、方沸石分别以 11、25、6 个氧原子为标准计算阳离子；Phl—金云母；Phn—多硅白云母；Zo—黝帘石；Anl—方沸石。

表 3 不同产地翡翠原料的矿物组成、构造背景汇总

Table 3 The mineral composition and tectonic background of jadeite raw materials from different origins

地点	主要矿物	次要矿物	构造背景
加勒比地区			
危地马拉，莫塔瓜断层北部 (Harlow, 1994; Harlow <i>et al.</i> , 2011; Knaf <i>et al.</i> , 2021)	硬玉、绿辉石	钠长石、方沸石、多硅白云母、金云母、白云母、 铝钠云母、黝帘石-斜黝帘石、褐帘石、钡长石、钡 冰长石、绿铁闪石、绿纤石、钙铝榴石	加勒比板块与北美板 块边界
危地马拉，莫塔瓜断层南部 (Harlow, 1994; Harlow <i>et al.</i> , 2011; Knaf <i>et al.</i> , 2021)	硬玉、绿辉石	钠长石、方沸石、多硅白云母、褐帘石、钡长石、 钡冰长石、蓝闪石、硬柱石、石英、绿纤石、钙铝 榴石、透辉石	
古巴东部 (Knaf <i>et al.</i> , 2021)	硬玉，多带有绿 辉石的环带	钠长石、方沸石、斜黝帘石、绿帘石、黑云母、金 云母、多硅白云母	
多米尼加共和国 (Knaf <i>et al.</i> , 2021)	硬玉为主，绿辉 石型较少	石英、钠长石、多硅白云母、金云母、黝帘石	
环太平洋地区			
日本系鱼川地区 (Morishita <i>et al.</i> , 2007; Abduriyim <i>et al.</i> , 2017)	硬玉为主，绿辉 石型较少	钠长石、方沸石、多硅白云母、黑云母、硬柱石、 蓝闪石、绿纤石、针钠钙石、葡萄石、富 Sr 的特征 矿物等	太平洋板块与北美板 块边界
阿尔卑斯-喜马拉雅造山带			
缅甸翡翠矿区 (Hughes <i>et al.</i> , 2000; Gardiner <i>et al.</i> , 2014; Shi <i>et al.</i> , 2009, 2012)	硬玉为主，绿辉 石、钠铬辉石	钠长石、方沸石、钠沸石、金云母、褐帘石、钡长 石、钠钡长石、钡冰长石、绿铁闪石、蓝闪石、叶 钠钙石、钙铝榴石	印度板块向欧亚板块 俯冲时期产生

翡翠,且缅甸翡翠的沸石族矿物类型较为丰富,有方沸石、钠沸石等,其他产地一般为方沸石,在云母族矿物上目前缅甸翡翠中只发现了金云母,而其他产地则可出现如多硅白云母、金云母、钠云母等多种云母矿物 (Hughes *et al.*, 2000; Shi *et al.*, 2009, 2012; Gardiner *et al.*, 2014)。日本系鱼川地区的宝石级翡翠在矿物组成上以出现一系列产地独有的富 Sr 矿物如 Itoigawaite [$\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_7(\text{OH})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$]、Rengeite ($\text{Sr}_4\text{ZrTi}_4\text{Si}_4\text{O}_{22}$) (Miyajima *et al.*, 1999, 2001)等为特征,其他产地的富 Sr 矿物主要为黝帘石-斜黝帘石和褐帘石等,在危地马拉和缅甸翡翠中发现的富 Ba 矿物(如铝硅钡石、钡钠长石、钡长石、钡冰长石等)在日本翡翠中却相对稀少 (Morishita *et al.*, 2007; Abduriyim *et al.*, 2017)。中美洲地区翡翠在一些次要矿物上略有区别,最典型的是危地马拉莫塔瓜断层南北两侧的翡翠,具有相同的大地构造背景但矿物组合区别较大,MFS 南部的翡翠常见高压矿物的组合(硬柱石+蓝闪石+石英),而北部翡翠少见,北部翡翠的云母矿物种类较多,有多硅白云母、白云母、金云母、钠云母和铝钠云母等,南部则多见高压的多硅白云母,因此翡翠的矿物组合可以辅助辨别其产地来源 (Farlow, 1994; Farlow *et al.*, 2011; Knaf *et al.*, 2021)。

本研究的高品质危地马拉绿色翡翠成品矿物组成相对单一,基本为晚期的绿辉石,原料中的次要矿物为其他产地都常见的金云母、黝帘石、方沸石等,而多硅白云母的出现可以辅助区分其与缅甸翡翠。但是对于加工好的成品样品而言,只通过矿物组合无法具体判断其来自危地马拉北部还是南部矿区,甚至可能与加勒比海地区其他翡翠产地混淆,因此只通过矿物组合区分产地对于一些宝石级的、矿物组成单一的、质量较高的翡翠并不完全适用。

对于宝石级的翡翠可尝试根据前人总结的在玉石溯源方面应用的岩矿地球化学分析方法 (张跃峰等, 2022),通过辉石种属进行投图分析对比其产地特征,结果如图 7 所示。市场上的缅甸翡翠以硬玉型为主,部分质量较差的 Fe^{3+} 含量较高,向霓石端员靠近,危地马拉翡翠则兼具硬玉型和绿辉石型两种。硬玉型以蓝水料为代表,相比缅甸翡翠 Ca 含量较高,而本研究的危地马拉高品质绿色翡翠主要为绿辉石型,主体部分为最晚期的、成分最均匀的 Omp-III,因此根据辉石端员种属可将高品质危地马拉绿色翡翠与大多数产地的硬玉型翡翠相区分。

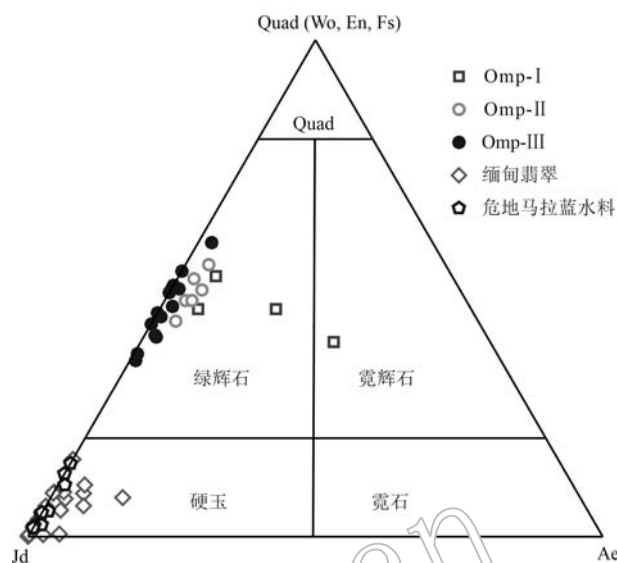


图 7 危地马拉翡翠和缅甸翡翠的辉石 Jd—Ae—Quad 种属判别图 [底图据 Morimoto (1988) 修改]

Fig. 7 Jd—Ae—Quad species discrimination map of pyroxene in Guatemala and Myanmar jadeite (according to Morimoto, 1988)

Jd—硬玉; Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—铁辉石; Ae—霓石; Quad—Ca-Mg-Fe 辉石的总和; 缅甸翡翠数据来源 (Shi *et al.*, 2012; 薛皓宇等, 2020), 危地马拉蓝水料数据来源 (薛皓宇等, 2020)
Jd—jadeite; Wo—Wollastonite; En—enstatite; Fs—ferrosilite; Ae—aegirine; Quad—the total amount of Ca-Mg-Fe pyroxene; data sources for Myanmar jadeite (Shi *et al.*, 2012; Xue Haoyu *et al.*, 2020) and Guatemalan “blue water” jadeite (Xue Haoyu *et al.*, 2020)

4.2 高品质危地马拉绿色翡翠的 Cr、Fe 含量对颜色的影响

对于翡翠的致色元素前人已进行比较系统的研究 (Harder, 1995; 施光海等, 2005; 陈秀英等, 2011; Abduriyim *et al.*, 2017; 商嫣然等, 2024), 认为缅甸翡翠的绿色主要由 Cr 元素致色, 而危地马拉翡翠除了 Cr 外还兼具 Fe 元素的影响, 如蓝水料则主要由 Fe 致色, 且一些墨绿色的危地马拉翡翠也主要由 Fe 元素致色。为了解高品质危地马拉绿色翡翠的致色元素含量特征, 通过对成分数据的 $\text{TFeO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量进行投图分析, 并与收集到前人研究的不同颜色的缅甸翡翠和危地马拉翡翠的成分数据进行对比, 结果如图 8 所示。如图 8, 缅甸绿色系列翡翠主要由 Cr 元素所致, 且 Cr 主要以微量元素的形式赋存于硬玉或绿辉石中, 含量较低 ($<0.1\%$)。由于缅甸翡翠中常发生含硬玉物质流体交代铬铁矿或钠铬辉石形成富铬硬玉的情况, 此时 Cr 以主要元素形

式出现,因此图8中一些样品会出现Cr异常高(0.2%~0.9%)的情况。Fe在大多数缅甸绿色系列翡翠中同样以微量元素形式存在(大多数<1%,平均为0.41%),而对于一些绿辉石型缅甸翡翠,Fe含量较高(2%~4%),可能是导致其呈暗绿-墨绿色的原因之一。危地马拉翡翠的Fe含量大多高于缅甸翡翠(平均为1.60%,大多数介于2%~5%之间),如蓝水料或一些蓝绿色、黄绿色、灰绿色翡翠,墨绿色的危地马拉翡翠则几乎不含Cr元素,基本由Fe元素致色,而对于一些具有鲜艳绿色的危地马拉翡翠则兼具Fe和Cr的影响。

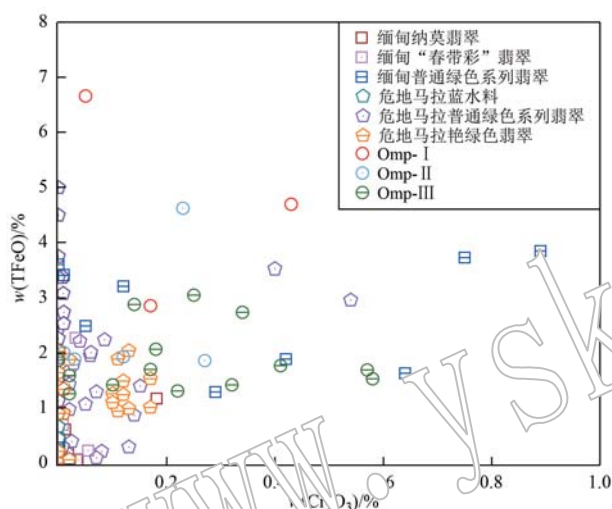


图8 高品质危地马拉绿色翡翠的TFeO-Cr₂O₃成分图解
Fig. 8 TFeO-Cr₂O₃ composition diagram of high-quality green jadeite from Guatemala

缅甸翡翠数据来源(Shi *et al.*, 2012; 薛皓宇等, 2020; 朱永倩, 2020; 秦靖玮, 2022); 危地马拉翡翠数据来源(郑亭, 2016; 林晨露, 2020; 薛皓宇等, 2020; 王礼胜等, 2022)

data sources for Myanmar jadeite (Shi *et al.*, 2012; Xue Haoyu *et al.*, 2020; Zhu Yongqian, 2020; Qin Jingwei, 2022); data sources for Guatemalan jadeite (Zheng Ting, 2015; Lin Chenlu, 2020; Xue Haoyu *et al.*, 2020; Wang Lisheng *et al.*, 2022)

对比本研究样品3期绿辉石成分特征可以发现Omp-I和Omp-II的Fe含量相对较高,虽然部分区域绿色调也较浓郁,但是整体带有明显的灰黑色调,而作为高品质危地马拉绿色翡翠主体部分的Omp-III成分上相比早期的绿辉石具有低Fe和高Cr的特征,其颜色可与缅甸高绿翡翠相媲美。总的来说,本研究的高品质危地马拉绿色翡翠相比于缅甸绿色翡翠具有更高的Fe(平均为1.57%)和Cr(平均为0.24%)含量,相比于普通危地马拉绿色翡翠(Cr平

均含量为0.08%)则具有高Cr特征。高品质危地马拉翡翠的绿色可能是Cr和Fe共同导致,且Cr占主导作用,但过高的Fe含量会导致翡翠颜色发灰发暗,而较高的Cr含量则让翡翠的绿色更加明艳。

5 结论

高品质危地马拉绿色翡翠主要由绿辉石组成,绿辉石可分为3个期次:早期的Omp-I富Fe(4.69%~7.28%,平均6.21%),霓石端员组分高(0.07~0.34);Omp-II相对富Mg(7.9%~10.07%,平均8.86%), X_{Ac} 为0.03~0.05,常与Omp-I交织在一起,交代Omp-I形成或包裹于多硅白云母、金云母中;Omp-III基本都为含有较高硬玉端员的纯的绿辉石, X_{Ac} <0.02,整体上低Mg(平均7.59%)和Fe(平均1.57%),高Cr(平均0.24%),成分较为均一。高品质危地马拉绿色翡翠原料中还存在多硅白云母、金云母、方沸石和黝帘石等次要矿物以及辉铜矿和红碲镍矿等金属矿物包体。

高品质危地马拉绿色翡翠由Fe和Cr共同致色,且Cr占主导地位,Omp-III构成了其主体部分,相比于早期的Omp-I和Omp-II,其绿色更加鲜艳,结构也更为细腻,外观特征,可与缅甸高绿硬玉型翡翠相媲美。

总的来说,目前中国主要翡翠集聚地所见高品质危地马拉绿色翡翠的辉石端员组成,Mg、Fe、Cr等元素的含量特征以及辉铜矿和红碲镍矿的金属矿物包体特征,可作为区别于其他主要产地高绿好种的翡翠的部分产地标型特征(缅甸高品质铁龙生翡翠可能存在例外),可以为其产地区分提供重要参考。

References

- Abduriyim A, Saruwatari K and Katsurada Y. 2017. Japanese jadeite: History, characteristics, and comparison with other sources [J]. *Gems & Gemology*, 53(1): 48~67.
- Chen Jingjing, He Mingyue and Bai Zhimin. 2012. The gem mineralogy researching for Guatemala jade [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 28(12): 12~14 (in Chinese with English abstract).
- Chen Quanli, Yin Zuowei, Bu Yuewen, *et al.* 2012. Raman spectroscopy study on the mineral composition of the Guatemalan jade [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(9): 2 447~2 451 (in Chinese).

- with English abstract).
- Chen Xiuying, Yuan Xinqiang and Lin Songshan, 2011. Mineral composition of the purple jadeite from Guatemala and its significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(Z1): 1~7 (in Chinese).
- García-Casco A, Rodríguez Vega A, Cárdenas Párraga J, *et al.* 2009. A new jadeitite jade locality (Sierra del Convento, Cuba): First report and some petrological and archeological implications[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(1): 1~16.
- Gardiner N J, Robb L J and Searle M P. 2014. The metallogenic provinces of Myanmar[J]. *Applied Earth Science*, 123(1): 25~38.
- Harder H. 1995. Trace elements as colouring agents in jadeites[J]. *The Journal of Gemmology*, 24(7): 508~511.
- Harlow G E. 1994. Jadeitites, albitites and related rocks from the motagua fault zone, Guatemala[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 12(1): 49~68.
- Harlow G, Sisson V and Sorensen S. 2011. Jadeitite from Guatemala: New observations and distinctions among multiple occurrences[J]. *Geologica Acta*, 9(3~4): 363~387.
- Harlow G E, Tsujimori T and Sorensen S S. 2015. Jadeitite and plate tectonics[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 43(1): 105~138.
- He Liyan, Liu Jie, Long G T, *et al.* 2018. Gemmological and mineralogical characteristics of "ashun" Jadeite[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 29(1): 31~37 (in Chinese with English abstract).
- Hughes R W, Gaubert O, Bosshart G, *et al.* 2000. Burmese jade: The inscrutable gem[J]. *Gems & Gemmology*, 36(1): 2~25.
- Knaf A C S, Habiba, Shafie T, *et al.* 2021. Trace-elemental and multi-isotopic (Sr-Nd-Pb) discrimination of jade in the circum-Caribbean: Implications for pre-colonial inter-island exchange networks[J]. *Journal of Archaeological Science*, 135: 105466.
- Lin Chenlu. 2020. Gemological and Mineralogical Studies on Green Jadeite in Different Tone from Guatemala[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Miyajima H, Matsubara S, Miyawaki R, *et al.* 1999. Itoigawaite, a new mineral, the Sr analogue of lawsonite, in jadeitite from the Itoigawa-Ohmi district, central Japan[J]. *Mineralogical Magazine*, 63(6): 909~916.
- Miyajima H, Matsubara S, Miyawaki R, *et al.* 2001. Rengeite, $\text{Sr}_4\text{ZrTi}_4\text{Si}_4\text{O}_{22}$, a new mineral, the Sr-Zr analogue of perrierite from the Itoigawa-Ohmi district, Niigata Prefecture, central Japan[J]. *Mineralogical Magazine*, 65(1): 111~120.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Mineralogy and Petrology*, 39(1): 55~76.
- Morishita T, Arai S and Ishida Y. 2007. Trace element compositions of jadeite (+omphacite) in jadeitites from the Itoigawa-Ohmi district, Japan: Implications for fluid processes in subduction zones[J]. *Island Arc*, 16(1): 40~56.
- Ouyang Qiumei. 1999. Mineral component of jadeite jade[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 1(1): 18~26 (in Chinese with English abstract).
- Qin Jingwei. 2022. Gemological and Mineralogical Study of Jadeite from Nammaw, Myanmar[D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University (in Chinese with English abstract).
- Shang Yanran, Wang Weizhao, Jin Tianli, *et al.* 2024. Colouration in purple jadeite-jade from Myanmar: A spectroscopy and chromaticity investigation[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 43(3): 643~651 (in Chinese with English abstract).
- Shi Guanghai and Xui Xinyuan. 2005. Desalinization of chromium within Myanmar jadeite-jade and implications[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 7(4): 7~12, 51 (in Chinese with English abstract).
- Shi G H, Harlow G E, Wang J, *et al.* 2012. Mineralogy of jadeitite and related rocks from Myanmar: A review with new data[J]. *European Journal of Mineralogy*, 24(2): 345~370.
- Shi G H, Wang X, Chu B B, *et al.* 2009. Jadeite jade from Myanmar: Its texture and gemmological implications[J]. *The Journal of Gemmology*, 31(5): 185~195.
- Sorensen S S, Sisson V B, Harlow G E, *et al.* 2010. Element residence and transport during subduction-zone metasomatism: Evidence from a jadeitite-serpentinite contact, Guatemala[J]. *International Geology Review*, 52(9): 899~940.
- Tsujimori T and Harlow G E. 2012. Petrogenetic relationships between jadeitite and associated high-pressure and low-temperature metamorphic rocks in worldwide jadeitite localities: A review[J]. *European Journal of Mineralogy*, 24(2): 371~390.
- Wang Lisheng, Zhang Haiheng, Liu Jingyi, *et al.* 2022. Mineral component and genesis of high-grade green jadeite jade from Guatemala[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 24(5): 11~30 (in Chinese with English abstract).
- Xing Biqian, Shi Guanghai, Zhang Jinhong, *et al.* 2021. Characteristics of the Guatemalan Feicui and its comparison to the Myanmar Feicui[J]. *Geoscience*, 35(6): 1769~1788 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zebin, Xu Zhi, Deng Changjie, *et al.* 2014. Gemmological study on jadeite called "Yongchuliao" in jewelry trade[J]. *Journal of Gems*

- & Gemmology, 16(6): 43~46(in Chinese with English abstract).
- Xue Haoyu, Chen Tao and Li Zhigang. 2020. Mineralogical comparison between omphacite-bearing jadeite from Guatemala and that from Myanmar[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(4): 481~494(in Chinese with English abstract).
- Yan Ruogu, Qiu Zhili, Dong Chuanwan, *et al.* 2009. A preliminary study of typomorphic characteristics of different kinds of black jadeite jades in the world[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28(3): 292~298(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuefeng, Qiu Zhili, Yang Jiong, *et al.* 2022. Applications and progress of petrogeochemical testing techniques in tracing the origin of ancient jade[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(6): 1 169~1 186(in Chinese with English abstract).
- Zhen Cuiling, Gao Yujie, and Li Kai. 2023. Identification characteristic of green Feicui from Myanmar and Guatemala[J]. *Journal of Gems & Gemmology*, 25(5): 17~28(in Chinese with English abstract).
- Zheng Ting. 2016. The Study on Gemological and Mineralogical Characteristics of Guatemala Green Feicui[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongqian. 2020. The gemological Characteristic and Color Origin of Myanmar "chundaicai" jadeite[D]. China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- 何立言, 刘杰, 龙楚, 等. 2018. “蓝水料”翡翠的宝石矿物学特征[J]. *宝石和宝石学杂志*, 20(2): 31~37.
- 林晨露. 2020. 危地马拉不同色调绿色翡翠宝石矿物学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 欧阳秋眉. 1999. 翡翠的矿物组成[J]. *宝石和宝石学杂志*, 1(1): 18~26.
- 秦靖玮. 2022. 缅甸纳莫翡翠的宝石矿物学研究[D]. 石家庄: 河北地质大学.
- 商嫣然, 王伟钊, 金天力, 等. 2024. 缅甸紫色翡翠的致色机理——光谱和色度学研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 43(3): 643~651.
- 施光海, 崔文元. 2005. 缅甸翡翠中“Cr的淡化”及意义[J]. *宝石和宝石学杂志*, 7(4): 7~12, 51.
- 王礼胜, 张海衡, 刘静怡, 等. 2022. 危地马拉高绿绿色翡翠的矿物组成及成因[J]. *宝石和宝石学杂志(中英文)*, 24(5): 11~30.
- 邢碧倩, 施光海, 张锦洪, 等. 2021. 危地马拉翡翠宝石矿物学特征及其与缅甸翡翠对比研究[J]. *现代地质*, 35(6): 1 769~1 788.
- 徐泽彬, 徐志, 刘常武, 等. 2014. “永楚料”翡翠的宝石学研究[J]. *宝石和宝石学杂志*, 16(6): 43~46.
- 薛皓予, 陈涛, 李志刚. 2020. 危地马拉与缅甸含绿辉石翡翠的矿物学对比研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 39(4): 481~494.
- 严若谷, 丘志力, 董传万, 等. 2009. 世界几个主要翡翠产地墨翠标型特征初探[J]. *岩石矿物学杂志*, 28(3): 292~298.
- 张跃峰, 丘志力, 杨炯, 等. 2022. 岩矿地球化学分析测试技术在古代玉器产地溯源中的应用及进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(6): 1 169~1 186.
- 甄翠玲, 邵玉杰, 李凯. 2023. 绿色缅甸翡翠和危地马拉翡翠的鉴别特征[J]. *宝石和宝石学杂志(中英文)*, 25(5): 17~28.
- 郑亨. 2015. 危地马拉绿色系列翡翠的宝石矿物学特征研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 朱永倩. 2020. 缅甸“春带彩”翡翠的宝石矿物学特征及颜色成因研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).

附中文参考文献

- 陈晶晶, 何明跃, 白志民. 2012. 危地马拉翡翠的宝石矿物学研究[J]. *科技通报*, 28(12): 12~14.
- 陈全莉, 尹作为, 卜玥文, 等. 2012. 拉曼光谱在危地马拉翡翠矿物组成中的应用研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 32(9): 2 447~2 451.
- 陈秀英, 袁心强, 林嵩山. 2011. 危地马拉紫色翡翠的矿物组成特征及意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 30(Z1): 1~7.