

· 宝玉石矿物学 ·

危地马拉与缅甸含绿辉石翡翠的矿物学对比研究

薛皓予¹, 陈涛¹, 李志刚²

(1. 中国地质大学(武汉)珠宝学院, 湖北 武汉 430074; 2. 广东省珠宝玉石及贵金属检测中心, 广东 广州 510030)

摘要: 以危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠为研究对象, 通过显微镜观察、岩石薄片观察、X射线粉末衍射分析、激光拉曼光谱分析、扫描电镜分析、电子探针分析等测试手段对两者进行了常规宝石学特征、结构特征、杂质矿物、化学成分等方面的对比研究。结果表明, 危地马拉蓝水料发育等粒变晶结构, 主要成分为硬玉, 含有绿辉石, 硬玉环带以2~3层为主, 绿辉石分别以自形颗粒、交代残余、沿微裂隙充填3种形式存在, 其中白色点状物为钠长石, 绿色点状物为霓辉石和绿辉石的混合物; 缅甸油青种翡翠以硬玉为主, 颗粒相对粗大, 呈柱粒状镶嵌结构, 硬玉发育3~5层环带结构, 绿辉石以脉状充填硬玉颗粒间隙或被硬玉颗粒交代呈孤岛状。危地马拉蓝水料硬玉颗粒与脉状绿辉石的CaO含量均高于缅甸油青种翡翠, 另外由于霓辉石的存在, 推测两产地翡翠结晶环境中的Ca、Fe含量可能存在差异。

关键词: 翡翠; 硬玉; 绿辉石; 蓝水料; 危地马拉; 缅甸

中图分类号: P578.954; P574.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2020)04-0481-14

Mineralogical comparison between omphacite-bearing jadeite from Guatemala and that from Myanmar

XUE Hao-yu¹, CHEN Tao¹ and LI Zhi-gang²

(Gemological Institute, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. Guangdong Provincial Gem & Precious Metal Testing Center, Guangzhou 510030, China)

Abstract: Guatemalan “blue water” jadeite and Myanmar “oil green” jadeite were analyzed by means of microscope observation, thin section observation, X-ray powder diffraction, laser Raman spectrum, and scanning electron microscope analysis. The authors tried to compare these two jadeites in conventional gemological characteristics, structural characteristics, impurity minerals and chemical composition. The results show that the jadeite grains of Guatemalan “blue water” material develop homoeoblastic structure, and the major mineral is jadeite, with a small amount of omphacite, the jadeite particles show the rhythmic zoning with 2~3 layers, and the omphacite occurs as euhedral grains, residues of metasomatism or filling material along the micro-crack, in which the white punctate mineral is albite, and the green punctate mineral is a mixture of aegirine-augite and omphacite. The jadeites in Myanmar “oil green” jadeite have coarse particles and a columnar granular mosaic structure, with relatively uniform sizes. The mineral has pure jadeite and mottled omphacite as impurity mineral, the jadeite particles of Myanmar “oil green” jadeite show the rhythmic zoning with 3~5 layers, and the omphacite grains fills the gap of jadeite particles in vein shape or is replaced by jadeite crystals in island shape. Meanwhile, the content of CaO in Guatemala

收稿日期: 2020-01-16; 接受日期: 2020-05-27; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFF0215403); 国家自然科学基金项目(41572033); 中国地质大学(武汉)珠宝学院科研基金项目(GICTXM-201805, GICTXM-S201826); 中国地质大学(武汉)珠宝检测技术创新中心项目(CIGTWZ-2019032)

作者简介: 薛皓予(1993-), 女, 硕士生, 主要从事宝石学方面研究, E-mail: xuehaoyugems@163.com; 通讯作者: 陈涛(1979-), 女, 教授, 主要从事宝石学方面研究, E-mail: chentao@cug.edu.cn。

“blue water” and vein omphacite are higher than that in Myanmar “oil green” jadeite. In addition, with the existence of aegirine-augite, it is inferred that there may be differences in Ca and Fe content in the crystal environment of jadeite from the two producing areas.

Key words: Guatemalan jadeite; jadeite; omphacite; “blue water” jadeite; Guatemala; Myanmar

Fund support: National Key Research and Development Program (2018YFF0215403); National Natural Science Foundation of China (41572033); Research Fund Project of Gemological Institute, China University of Geosciences, Wuhan, China (GICTXM-201805, CIGTXM-S201826); Project of Jewelry Testing Technology Innovation Center, CUG, Wuhan, China (CIGTWZ-2019032)

硬玉岩是一种由硬玉为主要矿物成分的岩石,通常存在于高压低温成因的蛇纹岩混杂岩体内,被认为是洋壳俯冲作用的产物,远比高压低温的榴辉岩产地少,世界范围内的硬玉岩产地目前发现的不足20处。一直以来,市场上作为商品流通的商业级硬玉岩(翡翠)主要来源于缅甸,由于地质背景及成矿环境的相似性,危地马拉、日本、哈萨克斯坦、俄罗斯等地也有商业级硬玉岩(翡翠)产出(施光海等,2000)。目前,危地马拉作为仅次于缅甸的翡翠产地,其蓝水料市场占有率逐渐升高,该品种外观呈蓝绿色,质地细腻,透明度较好,内部包含有大量棉絮状白色斑点,与产自缅甸的油青种翡翠在颜色、质地上较为相似。

前人运用岩相学与矿物学分析方法对危地马拉和缅甸的硬玉岩的成因及成矿地质背景进行过较为广泛的研究(Johnson and Harlow, 1999; 张良钜, 2004; 李旭平等, 2004; Shi *et al.*, 2005; Harlow and Sorensen, 2005; Sorensen *et al.*, 2006; Tsujimori and Harlow, 2012; 祁敏等, 2015)。关于硬玉岩的成因,近年来有结晶型(P型)与交代型(R型)两种观点。结晶型(P型)的观点认为,俯冲带内富含Na-Al-Si的流体直接结晶形成硬玉岩。硬玉矿物中存在的流体包裹体证明硬玉可以从俯冲带的流体中结晶形成。前人通过缅甸帕敢地区翡翠硬玉矿物中存在的流体包裹体,推测缅甸的硬玉岩可能是从含水和甲烷的硬玉质硅酸盐熔融体中结晶而成(Shi *et al.*, 2005);危地马拉翡翠硬玉矿物中也发现有流体包裹体,据此推测危地马拉的硬玉岩是由深俯冲带中含氡的蛇纹岩化流体结晶形成(Johnson and Harlow, 1999);不同产地的硬玉晶体在阴极发光图像以及背散射电子图像中呈现出来的韵律生长环带以及氧同位素和微量元素等证据都佐证了低温俯冲带流体的演变过程(Sorensen *et al.*, 2006)。交代型(R型)观点认为硬玉岩形成于斜长花岗岩、变质辉长岩以及

榴辉岩的交代作用,在硬玉岩中保留了部分原岩的结构并包含有原岩的矿物组成和地球化学等方面的证据(李旭平等, 2004; Harlow and Sorensen, 2005; Tsujimori and Harlow, 2012)。近年来国内部分学者通过偏光显微镜、粉晶衍射、电子探针、拉曼光谱等分析方法对危地马拉灰绿色、紫色等品种进行了初步探究,认为该区翡翠主要组成矿物为硬玉、绿辉石,具有矿物颗粒普遍粗大、透明度较差、结晶不好等特征(王铎等, 2009; 陈晶晶, 2009; 陈全莉等, 2012; 郑亭, 2015)。前人对缅甸油青种翡翠的矿物组成、化学成分、颜色成因及地质成因等方面的研究表明,油青种翡翠是由原生翡翠砾石被深埋于断陷盆地,经历酸碱流体的溶蚀,在颗粒间隙形成绿泥石致色而成,主要成分为硬玉(胡楚燕, 2004; 陈索翌, 2013; 闫薇薇等, 2013; 殷科等, 2014)。翡翠资源的稀缺性使得行业内对新产地品种的关注度提升,目前翡翠市场上产自危地马拉的高品质蓝水料市场占有率逐渐提高,对不同产地的翡翠相似品种的不同点进行宏观及微观的了解,有助于深入对比危地马拉与缅甸类似品质翡翠品种的宝石学及矿物学特征。

本文将利用常规宝石学测试、岩石薄片观察、X射线衍射分析、拉曼光谱测试、扫描电镜分析以及电子探针分析,对外观相似的危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠在宝石学性质、矿物组成、结构特征、化学成分等方面进行对比研究,为翡翠相似品种的产地溯源提供鉴别依据,也为两个地区硬玉岩高温低压变质环境的差异提供矿物学资料。

1 地质概况

危地马拉位于中美洲北部,是世界上仅次于缅甸的第二大商业级硬玉岩(翡翠)产出国。该地区硬玉岩位于北美和加勒比海板块之间的碰撞带、麦塔

高河谷的中生代白垩纪蛇纹岩带内,断裂带南北两侧均存在高压低温变质作用,且岩石组合具有较大的区别。麦塔高断裂带以南以榴辉岩、硬柱石榴辉岩、蓝闪石榴辉岩、蓝片岩、硬玉岩等高压低温的矿物岩石为主,北侧包含有硬玉岩、钠长岩和石榴石角闪岩以及少量的榴辉岩(Harlow *et al.*, 2011)。危地马拉硬玉岩的形成温压条件为 $< 400^{\circ}\text{C}$ 和 $0.3 \sim 0.8$ GPa,且具顺时针 p - T 轨迹(Harlow, 1994)。

缅甸硬玉岩位于印度板块和欧亚板块的碰撞缝合线附近。硬玉岩及相关岩石主要呈脉状、块状、透镜体状等产于蛇纹岩化超基性岩之中,缅甸硬玉岩产于古近纪和新近纪的橄榄岩中,形成的温度、压力条件分别为 $350 \sim 500^{\circ}\text{C}$ 和 $1 \sim 1.5$ GPa(Mével and Kiénast, 1986)。原生翡翠砾石被深埋于断陷盆地之后,经历了早期的酸性阶段和晚期的碱性阶段,早

期的酸性流体对原生翡翠砾石进行溶蚀,并携带 Fe、Mg 等元素进入翡翠的颗粒间隙和裂隙中,在晚期碱性流体阶段,Fe、Mg 等元素发生沉淀形成绿泥石,从而形成了次生的油青种翡翠(闫薇薇等, 2013)。

两个产地硬玉岩的地质构造背景相同,均产于板块构造俯冲带内,与俯冲或碰撞有关;但两者产出的时代以及温压条件存在差异。

2 样品和测试方法

2.1 样品

本文选取在广州、四会等地珠宝市场采集的 5 件危地马拉蓝水料硬玉岩(样品 GY-1、GY-2、GY-3、GY-4、GY-5)和 5 件缅甸油青种硬玉岩(样品 MY-1、MY-2、MY-3、MY-4、MY-5)原石样品(图1),经后期

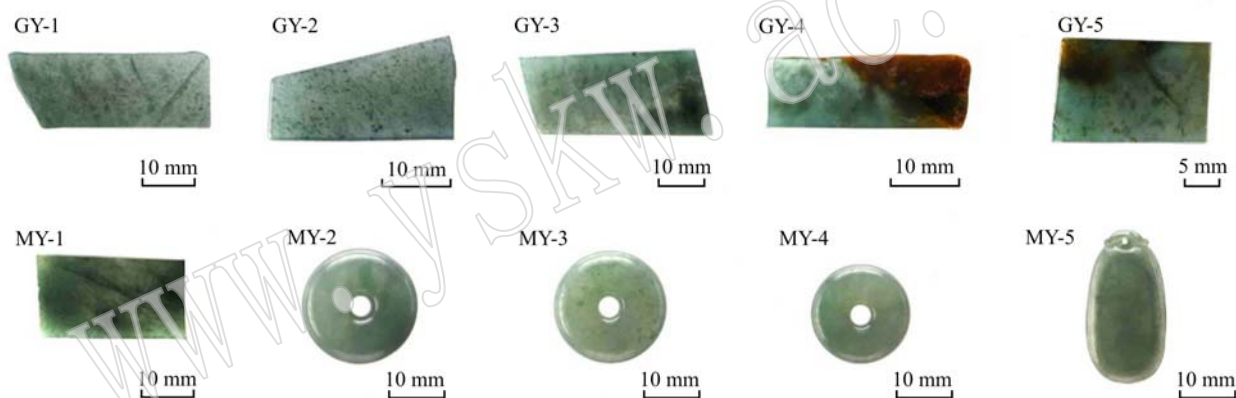


图1 实验样品照片
Fig. 1 Experimental samples

抛磨切割处理后进行测试。蓝水料样品呈浅灰绿色-深蓝绿色,具有玻璃光泽,微透明-透明,结构细腻,一般含有大量白色点状絮状物,部分样品可见绿色点状杂质。缅甸油青种翡翠样品呈灰绿色-深灰绿色,具有玻璃光泽,微透明-半透明,结构细腻,一般不含有杂质矿物。

2.2 测试方法

常规宝石学测试采用折射仪对样品折射率进行测试,采用静水称重法进行相对密度测试,两个产地每块样品分别在空气中和蒸馏水中称重 3 次,运用阿基米得定律进行相对密度测算。利用偏光显微镜观察、X 射线粉晶衍射、背散射电子图像等手段对两个产地样品的结构特征及矿物组成进行了分析。偏光显微镜观察在中国地质大学(武汉)珠宝学院实验室完成,采用 Axio Imager M2m 型科研级正置材料

显微镜,测试前将样品制作成光学薄片。X 射线粉末衍射分析采用 X'pert PRO Dy2198 型 X 射线粉末衍射仪,测试前将样品的小块研磨至约 200 目以下的粉末,测试电压 40 kV,电流 40 mA, Cu 靶,扫描速度 $0.4^{\circ}/\text{s}$,扫描步长 $0.0167^{\circ}/\text{s}$,测试范围为 $3^{\circ} \sim 65^{\circ}$ 。利用激光拉曼光谱和背散射电子图像对危地马拉样品中的白色和绿色杂质矿物结构与成分进行了分析。激光拉曼光谱测试采用 BRUKER R200L 型拉曼光谱仪,波长 532 nm,扫描范围 $1550 \sim 45$ cm^{-1} 。背散射电子图像观察采用 QUANTA 450 型环境扫描电镜进行,配备 X 射线能谱仪,实验前对探针片进行喷碳处理。以上测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。利用电子探针对于两个产地样品的硬玉和绿辉石成分进行了分析,在中国地质大学(武汉)地球科学学院电子探针

实验室采用日本电子 JEOL 株式会社 JXA-8230 型电子探针显微分析系统完成,钨丝灯电子枪配合 X 射线波谱仪,电压 15 kV,电流 20 nA,束斑直径 1 μm 。

3 实验结果

3.1 常规宝石学特征

常规宝石学测试结果(表 1)表明,样品的折射率为 1.66~1.67(点测),相对密度为 3.33~3.35。危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠的折射率和相对密度相近,测试值符合国家标准 GB/T 16553-2017《珠宝玉石 鉴定》中翡翠的规定。

3.2 结构特征

利用偏光显微镜对部分肉眼观察结构细腻、透明度相似的样品(GY-1、GY-2、GY-3 和 MY-2、MY-3、MY-4)进行光学薄片观察。结果表明,危地马拉蓝水料主要矿物为硬玉,次要矿物为绿辉石。单偏光镜下可见硬玉为无色,正中-高突起,发育两组解理且交角近于 87°或 93°,正交偏光镜下可见硬玉多呈粒状、长柱状以及不规则粒状,最高干涉色为 I 级橙,二轴晶正光性,消光角较大。样品 GY-1、GY-2、GY-3 样品颗粒大小相对均一,无定向性,呈等粒状变晶结构,可见绿辉石间杂分布于硬玉颗粒间,颗粒界限多呈镶嵌状(图 2)。绿辉石在单偏光下为无

表 1 危地马拉蓝水料和缅甸油青种翡翠样品的常规宝石学特征

Table 1 Basic gemological characteristics of the “blue water” in Guatemala and “oil green” in Myanmar

样品	颜色	透明度	光泽	折射率(点测)	相对密度	外观特征
GY-1	灰绿色	半透明	玻璃	1.66	3.35	结构细腻,含绿色点状杂质
GY-2	蓝绿色	半透明	玻璃	1.66	3.35	结构细腻,含绿色点状杂质
GY-3	蓝绿色	半透明	玻璃	1.66	3.34	结构细腻,含绿色、白色点状杂质
GY-4	蓝绿色	半透明	玻璃	1.67	3.34	结构细腻,含白色点状杂质
GY-5	蓝绿色	半透明	玻璃	1.66	3.34	结构细腻,含白色点状和絮状杂质
MY-1	墨绿色	半透明	玻璃	1.66	3.35	结构较粗
MY-2	灰绿色	半透明	玻璃	1.65	3.33	结构细腻
MY-3	灰绿色	半透明	玻璃	1.66	3.33	结构细腻
MY-4	灰绿色	半透明	玻璃	1.66	3.35	结构细腻
MY-5	墨绿色	半透明	玻璃	1.66	3.34	结构细腻

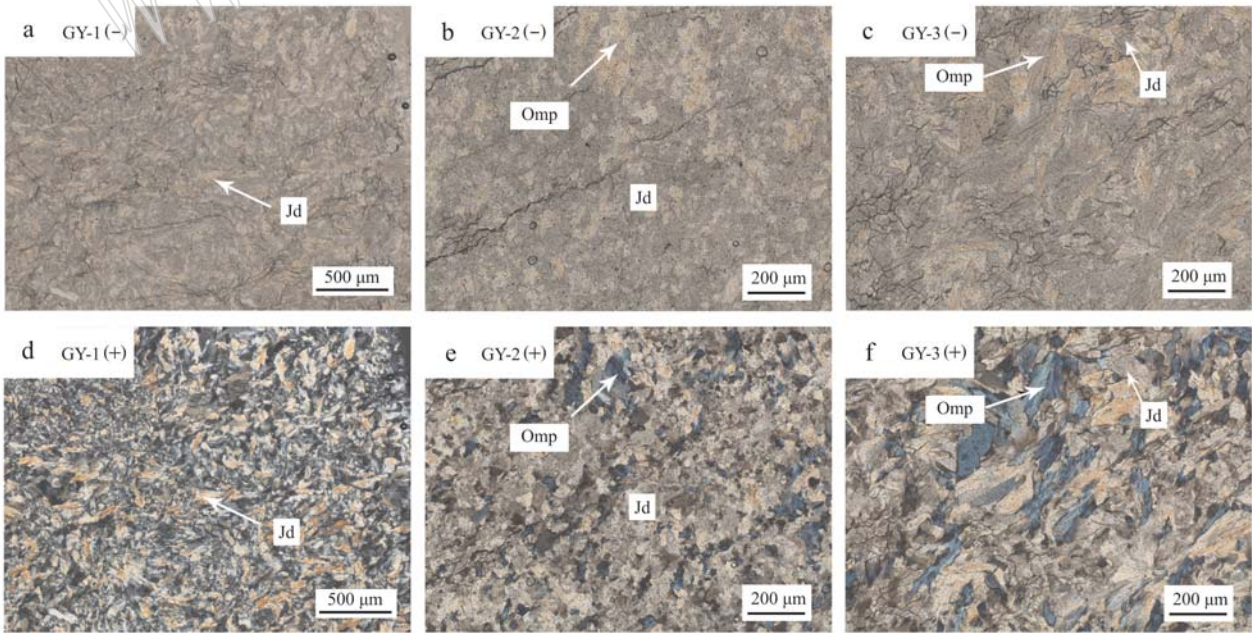


图 2 危地马拉蓝水料在偏光显微镜下特征

Fig. 2 Characteristics of “blue water” jadeite in Guatemala under polarizing microscope

Jd—硬玉; Omp—绿辉石
Jd—jadeite; Omp—omphacite

色,正高突起;正交偏光镜下可见绿辉石呈不规则状,最高干涉色可达Ⅱ级蓝绿。

缅甸油青种翡翠样品以硬玉为主,硬玉颗粒较危地马拉蓝水料硬玉颗粒粗大。单偏光镜下可见硬玉为无色,正中-高突起,解理发育,解理夹角为 87° 或 93° 。正交偏光镜下可见硬玉呈粒状、长柱状,自

形程度较高,最高干涉色为Ⅰ级橙,二轴晶正光性,斜消光。正交偏光下可见 MY-1、MY-2、MY-3 样品硬玉多为自形-半自形柱粒状,粒径大于 $200\text{ }\mu\text{m}$,颗粒边界平直,彼此呈镶嵌状,无定向性,硬玉颗粒解理发育,呈典型的柱粒状变晶结构(图 3a、3b、3d、3e)。部分硬玉颗粒正交偏光镜下可见环带结构(图 3c、3f)。

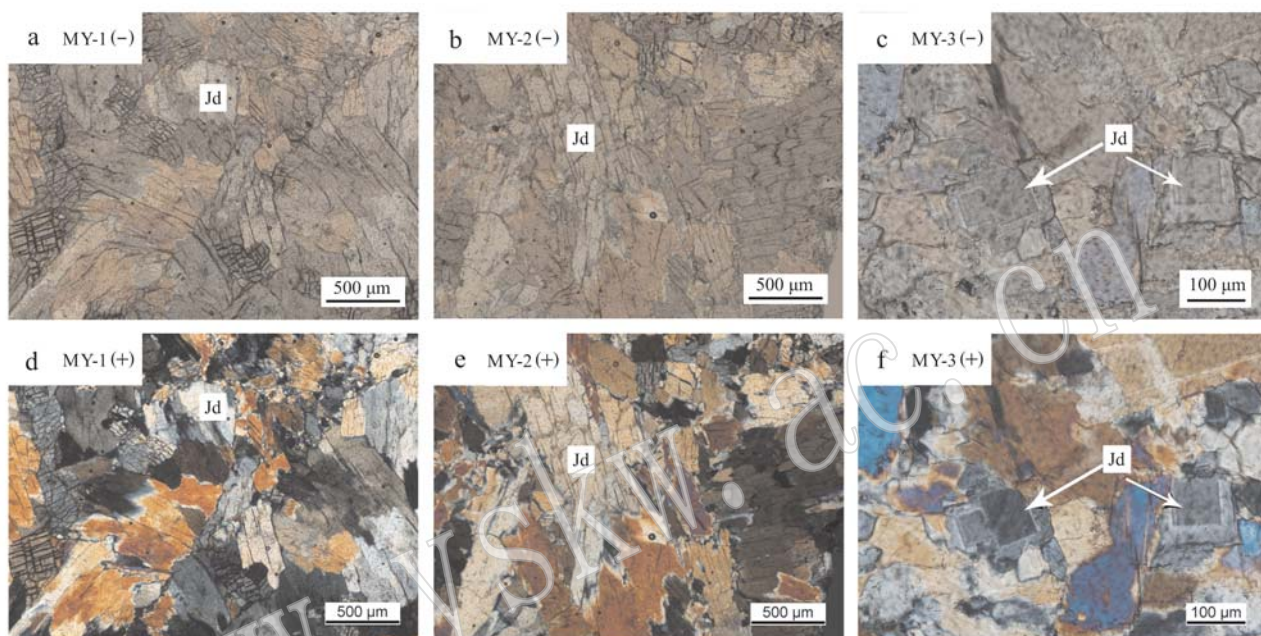


图3 缅甸油青种翡翠在偏光显微镜下特征

Fig. 3 Characteristics of "oil green" jadeite in Myanmar under polarizing microscope

3.3 矿物成分分析

3.3.1 X射线粉晶衍射测试

对5件危地马拉蓝水料和5件缅甸油青种翡翠样品的X射线粉晶衍射结果显示,危地马拉蓝水料在 6.21 、 4.28 、 3.10 、 2.92 、 2.83 、 2.49 、 2.41 、 2.07 、 1.97 、 $1.57\text{ }\text{\AA}$ 等处出现强衍射峰,与国际标准粉晶衍射数据卡片PDF: 22-1388硬玉的衍射峰位吻合。同时,在 $2\theta=28^\circ\sim 32^\circ$ 间, d 值为 3.16 、 2.96 、 $2.87\text{ }\text{\AA}$ 等处显示绿辉石衍射峰位,表明其主要组成矿物为硬玉,次要矿物成分为绿辉石(图4)。X射线粉末衍射峰形尖锐,表明矿物结晶程度较高。绿辉石具有3种不同结构,空间群分别为 $C2/c$ 、 $P2$ 和 $P2_1/n$,主要与M2和M1不同阳离子的量和有序-无序有关(陈晶晶, 2009)。测试结果显示样品中绿辉石与 $P2$ 型绿辉石的衍射线吻合,由此可进一步推测危地马拉含绿辉石硬玉岩形成于低温有序的形成环境。

缅甸油青种翡翠样品在 6.20 、 4.28 、 3.10 、 2.92 、

2.82 、 2.49 、 2.41 、 2.07 、 1.97 、 $1.57\text{ }\text{\AA}$ 等处出现强衍射峰,不含有杂质峰,峰形尖锐,表明其主要成分为硬玉,结晶良好(图5)。由于缅甸油青种翡翠中的绿辉石含量很少,矿物XRD研究中,含量5%以下的矿物不能够准确探测(王元熙, 1988),因此XRD无法探测到缅甸油青翡翠中的绿辉石。

3.3.2 激光拉曼测试

危地马拉蓝水料翡翠样品中可见绿色点状杂质矿物及白色点状、絮状杂质矿物,利用激光拉曼光谱仪对杂质矿物进行了成分测试。结果表明,危地马拉蓝水料样品中白色点状、絮状杂质矿物在 506 、 479 、 291 、 208 、 185 、 160 cm^{-1} 等处存在拉曼位移峰(图6),表明白色斑点成分为钠长石。基质部分在 1037 、 985 、 777 、 697 、 522 、 431 、 372 、 308 、 253 和 201 cm^{-1} 等处显示硬玉的典型拉曼光谱特征(图6),峰形尖锐,表明矿物结晶程度良好。

对GY-1、GY-3样品出露表面的绿色点状杂质测

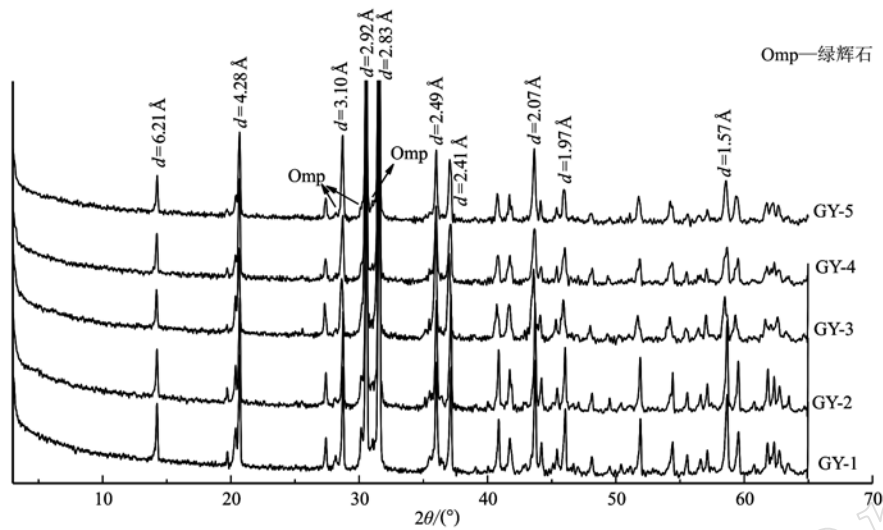


图4 危地马拉蓝水料样品 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of Guatemala "blue water" samples

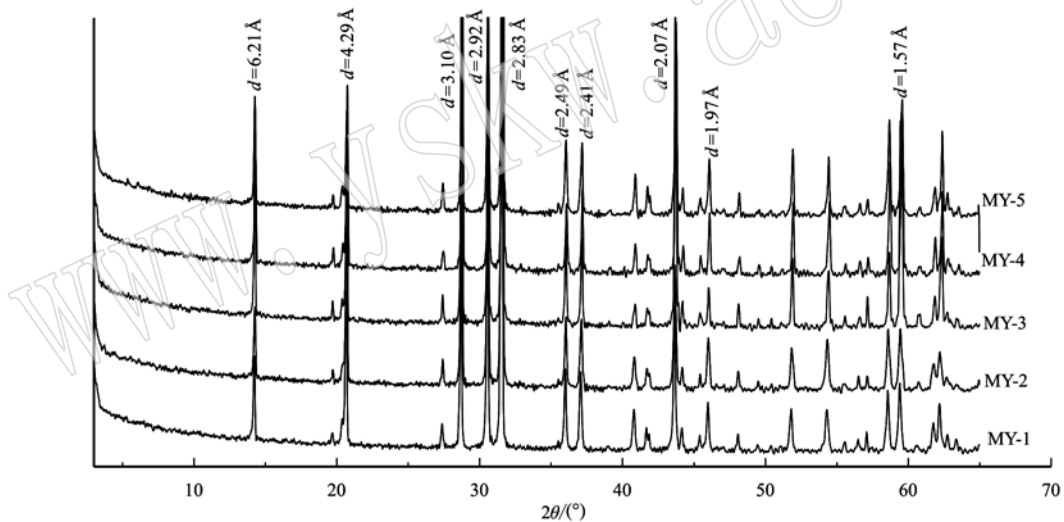


图5 缅甸油青种翡翠样品 XRD 图谱

Fig. 5 XRD pattern of Myanmar "oil green" jadeite samples

试结果显示,拉曼位移峰在 1 035、1 022、1 011、983、974、698、680、376 cm^{-1} 处存在拉曼位移峰(图7),其中 1 035、983、698、376 cm^{-1} 这几处强峰指示硬玉,680、1 022 cm^{-1} 处的拉曼位移峰与绿辉石标准峰吻合(图7)。根据链状硅酸盐的振动光谱归属,认为 1 022 cm^{-1} 处位移峰归属为 Si—O_t 伸缩振动谱带,680 cm^{-1} 位移峰为 Si—O—Si 弯曲振动谱带(Gendron *et al.*, 2002; 陈全莉等, 2012)。同时,在 974 和 1 011 cm^{-1} 处存在肩峰,分别为霓石与普通辉石的主峰,结合下文危地马拉蓝水料绿色杂质包体

电子探针测试结果分析,认为该处位移峰指示霓辉石。

3.3.3 背散射电子图像观察

通过背散射电子衬度图观察可知,危地马拉蓝水料主要由硬玉与绿辉石组成,硬玉呈长柱状(粒径约 20 μm)或它形细粒状(粒度小于 10 μm),无明显定向性(图8a),与偏光显微镜观察结果一致。蓝水料硬玉颗粒可见韵律环带结构,环带层数为 2~3 层,通常发育单层环带,常见暗色核心,边缘为浅灰衬度(图8b),少量颗粒发育2层环带,核心显示浅

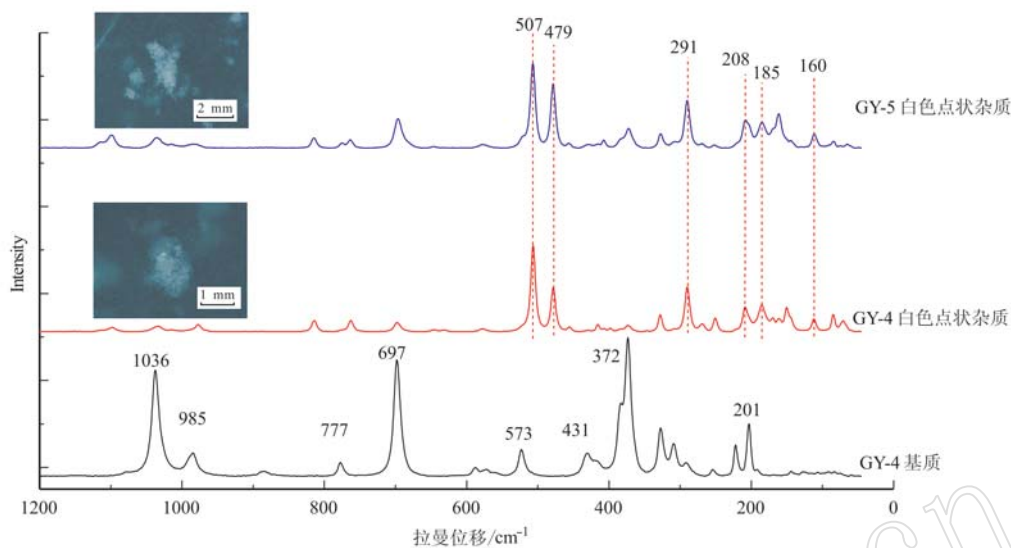


图6 危地马拉蓝水料白色点状杂质矿物及基质拉曼谱图

Fig. 6 Raman spectra of white point impurity minerals and matrix of "blue water" in Guatemala

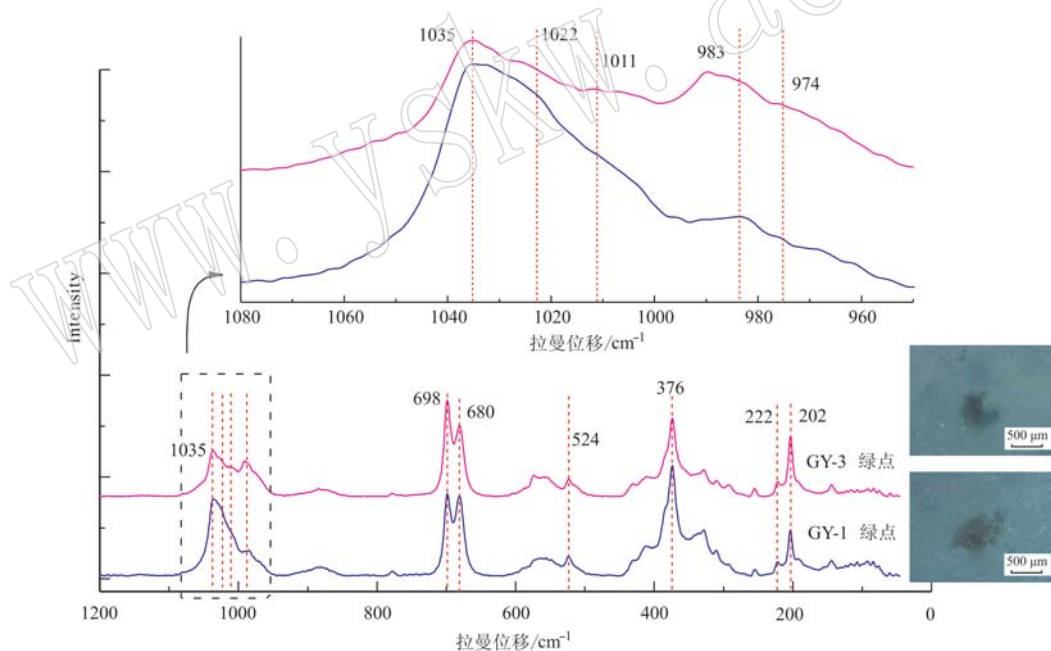


图7 危地马拉蓝水料翡翠中绿色点状杂质矿物的拉曼谱图

Fig. 7 Raman spectra of green spotted impurity minerals in Guatemala "blue water" jadeite

灰衬度(图8c)。

在背散射电子图像中,绿辉石显示为浅色衬度,在危地马拉蓝水料中分布较多。绿辉石主要呈3种存在形式:第1种呈脉状形式存在,通常切穿并充填早期硬玉颗粒及颗粒间隙,随着温度的降低发生热液结晶分离,形成绿辉石与硬玉颗粒(图8d、8e);第2种为绿辉石呈不规则状充填于硬玉颗粒间隙,交代

早期硬玉,可见部分硬玉呈孤岛状存在(图8f);第3种绿辉石自形程度高,呈柱状、长柱状、纤维状,在危地马拉蓝水料中以绿色点状杂质形式存在(图8g)。部分自形颗粒内部可见深色衬度绿辉石与浅色衬度霓辉石两种存在普遍类质同像的矿物共存(图8h),反映出早期温压条件下辉石组端员矿物固溶体互溶,当后期压力降低时,二者相互分离。

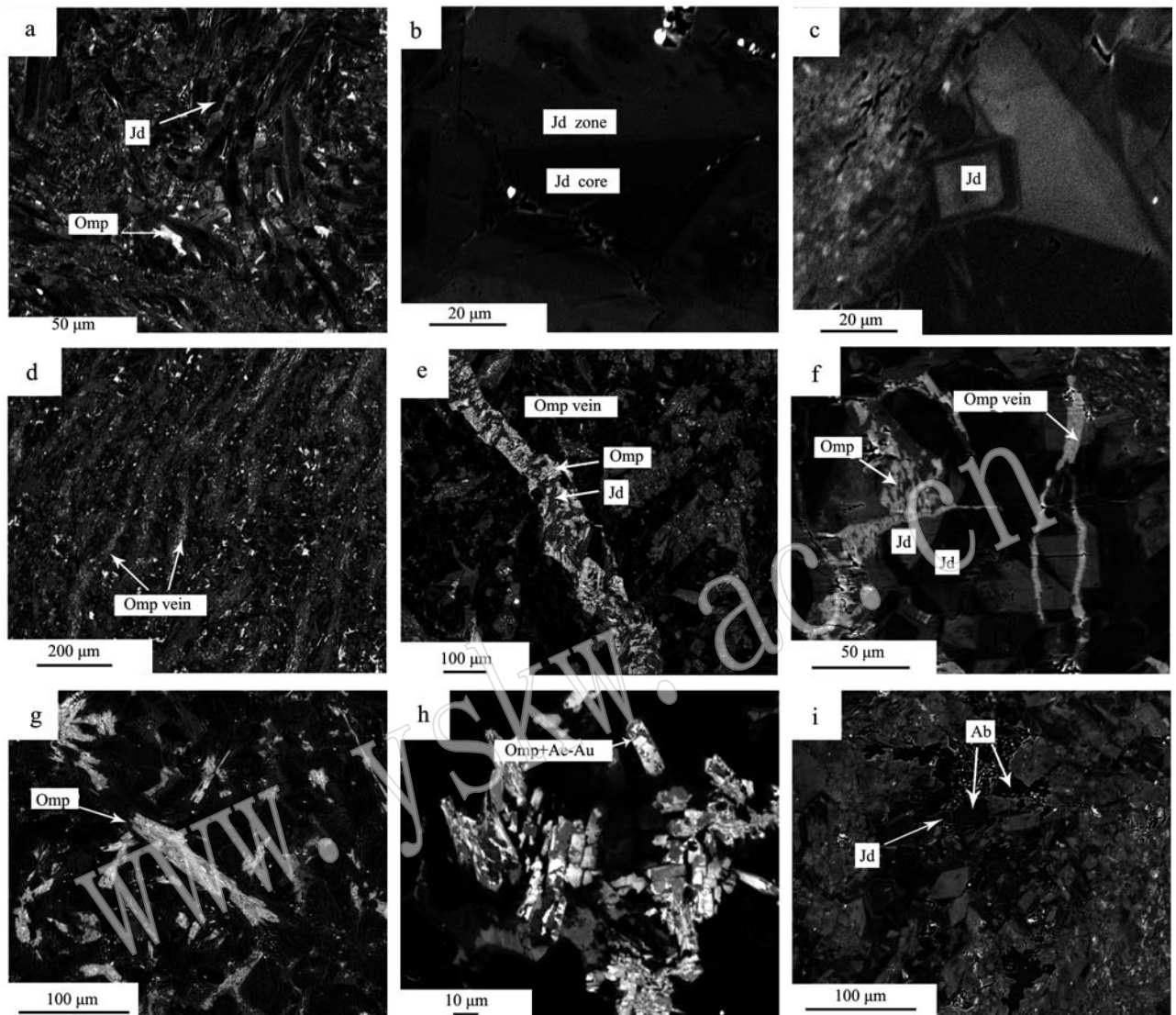


图8 危地马拉蓝水料背散射电子衬度图

Fig. 8 Backscatter images of Guatemala "blue water" jadeite

Jd—硬玉; Jd core—硬玉环带核心; Jd zone—硬玉外层环带; Omp—绿辉石; Omp vein—绿辉石脉; Ae-Au—霓辉石; Ab—钠长石
Jd—jadeite; Jd core—core of jadeite zoning structure; Jd zone—layer of jadeite zoning structure; Omp—omphacite; Omp vein—omphacite vein;
Ae-Au—aegirine-augite; Ab—albite

危地马拉蓝水料中的钠长石杂质矿物呈点状相间分布于硬玉中(图8i)。

缅甸油青种翡翠主要由硬玉组成。硬玉呈柱状、粒状,自形程度较高,粒径约100~300 μm,呈柱粒状镶嵌结构,三维无序,无明显定向性(图9a、9b),与偏光显微镜下观察结果一致。在背散射电子衬度图像中,缅甸油青种翡翠硬玉颗粒可见明显明暗交替的韵律环带结构,硬玉环带显示为不同衬度,深灰衬度的环带区域相对明亮衬度的环带区域富Ca、Mg。硬玉颗粒常见以深灰衬度为核心,韵律环带通常发育3~5层(图9b~9d)。部分硬玉颗粒环

带发生弯曲变形(图9c),表明晶体生长具有间断性,其所处地质环境发生变化。

相对危地马拉蓝水料,缅甸油青种翡翠中绿辉石分布较少,部分区域可见绿辉石以脉状充填硬玉颗粒间隙或被硬玉颗粒交代呈孤岛状,交代残余绿辉石颗粒与硬玉间存在明显反应边,反应边成分为硬玉(图9e、9f)。绿辉石脉中间几乎不含有硬玉成分或含量较少(图9e),与危地马拉绿辉石脉的存在形式明显不同。

3.3.4 电子探针测试

通过危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠中硬玉

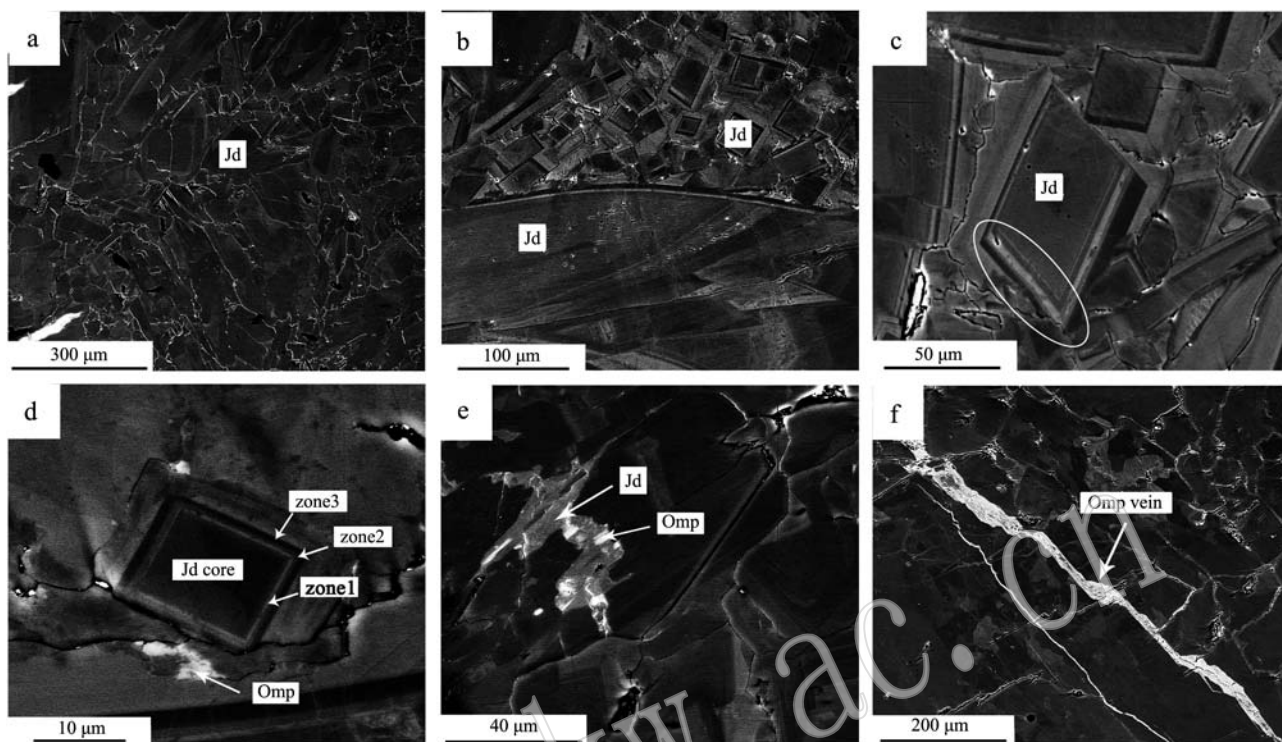


图9 缅甸油青种翡翠背散射电子衬度图

Fig. 9 Backscatter images of Myanmar “oil green” jadeite

Jd—硬玉；Omp—绿辉石；Omp vein—绿辉石脉；Jd core—硬玉环带核心；zone1~3—硬玉颗粒第1~3层外层环带

Jd—jadeite; Omp—omphacite; Omp vein—omphacite vein; Jd core—core of jadeite zoning structure; zone1~3—the 1~3 layers of jadeite zoning structure

的探针结果分析可知,危地马拉蓝水料样品中硬玉矿物的 Jd ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$) 端员含量 (Jd 平均值为 95.74%) 比缅甸油青种 (Jd 平均值为 99.10%) 低 (表 2), WEF 端员含量明显高于缅甸油青种 (表 2), CaO 、 MgO 含量高于缅甸油青种中的硬玉矿物。

危地马拉硬玉韵律环带伴随着成分的振荡变化,其核部深灰衬度 Jd 含量明显高于边缘浅灰衬度 (表 3),环带核部 Jd 端员平均含量为 98.23%;浅灰环带边缘 Jd 端员平均含量为 86.98%。浅灰环带边缘 CaO (1.99% ~ 2.52%)、 MgO (1.99% ~ 2.52%) 含量较核部 CaO (0.40% ~ 0.49%)、 MgO (0.28% ~ 0.34%) 含量高。

缅甸油青种硬玉颗粒通常发育 3 层及 4 层韵律环带 (图 9d),核部与第 2 层环带均为深灰衬度, Jd 含量最高, CaO (0.44% ~ 1.60%)、 MgO (0.34% ~ 1.19%) 含量最低;第 1 层环带为深灰衬度, Jd 含量相对较低, CaO 、 MgO 含量分别为 1.72% ~ 1.940%、1.30% ~ 1.62%;第 3 层边缘为浅灰衬度, Jd 含量最低, CaO 、 MgO 含量分别为 2.33% ~ 2.66%、1.90%

~2.08% (表 3)。

对比两个品种硬玉环带不同层 CaO 、 MgO 含量,发现两个品种硬玉环带核心 CaO 、 MgO 含量基本在同一区间范围,而危地马拉蓝水料硬玉环带边缘 CaO 、 MgO 含量与缅甸油青种硬玉颗粒的第 3 层环带接近;危地马拉硬玉环带发育层数较少,同时 CaO 、 MgO 含量变化区间较大;缅甸硬玉环带核部 Ca 、 Mg 含量最低,随后向外 Ca 、 Mg 含量增加,继而周期性交替变化。

危地马拉蓝水料与缅甸油青种均包含绿辉石成分。危地马拉蓝水料硬玉岩中存在 3 种形式的绿辉石,其 CaO 、 MgO 、 FeO 含量存在明显差异 (表 4): ① 脉状绿辉石充填早期硬玉颗粒及颗粒间隙,随着温度的降低,发生热液结晶分离,形成绿辉石与硬玉颗粒。该形式绿辉石的 CaO 、 MgO 、 FeO 平均含量分别为 14.13%、9.57%、1.53%; ② 绿辉石呈不规则状充填于硬玉颗粒间隙,并交代早期硬玉,部分区域可见硬玉呈孤岛状存在。该形式绿辉石的 CaO 、 MgO 平均含量分别为 10.73%、7.03%,明显低于后期充

表 2 危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠硬玉颗粒电子探针测试结果

$w_B/\%$

Table 2 Analytical results of EPMA for Guatemala “blue water” and Myanmar “oil green” jadeites

样品	GY-1	GY-2	GY-3	GY-4	GY-5	MY-1	MY-2	MY-3	MY-4	MY-5
SiO ₂	58.42	58.06	58.34	59.13	58.74	59.88	59.30	59.78	60.05	59.96
TiO ₂	0.05	0.03	0.02	0.04	0.06	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	24.48	24.18	24.40	25.42	24.43	24.80	25.60	26.28	26.10	25.98
FeO	0.42	0.36	0.28	0.18	0.39	0.04	0.19	0.02	0.00	0.00
MnO	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00
MgO	0.25	0.72	0.52	0.35	0.63	0.56	0.03	0.00	0.10	0.02
CaO	0.59	0.92	0.81	0.56	0.92	0.58	0.11	0.01	0.05	0.19
Na ₂ O	14.88	14.76	14.56	14.61	14.28	14.75	14.33	15.00	15.00	14.77
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.11	99.03	98.94	100.31	99.46	100.64	99.66	101.09	101.32	100.92
TSi	1.99	1.98	1.99	1.99	2.00	2.01	2.02	1.99	2.00	2.01
TAl	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
TFe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al _{M1}	0.97	0.95	0.97	1.00	0.98	0.98	1.03	1.03	1.02	1.03
Fe _{M1} ³⁺	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti _{M1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr _{M1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg _{M1}	0.01	0.04	0.03	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe _{M1} ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn _{M1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg _{M2}	0.01	0.04	0.03	0.02	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe _{M2} ²⁺	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Mn _{M2}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca _{M2}	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01
Na _{M2}	0.98	0.97	0.96	0.95	0.94	0.96	0.94	0.97	0.97	0.96
Σ Cation	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Wo	1.07	1.63	1.48	1.03	1.70	1.05	0.21	0.03	0.10	0.35
En	1.28	3.53	2.65	0.91	2.59	2.39	0.09	0.00	0.24	0.05
Fs	0.00	0.00	0.40	0.26	0.57	0.06	0.28	0.03	0.00	0.00
WEF	2.35	5.16	4.52	2.20	4.86	3.50	0.58	0.05	0.34	0.40
Jd	96.46	93.81	95.47	97.80	95.14	96.50	99.42	99.95	99.66	99.60
Ae	1.19	1.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
名称	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd

WEF 为 Wo、En 和 Fs 3 种矿物含量总和; Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—铁辉石; Jd—硬玉; Omp—绿辉石; Ae—霓石; 下表同。

填脉状绿辉石;FeO 平均含量为 4.11%,明显高于脉状绿辉石 FeO 含量;③ 绿辉石发育自形柱状、长柱状或纤维状。该形式绿辉石 CaO、MgO 平均含量相对较低,分别为 11.33%、7.52%,FeO 平均含量达到 5.64%,该形式绿辉石 FeO 含量最高。

在背散射电子图像下,部分自形绿辉石颗粒内部含有不规则状浅色衬度区域(图 8h),该部分霓石(Ae)端员组分含量明显增加,可达 41.41%,根据 Morimoto(1989)辉石命名法则进行辉石端员投影,结果显示该矿物为霓辉石(图 10),表明危地马拉蓝水料翡翠中绿色点状杂质主要成分为富铁绿辉石与霓辉石。危地马拉蓝水料中包含较多钠长石杂质矿

物,在蓝水料中以白色点状、絮状形式存在(表 4)。缅甸油青种翡翠中绿辉石主要以脉状与交代残余状两种形式存在,两者的 CaO、MgO、FeO 三者含量无明显差异(表 4)。

4 结果与讨论

4.1 硬玉环带结构与化学成分的差异

危地马拉蓝水料中的硬玉与缅甸油青种中的硬玉矿物均可见环带结构,说明高压变质过程中均存在化学成分的变化。危地马拉蓝水料和缅甸油青种中的硬玉核部均为化学成分较纯的硬玉矿物,Na和

表 3 危地马拉蓝水料与缅甸油青种硬玉环带电子探针测试结果

$w_B/\%$

Table 3 Analytical results of EPMA for the rhythmic zoning of “blue water” jadeite from Guatemala and “oil green” jadeite from Myanmar

样品编号	GY-1		GY-2		GY-3		MY-1				MY-2			
	核部	环带	核部	环带	核部	环带	核部	环带 1	环带 2	环带 3	核部	环带 1	环带 2	环带 3
SiO ₂	58.31	57.71	58.50	58.35	58.91	58.60	58.65	58.12	58.62	58.46	59.18	59.15	59.72	58.67
TiO ₂	0.00	0.07	0.00	0.10	0.00	0.04	0.01	0.06	0.08	0.10	0.00	0.04	0.00	0.10
Al ₂ O ₃	25.27	22.58	25.21	21.77	25.05	22.13	24.29	22.14	23.44	22.25	24.45	23.89	25.90	22.23
FeO	0.09	0.44	0.11	0.66	0.14	0.57	0.32	0.91	0.92	0.59	0.10	0.23	0.05	0.58
MnO	0.06	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
MgO	0.29	1.42	0.34	1.55	0.28	1.83	0.52	1.62	0.78	1.90	1.19	1.30	0.34	2.08
CaO	0.49	1.99	0.40	2.30	0.43	2.52	0.72	1.94	0.83	2.33	1.60	1.72	0.44	2.66
Na ₂ O	14.61	14.14	14.71	13.56	14.30	13.13	14.30	13.98	14.38	13.90	14.02	13.77	14.64	12.98
K ₂ O	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P ₂ O ₅	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
Total	99.13	98.36	99.30	98.29	99.14	98.82	98.86	98.82	99.05	99.53	100.58	100.14	101.07	99.30
TSi	1.98	1.98	1.99	2.02	2.01	2.02	2.01	1.99	2.00	1.99	1.99	2.00	2.00	2.01
TAl	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
TFe ³⁺	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 _{M1}	1.01	0.90	1.00	0.89	1.01	0.90	0.98	0.89	0.94	0.88	0.97	0.95	1.02	0.90
Fe _{M1} ³⁺	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti _{M1}	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
Cr _{M1}	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 _{M1}	0.00	0.07	0.00	0.08	0.00	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.10
Fe _{M1} ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn _{M1}	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 _{M2}	0.01	0.07	0.02	0.08	0.01	0.09	0.03	0.08	0.04	0.10	0.06	0.07	0.02	0.11
Fe _{M2} ²⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02
Mn _{M2}	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
Ca _{M2}	0.02	0.07	0.01	0.09	0.02	0.09	0.03	0.07	0.03	0.08	0.06	0.06	0.02	0.10
Na _{M2}	0.96	0.94	0.97	0.91	0.95	0.88	0.95	0.93	0.95	0.92	0.92	0.90	0.95	0.86
Σ Cation	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
Wo	0.91	3.49	0.73	4.09	0.81	4.52	1.33	3.54	1.51	4.21	2.97	3.13	0.81	4.78
En	0.75	6.91	0.87	7.67	0.73	9.44	2.28	4.12	1.98	4.78	3.05	5.55	0.87	10.00
Fs	0.14	0.00	0.16	0.91	0.21	0.79	0.46	0.00	1.31	0.00	0.15	0.33	0.07	0.81
WEF	1.80	10.40	1.75	12.67	1.75	14.76	4.08	7.66	4.80	8.99	6.17	9.02	1.76	15.59
Jd	98.20	88.37	98.25	87.33	98.25	85.24	95.92	89.71	95.20	89.31	93.83	90.98	98.24	84.41
Ae	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.63	0.00	1.70	0.00	0.00	0.00	0.00
名称	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd	Jd

Al 含量高。危地马拉蓝水料中的硬玉颗粒通常发育单层环带,缅甸油青种翡翠硬玉颗粒通常发育 3~5 层环带,两者的核部 Ca、Mg 含量无明显差异,前者单层环带边缘与后者环带最外层成分接近。硬玉颗粒韵律环带结构表明周围环境经历了动荡-稳定-动荡,组分重新接近平衡的过程。辉石中明暗交替的环带可以说明成矿流体携带的 Ca、Mg 物质在周围物理化学条件变化过程中有规律地进入到硬玉中,从而提升了硬玉颗粒 Ca-Mg-Fe 辉石组分的含量。硬

玉环带的形态可以指示晶体生长环境的稳定程度,当环带数较少时,表明流体的性质和流量相对稳定,变化周期较长;反之,晶体生长环境不稳定,当环带弯曲不平,说明晶体生长具有间断性,并且可能发生过溶蚀,进而说明矿物的形成环境是不断变化的(张智宇等,2012)。危地马拉硬玉晶体环带层数较少,环带边界平直并且连续;缅甸硬玉晶体环带层数较多,同时环带出现弯曲。该现象指示两产地的硬玉矿物结晶环境存在差异。

表 4 危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠杂质矿物电子探针测试结果

Table 4 Analytical results of EPMA for punctate minerals of Guatemala “blue water” jadeite and Myanmar “oil green” jadeite

$w_B/\%$

样品 矿物	危地马拉蓝水料							缅甸油青种翡翠				
	脉状绿辉石	交代残余绿辉石	自形绿辉石	绿辉石离溶部分	钠长石			脉状绿辉石	交代残余绿辉石颗粒			
SiO ₂	56.48	56.42	56.41	56.58	55.18	55.66	54.59	68.91	55.86	55.51	56.86	56.81
TiO ₂	0.04	0.03	0.10	0.16	0.07	0.07	0.39	0.013	0.00	0.12	0.13	0.49
Al ₂ O ₃	12.08	9.37	11.81	13.84	10.96	10.64	9.63	19.56	11.87	11.12	11.79	10.82
FeO	1.89	1.18	3.42	4.81	6.70	5.88	14.73	0.04	1.91	1.27	1.407	2.15
MnO	0.06	0.04	0.03	0.05	0.06	0.07	0.07	0.01	0.08	0.01	0.02	0.04
MgO	9.25	9.89	8.06	6.01	7.27	7.59	2.74	0.01	9.94	10.58	9.13	10.10
CaO	11.96	16.31	11.85	9.62	12.58	11.62	5.39	0.02	12.38	12.87	11.61	12.27
Na ₂ O	7.52	5.79	7.24	8.38	6.73	7.56	11.35	11.98	7.02	6.87	7.765	7.32
K ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02
Cr ₂ O ₃	0.01	0.00	0.00	0.01	0.04	0.00	0.02	—	0.00	0.01	0.00	0.03
NiO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.01	0.03
P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	99.29	99.03	98.92	99.49	99.61	99.09	98.92	100.55	99.08	98.38	98.72	100.07
TSi	1.99	2.02	2.01	2.01	1.98	1.99	1.98	—	1.97	1.97	2.01	1.99
TAl	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	—	0.00	0.03	0.00	0.00
TFe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Al _{M1}	0.49	0.39	0.50	0.58	0.46	0.44	0.39	—	0.49	0.44	0.49	0.45
Fe _{M1} ³⁺	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.08	0.41	—	0.04	0.04	0.01	0.05
Ti _{M1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	—	0.00	0.00	0.00	0.01
Cr _{M1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg _{M1}	0.48	0.53	0.43	0.32	0.39	0.41	0.15	—	0.47	0.52	0.48	0.49
Fe _{M1} ²⁺	0.00	0.04	0.07	0.14	0.17	0.09	0.03	—	0.00	0.00	0.01	0.00
Mn _{M1}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg _{M2}	0.49	0.53	0.43	0.43	0.00	0.00	0.00	—	0.52	0.56	0.48	0.53
Fe _{M2} ²⁺	0.02	0.00	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	—	0.02	0.00	0.02	0.02
Mn _{M2}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	—	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca _{M2}	0.45	0.62	0.45	0.37	0.48	0.45	0.21	—	0.47	0.49	0.44	0.46
Na _{M2}	0.51	0.40	0.50	0.58	0.47	0.53	0.80	—	0.48	0.47	0.53	0.50
Σ Cation	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	—	4.00	4.00	4.00	4.00
Wo	18.31	24.81	18.76	18.48	24.45	22.37	10.54	—	19.24	19.45	17.63	18.47
En	39.03	41.88	35.53	16.05	19.66	20.34	7.44	—	40.62	43.01	38.57	40.97
Fs	0.95	1.40	4.23	7.22	8.58	4.62	1.71	—	0.65	0.00	1.11	0.70
WEF	58.30	68.09	58.52	41.74	52.69	47.33	19.69		60.51	62.46	57.31	60.14
Jd	39.13	31.91	41.48	58.26	44.32	44.27	38.90		36.50	34.56	41.51	36.18
Ae	2.57	0.00	0.00	0.00	3.00	8.39	41.41		2.99	2.98	1.18	3.68
名称	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Omp	Ae-Au	Ab	Omp	Omp	Omp	Omp

Ae-Au—霓辉石；Ab—钠长石。

4.2 绿辉石结构构造与化学成分的差异

危地马拉蓝水料中绿辉石至少有 3 个形成阶段：早期形成的绿辉石呈自形程度高的柱状、长柱状或纤维状，可见离溶现象，形成蠕虫状构造，反映出早期高压下辉石组端员矿物固溶体互溶，当后期压力降低时，二者相互分离，同时，自形绿辉石颗粒内部广泛的离溶现象也表明发生了强烈的退变质作用（Tsujimori *et al.*，2005）；中期绿辉石呈不规则状充填于硬玉颗粒间隙，交代早期硬玉颗粒。该期次绿

辉石的 CaO（平均含量 10.73%）、MgO（平均含量 7.03%）含量较低，与早期绿辉石含量差异不大，但 FeO 含量低于早期自形绿辉石颗粒。后期热液沿微裂隙充填早期硬玉颗粒及颗粒间隙，热液中 Na 与 Ca 成分含量相对较高，随着温度的降低发生热液结晶分离，形成绿辉石与硬玉颗粒。该期次绿辉石的 CaO、MgO、FeO 平均含量为 14.13%、9.57%、1.53%，Ca、Mg 平均含量明显高于前两期绿辉石，Fe 含量为 3 个期次中最低。

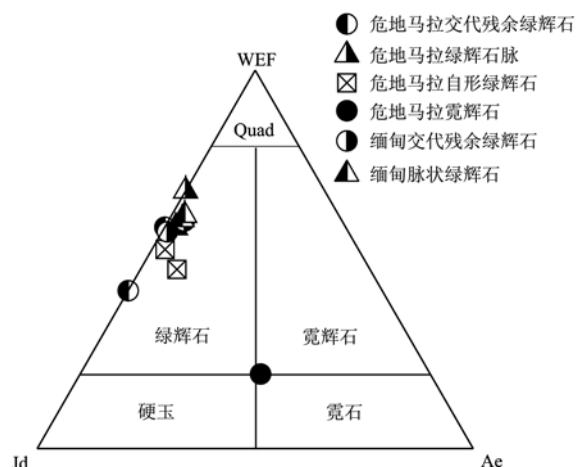


图 10 危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠中不同形式绿辉石的 Jd - Ae - WEF 投影图(据 Morimoto, 1989)

Fig. 10 Jd - Ae - WEF diagram of omphacite in Guatemalan "blue water" and Myanmar "oil green" jadeite (Morimoto, 1989)
WEF—Wo、En 和 Fs 3 种矿物含量总和; Wo—硅灰石; En—顽火辉石; Fs—铁辉石; Jd—硬玉; Ae—霓石
WEF—the sum of Wo, En, Fs; Wo—wollastonite; En—enstatite; Fs—ferrosilite; Jd—jadeite; Ae—aeirine

缅甸油青种中的绿辉石主要以交代残余状与脉状两种形式存在,两者的 CaO、MgO 平均含量无明显差异。结合背散射电子图像分析,认为缅甸油青种翡翠中的绿辉石为同期次形成,且形成时间晚于硬玉。

对比分析危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠硬玉以及晚期绿辉石成分差异,前者的 CaO 含量明显高于缅甸油青种翡翠,另外由于霓石的存在,推测危地马拉硬玉岩的成矿热液中 Ca 和 Fe 含量高于缅甸。

4.3 硬玉岩结构与矿物组成对形成环境的指示

危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠都是基本由碱性辉石亚族矿物形成的集合体,但是两者在矿物组成和结构类型上存在较大差异。

危地马拉蓝水料主要组成成分为硬玉与绿辉石,绿辉石含量较高,并包含有少量的钠长石杂质矿物,并可检测到微量的霓辉石,整体发育等粒状结构。危地马拉蓝水料后期热液充填微裂隙,随着后期温度的下降,热液分离结晶形成绿辉石与硬玉矿物。该现象表明危地马拉后期构造活动频繁,热液成分变化较大。

缅甸油青种翡翠主要成分为硬玉,杂质矿物含量较少,硬玉颗粒粒度大于危地马拉蓝水料,自形程度高。硬玉岩以变晶结构为主,存在交代结构及动力变质结构。其中缅甸油青种翡翠中的后期主要沿

裂隙充填,以脉状绿辉石形式存在,绿辉石脉边界清晰,且不包含或很少包含有硬玉成分。

5 结论

危地马拉蓝水料与缅甸油青种翡翠均以硬玉为主要成分,分别含有少量和微量的绿辉石,形成于碱性变质岩中。缅甸油青种翡翠 Jd 端员含量较危地马拉蓝水料高,WEF 含量较危地马拉蓝水料低,两者的结晶度均良好。利用激光拉曼和电子探针对危地马拉蓝水料中绿色与白色杂质斑点进行的结构与成分测试结果表明,绿色杂质斑点成分为富铁绿辉石与霓辉石,白色杂质斑点成分为钠长石。危地马拉蓝水料中的硬玉颗粒常见短柱状、纤维状或不规则状,部分颗粒可见弯曲变形现象,硬玉粒径相对细小,分布无明显定向,该品种翡翠结构主要为等粒状变晶结构。缅甸油青种翡翠中的硬玉常呈长柱状或粒状,晶形发育完整,硬玉颗粒比危地马拉蓝水料明显粗大,颗粒分布无明显定向,整体结构主要为柱粒状变晶结构。

两产地的硬玉颗粒均具有韵律环带结构,缅甸油青种翡翠硬玉环带较危地马拉蓝水料层数多,危地马拉蓝水料中绿辉石分别以自形颗粒、交代残余、沿裂隙充填 3 种形式存在。缅甸油青种翡翠中绿辉石以脉状充填硬玉颗粒间隙或被硬玉颗粒交代呈孤岛状。危地马拉蓝水料的硬玉颗粒与脉状绿辉石的 CaO 含量均高于缅甸油青种翡翠,另外由于霓辉石的存在,推测危地马拉硬玉岩的成矿热液中 Ca 和 Fe 含量高于缅甸。

危地马拉蓝水料翡翠和缅甸油青种翡翠可以通过结构特征、杂质矿物成分、硬玉矿物环带结构以及化学成分的不同进行产地鉴别。

References

- Chen Jingjing. 2009. Gemstone Mineralogy of Jadeite in the Motagua Valley Fault Zone, Central Guatemala[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Chen Quanli, Yin Zuwei, Bu Yuewen, et al. 2012. The application of Raman spectroscopy in the mineral composition of Guatemalan Jadeite[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 32(9): 2 447 ~ 2 451 (in Chinese).
- Chen Suoyi. 2013. The Gemstone Mineralogy of "Oil Green" Jadeite[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).
- Gendron F, Smith D C and Gendron-Badou A. 2002. Discovery of

- jadeite-jade in Guatemala confirmed by non-destructive Raman microscopy[J]. *J. Archaeol. Sci.*, 29(8): 837 ~ 851.
- Harlow G E. 1994. Jadeitites, albitites and related rocks from the Motagua fault zone, Guatemala[J]. *J. Metamorph. Geol.*, 12(1): 49 ~ 68.
- Harlow G E, Sisson V B and Sorensen S S. 2011. Jadeitite from Guatemala: New observations and distinctions among multiple occurrences [J]. *Geologica Acta*, 9(3 ~ 4): 363 ~ 365.
- Harlow G E and Sorensen S S. 2005. Jade (Nephrite and Jadeitite) and Serpentinite: Metasomatic Connections[J]. *International Geology Review*, 47(2): 113 ~ 146.
- Hu Chuyan. 2004. Geological evolution characteristics of jadeite terrace deposits in Myanmar[J]. *Jewelry Technology*, (2): 62 ~ 66(in Chinese).
- Johnson C A and Harlow G E. 1999. Guatemala jadeitites and albitites were formed by deuterium-rich serpentinizing fluids deep within a subduction zone[J]. *Gemology*, 27(7): 629 ~ 632.
- Li Xuping and Zhang Lifei. 2004. Hardite and heterogeneous calcareous garnet in serpentinite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, (6): 176 ~ 183 (in Chinese with English abstract).
- Mével C and Kiénast J R. 1986. Jadeite-kosmochlor solid solution and chromite, sodic amphiboles in jadeitites and associated rocks from Tawmaw (Burma)[J]. *Bulletin de Minéralogie*, 109: 617 ~ 633.
- Morimoto N. 1989. Nomenclature of pyroxenes[J]. *Canadian Mineralogist*, 27: 143 ~ 156.
- Qi Min, Shen Kun and Xiang Hua. 2015. Fluid inclusions in Myanmar jadeitite[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(3): 405 ~ 417 (in Chinese with English abstract).
- Shi Guanghai and Cui Wenyuan. 2000. The commonness and individuality of jadeite from different areas[J]. *Geoscience Frontiers*, (1): 42(in Chinese).
- Shi G H, Tropper P, Cui W Y, *et al.* 2005. Methane (CH₄)-bearing fluid inclusions in the Myanmar jadeitite[J]. *Geochemical Journal*, 39(6): 503 ~ 516.
- Sorensen S, Harlow G E, Rumble, *et al.* 2006. The origin of jadeitite-forming subduction-zone fluids: CL-guided SIMS oxygen-isotope and trace-element evidence[J]. *Am. Miner.*, 91(7): 979 ~ 996.
- 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.
- Tsujimori T, Liou J G and Coleman R G. 2005. Coexisting retrograde jadeite and omphacite in a jadeite-bearing lawsonite eclogite from the Motagua Fault Zone, Guatemala[J]. *Am. Miner.*, 90(5 ~ 6): 836 ~ 842.
- Wang Duo, Long Chu and Tan Zhaoqin. 2009. Emerald in Guatemala[J]. *Journal of Gems and Gemology*, 11(2): 20 ~ 29 (in Chinese).
- Wang Yuanxi. 1988. X-ray and X-ray Diffraction[M]. Beijing: Higher Education Press, 45 ~ 49(in Chinese).
- Yan Weiwei and Wang Jianhua. 2013. The formation mechanism of the secondary "oil green" jadeite in the tertiary faulted basin, Myanmar [J]. *Mineral and Rock*, 33(1): 22 ~ 26(in Chinese).
- Yin Ke, Tian Jian, Ma Yubo, *et al.* 2014. Mineralogical characteristics and color origin of "Oil green" Jadeite[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 34(12): 3 323 ~ 3 326(in Chinese).
- Zhang Liangju. 2004. Study on the characteristics and genesis of the primary jade orebody in Namo, Myanmar[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(1): 49 ~ 53 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhiyu, Shi Guanghai, Ouyang Qiumei, *et al.* 2012. Petrological characteristics and geological significance of jadeite and jadeited omphacite in Guatemala[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(1): 198 ~ 208(in Chinese).
- Zheng Ting. 2015. A Study on the Mineralogical Characteristics of Green Jadeite in Guatemala[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈晶晶. 2009. 危地马拉中部麦塔高河谷断裂带翡翠的宝石矿物学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 陈全莉, 尹作为, 卜明文, 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.
- 陈索昱. 2013. "油青"翡翠的宝石矿物学研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 胡楚雁. 2004. 缅甸翡翠阶地矿床地质演化特征分析[J]. *珠宝科技*, (2): 62 ~ 66.
- 李旭平, 张立飞. 2004. 蛇纹岩体中的硬玉岩与异剥钙榴岩[J]. *岩石学报*, (6): 176 ~ 183.
- 祁敏, 沈昆, 向华. 2015. 缅甸硬玉岩中的流体包裹体[J]. *岩石矿物学杂志*, 34(3): 405 ~ 417.
- 施光海, 崔文元. 2000. 不同产地硬玉岩的共性与个性[J]. *地学前缘*, (1): 42.
- 王铎, 龙楚, 谭钊勤. 2009. 危地马拉灰绿色翡翠[J]. *宝石和宝石学杂志*, 11(2): 20 ~ 29.
- 王元熙. 1988. X射线及X射线衍射[M]. 北京: 高等教育出版社, 45 ~ 49.
- 闫薇薇, 王建华. 2013. 缅甸第三纪断陷盆地中的次生油青种翡翠的形成机理研究[J]. *矿物岩石*, 33(1): 22 ~ 26.
- 殷科, 田健, 马遇伯, 等. 2014. "油青种"翡翠的矿物学特征及颜色成因[J]. *光谱学与光谱分析*, 34(12): 3 323 ~ 3 326.
- 张良钊. 2004. 缅甸纳莫原生翡翠矿体特征与成因研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(1): 49 ~ 53.
- 张智宇, 施光海, 欧阳秋眉, 等. 2012. 危地马拉硬玉岩与硬玉化绿辉石岩的岩石学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 86(1): 198 ~ 208.
- 郑亭. 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).