

doi:10.3799/dqkx.2011.052

# 流体—超镁铁质岩相互作用与硬玉岩的形成

祁敏<sup>1</sup>, 向华<sup>1</sup>, 钟增球<sup>1\*</sup>, 周汉文<sup>1,2</sup>

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学教育部长江三峡库区地质灾害研究中心, 湖北武汉 430074

**摘要:** 俯冲带中流体与岩石相互作用以及流体循环一直是地质学家关注的焦点之一。硬玉岩(翡翠)作为高档宝玉石材料, 其成因一直备受关注。硬玉岩产于与俯冲带有关的蛇纹石化超镁铁质岩中, 是俯冲带中流体与超镁铁岩相互作用的特殊产物。岩石组合、岩相学、显微结构及矿物化学特征表明: 橄榄岩与流体的作用可以分为5个阶段, 分别为蛇纹石化→(绿泥石、金云母)→角闪石→辉石→(方沸石、钠长石)阶段。结合热力学相图, 总结了橄榄岩与流体作用过程中矿物的演化序列。硬玉岩的形成需要富Na、Al、Si流体和较高的压力。缅甸硬玉岩中, 钠质闪石总是与硬玉岩伴生, 钠质闪石成分变化大, 且能与流体发生再平衡从而调节自身和流体的成分。钠质闪石在硬玉形成过程中充当了Na、Al、Si的缓冲剂, 使Na、Al、Si达到一定比例有利于硬玉的结晶。

**关键词:** 硬玉岩; 成因; 物质来源; 钠源; 流体; 岩石学。

**中图分类号:** P588.36

**文章编号:** 1000-2383(2011)03-0511-10

**收稿日期:** 2010-12-10

## Fluid-Ultramafic Rock Interaction and Formation of Jadeite Rocks

QI Min<sup>1</sup>, XIANG Hua<sup>1</sup>, ZHONG Zeng-qiu<sup>1\*</sup>, ZHOU Han-wen<sup>1,2</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Three Gorges Research Center for Geo-Hazard, Ministry of Education China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** The fluid-rock interactions and fluid circulations in subduction zone have been a focus for geologists. As a kind of high-grade gem material, the genesis of jadeite rocks attracts an increasing concern. The jadeite rocks generally occur in the serpentinized ultramafic rocks in subduction zones and its formation is related to the interaction between subduction-related fluids and ultramafic rocks (peridotite). Based on rock association, petrography, microstructure and mineral chemical characteristics, the processes of interaction between peridotite and fluid can be divided into five stages, that is, serpentine→(chlorite, phlogopite)→amphibole→pyroxene→(analcime, albite). Combined with analysis of thermodynamic phase diagrams, the evolutionary series of minerals in the processes of interaction are identified. Formation of jadeite requires the fluids enrich in Na, Al, Si and under relatively higher pressure. In the jadeite rocks from Myanmar, the sodium amphiboles with various chemical components are always associated with the jadeite, and rebalance of the amphiboles with fluids can regulate the compositions of minerals and fluids. Sodium amphiboles act as a buffer in the formation process of jade and the jadeite was crystallized when the Na, Al and Si were concentrated to certain percentage.

**Key words:** jadeite; petrogenesis; material resources; Na-source; fluid; petrology.

## 0 引言

硬玉岩主要由硬玉组成, 质地较好、透明的硬玉岩(翡翠)属于高档宝玉石材料, 价值连城(Harlow and Sorensen, 2005)。现有的硬玉岩均产于俯冲带

的蛇纹岩或蛇纹石化超基性混杂岩中, 且普遍呈透视镜状或脉状(Coleman 1961; 施光海等, 2000, 2001; Harlow and Sorensen, 2005)。由于硬玉岩十分稀少, 野外露头较少, 加之局势动荡, 一些典型产地如缅甸矿区的详细地质学研究仍较为薄弱。学者对于

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 40873044)。

**作者简介:** 祁敏(1982-), 女, 博士研究生, 主要从事宝玉石研究。\* 通讯作者: 钟增球, E-mail: zqzhong@cug.edu.cn

硬玉岩的成因认识一直存在较大分歧,主要的观点有岩浆成因、交代成因和直接从流体中结晶(Coleman 1961; Harlow 1994; 崔文元等, 2000; Shi *et al.*, 2003; 张良钜, 2004; Harlow and Sorensen, 2005; Shi *et al.*, 2005; Sorensen *et al.*, 2006). 近年的研究认为,硬玉岩与流体密切相关,其形成记录了在汇聚边缘的蛇纹石化橄榄岩内部和周围的流体交互作用事件(Harlow and Sorensen, 2005; Shi *et al.*, 2005; Morishita *et al.*, 2007; Tsujimori *et al.*, 2007; Sorensen *et al.*, 2008; Garcia-Casco *et al.*, 2009). 硬玉岩的形成与俯冲带流体及流体与岩石相互作用有关,而俯冲带流体及流体与岩石相互作用的研究一直是地质学家关注的焦点之一,因此对硬玉岩及相关岩石的深入研究,不仅是探讨硬玉岩成因的关键,也是了解俯冲带流体与岩石相互作用和流体循环的重要窗口.

尽管不能到产地考察和采样,笔者还是从桂林理工大学张良钜教授和奥岩等到过缅甸矿区实地考察的老师处获得了珍贵的围岩和硬玉岩样品;并在云南瑞丽翡翠市场及广州翡翠市场收集了大量缅甸硬玉岩(翡翠)标本. 本文拟以硬玉岩及其围岩为研究对象,在岩相学、显微结构及矿物化学等研究基础上,揭示缅甸硬玉岩形成过程的流体与超镁铁岩的相互作用,进而探讨硬玉岩的成因,了解俯冲带流体与岩石相互作用.

## 1 地质背景及岩石组合

缅甸是硬玉岩的主要产地,也是高档翡翠的唯一产地. 产出硬玉岩的东南亚地块属印度板块与欧亚大陆板块相互碰撞的接合带. 该区以莫谷(Mogok)和那加山(Naga Hills)断裂为界划分为三大块体(图1)(Barley *et al.*, 2003; Morley, 2004; Acharyya, 2007; Mitchell *et al.*, 2007; Searle *et al.*, 2007). 莫谷断裂以东为掸泰(Shan-Thai)地体,相当于我国西南境内的宝山—腾冲地体(丘志力等, 2008),莫谷与那加山断裂所限定的范围就是缅甸翡翠所产出的中缅地块(又称东缅地块),它大体相当于藏南的拉萨地块(丘志力等, 2008). 由于印度与亚洲板块碰撞所引起的强烈走滑作用,在莫谷构造带的西侧发育了右行走滑的实皆断裂(Curray, 2005).

缅甸翡翠主要产于中缅地块北部的帕敢(Hpakkan)地区,它可能是实皆构造带北部的一部分(Searle *et al.*, 2007),也可能是莫谷构造带的组成部分,只是后来的构造将其推覆至现在的位置(Mitchell *et al.*, 2007).

原生硬玉岩(钠质辉石岩)呈脉状产于帕敢蛇纹石化超基性岩中,矿体长5~100 m不等,厚0.5~5 m,呈串珠状分布,雁行排列(Harlow and Sorensen, 2005). 硬玉岩脉与蛇纹石化超基性岩之间具明

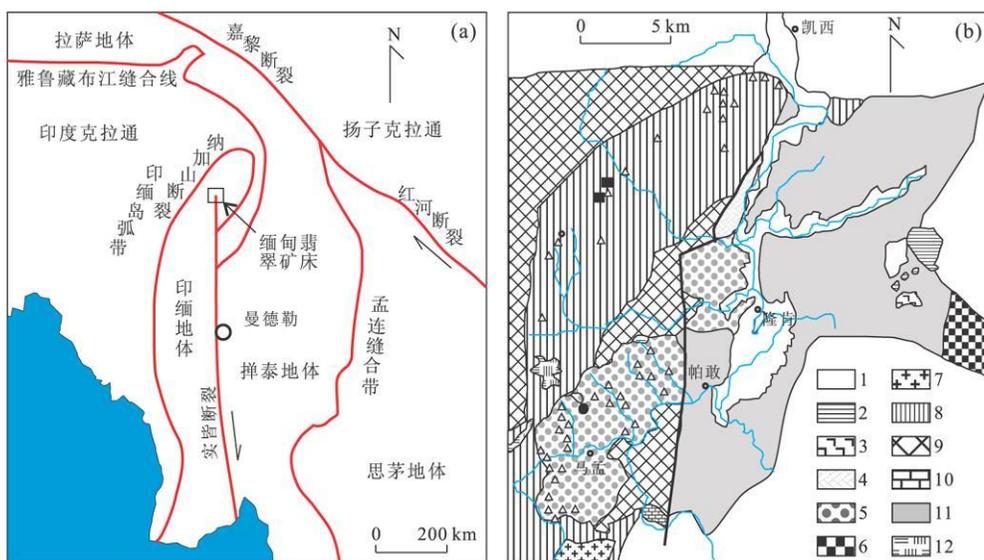


图1 缅甸及邻区地质构造简图(a)(丘志力等, 2008)及缅甸翡翠矿区地质简图(b)(Shi *et al.*, 2008)

Fig. 1 Simplified tectonic map of Myanmar and the adjacent areas (a) and geological map of the Myanmar jadeite area (b)  
1. 第四纪; 2. 安山岩; 3. 玄武岩; 4. 陆质岩; 5. 含硬玉砾石岩; 6. 火山角砾岩; 7. 花岗岩; 8. 蛇纹石化橄榄岩; 9. 结晶片岩类; 10. 第三纪沉积岩; 11. 硅质角砾岩;  $\Delta$ . 硬玉岩;  $\blacksquare$ . 铬铁矿;  $\bullet$ . 金矿化点

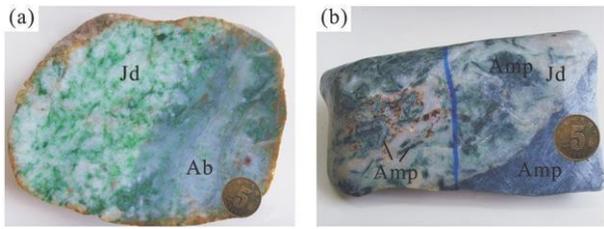


图2 手标本照片

Fig. 2 Hand specimen photos

a. 硬玉岩与钠长石岩接触界线; b. 硬玉岩外围的角闪石带以及硬玉岩中的角闪石; Jd: 硬玉; Ab: 钠长石; Amp: 角闪石

显的过渡层, 从内到外分别为硬玉岩脉, 钠质闪石层, 绿泥石(金云母)片岩层, 蛇纹石化超基性岩. 在局部地方可见钠长石脉分布于硬玉岩与钠质闪石层之间(图 2a). 硬玉岩脉、角闪石层等常被后期的钠长石脉切割(张位及, 2002). 角闪石岩主要由交代成因的钠质、钠-钙质闪石组成, 包括透闪石、镁铝钠闪石(Eckermannite)、镁红闪石(Magnesiokatophorite)、尼镁铝钠闪石(Nyböite)、蓝闪石(Glaucophane)、钠透闪石(Richterite)、蓝透闪石等(Winchite)(Shi *et al.*, 2003). 在角闪石带或角闪石带内侧, 常有钠铬辉石, 富Cr硬玉以及含Cr绿辉石冠状体或团块(Shi *et al.*, 2005a, 2005b). 靠近钠质闪石层的蛇纹岩多已蚀变为绿泥石和金云母, 与蛇纹岩逐渐过渡. 在蛇纹石化超基性外围, 出露有含多硅白云母蓝闪石片岩, 含黑硬绿泥石的石英岩等高压相岩石组合以及含少量角闪岩和透辉石大理岩等角闪岩相岩石(施光海等, 2001).

## 2 岩相学特征

硬玉岩围岩为蛇纹石化超镁铁岩, 本文所研究的主要为硬玉岩, 蛇纹石化超镁铁岩及二者之间的产物.

(1) 蛇纹石化超基性岩. 硬玉岩所在的超基性岩主要由蛇纹岩、含铬铁矿蛇纹岩等组成. 蛇纹岩以蛇纹石为主, 局部含量高达90%以上. 可见残余的橄榄石与铬铁矿. 橄榄石被交代成孤岛状(施光海等, 2001). 在本文所研究标本中可见蛇纹石呈纤维状及叶片状, 铬铁矿呈孤立的点状或呈浸染状产于蛇纹岩之中, 或呈致密块状. 在靠近硬玉岩脉体一侧, 蛇纹石岩逐渐过渡为由斜绿泥石、金云母组成的岩石. 斜绿泥石富Cr, 显浅黄色-淡红色. 铬铁矿周围可见深绿色的钠铬辉石和富Cr绿辉石产出(图 3a).

(2) 角闪石岩. 主要分布于硬玉岩脉体与蛇纹石岩接触带上或呈团块状分布于硬玉岩脉体中. 绿泥石片岩层和角闪石岩层逐渐过渡, 部分岩石中可见绿泥石与角闪石共生(图 3b). 角闪石岩主要由角闪石、铬铁矿和少量钠质辉石组成. 角闪石通常晶形较大(最大可 $>1$  cm), 且较自形, 在薄片中多为无色透明, 部分富Cr的呈翠绿色. 沿角闪石边缘、裂隙, 可见大量细小的钠质辉石呈竹叶状产出(图 3c). 角闪石内部也可见大量细小粒状钠质辉石产出(图 3d), 或沿解理方向“出溶”大量针状钠质辉石(图 3e). 钠质辉石在局部也呈团块状产出(图 3f).

(3) 钠质辉石岩. 主要包括硬玉岩、绿辉石岩以及钠铬辉石岩, 主要呈透镜体分布在蛇纹石化超镁铁质岩中. 硬玉岩中硬玉粒度较粗, 核部常有大量包裹体, 且不透明, 而边缘则通常无明显包裹体, 较为干净(图 3h), 且具明显的韵律环带(图 3i). 局部可见方沸石充填钠质辉石粒间空隙(图 3j). 后期的钠长石细脉切穿角闪石岩和钠质辉石岩(图 3k, 图 3l).

## 3 矿物化学特征

在详细的岩相学观察基础上, 利用电子探针对缅甸硬玉岩及围岩中的各种矿物进行了详细的化学成分研究. 矿物电子探针分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行, 分析仪器为JAX-8100型电子探针, 分析条件为加速电压15 kV, 电流20 nA, 分析结果见表1.

(1) 橄榄石及蛇纹石. 蛇纹石化橄榄岩中的残留的橄榄石呈孤岛状, 其镁含量很高,  $Mg/(Fe+Mg)$  大于0.93, 属于镁橄榄石( $Fo$ ). 结合蛇纹岩中的高 $Mg/(Fe+Mg)$ 值, 可以判定帕敢超基性岩未蚀变前为纯橄岩类. 蛇纹石 $SiO_2$ 含量约为39%~42%,  $MgO$ 含量为约37%,  $FeO$ 含量约为8%, 以及少量 $Al_2O_3$  ( $<2\%$ ), 总量为88%~89%之间.  $Mg/(Fe+Mg)$ 比值在0.88~0.90之间, 较橄榄石略低.

(2) 绿泥石. 绿泥石化学成分变化较大,  $Mg^{\#}$ 值的范围为0.85~0.89, 其 $FeO$ 含量在6.09%~9.13%之间,  $MgO$ 含量在27.02%~28.73%之间,  $Al_2O_3$ 含量在7.38%~13.44%之间,  $Cr_2O_3$ 含量普遍较高, 为1.34%~10.33%, 且主要集中在8%~10%范围内, 属铬斜绿泥石.

(3) 角闪石. 角闪石成分复杂, 且成分变化非常大, 尤其是Na、Al、Ca(表1和图4). 根据国际矿物学协会关于角闪石的分类命名方案(IMA97), 角闪

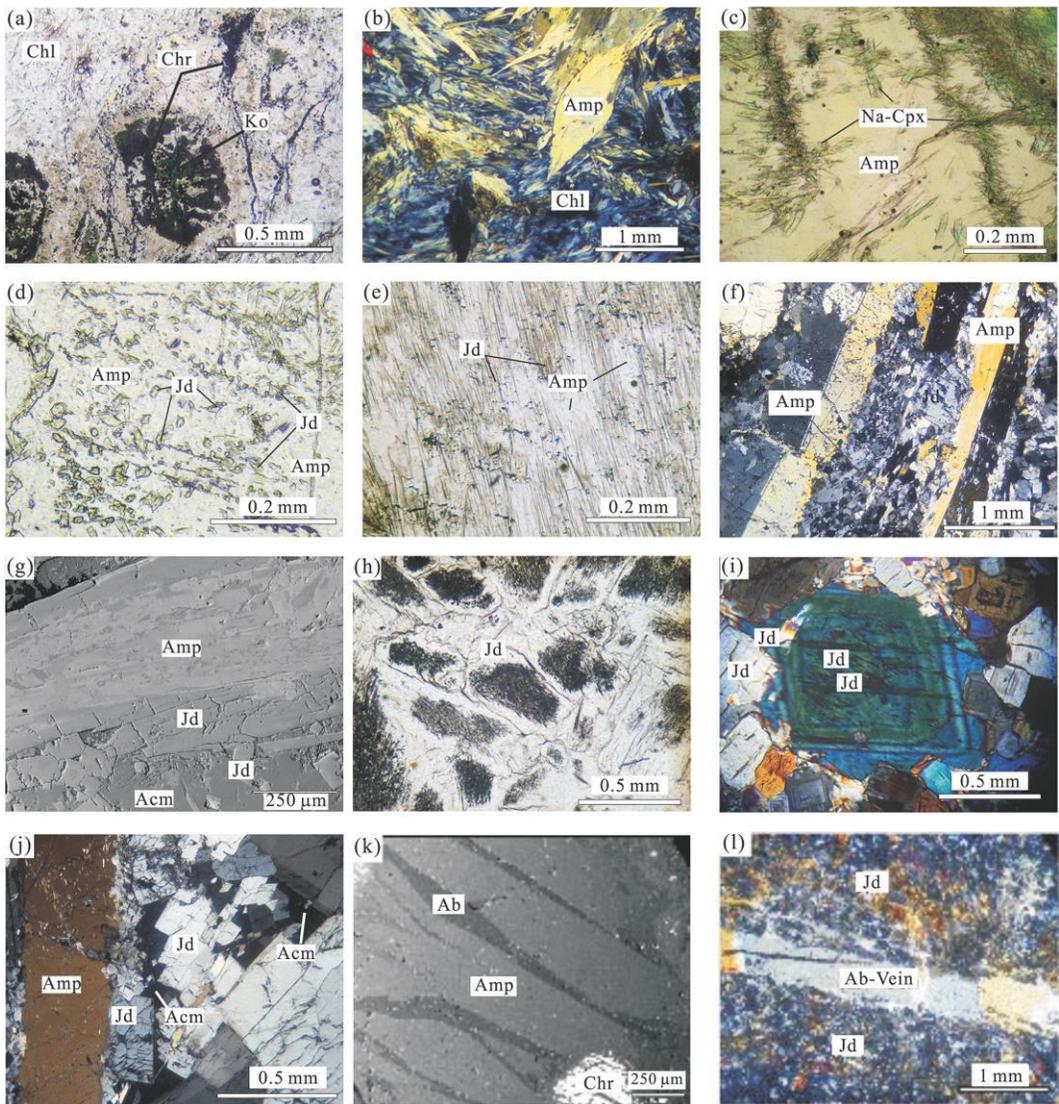


图3 显微结构照片

Fig. 3 Micrographs showing the microtextures of the jadeitites

a. 细小叶片状斜绿泥石及铬铁矿残余, 部分铬铁矿周围有绿色钠铬辉石(单偏光); b. 角闪石与绿泥石共生(正交偏光); c. 角闪石边缘及内部的毛发状钠质辉石(单偏光); d. 角闪石中细粒钠质辉石包裹体(单偏光); e. 钠质角闪石中大量针状钠质辉石析出(单偏光); f. 长柱状角闪石与自形粒状的硬玉共生(正交偏光); g. 角闪石边缘被硬玉交代(BSE 图像); h. 早期粗粒硬玉核部包含大量包裹体, 边部较干净(单偏光); i. 硬玉的韵律环带(正交偏光); j. 自形的硬玉晶体间空隙被后期的方沸石充填(正交偏光); k. 钠长石细脉穿插在角闪石晶体中(BSE); l. 硬玉岩中的钠长石细脉(正交偏光); Jd=硬玉; Ab=钠长石; Amp=角闪石; Chl=绿泥石; Chr=铬铁矿; Na-Cpx=钠质辉石; Acm=方沸石; Ko=钠铬辉石

石可分为3类中的7种; 钙质角闪石主要包括透闪石; 钠-钙质闪石有镁红闪石(Mg-kat)、蓝透闪石(Win)和钠透闪石(Rich); 钠质闪石包括蓝闪石(Gln)、尼美铝钠闪石(Nyb)和镁铝钠闪石(Eck)。

粗粒角闪石常具有明显的成分环带, 从核部到边缘, Ca含量降低, Na含量升高。粗粒角闪石内部及基质中的角闪石属镁铝钠闪石(Eck), 粗粒角闪石边缘为钠透闪石(Rich)。

(4) 辉石。本文所研究的样品中的辉石均为钠质辉石, 但成分较复杂, 可分为硬玉、富铬硬玉、钠铬辉

石和绿辉石(图5a)。

硬玉中Na、Al分子数分别为0.84~1.00 a.p.f.u.和0.79~0.99 a.p.f.u. (a.p.f.u.表示单位分子式中的原子数)。Ca、Mg与Na、Al呈负相关性, 其变化范围分别为0.004~0.125 a.p.f.u.和0.001~0.133 a.p.f.u.。全铁含量较低, 主要为0.002~0.161 a.p.f.u.。这表明主要为硬玉(Jd)-透辉石(Di)固溶体和少量钙铁辉石(Hed)和锥辉石(Acm)组分。

绿辉石成分变化较大, Na、Al分子数分别为

表1 各种矿物代表性电子探针成分分析结果(主量元素单位:%)  
Table 1 Representative electron microprobe data of minerals from the jadeitite

	Ol*	Chr	Serp	Chl	Chl	Phl	Eck	Gla	Mg-Kat	Nyb	Rich	Tre	Ko	Cr-Jd	Jd	Omp	Ab	Acm
SiO <sub>2</sub>	41.55	0.14	41.99	36.90	34.87	42.98	57.18	58.23	52.29	53.74	56.36	55.71	53.36	56.82	59.23	56.16	68.33	59.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	7.15	1.38	13.44	7.44	12.49	7.01	4.94	7.41	7.56	6.80	2.44	2.36	15.15	24.65	8.75	19.24	24.97
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.04	0.02	0.01	0.03	0.05	0.07	0.12	0.18	0.08	0.04	0.04	0.48	0.26	0.03	0.21	0.03	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00	58.28	0.15	1.34	8.82	0.92	1.02	7.82	0.02	5.60	1.10	1.44	26.52	6.29	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	51.36	1.09	36.94	27.94	27.93	23.32	17.96	13.27	18.90	16.31	18.47	21.87	0.65	2.65	0.16	10.37	0.00	0.06
FeO	7.39	28.97	7.94	6.09	7.71	4.84	4.01	5.46	4.63	2.47	3.93	2.35	2.32	2.26	0.12	2.99	0.03	0.10
MnO	0.00	3.61	0.07	0.07	0.26	0.12	0.10	0.05	0.10	0.05	0.09	0.19	0.07	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.04	0.08	0.67	0.90	0.02	3.04	0.41	8.92	2.03	3.97	11.16	0.78	3.59	0.20	14.70	0.08	0.11
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.32	0.06	0.04	0.04	9.23	8.27	4.61	10.03	8.82	1.90	13.37	12.76	15.25	6.28	11.78	9.88
K <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.02	2.76	0.03	10.23	0.19	0.19	0.20	0.08	0.24	0.12	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03
Total	100.30	99.31	88.91	89.27	88.02	95.00	99.81	98.76	97.25	97.95	99.82	97.21	99.90	99.82	99.64	99.46	99.49	94.67
Si	1.002	0.005	3.951	3.479	3.420	3.056	7.676	7.961	7.279	7.428	7.593	7.692	1.991	1.988	2.001	1.996	2.997	2.064
Al	0.000	0.302	0.153	1.493	0.860	1.047	1.110	0.795	1.216	1.232	1.080	0.397	0.104	0.625	0.981	0.367	0.995	1.020
Ti	0.000	0.001	0.001	0.001	0.002	0.003	0.007	0.013	0.019	0.008	0.004	0.004	0.013	0.007	0.001	0.006	0.001	0.000
Fe3	0.000	0.033	0.000	0.000	0.000	0.000	0.197	0.170	0.271	0.114	0.202	0.136	0.072	0.066	0.003	0.062	0.001	0.000
Cr	0.000	1.653	0.011	0.100	0.684	0.052	0.108	0.845	0.002	0.612	0.117	0.158	0.782	0.174	0.000	0.000	0.000	0.000
Mg	1.847	0.058	5.181	3.926	4.084	2.472	3.594	2.704	3.921	3.361	3.710	4.501	0.036	0.138	0.008	0.550	0.000	0.003
Fe2	0.149	0.837	0.625	0.480	0.632	0.288	0.253	0.454	0.268	0.171	0.241	0.135	0.000	0.000	0.000	0.027	0.000	0.003
Mn	0.000	0.110	0.006	0.005	0.021	0.007	0.011	0.006	0.011	0.006	0.010	0.023	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000
Ca	0.000	0.001	0.008	0.067	0.095	0.001	0.437	0.060	1.330	0.301	0.573	1.651	0.031	0.134	0.007	0.560	0.004	0.004
Na	0.000	0.000	0.058	0.012	0.008	0.006	2.402	2.193	1.245	2.689	2.305	0.507	0.967	0.865	0.999	0.433	1.001	0.664
K	0.000	0.000	0.002	0.332	0.004	0.928	0.032	0.032	0.036	0.015	0.042	0.021	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001
O	4	4	14	14	14	11	23	23	23	23	23	23	6	6	6	6	8	6
Mg#	0.93	0.07	0.89	0.89	0.87	0.90	0.93	0.86	0.94	0.95	0.94	0.97	0.99	1.00	1.00	0.95	1.00	0.49

注: \* 据施光海等,2001.

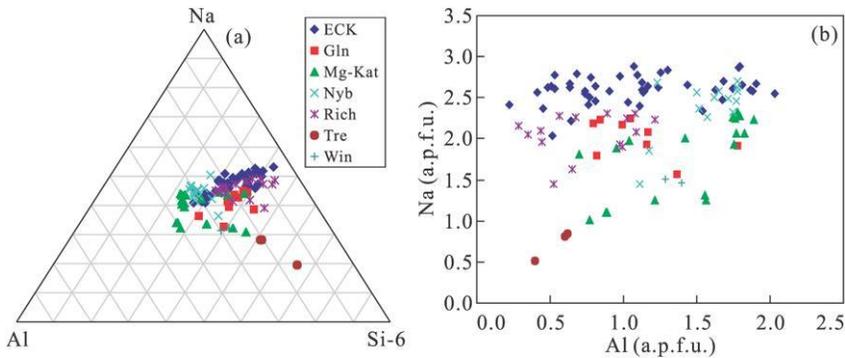


图 4 角闪石成分变化图解

Fig. 4 The diagrams of amphibole composition

a. Na-Al-(Si-6)图解;b. Na-Al 图解

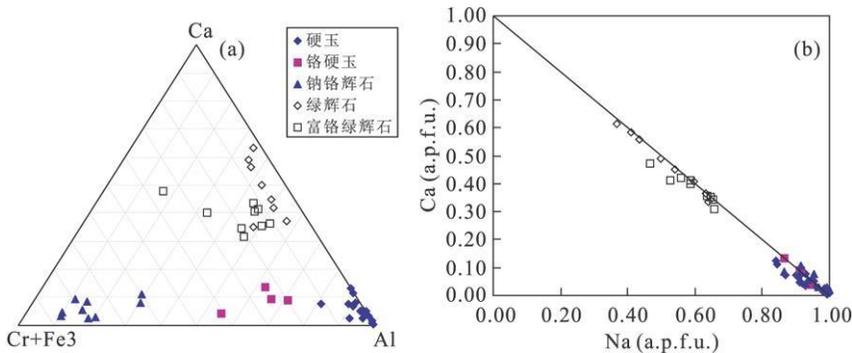


图 5 斜方辉石成分图解(a)和斜方辉石 Ca vs. Na(b)

Fig. 5 Compositional trend of orthopyroxene (a) and orthopyroxene Ca vs. Na (b)

0.37~0.66 a.p.f.u. 和 0.34~0.56 a.p.f.u.; Ca、Mg 分子数分别为 0.34~0.61 a.p.f.u. 和 0.34~0.58 a.p.f.u.。全铁含量相对较高,多数在 0.05~0.12 a.p.f.u. 之间,与绿辉石或富 Cr 闪石相关的绿辉石 Cr 含量较高,在 0.027~0.268 a.p.f.u. 之间。

钠铬辉石主要为钠铬辉石和硬玉端元的固溶体,Na 分子数为 0.87~0.97 a.p.f.u. 之间,Al、Cr 分子数分别在 0.10~0.29 a.p.f.u. 和 0.54~0.78 a.p.f.u. 之间,Ca、Mg 含量低,均小于 0.11 a.p.f.u.。

(5)其他矿物.方沸石和钠长石化学成分均一,且接近纯的端元组分(表 1)。

## 4 讨论与结论

### 4.1 流体与超镁铁岩反应

硬玉岩中硬玉常含有富水流体包裹体(施光海等,2000),且多具韵律环带(图 3i),常见硬玉晶体呈锯齿状排列,而空隙被方沸石等矿物充填(图 3j),指

示了硬玉是从流体中结晶(Harlow, 1994; Harlow and Sorensen, 2005; Garcia-Casco *et al.*, 2009)。而硬玉岩仅产于俯冲带的超镁铁质岩中,因此这种硬玉饱和和流体的形成和演化与超基性岩密切相关。在缅甸原生硬玉岩矿区,从蛇纹石化超镁铁质岩到硬玉岩,所看到的主要矿物组成为蛇纹石、绿泥石、铬铁矿、钠质角闪石、钠质辉石等。依据矿物之间的关系以及矿物的化学特征,可将矿物的演化关系大致归纳为几个阶段,即由橄榄石演化为蛇纹石→(绿泥石、金云母)→钠质角闪石→钠质辉石→(钠长石、方沸石)等的不同阶段。从蛇纹石到钠质辉石,再到后期的钠长石、方沸石,矿物中 Na、Al、Si 含量也逐渐升高,Fe、Mg 等元素逐渐减少甚至消失(图 6)。由于超镁铁质岩几乎不含 Na、Al,且贫 Si,说明这些元素只能是流体带来的。这些不同的矿物是流体与超镁铁质岩相互作用过程中不同阶段的产物。

(1)橄榄石的蛇纹石化阶段.蛇纹石化在俯冲带流体与超镁铁岩相互作用中最为常见(Wang *et al.*, 2009)。该阶段主要由橄榄石与水反应生成蛇纹石,产物以蛇纹石为主。由俯冲板片释放的流体向

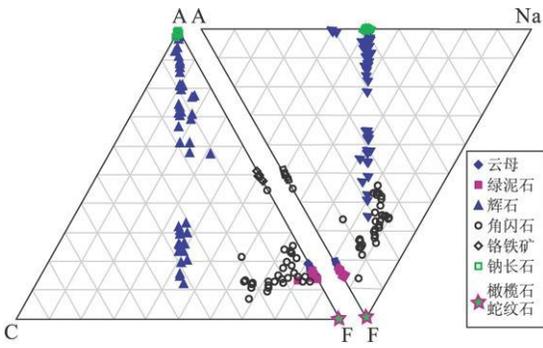


图 6 ACF 及 AFNa 图解

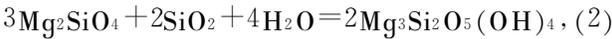
Fig. 6 Correlation of ACF and AFNa

A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; C = CaO; F = FeO + MgO + MnO; Na = Na<sub>2</sub>O

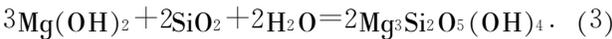
上运移进入上覆地幔楔与地幔发生反应所形成含水矿物包括蛇纹石、滑石和水镁石等. 当流体中 SiO<sub>2</sub> 活度较低时, 橄榄石与水反应生成蛇纹石和水镁石(式 1); 而当流体中 SiO<sub>2</sub> 活度较高时, 则没有水镁石生成, 如式(2)(Frost and Beard, 2007). 此外, 后期富 SiO<sub>2</sub> 流体的进一步作用, 也可使早期形成的水镁石与 SiO<sub>2</sub> 进一步反应而形成了蛇纹石, 其反应可用式(3)表示. 所研究蛇纹石化橄榄岩中缺乏水镁石, 说明流体中 SiO<sub>2</sub> 的活度较高.



Fo                      Serp                      Brc

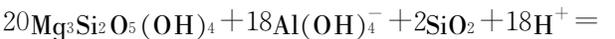


Fo    Serp

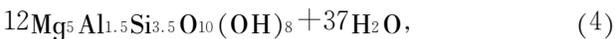


Brc    Serp

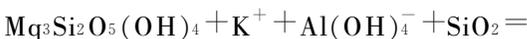
(2) 绿泥石、金云母化阶段. 在靠近硬玉岩脉的超镁铁质围岩中绿泥石、金云母化现象较普遍. 绿泥石是蛇纹石与流体进一步反应所形成, 即蛇纹石与含 Al 流体反应形成绿泥石, 如反应式(4)所示. 后期, 富 SiO<sub>2</sub> 流体与蛇纹石的相互作用还可形成滑石(图 7a, 图 7b). 如果流体中富 K、Al, 则蛇纹石与流体反应可生成金云母(式 5).



Serp



Chl



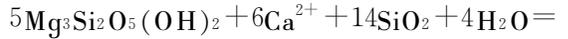
Serp



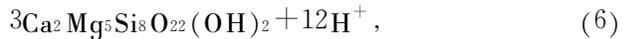
Phl

(3) 角闪石化阶段. 蛇纹石或绿泥石与富 SiO<sub>2</sub>

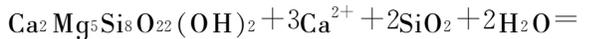
和 Ca<sup>2+</sup> 的流体进一步反应, 可生成透闪石(式 6)或透辉石(式 7 和式 8). 是形成透闪石还是透辉石, 取决于 Ca<sup>2+</sup> 的活度. 当 Ca<sup>2+</sup> 活度较高时, 多生成透辉石, 当 Ca<sup>2+</sup> 活度较低时, 则主要生成透闪石(图 7a). 但当流体富 Na、Al 和贫 Ca 时, 在适当高压条件下, 就会形成钠质闪石或钠钙质闪石(式 9 和式 10; 图 7b). 本文所研究的样品中, 与硬玉共生的角闪石主要为钠质闪石和钠钙质闪石, 说明了与硬玉岩形成相关的流体富 Na、Al 而贫 Ca.



Chl



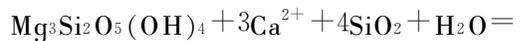
Tre



Tre



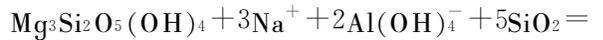
Di



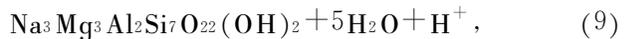
Serp



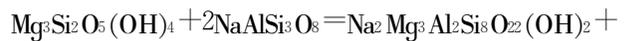
Di



Serp



Na-Amp



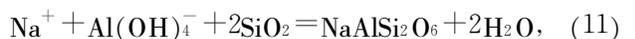
Serp

Ab

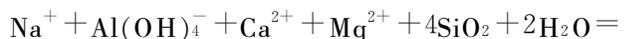
Na-Amp



(4) 钠质辉石(硬玉)阶段. 该阶段表现为富 Na 矿物的出现, 包括钠质闪石、钠质辉石. 与俯冲带有关的超基性岩体中普遍存在蛇纹石化现象, 且常有透辉石、透闪石等产出, 但含硬玉岩的蛇纹岩带却很少. 这也许说明硬玉岩的产出需要特殊的流体, 即一种富 Na、Al 的流体. 这种富 Na、Al、Si 流体在特定的条件下可以结晶出硬玉. 在高的 P/T 条件和高 Na、Al 活度的条件下, 硬玉优先从流体中结晶, 而在低 P/T 条件和高 SiO<sub>2</sub> 活度的条件下, 则结晶出钠长石(图 7b). 所看到的硬玉等钠质辉石常具有明显的韵律生长环带, 也表明其主要是从富 Na、Al、Si 的流体中结晶的(Harlow 1994; Harlow and Soerensen, 2005), 其可用式(11)和式(12)表示:



Jd



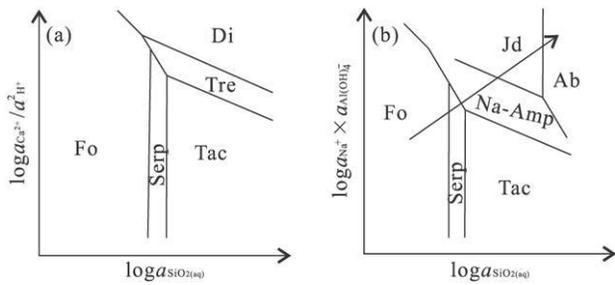
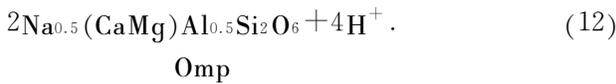
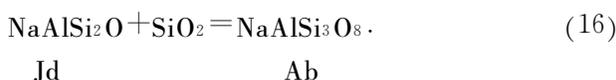
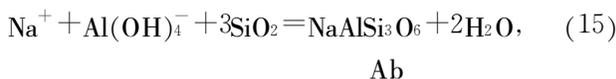
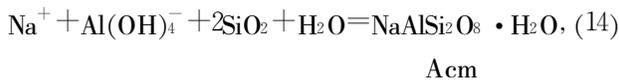
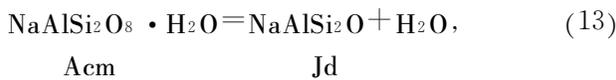


图 7  $\log a_{\text{Ca}^{2+}}/\log a_{\text{H}^+}$  示意(Allen *et al.*, 2003) (a) 和  $\log a_{\text{SiO}_2(\text{aq})} - \log a_{\text{Na}^+} \times a_{\text{Al(OH)}_4^-}$  示意(b)

Fig. 7 Schematic diagram of  $\log a_{\text{SiO}_2(\text{aq})} - \log a_{\text{Ca}^{2+}}/\log a_{\text{H}^+}$  (a) and  $\log a_{\text{SiO}_2(\text{aq})} - \log a_{\text{Na}^+} \times a_{\text{Al(OH)}_4^-}$  (b)



(5)方沸石、钠长石阶段:后期抬升过程中,由于压力的降低,在低于方沸石分解为硬玉和水(式 13)的反应线且  $\text{SiO}_2$  活度较低时,方沸石优先从流体中结晶(式 14).这与硬玉等矿物颗粒间隙由方沸石充填的现象一致.当压力较低, $\text{SiO}_2$  活度较高的流体在流经硬玉岩与角闪石时,其  $\text{SiO}_2$  活度不易改变,更容易结晶出钠长石,形成钠长石脉(式 15 和式 16).



## 4.2 角闪石在硬玉岩形成中的作用

硬玉(钠质辉石)岩总是与钠质角闪石伴生(图 3f, 3g),在钠质角闪石边缘或裂隙处常分布毛发状、竹叶状硬玉(钠质辉石)(图 3c),在钠质角闪石内部也可见硬玉(钠质辉石)晶体析出(图 3d, 图 3e),这表明钠质角闪石对硬玉岩的形成可能具有重要意义(Shi *et al.*, 2003).所研究角闪石成分变化比较大,主要表现为 Na、Al 含量的变化(图 4),  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的变化范围分别为 1.90%~11.23% 和 1.38%~12.35%.粗粒的角闪石常具有明显的成分环带(图 8)(Shi *et al.*, 2003).部分角闪石的边缘或沿着裂隙,成分发生明显的变化(图 8),粗粒角闪石的核部富 Ca, 贫 Na、Al, 属透闪石(Tre),在边缘

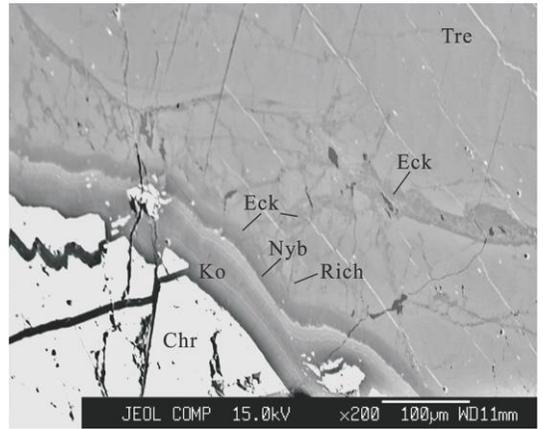


图 8 BSE 图像显示角闪石沿边缘及裂隙成分变化

Fig. 8 Backscatter electron (BSE) images showing the change of chemical composition along border and fractures of the amphibole porphyroblasts

或裂隙发育处,从内到外, Ca、Mg 含量逐渐降低, Na、Al 含量升高,从内到外经钠透闪石(Rich)、镁铝钠闪石(Eck)逐渐过渡到尼镁铝钠闪石(Nyb).这说明流体与角闪石可以发生相互反应,不仅改变了自身成分也改变了流体的成分,使流体与角闪石达到平衡.当流体中 Na、Al 活度较高,且角闪石中相对贫 Na、Al 富 Ca、Mg 时,流体与角闪石发生再平衡, Na、Al 置换出角闪石中的 Ca、Mg;而当流体中 Na、Al 活度较低,且角闪石中 Na、Al 较高时,流体与角闪石在平衡过程中也会释放出 Na、Al 离子.角闪石的存在可以调节流体中 Na、Al、Si 的浓度和比值,充当了硬玉形成过程中的 Na、Al、Si 缓冲剂.

## 4.3 硬玉岩的形成

如上所述,硬玉岩产于俯冲带蛇纹石化超镁铁岩中,其形成是富 Na-Al-Si 的流体与超镁铁质岩相互作用的结果.以往的研究认为,这种流体可能来自于俯冲板片的脱水(Morishita *et al.*, 2007).Manning(1998)研究表明俯冲板片中在蓝片岩到榴辉岩过渡带脱水作用能产生富 Na-Al-Si 流体.但这些流体中  $\text{SiO}_2$  的活度较高,而 Na、Al 的活度相对较低,不能达到结晶出硬玉的饱和点.然而当这些流体运移到俯冲板片上方的地幔楔或地幔楔碎块中,并发生广泛的交代作用,就有可能改变这些流体的性质,使之有利于硬玉岩的形成.如笔者的研究显示,超镁铁质岩在上升的过程中,首先是橄榄岩蛇纹石化,消耗了流体中大量的水和  $\text{SiO}_2$ ,使得流体中 Na、Al 得以富集,调整了 Na、Al、Si 的比例.随着流体与超镁铁质岩的进一步反应,蛇纹石化的规模扩大,先后形

成绿泥石、角闪石,进一步消耗掉流体中的 Si 和 Al,使流体中 Na、Al、Si 达到一定的比例,从而有利于硬玉的结晶。硬玉岩正是在这种经过不断调整的特殊环境下所形成的。在这一过程中,角闪石的存在调节了流体中 Na、Al、Si 的浓度和比值,充当了硬玉形成过程中的 Na、Al、Si 缓冲剂。

#### 4.4 结论

硬玉岩(翡翠)的形成与俯冲带富 Na、Al、Si 的流体与超镁铁质岩的相互作用有关。流体与超镁铁质岩相互作用可以分为蛇纹石化,绿泥石-云母化,角闪石化,钠质辉石,钠长石-方沸石这 5 个阶段。早期形成的绿泥石、角闪石层成为阻碍流体与蛇纹石化超镁铁质岩进一步反应的屏障。从而使流体中的 Na、Al、Si 富集,为硬玉的结晶创造条件。

超镁铁质岩在上升的过程中,首先是橄榄岩蛇纹石化,消耗了流体中大量的水和 SiO<sub>2</sub>,使得流体中 Na、Al 得以富集。随着流体与超镁铁质岩的进一步反应,蛇纹石化的规模扩大,先后形成绿泥石、角闪石,进一步消耗掉流体中的 Si 和 Al,使流体中 Na、Al、Si 达到一定的比例,从而有利于硬玉的结晶。硬玉岩正是在这种经过不断调整的特殊环境下所形成的。

与硬玉岩共生的角闪石成分复杂,多为钠质或钙钠质闪石,其成分变化大,尤其是 Na、Al、Si 及 Ca 等,并具明显的成分环带,这也表明流体与角闪石发生了相互反应。这些反应不仅改变了角闪石自身的成分,也改变了流体的成分,使流体与角闪石达到平衡。正是由于角闪石的存在,使流体中 Na、Al、Si 的浓度和比值得以调整,最终使流体中 Na、Al、Si 的活度及其比例稳定在一定范围内,而有利于硬玉等钠质辉石的结晶。角闪石充当了硬玉形成过程中的 Na、Al、Si 缓冲剂。

致谢:北京博观国际拍卖有限公司奥岩先生和桂林理工大学张良钜教授提供了珍贵的缅甸硬玉(翡翠)围岩标本,深圳职业技术学院胡楚雁副教授,云南德宏州瑞丽珠宝检测站徐斌工程师及广东省珠宝玉石及贵金属检测中心王铎提供了部分翡翠标本,郑署老师在电子探针测试中提供了帮助,在此一并表示真诚的感谢。

#### References

Acharyya, S. K., 2007. Collisional emplacement history of the Naga-Andaman ophiolites and the position of the eastern Indian suture. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29

(2-3): 229-242. doi: 10.1016/j.jseae.2006.03.003

- Allen, D. E., Seyfried Jr., W. E., 2003. Compositional controls on vent fluids from ultramafic-hosted hydrothermal systems at mid-ocean ridges: an experimental study at 400 °C, 500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(8): 1531-1542. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01173-0
- Barley, M. E., Pickard, A. L., Khin, Z., et al., 2003. Jurassic to Miocene magmatism and metamorphism in the Mogok metamorphic belt and the India-Eurasia collision in Myanmar. *Tectonics*, 22(3): 1019. doi: 10.1029/2002TC001398
- Coleman, R. G., 1961. Jadeite deposits of the clear Creek area, New Idria district, San Benito County, California. *Journal of Petrology*, 2(2): 209-247.
- Cui, W. Y., Shi, G. H., Yang, F. X., et al., 2000. A new viewpoint-magma genesis of jadeite jade. *Journal of Gems & Gemmology*, 2(3): 16-22 (in Chinese with English abstract).
- Curray, J. R., 2005. Tectonics and history of the Andaman sea region. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(1): 187-228. doi: 10.1016/j.jseae.2004.09.001
- Frost, B. R., Beard, J. S., 2007. On silica activity and serpentinization. *Journal of Petrology*, 48(7): 1351-1368. doi: 10.1093/petrology/emg021
- García-Casco, A., Vega, A. R., Parraga, J. C., et al., 2009. A new jadeite jade locality (Sierra del Convento, Cuba): first report and some petrological and archeological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 158(1): 1-16. doi: 10.1007/s00410-008-0367-0
- Harlow, G. E., 1994. Jadeitites, albitites and related rocks from the Motagua fault zone, Guatemala. *Journal of Metamorphic Geology*, 12(1): 49-68.
- Harlow, G. E., Sorensen, S. S., 2005. Jade (nephrite and jadeite) and serpentinite: metasomatic connections. *International Geology Review*, 47(2): 113-146.
- 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. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, 78(2): 225-242.
- Mitchell, A. H. G., Htay, M. T., Htun, K. M., et al., 2007. Rock relationships in the Mogok metamorphic belt, Tatkon to Mandalay, central Myanmar. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(5-6): 891-910. doi: 10.1016/j.jseae.2006.05.009
- Morishita, T., Arai, S., Ishida, Y., 2007. Trace element compositions of jadeite (+omphacite) in jadeitites from the Itoigawa-Ohmi district, Japan: implications for fluid

- processes in subduction zones. *Island Arc*, 16 (1): 40–56. doi: 10.1111/j.1440-1738.2007.00557.x
- Morley, C. K., 2004. Nested strike-slip duplexes, and other evidence for Late Cretaceous–Palaeogene transpressional tectonics before and during India–Eurasia collision, in Thailand, Myanmar and Malaysia. *Journal of the Geological Society*, 161(5): 799–812. doi: 10.1144/0016-764903-124
- Qiu, Z. L., Wu, F. Y., Yang, S. H., et al., 2008. Age and genesis of the Myanmar jadeite: constraints from U–Pb ages and Hf isotopes of zircon inclusions. *Chinese Science Bulletin*, 54(4): 658–668. doi: 10.1007/S1134-008-04903
- Searle, M. P., Noble, S. R., Cottle, J. M., et al., 2007. Tectonic evolution of the Mogok metamorphic belt, Burma (Myanmar) constrained by U–Th–Pb dating of metamorphic and magmatic rocks. *Tectonics*, 26 (3): TC3014. doi: 10.1029/2006TC002083
- Shi, G. H., Cui, W. Y., Cao, S. M., et al., 2008. Ion microprobe zircon U–Pb age and geochemistry of the Myanmar jadeite. *Journal of the Geological Society*, 165: 221–234.
- Shi, G. H., Cui, W. Y., Liu, J., et al., 2001. Petrology of jadeite-bearing serpentinized peridotite and its country rocks from northwestern Myanmar (Burma). *Acta Petrologica Sinica*, 17(3): 483–490 (in Chinese with English abstract).
- 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 jadeite area in northwestern Myanmar, formerly Burma. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 145 (3): 355–376. doi: 10.1007/s00410-003-0457-y
- Shi, G. H., Cui, W. Y., Wang, C. Q., et al., 2000. The fluid inclusions in jadeite from Pharkant area, Myanmar. *Chinese Science Bulletin*, 45(20): 1896–1900. doi: 10.1007/BF02886302
- Shi, G. H., Stockhert, B., Cui, W. Y., 2005a. Kosmochlor and chromian jadeite aggregates from the Myanmar jadeite area. *Mineralogical Magazine*, 69 (6): 1059–1075. doi: 10.1180/026461056960308
- Shi, G. U., Tropper, P., Cui, W. Y., et al., 2005b. Methane (CH<sub>4</sub>)-bearing fluid inclusions in the Myanmar jadeite. *Geochemical Journal*, 39(6): 503–516.
- Sorensen, S., Harlow, G. E., Rumble III, D., 2006. The origin of jadeite-forming subduction-zone fluids: CL-guided SIMS oxygen-isotope and trace-element evidence. *American Mineralogist*, 91(7): 979–996. doi: 10.2138/am.2006.1949
- Sorensen, S. S., Sisson, V. B., Harlow, G. E., 2008. Fluids and the REE and O-isotopes of albitite, jadeite and jadeite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72 (12): A885–A885.
- Tsujimori, T., Moriguti, T., Kunihiro, T., et al., 2007. Large-scale fluid flow in a cold subduction-zone: SIMS Li-isotope study of jadeite veins in Franciscan meta-graywacke. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71 (15S): A1040–A1040.
- Wang, X. M., Zeng, Z. G., Chen, J. B., et al., 2009. Serpentinization of peridotites from the southern Mariana forearc. *Progress in Natural Science*, 19(10): 1287–1295. doi: 10.1016/j.pnsc.2009.04.004
- Zhang, L. J., 2004. Characteristics and genesis of the primary jadeite jade orebody in Nammaw, Myanmar. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(1): 49–53 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W. J., 2002. Jadeite deposit geology in Pharkant area, North Myanmar. *Yunnan Geology*, 21(4): 378–390 (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. 宝石和宝石学杂志, 2(3): 16–21.
- 丘志力, 吴福元, 杨树辉, 等, 2008. 缅甸翡翠形成时代和成因的锆石 U–Pb 年龄与 Hf 同位素制约. 科学通报, 53(24): 3104–3111.
- 施光海, 崔文元, 刘晶, 等, 2001. 缅甸含硬玉的蛇纹石化橄榄岩及其围岩的岩石学研究. 岩石学报, 17(3): 483–490.
- 施光海, 崔文元, 王长秋, 等, 2000. 缅甸帕敢地区硬玉岩中流体包裹体. 科学通报, 45(13): 1433–1437.
- 张良钜, 2004. 缅甸纳莫原生翡翠矿体特征与成因研究. 岩石矿物学杂志, 23(1): 49–53.
- 张位及, 2002. 缅甸北部帕敢地区翡翠矿床地质. 云南地质, 21(4): 378–390.