

# 含霞石翡翠的成因研究

韩辰婧, 王雅玫

(中国地质大学 珠宝学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 本文针对鲜有报道的含霞石翡翠, 选择了若干具有代表性的样品进行了详细的岩相学、矿物化学、拉曼光谱和 X 射线粉晶衍射等方面的研究, 并对其成因进行了深入探讨。本研究中的样品属于翡翠中的“飘蓝花”品种, 为柱粒状结构, 主要由硬玉、霞石、角闪石和少量的钡铝硅酸盐等组成。硬玉可分为两个世代, 早期硬玉呈自形, 发育规则的环带结构, 反映了成岩流体的反复补给过程。早期自形的硬玉颗粒部分被后期细粒化的硬玉 ± 角闪石取代, 反映了后期流体事件的改造作用。根据产出和成分特征可将霞石分为两种: 贫钾霞石和富钾霞石, 其中贫钾霞石多沿自形的硬玉颗粒边界分布, 而富钾霞石充填在自形的硬玉颗粒之间。根据结构特征可以推测, 含霞石翡翠主要是从成岩流体中直接结晶形成的。矿物组成及其成分特征表明该成岩流体主要富集 Na、Al、Si、K、Ba 以及少量的 Ca、Fe、Mg 等元素, 微量元素则相对富集 LREE、HFSE 和 Sr 等元素。结合样品中的矿物相关性和前人的研究结果, 含霞石翡翠中硬玉的结晶压力和温度范围分别被限制在 0.6~1.4 GPa 和 300~450°C 之间, 其中霞石代表着母岩减压后流体活动的产物。

**关键词:** 翡翠, 硬玉, 霞石, 成岩流体, 结晶温压

中图分类号: P619.28<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)03-0581-10

## The petrogenesis of nepheline jade

HAN Chen-jing and WANG Ya-mei

(School of Gemology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In this paper, the authors conducted detailed researches on the rarely-reported nepheline jades in the aspects of petrography, mineral chemistry, Raman spectroscopy and X-ray powder diffraction, with a discussion on their petrogenesis. The jades in this study belong to the “floating blue flower” variety and are mainly composed of jadeite, nepheline and hornblende with minor Ba-aluminosilicates, assuming a tubular texture. Jadeites in these samples have two generations: the earlier ones are euhedral and show regular oscillatory zoning, indicating iterative replenishment of diagenetic fluids during the growth of jadeites; the earlier jadeites are partly replaced by later fine-grained jadeite ± amphibole, indicating the alteration caused by later fluids. On the basis of its modes of occurrence and compositions, nepheline can be divided into two types, i. e., K-poor nepheline and K-rich nepheline, in which the former occurs along the grain boundaries of the euhedral jadeites whereas the latter fills in the space between the euhedral jadeites. The textural features indicate that the nepheline jades were directly precipitated from fluids. The mineral assemblage and compositions suggest that the fluids were rich in Na, Al, Si, K, Ba with small amounts of such major elements as Ca, Fe and Mg, while the trace elements are characterized by enrichment of LREE, HFSE, Sr, etc. Combining the phase relations between the minerals in the samples with the results from previous studies, the authors hold that the crystallization *p-t* conditions for the

收稿日期: 2013-10-22; 修订日期: 2014-03-24

作者简介: 韩辰婧 (1988-), 女, 宝石学专业硕士研究生, E-mail: aramihan@163.com; 通讯作者: 王雅玫 (1962-), 女, 副教授, 地质学专业。

jadeites should be confined to 6~14 GPa and 300~450°C. The nepheline in the jades represents the precipitation product of fluids after decompression.

**Key words:** jade; jadeite; nepheline; diagenetic fluids; *p-t* conditions

迄今为止,全球已报道的翡翠产地多达十几个国家和地区,其中主要包括缅甸西北部的 Hpakan-Tawmw 硬玉岩带、日本的 Oosacho、Kamuikotan 和 Kotaki 地区、美国加州的 San Benito、俄罗斯的 Polar Urals 和 Pay Yer 地块、哈萨克斯坦的 Near Balkash 北部以及危地马拉的 Motagua 断裂带等(Harlow and Sorensen, 2005; Tsujimori and Harlow, 2012)。在这些硬玉岩的产地中,缅甸西北部的 Hpakan-Tawmw 硬玉岩带构成了优质翡翠的主要源产地,其次为危地马拉的 Motagua 断裂带,而其它地区鲜有宝石级翡翠的报道。

翡翠作为一种主要由硬玉组成的玉石,在岩石学上又名硬玉岩。针对硬玉岩,前人已经做过多方面的研究工作,例如产出的大地构造背景、岩相学、矿物学和年代学等(Harlow, 1994; Shi *et al.*, 2000, 2003, 2005a, 2005b, 2008, 2010; Fu *et al.*, 2010; Yui *et al.*, 2010, 2013; Compagnoni *et al.*, 2012; 张智宇等, 2012),并取得了若干重要研究成果。研究发现,虽然产地不同,但硬玉岩产出的大地构造背景类似,均产于俯冲带内,同洋壳俯冲期间的高压低温变质作用密切相关。在野外产状方面,硬玉岩多以脉状、团块状、透镜状或扁豆状等形式产于超基性岩体中,同围岩一般呈渐变接触关系。基于这些认识所引申的硬玉岩成因机制历来为众所关注的焦点,目前提出的主要观点可分为岩浆、热液和变质成因等三种,其中宝石级硬玉岩的成因更多倾向于热液成因(Shi *et al.*, 2000; 崔文元等, 2000; Sorensen *et al.*, 2006; Fu *et al.*, 2010; Yui *et al.*, 2010, 2012; Maresch *et al.*, 2012; Shigeno *et al.*, 2012)。

目前报道的宝石级翡翠中次要矿物多以钠长石系列为主,然而关于含霞石的翡翠则鲜有报道。笔者在收集到的翡翠样品中发现了两批含霞石的翡翠,本文对这种质地细腻、水头上佳的“飘蓝花”种翡翠,从其岩相学、矿物化学等方面进行了详细的研究和报道,以期对硬玉岩的物源、形成过程以及形成条件等方面提供新的制约。

## 1 样品描述

### 1.1 宝石学特征

所研究的含霞石的翡翠是收集自广东省佛山市平洲镇翡翠原石交易市场的缅甸翡翠。霞石翡翠属于“飘蓝花”品种,整体绿色偏蓝,蓝色飘花呈彩带状、团块状分布于浅绿色或白色半透明的基底上(图 1a, 1b)。柱粒状结构显著,可见橘皮效应和“翠性”,相对密度为 3.113~3.230,折射率为 1.658~1.662。在宝石显微镜下观察发现,样品中不同的矿物光泽不同,光泽强的部分为硬玉,为自形-半自形晶,可见清晰的柱粒状结构;光泽暗淡处为霞石,结构特征不明显,部分霞石中镶嵌有自形的硬玉颗粒(图 1c, 1d)。

### 1.2 岩相学特征

含霞石翡翠为块状构造,中细粒结构,主要由硬玉(75%~85%,体积分数,下同)、霞石(10%~20%)以及少量的角闪石(3%~5%)组成,副矿物见钡铝硅酸盐。硬玉主要呈自形的短柱状到长柱状(图 2a, 2b; 图 3a, 3b),部分被后期细粒化的硬玉±角闪石取代(图 2c, 2d; 图 3c, 3d)。另外,自形的硬玉颗粒发育规则的环带结构(图 3a, 3b)。霞石充填在自形的硬玉颗粒之间,可分为光性特征明显不同的两种霞石(图 2a, 2b),双晶不发育。钡铝硅酸盐零星地散布在硬玉和霞石中(图 3a)。

## 2 拉曼光谱和 X 射线粉晶衍射

考虑到现今市场上常见翡翠中的次要矿物主要是钠长石,而钠长石和霞石的光学特征又比较接近,采用激光拉曼光谱仪对样品中的霞石进行了微区分析,分析工作在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。仪器型号为 Thermo Scientific DXR,激光光源为 Nd:YVO<sub>4</sub>,激光波长为 532 nm,分辨率和精度分别为 3 cm<sup>-1</sup>和 0.5 cm<sup>-1</sup>(±σ)。本研究分析得到的霞石两个主峰分别为 398 cm<sup>-1</sup>

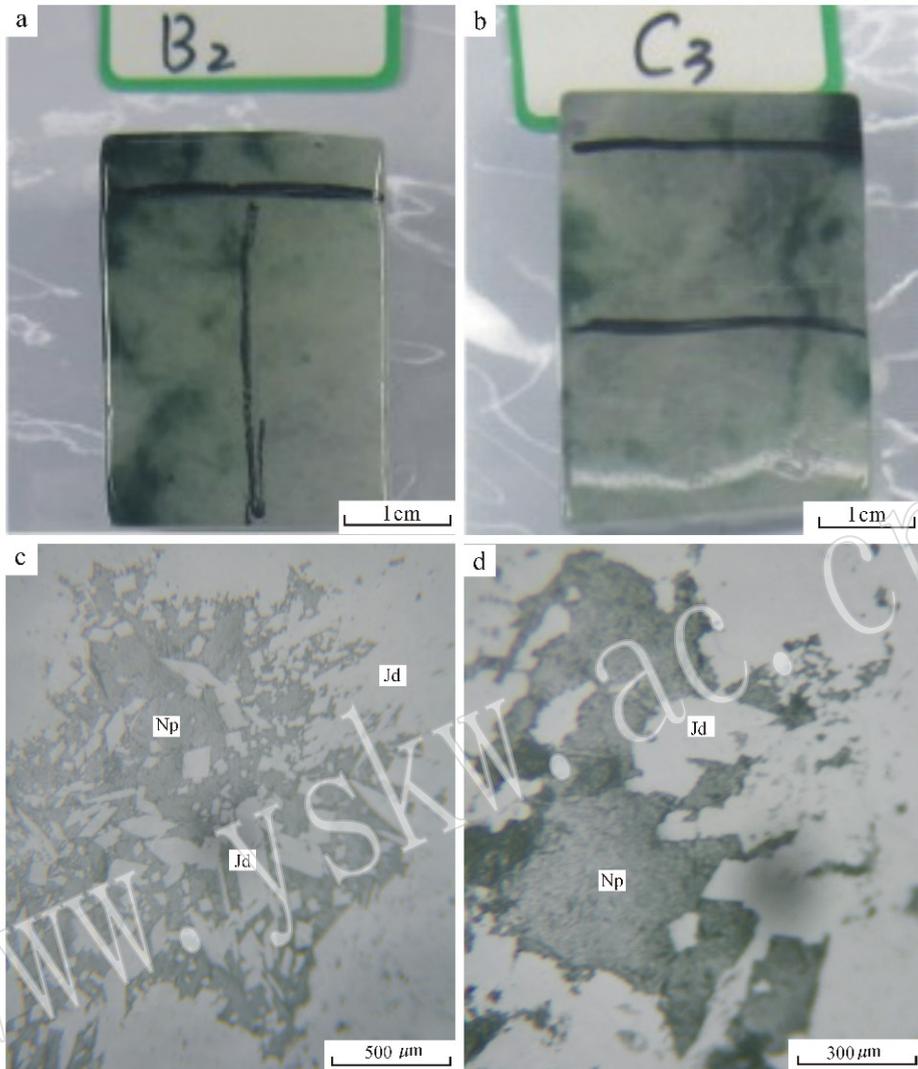


图1 霞石翡翠的宝石学特征

Fig. 1 Gemological features of nepheline jades

Jd—硬玉; Np—霞石

Jd—jadeite; Np—nepheline

和  $989\text{ cm}^{-1}$ , 较弱的峰值包括  $201\text{ cm}^{-1}$ 、 $347\text{ cm}^{-1}$  和  $465\text{ cm}^{-1}$  等(图4)。霞石的其他谱峰被树脂胶叠加后很难识别, 故未列出。

本研究还利用 X 射线粉晶衍射仪对霞石翡翠的主要矿物组成进行了分析, 分析工作中科院广州地球化学研究所完成。仪器型号为 BRUKER D8 ADVANCE, 测试条件: Cu(单色), 工作电压 40 kV, 工作电流 30 mA, 扫描范围  $2\theta=3^{\circ}\sim 85^{\circ}$ , 狭缝宽度 1 mm, 扫描速度  $4^{\circ}/\text{min}$ 。X 射线粉晶衍射的分析结果表明, 样品主要由硬玉(77.1%~93.4%)、霞石(2.5%~17.1%)和角闪石(3.9%~13.7%)等矿物组成(图5), 这和光学显微镜下的观察结果一致, 并进一步肯定了样品中霞石的存在。

### 3 矿物化学

利用电子显微镜对霞石翡翠的主要组成矿物进行了详细的结构和成分分析。电子背散射图像利用中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室的 FEI Quanta 450 FEG 场发射扫描电镜进行采集, 加速电压为 20 kV, 电流束斑的直径为  $5\text{ }\mu\text{m}$ , 工作距离为 12~15 mm。单矿物成分分析采用国家海洋局第二海洋研究所国家海洋局海底科学重点实验室 JEOL JXA-8100 电子探针, 加速电压为 15 kV, 电流为 20 nA, 电子束斑的直径为 3~10  $\mu\text{m}$ , 初始数据利用 ZAF 校正法进行处理。为便于下文描述,

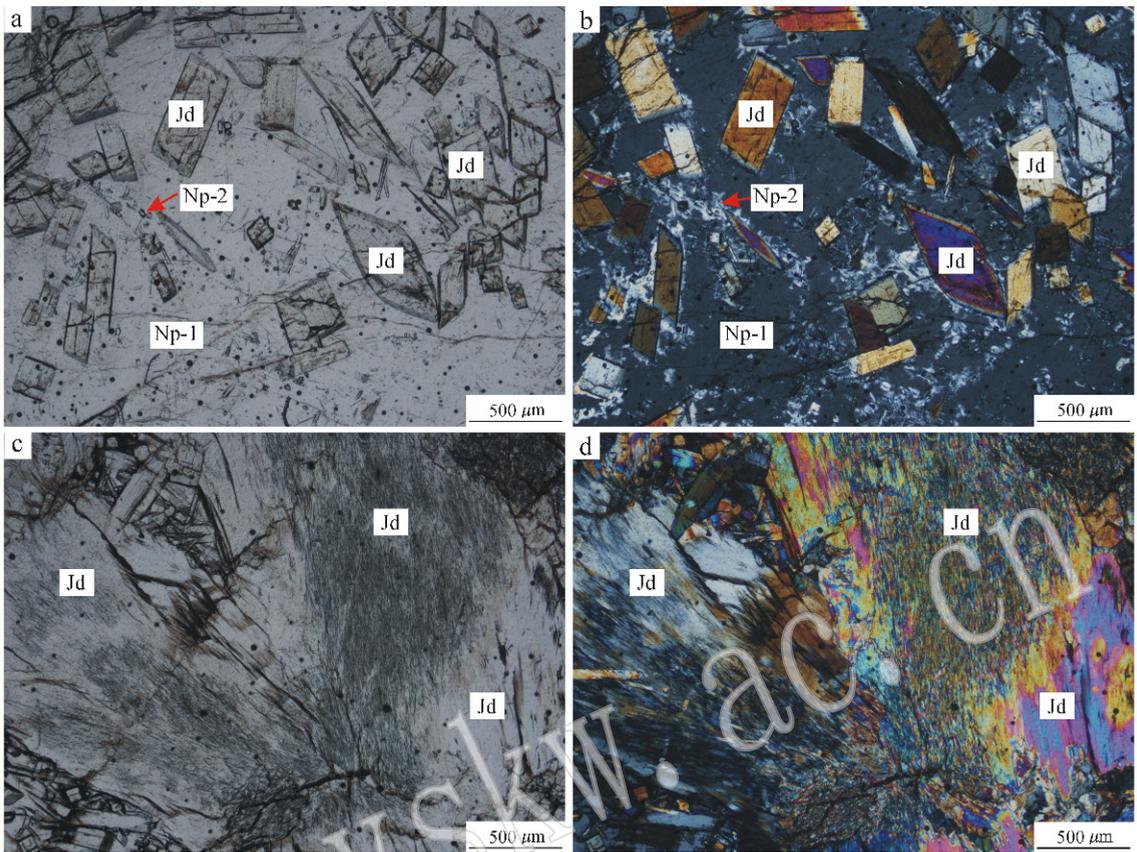


图2 霞石翡翠的镜下特征(a、c为单偏光,b、d为正交偏光)

Fig. 2 Photomicrographs of nepheline jades (a, c: plainlight, b, d: crossed nicols)

a, b—霞石中自形的硬玉晶体,可见产状不同的两种霞石; c, d—初始自形的硬玉被后期细粒化的硬玉±角闪石取代; Jd—硬玉; Np-1—富钾霞石; Np-2—贫钾霞石

a, b—euhedral jadeite crystals within nepheline; note two types of nepheline with different modes of occurrence; c, d—initial euhedral jadeites replaced by later fine-grained aggregates comprising jadeite± amphibole; Jd—jadeite; Np-1—K-rich nepheline; Np-2—K-poor nepheline

将硬玉含量从核部到边部逐渐降低即衬度由暗变亮的成分环带称之为正环带结构,反之则为反环带结构,如果正反环带相间,则称之为韵律环带结构。

电子探针分析结果表明,霞石翡翠的主要组成矿物单斜辉石全部投于硬玉的成分范围内,其成分结构多变。自形的硬玉颗粒普遍发育正环带和韵律环带结构,部分颗粒内部由若干硬玉含量较高的规则暗核组成,称之为“窗面结构”(图3a, 3b)。发育正环带结构的硬玉颗粒可以进一步分为暗核、灰幔和亮边(图3a, 3b),其端员组成依次为  $Jd_{97-99}Wo_{0-1}En_{0-1}Fs_0Ac_0$ 、 $Jd_{95-97}Wo_{1-2}En_{1-3}Fs_{0-1}Ac_0$  和  $Jd_{91-92}Wo_{3-4}En_{3-4}Fs_{1-2}Ac_0$ (表1)。后期细粒化的硬玉可以分为明暗不同的两种硬玉,较暗硬玉的端员组成为  $Jd_{97-100}Wo_{0-1}En_{0-1}Fs_{0-1}Ac_0$ , 较亮硬玉的端员组成为  $Jd_{92-95}Wo_{1-2}En_{1-2}Fs_3Ac_{0-2}$ (表1), 细粒化区域中的角闪石属于钠角闪石组(表1)。

相对钠长石而言,本研究计算得到的霞石结构分子式中明显亏损两个  $SiO_2$  分子。详细的扫描电镜观察结果显示,翡翠中的霞石可以分为两种。一种在电子背散射图像上衬度较亮,  $K_2O$  含量明显较高,具体成分为  $K_{0.12-0.13}Na_{0.81-0.84}Al_{0.98-0.99}Si_{1.01-1.03}O_4$ (表2)。另一种在电子背散射图像上衬度较暗,几乎不含  $K_2O$ ,具体成分为  $K_0Na_{0.96-0.99}Al_{0.99-1}Si_{1-1.01}O_4$ (表2)。富钾霞石明显较多,贫钾霞石多散布于由前者构成的基质中。值得注意的是,自形的硬玉颗粒边部只被贫钾霞石包绕(图3a, 3b)。

## 4 讨论

### 4.1 结构分析

根据结构关系可将含霞石翡翠中的组成矿物分

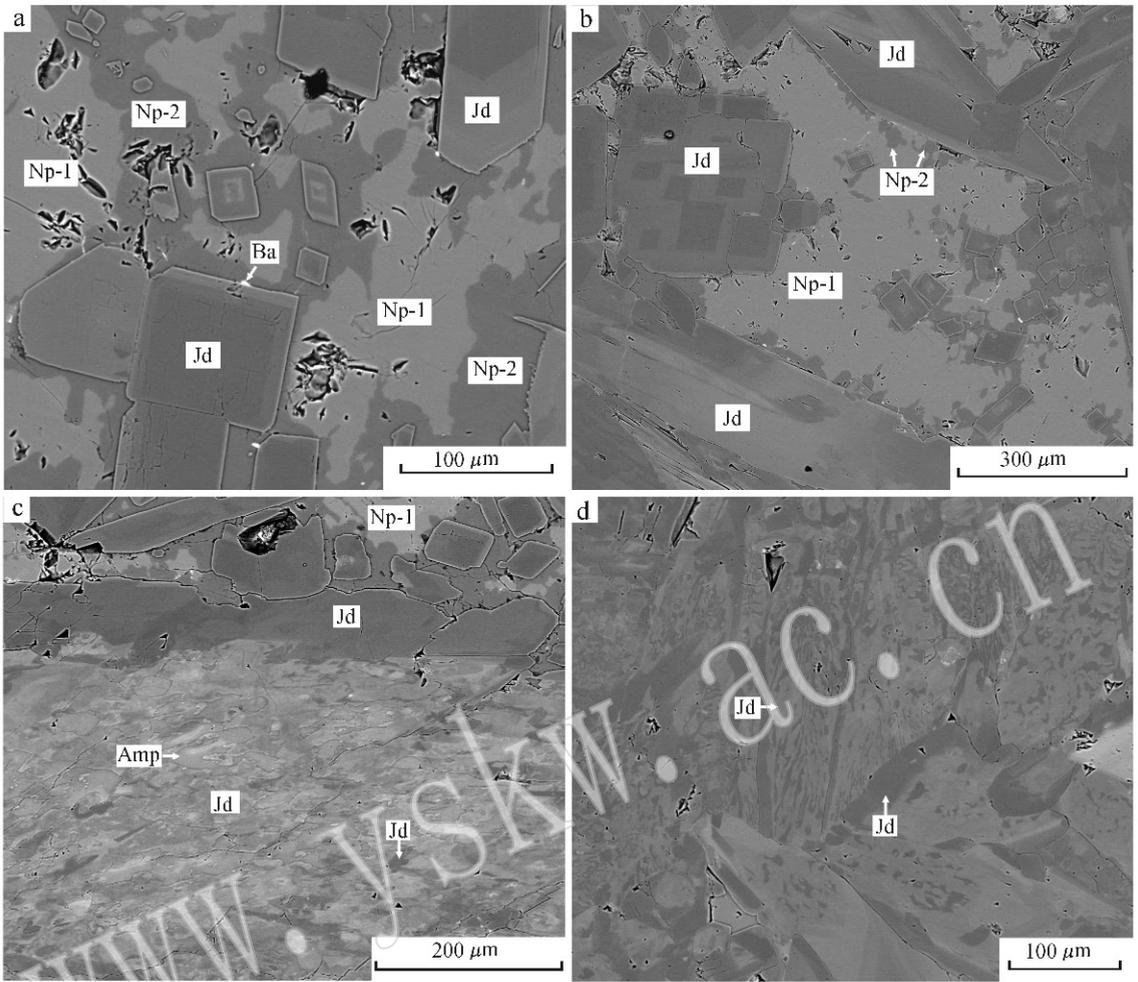


图3 霞石翡翠的电子背散射照片

Fig. 3 Back-scattered electron image of nepheline jades

a—硬玉发育正环带结构或者韵律环带结构，只有贫钾霞石沿硬玉颗粒边界分布；b—硬玉的“窗面结构”，只有贫钾霞石沿硬玉颗粒边界分布；c—早期自形的硬玉晶体被后期细粒化的硬玉+角闪石取代，可见细粒化区域中明暗交生的两种硬玉；d—细粒化的硬玉主要由明暗交生的两种硬玉组成；Ba—钡铝硅酸盐；Amp—角闪石

a—positive zoned and oscillatory zoned textures of jadeite, note that only K-poor nepheline is distributed along the jadeite boundaries; b—“grid texture” of jadeite, note that only K-poor nepheline is distributed along the jadeite boundaries; c—initial euhedral jadeites replaced by later fine-grained aggregates composed of jadeite + amphibole, note two types of jadeites with different contrasts within the fine-grained aggregates; d—fine-grained jadeite aggregates composed mainly of two types of jadeites with different contrasts; Ba—Ba-aluminosilicates; Amp—amphibole

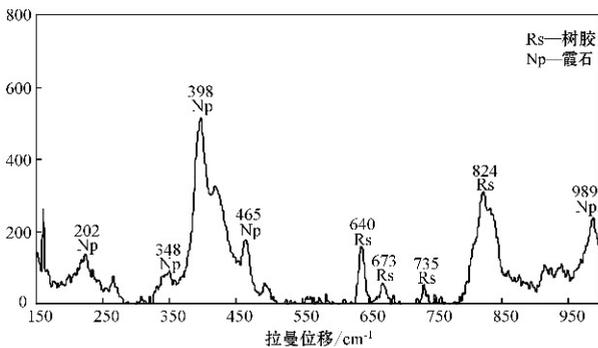


图4 霞石的拉曼光谱

Fig. 4 Raman spectra of nepheline

为3个世代，按先后顺序依次为自形的硬玉、细粒化的硬玉+角闪石、霞石+钡铝硅酸盐。最早期的硬玉呈自形的短柱状到长柱状(图2a, 2b; 图3a, 3b)，表明其是在相对稳定并且非常自由的空间条件下结晶形成的。自形的硬玉颗粒普遍发育环带结构(图3a, 3b)，这反应了结晶温度、压力和/或介质成分的变化。考虑到温度和压力很难发生周期性的变化，硬玉的韵律环带归因于结晶介质成分的变化，极有可能是物源的反复补给造成的。在一个结晶周期内，结晶介质中的其他阳离子(Ca<sup>2+</sup>/Fe<sup>2+</sup>/Mg<sup>2+</sup>)浓度逐渐升高，导致硬玉幔部和边部的其他端元含量逐渐升高，由此形成一期正环带结构。硬玉的“窗面结

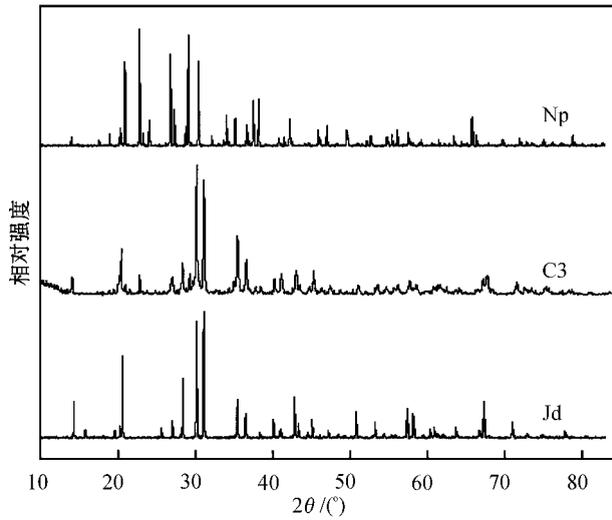


图 5 霞石翡翠(C3)的 X 射线粉晶衍射图  
Fig. 5 XRD spectra of nepheline jades

构(图 3b)代表初始的若干晶体被后期生长的硬玉包裹成一个大单晶,可能反映了结晶过程中温度和压力条件的变化,导致硬玉成核和生长速率的变化。细粒化的硬玉蚕食之前的自形硬玉颗粒(图 2c, 2d; 图 3c)表明其是在相对后期经过交代早期硬玉形成的,这一过程还形成了少量的含水矿物钠角闪石(图 3c)。

含霞石翡翠中有两种霞石:富钾的霞石和贫钾的霞石(表 2),其中前者远多于后者。值得注意的一种结构特征是,自形的辉石颗粒总是被贫钾的霞石包绕,富钾的霞石只在极少情况下同硬玉接触(图 2a, 2b; 图 3a, 3b)。因此提出了两种可能的解释:第一种是后期的钠质流体在结晶过程同硬玉发生成分交换,造成在硬玉颗粒边部结晶的霞石相对富钠贫钾;另一种解释是后期的钠质流体可分为两个世代,早期的贫钾钠质流体先沿硬玉颗粒边界结晶,而

表 1 硬玉和角闪石的矿物化学成分

w<sub>B</sub>/%

Table 1 Chemical composition of jadeite and amphibole

	自形硬玉			次生硬玉						次生角闪石		
	颗粒 1		颗粒 2	类型 1		类型 2		同类型 1 共生				
	暗核	灰幔		暗域	亮域	暗域	亮域					
Na <sub>2</sub> O	14.58	14.32	13.80	14.58	14.20	13.74	14.21	14.38	14.90	14.40	9.68	9.73
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.12	0.13
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.01	0.04	0.08	0.01
MgO	0.18	1.14	1.59	0.14	0.85	1.19	0.14	0.50	0.02	0.35	19.60	20.16
CaO	0.23	0.97	2.15	0.18	0.68	1.71	0.21	0.68	0.04	0.54	1.92	2.14
MnO	0.00	0.05	0.00	0.04	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.86	23.47	22.52	24.69	23.48	22.72	24.43	22.18	25.33	23.33	3.14	2.75
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.03	0.02	0.00	0.15	0.02	0.08	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	0.09	0.35	0.94	0.10	0.35	0.96	0.60	2.86	0.11	1.84	3.48	3.27
SiO <sub>2</sub>	60.10	60.20	59.77	59.97	59.81	59.53	59.36	59.17	60.00	59.60	58.63	58.74
Total	100.06	100.56	100.79	99.71	99.52	99.92	99.03	99.87	100.42	100.09	96.79	97.00
硬玉基于 6 个氧离子和 4 个阳离子进行计算,角闪石基于 23 个氧离子和总阳离子数 -Ca-Na-K = 13 进行计算												
Na <sup>+</sup>	0.96	0.94	0.90	0.96	0.94	0.91	0.94	0.95	0.97	0.95	2.58	2.59
K <sup>+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02
Cr <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
Mg <sup>2+</sup>	0.01	0.06	0.08	0.01	0.04	0.06	0.01	0.03	0.00	0.02	4.02	4.12
Ca <sup>2+</sup>	0.01	0.04	0.08	0.01	0.02	0.06	0.01	0.02	0.00	0.02	0.28	0.31
Mn <sup>2+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.01	0.01
Al <sup>3+</sup>	0.99	0.93	0.90	0.99	0.94	0.91	0.99	0.89	1.00	0.93	0.51	0.44
Ti <sup>4+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.20	0.22
Fe <sup>2+</sup>	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.03	0.02	0.07	0.00	0.05	0.20	0.16
Si <sup>4+</sup>	2.03	2.03	2.02	2.04	2.04	2.03	2.03	2.02	2.02	2.03	8.06	8.05
端员成分计算												
Aeg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00		
Jd	0.99	0.95	0.91	0.99	0.96	0.92	0.98	0.93	1.00	0.95		
Wo	0.00	0.02	0.04	0.00	0.01	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01		
En	0.00	0.03	0.04	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01		
Fs	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.03	0.00	0.03		
WEF	0.01	0.05	0.09	0.01	0.04	0.08	0.02	0.06	0.00	0.05		

表 2 霞石的矿物化学成分

$w_B/\%$

Table 2 Chemical composition of nepheline

样号	富钾霞石						贫钾霞石					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Na <sub>2</sub> O	17.98	17.59	17.93	18.13	18.16	17.42	20.85	21.83	21.59	21.39	20.99	21.74
K <sub>2</sub> O	4.25	4.33	4.16	4.06	4.19	3.90	0.07	0.09	0.08	0.09	0.07	0.07
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.06	0.01
MgO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.01	0.02	0.00	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01	0.01
MnO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.05	0.03	0.05	0.03	0.01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34.50	34.81	34.57	34.81	34.90	34.97	35.25	36.04	35.48	36.08	35.54	35.82
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.07	0.09	0.00	0.00	0.00	0.07	0.07	0.00	0.00	0.03	0.00
FeO	0.01	0.02	0.02	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03
SiO <sub>2</sub>	42.06	42.24	42.23	42.50	42.66	42.86	42.65	42.83	42.77	42.98	42.38	42.82
Total	98.80	99.09	99.00	99.53	99.98	99.18	98.93	100.93	100.03	100.61	99.10	100.51
基于 4 个氧离子进行计算												
Na <sup>+</sup>	0.84	0.82	0.84	0.84	0.84	0.81	0.96	0.99	0.99	0.97	0.97	0.99
K <sup>+</sup>	0.13	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cr <sup>3+</sup>	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 <sup>2+</sup>	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 <sup>2+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn <sup>2+</sup>	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 <sup>3+</sup>	0.98	0.99	0.98	0.98	0.98	0.99	0.99	1.00	0.99	1.00	1.00	0.99
Ti <sup>4+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe <sup>2+</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Si <sup>4+</sup>	1.02	1.02	1.02	1.02	1.02	1.03	1.02	1.00	1.01	1.01	1.01	1.01

后期的富钾钠质流体随机充填在硬玉颗粒之间结晶。

#### 4.2 翡翠中的霞石

虽然硬玉构成了翡翠的主要组成矿物,但其他矿物也有产出。翡翠中常见的次要矿物包括绿辉石、钠角闪石、铬铁矿、锆石、石墨、钠长石、方沸石、钡钠长石、钡铝沸石和斜绿泥石等(Harlow and Sorensen 2005)。所有这些次要矿物中,最为常见的是钠长石,而霞石鲜有报道。本文通过光学显微镜观察(图 2a、2b)并结合拉曼光谱(图 4)、X 射线粉晶衍射分析(图 5)和电子探针(表 2)等研究方法,在本研究的翡翠中发现了霞石,丰富了对翡翠中次要矿物种类的认识。虽然危地马拉 Motagua 断裂带的硬玉岩中也含有霞石,但是该地区产出的翡翠多为豆种,且结构粗、透明度差。本研究中的霞石翡翠多为柱粒状结构,属于半透明的“飘蓝花”品种,其以较高的透明度和较细密的质地明显不同于危地马拉翡翠(图 1)。

#### 4.3 翡翠的成因

##### 4.3.1 流体结晶成因

翡翠亦即硬玉岩主要以岩脉的形式产在蛇纹岩

化的橄榄岩体中,其共生的岩石类型还包括蓝片岩、榴辉岩和石榴角闪岩等代表高压低温变质作用产物的岩石系列,这种岩性组合多产于大洋俯冲带的大地构造背景中(Harlow and Sorensen, 2005; Tsujimori and Harlow, 2012)。由于硬玉岩多和蛇纹岩共生,多数研究者认为硬玉岩的形成同超基性岩体蛇纹岩化所需要的流体活动有关(Johnson and Harlow, 1999),或是形成于流体的交代作用(Shigeno *et al.*, 2012; Compagnoni *et al.*, 2012),或是直接结晶于流体中(Harlow, 1994; Shi *et al.*, 2000, 2005b)。本研究发现,霞石翡翠中的早期硬玉发育自形的环带结构(图 3a、b),表明其是在相对自由的流体空间中直接结晶形成的,而韵律环带则又反映了流体的反复补给过程。Shi 等(2000)对硬玉中流体包裹体的研究发现,某些流体包裹体中含有固相子晶硬玉,这为硬玉岩的直接结晶模型提供了进一步的佐证。

##### 4.3.2 流体来源

既然硬玉岩是从流体中结晶形成的,流体的成分以及来源就值得探讨。流体包裹体的研究表明,硬玉的结晶介质主要为富水流体(Shi *et al.*, 2000, 2005b; 彭卓伦等, 2004)。结合硬玉的化学

成分推测,该富水流体中应该溶解有大量的 Na、Al、Si 以及少量的 Ca、Mg、Fe 等元素,而富钾霞石和钡铝硅酸盐的产出则表明流体中也有可能溶解有部分 K、Ba 等大离子亲石元素。就微量元素而言,前人的研究结果表明成岩流体中应该相对富集 LREE、HFSE 和 Sr 等元素(Sorensen *et al.*, 2006; Shi *et al.*, 2010; Yui *et al.*, 2010, 2013)。考虑到硬玉岩富 Na 的特征,流体的源区应该相对富 Na,其流体来源极有可能来源于俯冲板片。俯冲板片中 Na 的主要储库可分为岩石孔隙中的海水、细碧岩化的大洋玄武岩以及大洋沉积物等。实验岩石学的研究结果表明,玄武质洋壳在从蓝片岩转变为榴辉岩的过程中会脱水形成含 Na、Al 和 Si 的富水流体(Manning, 1998)这可能为硬玉岩的成岩介质提供了最为主要的流体来源。虽然孔隙海水在俯冲的较浅深度就会大量脱掉,但是榴辉岩中原生海水包裹体的发现意味着,部分孔隙海水也有可能俯冲到较深的位置,然后再脱掉参与硬玉岩的形成(Giaramita and Sorensen, 1994)。另外,部分硬玉岩富 K、Ba、Sr 等大离子亲石元素的特征表明,某些大洋沉积物也为硬玉岩的形成提供了一定的流体来源(Shi *et al.*, 2010)。Sorensen 等(2006)对硬玉晶体中微量元素和氧同位素组成的分析发现,硬玉岩的成岩流体成分复杂多变,其不仅具有多源性,而且流体在演化迁移的过程中也有可能发生成分上的改变。

#### 4.3.3 形成温压条件

估算硬玉岩的形成  $p-t$  条件是非常困难的,主要原因在于硬玉岩的矿物组成比较单一,缺少有效的可以计算  $p-t$  条件的矿物对。如果体系中存在石英,硬玉岩的形成压力下限可用反应硬玉 + 石英 = 钠长石进行制约。然而多数硬玉岩中缺少石英,二氧化硅活度的降低导致硬玉可以在更广的  $p-t$  范围内稳定存在。即便如此,硬玉岩的形成  $p-t$  条件仍可利用其他共生矿物抑或反应进行制约(图 6)。硬柱石和蓝闪石的产出表明,某些硬玉岩是在蓝片岩相条件下形成的(Shi *et al.*, 2003; Oberhänsli *et al.*, 2007; Harlow *et al.*, 2011)。针对这些硬玉岩的形成条件,Harlow 等(2005)利用反应方沸石 = 硬玉 + H<sub>2</sub>O, 钠长石 = 硬玉 + 石英和 4 硬柱石 + 2 硬玉 = 钠云母 + 2 斜黝帘石 + 石英 + H<sub>2</sub>O 限定的形成温度和压力上限分别为 450°C 和 1.4 GPa。结合矿物的氧同位素组成和反应方沸石 = 硬玉 + 水,限定的温度和压力下限分别为 300~400°C 和 0.6~0.8 GPa。

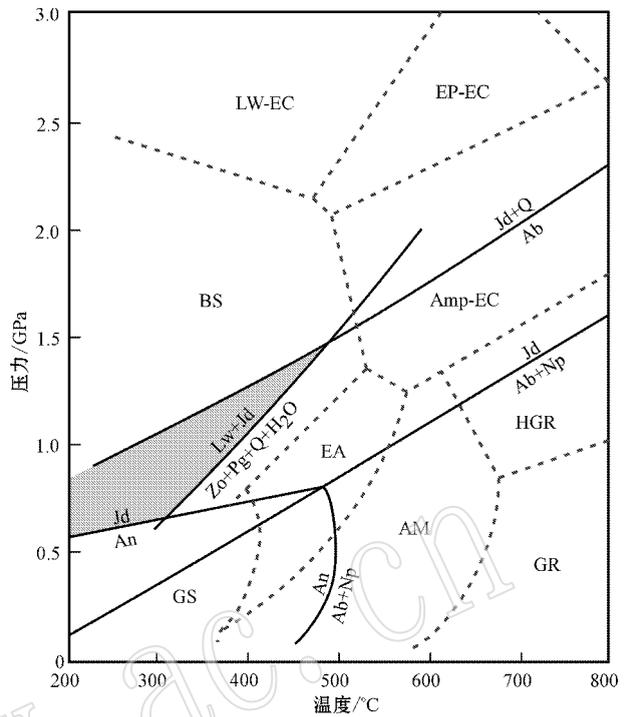


图 6 霞石翡翠形成的  $p-t$  条件(据 Tsujimori and Harlow, 2012)

Fig. 6 Formation  $p-t$  conditions of nepheline jades (after Tatsuki and Harlow, 2012)

Lw—硬柱石; Zo—黝帘石; Pg—钠云母; Q—石英; GS—绿片岩相; BS—蓝片岩相; EA—绿帘角闪岩相; AM—角闪岩相; Amp-EC—角闪榴辉岩相; EP-EC—绿帘榴辉岩相; LW-EC—硬柱石榴辉岩相; GR—麻粒岩相; HGR—高压麻粒岩相; 阴影区域表示霞石翡翠形成的  $p-t$  范围

Lw—lawsonite; Zo—zoisite; Pg—paragonite; Q—quartz; GS—greenschist-facies; BS—blueschist-facies; EA—epidote-amphibolite-facies; AM—amphibolite-facies; Amp-EC—amphibole eclogite-facies; EP-EC—epidote eclogite-facies; LW-EC—lawsonite eclogite-facies; GR—granulite-facies; HGR—high pressure granulite-facies; the shaded area represents the formation  $p-t$  conditions of nepheline jades

基于上述这些反应以及硬玉岩的  $p-t$  演化轨迹可以推测,当硬玉岩减压至硬玉的非稳定区域时,开始结晶形成其他低压钠铝硅酸盐矿物。在相对富水的条件下,先结晶形成方沸石,当水被耗尽时,钠长石抑或霞石开始结晶,这又取决于成岩流体中的硅含量。如果流体中硅饱和,则会形成钠长石,反之则形成霞石,本研究中的霞石翡翠即代表后一种情况。需要进一步说明的是,硬玉岩的形成峰期条件在不同地区是有变化的。例如, Motagua 断裂带中某些榴辉岩(Harlow *et al.*, 2011)和 Monviso 榴辉岩相的变斜长花岗岩中(Compagnoni *et al.*, 2007; Groppo and Castelli, 2010)就产有硬玉,说明硬玉岩可以在相对于蓝片岩相更高的压力条件下形成。另外,硬

玉岩也可以在更高的温度条件下形成。例如,新近的研究结果表明,古巴东部以及多米尼加共和国的某些硬玉岩可能是在大于 550℃ 的温度条件下形成的(Tsujimori and Harlow, 2012)。

## 5 结论

(1) 翡翠的主要组成矿物是硬玉,次要矿物包括绿辉石、钠角闪石、铬铁矿、锆石、石墨、钠长石、方沸石、钡钠长石、钡铝沸石和斜绿泥石等。所有这些次要矿物中,最为常见的次要矿物为钠长石,而霞石鲜有报道,本研究中的翡翠发现了霞石,丰富了对翡翠中常见次要矿物的认识。

(2) 含霞石翡翠中的组成矿物分为三个世代,按先后顺序依次为自形的硬玉、细粒化的硬玉+角闪石和霞石+钡铝硅酸盐。霞石分为两种:富钾的霞石和贫钾的霞石,自形的辉石颗粒总是被贫钾的霞石包绕,富钾的霞石只在极少情况下同硬玉接触。

(3) 硬玉颗粒发育自形的环带结构,特别是韵律环带结构,反映了硬玉岩是直接由流体中结晶出来的,并且流体具有反复补给的特征。根据矿物组合和成分特征可以推断流体来源于俯冲洋壳和大洋沉积物的脱水作用。

(4) 翡翠形成的温压条件反应可表示为:硬玉+石英=钠长石,方沸石=硬玉+H<sub>2</sub>O,钠长石=硬玉+石英+4硬柱石+2硬玉=钠云母+2斜黝帘石+石英+H<sub>2</sub>O,结合矿物的氧同位组成来进行限定,温度和压力的上限分别为 450℃ 和 1.4 GPa,下限分别为 300~400℃ 和 0.6~0.8 GPa。

## References

Compagnoni R, Rolfo F and Castelli D. 2012. Jadeitite from the Monviso meta-ophiolite, western Alps: occurrence and genesis [J]. *European Journal of Mineralogy*, 24: 333~343.

Compagnoni R, Rolfo F, Manavella F, et al. 2007. Jadeitite in the Monviso meta-ophiolite, Piemonte Zone, Italian western Alps [J]. *Periodici Mineralogia*, 76: 79~89.

Cui Wenyuan, Shi Guanghai, Yang Fuxu, et al. 2000. A new view point-magma genesis of jadeite jade [J]. *Journal of Gems and Gemology*, 2(3): 16~22 (in Chinese with English abstract).

Fu B, Valley J W, Kita N T, et al. 2010. Multiple origins of zircons in jadeitite [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159: 769

~780.

Giaramita M J and Sorensen S S. 1994. Primary fluids in low temperature eclogites: evidence from two subduction complexes Dominican Republic and California, U. S. A [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117: 279~292.

Groppo C and Castelli D. 2010. Prograde P-T evolution of a lawsonite eclogite from the Monviso meta-ophiolite (Western Alps): dehydration and redox Reactions during subduction of oceanic FeTi-oxide gabbro [J]. *Journal of Petrology*, 51: 2489~2514.

Harlow G E. 1994. Jadeitites, albitites and related rocks from the Motagua Fault Zone, Guatemala [J]. *International Geology Review*, 12: 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: 363~387.

Harlow G E and Sorensen S S. 2005. Jade (Nephrite and Jadeitite) and Serpentinite: Metasomatic Connections [J]. *International Geology Review*, 47: 113~146.

Johnson C A and Harlow G E. 1999. Guatemala jadeitites and albitites were formed by deuterium-rich serpentinizing fluids deep within a subduction-channel [J]. *Geology*, 27: 629~632.

Manning C E. 1998. Fluid composition at the blueschist-eclogite transition in the model system Na<sub>2</sub>O-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O-HCl [J]. *Swiss Bulletin of Mineralogy and Petrology*, 78: 225~242.

Maresch W V, Grevel C, Stanek K P, et al. 2012. Multiple growth mechanisms of jadeite in Cuban metabasite [J]. *American Mineralogist*, 24: 217~235.

Oberhänsli R, Bousquet R, Moïnzadeh M, et al. 2007. The field of stability of blue jadeite: a new occurrence of jadeitite at Sorkhan, Iran, as a case study [J]. *The Canadian Mineralogist*, 45: 1501~1509.

Peng Zhuolun and Peng Mingsheng. 2004. Inclusions in Jadeite from Burma [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 43(4): 98~101 (in Chinese with English abstract).

Shigeno M, Mori Y, Shimada K, et al. 2012. Jadeitites with metasomatic zoning from the Nishisonogi metamorphic rocks, western Japan: fluid-tectonic block interaction during exhumation [J]. *American Mineralogist*, 24: 289~311.

Shi G H, Cui W Y, Cao S M, et al. 2008. Ion microprobe zircon U-Pb age and geochemistry of the Myanmar jadeitite [J]. *Journal of the Geological Society, London*, 165: 221~234.

Shi G H, Cui W Y, Tropper P, et al. 2003. The petrology of a complex sodic and sodic-calcic amphibole association and its implications for the metasomatic processes in the jadeitite area in northwestern Myanmar, formerly Burma [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145: 355~376.

- Shi G H, Cui W Y, Wang C Q, *et al.* 2000. The fluid inclusions in jadeitite from Pharkant area, Myanmar [J]. Chinese Science Bulletin, 45(20): 1896–1901.
- Shi G H, Jiang N, Wang Y W, *et al.* 2010. Ba minerals in clinopyroxene rocks from the Myanmar jadeitite area: implications for Ba recycling in subduction zones [J]. European Journal of mineralogy, 22: 199–214.
- Shi G H, Stoèckhert B and Cui W Y. 2005a. Kosmochlor and chromian jadeite aggregates from the Myanmar jadeitite area [J]. Mineralogical Magazine, 69(6): 1059–1075.
- Shi G H, Tropper P, Cui W Y, *et al.* 2005b. Methane (CH<sub>4</sub>)-bearing fluid inclusions in the Myanmar jadeitite [J]. Geochemical Journal, 39: 503–516.
- Sorensen S, Harlow G E and Rumble D. 2006. The origin of jadeitite-forming subduction-zone fluids: CL-guided SIMS oxygen-isotope and trace-element evidence [J]. American Mineralogist, 91: 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: 371–390.
- Yui T F, Fukuyama M, Iizuka Y, *et al.* 2013. Is Myanmar jadeitite of Jurassic age? A result from incompletely recrystallized inherited zircon [J]. Lithos, 160–161: 268–282.
- Yui T F, Maki K, Usuki T, *et al.* 2010. Genesis of Guatemala jadeitite and related fluid characteristics: Insight from zircon [J]. Chemical Geology, 270: 45–55.
- Yui T F, Maki K, Wang K L, *et al.* 2012. Hf isotope and REE compositions of zircon from jadeitite (Tone, Japan and north of the Motagua fault, Guatemala): implications on jadeitite genesis and possible protolith [J]. American Mineralogist, 24: 263–275.
- Zhang Zhiyu, Shi Guanghai, Ouyang Qiumei, *et al.* 2012. Petrology of the jadeitite and jadeitized omphacitite from Guatemala and Its geological implication [J]. Acta Geologica Sinica, 86(1): 198–208 (in Chinese with English abstract).

### 附中文参考文献

- 崔文元, 施光海, 杨富绪, 等. 2000. 一种新观点——翡翠新的岩浆成因说 [J]. 宝石和宝石学杂志, 2(3): 16–22.
- 彭卓伦, 彭明生. 2004. 缅甸硬玉中的包裹体 [J]. 中山大学学报, 43(4): 98–101.
- 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]. 岩石学报, 86(1): 198–208.