

# 新疆阿尔泰伟晶岩中绿柱石拉曼光谱特征研究 ——以可可托海3号脉与阿祖拜328、528号脉为例

周天怡<sup>1</sup>, 陈衍景<sup>1</sup>, 张 辉<sup>2</sup>

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

**摘 要:** 本文对新疆可可托海3号伟晶岩脉中的绿柱石与阿祖拜328、528号伟晶岩脉中的宝石级绿柱石开展拉曼光谱对比研究, 获得以下主要结论: ① 阿祖拜328、528号伟晶岩脉中宝石级绿柱石以富含I型H<sub>2</sub>O为特征, 可可托海3号脉早期形成的结构带(I-II带)中绿柱石以及相对富H<sub>2</sub>O岩浆体系中形成的绿柱石(IV带)以存在I型H<sub>2</sub>O为主, 演化程度相对较高, 岩浆体系中结晶的结构带(III带)以及岩浆-热液过渡阶段体系形成的结构带(V带)中绿柱石以含有II型H<sub>2</sub>O为特征; ② 在可可托海3号脉以及阿祖拜328号、528号脉绿柱石矿物中均发现冰晶石矿物包体, 指示伟晶岩岩浆含有较高的F含量; ③ 绿柱石通道水类型(I型H<sub>2</sub>O、II型H<sub>2</sub>O)及相对比例, 是伟晶岩岩浆-热液演化过程及其形成条件的响应, 在相对氧化的岩浆体系中主要形成绿柱石矿物, 而相对还原的富H<sub>2</sub>O岩浆体系更有利于海蓝宝石形成。

**关键词:** 通道水; 拉曼光谱; 绿柱石; 海蓝宝石; 阿尔泰伟晶岩

中图分类号: P578.953; P575.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)S2-0077-08

## Comparative laser Raman spectroscopy study of green beryls from Azubai and Kokotokay pegmatite veins in Altay, Xinjiang

CHOW Tin-yi<sup>1</sup>, CHEN Yan-jing<sup>1</sup> and ZHANG Hui<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** The differences between green beryls from the Kokotokay No. 3 pegmatite and aquamarines from the Azubai area in Xinjiang were investigated by means of laser Raman spectroscopy. Some conclusions have been reached: ① Gem-grade beryls from Azubai No. 328 and No. 528 pegmatite veins are characterized by high content of Type I channel water, and beryls from Kokotokay No. 3 pegmatite show interchanging properties. Beryls formed during early crystallization (zone I and zone II) and in the magmatic system that is comparatively rich in water (zone IV) feature predominantly Type I channel water, whereas beryls from the more evolved textural zones, i. e., zones formed at magmatic and magmatic-hydrothermal stages (zone III and zone V, respectively) comprise mainly Type II channel water. ② The discovery of cryolite inclusions in Kokotokay No. 3, Azubai No. 328 and No. 528 pegmatite veins indicate that the pegmatitic magmas have a relatively high content of F. ③ The types of channel water in beryls (Type I and Type II water) and their relative proportions are subject to the magmatic-hydrothermal evolution of the pegmatites as well as the formation conditions. The pegmatitic magma system that is relatively oxidized forms primarily beryl minerals, while the system that is relative-

收稿日期: 2014-08-30; 修订日期: 2014-09-06

作者简介: 周天怡(1986-), 女, 博士研究生, 从事宝石矿床研究, E-mail: tychow@pku.edu.cn; 通信作者: 张 辉(1965-), 男, 研究员, E-mail: zhanghui@vip.gyig.ac.cn

ly reduced and rich in water is favorable for the formation of aquamarine.

**Key words:** channel water; Raman spectroscopy; green beryl; aquamarine; Altay pegmatite

新疆北部阿尔泰地区是世界著名的稀有金属-宝石花岗伟晶岩成矿带,也是我国享有盛名的海蓝宝石(宝石级蓝色绿柱石)主要产地,其中以福海县阿祖拜伟晶岩与青河县阿斯喀尔特花岗岩-伟晶岩中产出的海蓝宝石为最。由于形成时代、构造背景以及岩浆-热液演化等差异,不同地区伟晶岩产出的绿柱石品质却良莠不齐。可可托海3号脉是世界上分异最完善的稀有金属伟晶岩矿床之一,以稀有金属矿种多(Li、Be、Nb、Ta、Rb、Cs、Zr、Hf)、储量大而闻名中外。然而,历经半个多世纪的开采,目前资源已近枯竭,绿柱石仅达到矿物级别,成为用于提取金属Be的原材料。

新疆福海县的阿祖拜328和528号脉是上个世纪80年代阿尔泰海蓝宝石主要产地。伟晶岩脉形成于三叠纪(216~201 Ma,未发表资料),与可可托海3号脉形成时代(220~210 Ma)(Zhu *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2007; 陈剑锋, 2011; 刘锋等, 2012)相近。阿祖拜328和528号伟晶岩锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 分别为+0.77~+4.13和+0.55~+2.40(未发表数据),而可可托海3号脉的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为+1.25~+2.39(陈剑锋, 2011),表明两个地区的稀有金属伟晶岩具有相似的物质来源。相似的锆石Hf同位素组成表明它们形成于相似的物源。可可托海3号脉中赋存的是超大型Be矿体,主要含Be矿物是绿柱石;而阿祖拜328号脉、528号脉是阿尔泰代表性的海蓝宝石矿。但至今未见与伟晶岩中海蓝宝石形成相关的岩浆-热液演化过程及其形成的物化条件的研究。

本文对比研究了可可托海3号脉绿柱石与阿祖拜地区宝石级绿柱石(海蓝宝石)的拉曼光谱学研究,根据绿柱石中存在的矿物包体以及通道水拉曼光谱特征,探讨伟晶岩岩浆-热液演化体系中宝石级绿柱石形成的物理化学条件。

## 1 可可托海及阿祖拜伟晶岩地质概况

可可托海及阿祖拜矿区皆位于新疆北部阿尔泰造山带的中阿尔泰构造单元。伟晶岩脉主要分布在花岗岩的内外接触带或贯入片岩的构造裂隙中,伟晶岩脉多与造山带主构造线一致,主要呈北西330~

340°展布,明显受区域性构造控制(王淑珍等, 1994)(图1)。

可可托海3号伟晶岩形态复杂,规模庞大,整体由筒状岩钟体和底部缓倾斜脉体两部分组成。围岩为斜长角闪岩。岩钟体走向NW335°,倾向NE,倾角大,上盘40~60°,下盘80~90°;缓倾斜部分走向NW310°,倾向SE,倾角10~25°。根据岩石结构特征和特定的矿物共生组合,从脉体边部到核部带可把伟晶岩脉划分出9个结构带,构成近同心环带状构造,从外向内依次为:文象变文象伟晶岩带(I带)、糖粒状钠长石带(II带)、块体微斜长石带(III带)、白云母-石英带(IV带)、叶钠长石-锂辉石带(V带)、石英-锂辉石带(VI带)、白云母-薄片状钠长石带(VII带)、锂云母-薄片状钠长石带(VIII带)、核部块体微斜长石带和石英(IX<sub>1</sub>和IX<sub>2</sub>)。绿柱石普遍分布于各结构带中,其中以II和IV带含量最高,IX带最低。根据岩浆-热液演化不同阶段,早期岩浆阶段I至IV带形成钠绿柱石,岩浆-热液过渡阶段V至VI带形成钠锂绿柱石,而晚期热液阶段VII至IX带则形成锂铯绿柱石(朱金初等, 2000; Wang *et al.*, 2009)。

阿祖拜328和528号伟晶岩均呈脉状侵位于志留系地层库鲁木提群中,围岩为红柱石-石英-黑云母片岩。两脉相距约1 km,分别呈NNW和NW向展布。328号脉走向350°,倾向NE,倾角~40°。528号脉走向310°,倾向SW,倾角35°。两脉分异演化程度相当,其中328号脉主要由文象微斜长石带、石英-白云母带-微斜长石带构成,偶见块体微斜长石带;528号脉主要包含文象微斜长石带、石英-白云母-微斜长石带,偶见块体微斜长石带、糖粒状钠长石带。主要矿物包括钠长石、微斜长石、石英和白云母,矿石矿物以宝石级绿柱石为主,少量锂辉石和石榴石(王登红等, 2000)。除块体微斜长石带之外,各结构绿柱石普遍发育,其中以石英-白云母-微斜长石带中的绿柱石含量最高。

## 2 样品及分析方法

### 2.1 绿柱石样品及特征

本研究共选用了15个采自阿尔泰可可托海3号、阿祖拜328号及528号伟晶岩的绿柱石样品,其

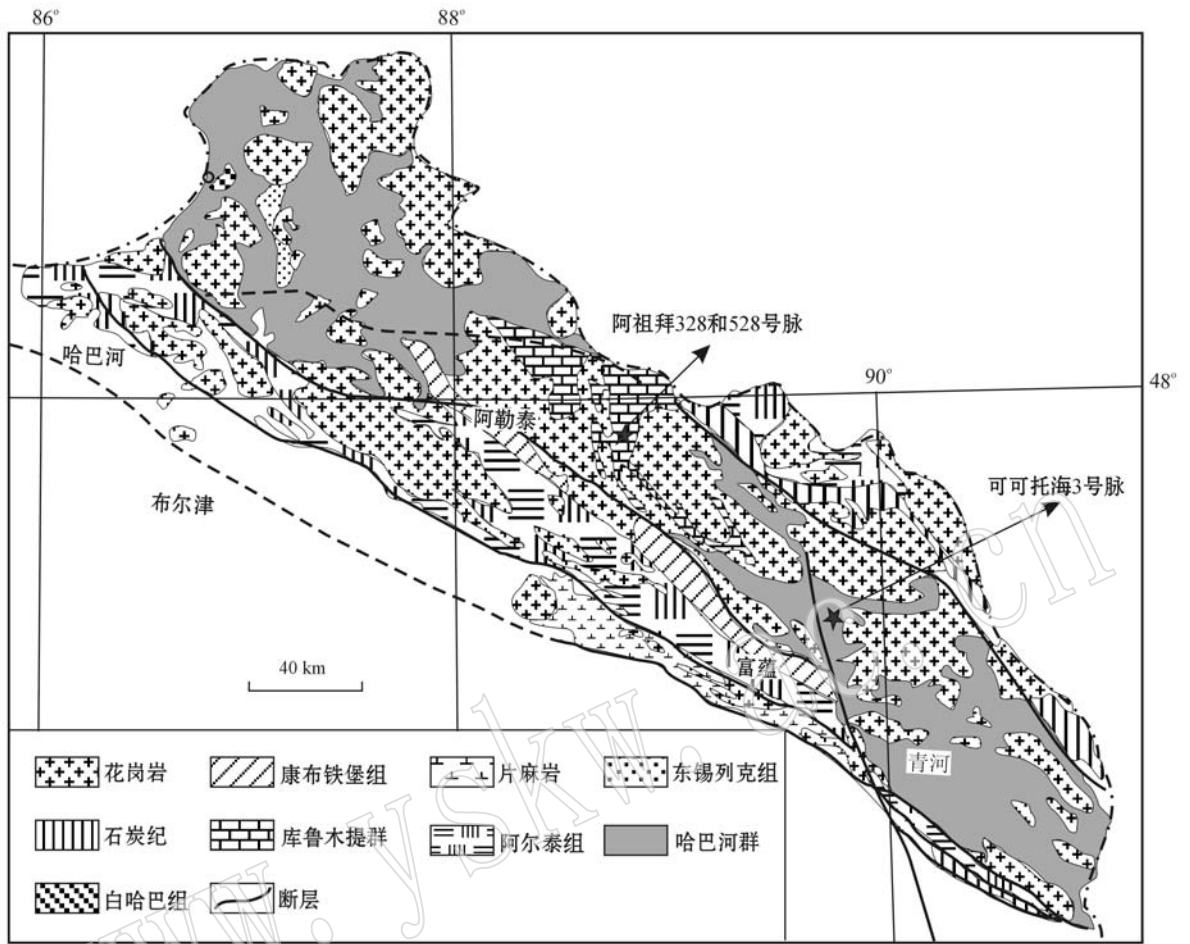


图 1 新疆阿尔泰地质简图(据 Windley *et al.*, 2002 和 Lü *et al.*, 2012 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Altay, Xinjiang (modified after Windley *et al.*, 2002 and Lü *et al.*, 2012)

中可可托海 3 号脉在绿柱石样品主要采自文象变文象伟晶岩带 (I 带)、糖粒状钠长石带 (II 带)、块体微斜长石带 (III 带)、白云母-石英带 (IV 带) 和叶钠

长石-锂辉石带 (V 带), 阿祖拜 328 号脉、528 号脉样品主要来自文象微斜长石带、石英-白云母带-微斜长石带构成。所研究的绿柱石样品描述列于表 1。

表 1 KK3、阿祖拜 328 号和 528 号伟晶岩中绿柱石样品描述

Table 1 Green beryl samples details of KK3, AZB328 and AZB528 pegmatites

| 样品编号        | 伟晶岩结构分带      | 绿柱石特征                                    |
|-------------|--------------|--|
| KK3-1-1     | 文象变文象伟晶岩带    | 含量低、浅绿-黄绿色、他形、晶体较小、一般长 0.5~1 cm          |
| KK3-2-5     | 糖粒状钠长石带      | 含量高、不同色调的绿色、短柱状-他形、一般长 1~5 cm, 个别 >10 cm |
| KK3-3-7     | 块体微斜长石带      | 含量低、浅绿-黄绿色、他形、约 4~6 cm 长                 |
| KK3-4-10    | 白云母-石英带      | 含量高、淡蓝绿色、短柱状-他形、约 2~6 cm 长               |
| KK3-5-14    | 叶钠长石-锂辉石带    | 含量低、白色、六方板状、晶体普遍较大, 2~7 cm 宽             |
| AZB328-1-19 | 文象微斜长石带      | 含量较高、蓝色、六方柱状、一般长 1~2 cm                  |
| AZB328-2-20 | 块体微斜长石带      | 极少、淡蓝绿色、六方柱状、约 3 cm 长                    |
| AZB328-4-21 | 石英-白云母-微斜长石带 | 含量较高、蓝色、六方柱状、约 2~3 cm 长                  |
| AZB328-5-22 | 石英-叶钠长石带     | 含量低、淡蓝色、约 1 cm 长                         |
| AZB528-1-25 | 文象微斜长石带      | 含量较高、淡蓝绿色、六方柱状、约 2.5 cm 长                |
| AZB528-2-28 | 块体微斜长石带      | 极少、淡绿色、六方柱状                              |
| AZB528-3-29 | 糖粒状钠长石带      | 含量低、淡蓝色、六方柱状、1~1.5 cm 长                  |
| AZB528-4-31 | 石英-白云母-微斜长石带 | 含量最高、淡蓝绿色、六方柱状、2 cm 长                    |
| AZB528-5-33 | 石英-叶钠长石带     | 含量低、淡蓝色、六方柱状、2~3.5 cm 长                  |
| AZB528-6-36 | 石英集合体        | 含量低、蓝色、1~2.5 cm 长                        |

可可托海3号脉中不同结构带的绿柱石在矿物学上差异显著,晶形多样,多为不完整柱状至他形,颜色变化范围较大,呈淡蓝-黄绿-白色,半透明-不透明且裂隙发育,粒度在6 cm×7 cm至0.5 cm×0.5 cm不等(图2)。

阿祖拜328和528号脉的海蓝宝石样品以淡蓝至鲜蓝色为主,一般晶形完好,六方柱状自形居多,透明-半透明,粒度在4 cm×2 cm至1 cm×0.5 cm不等(图2)。

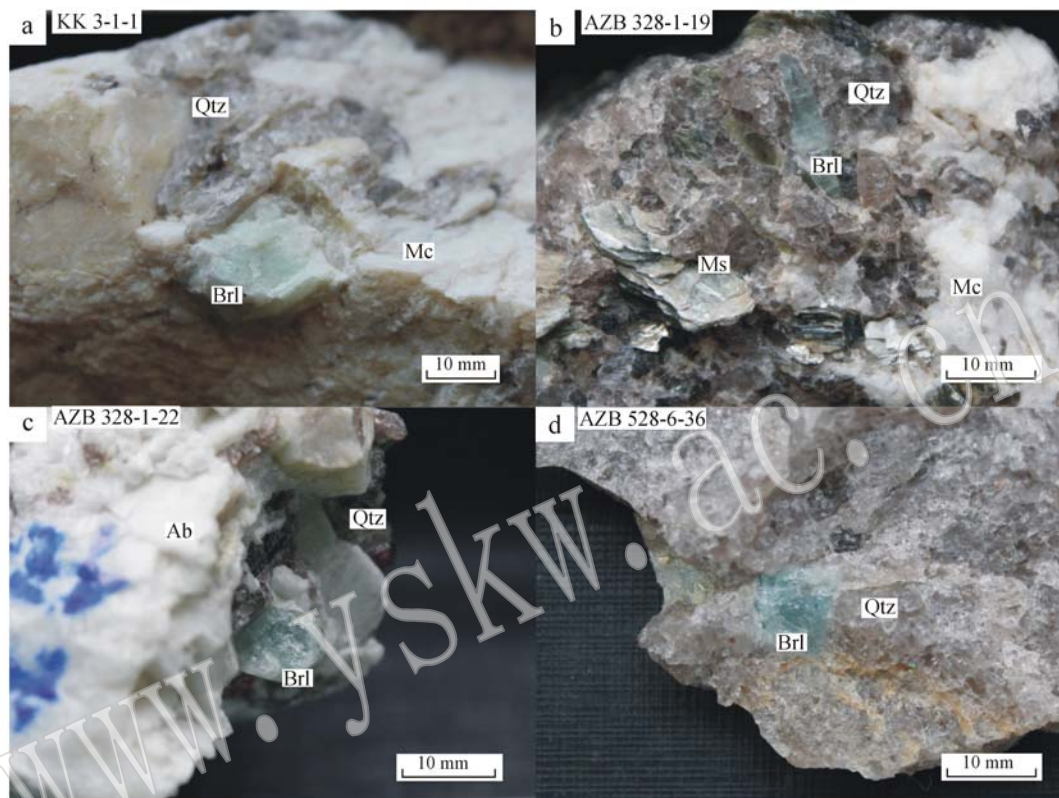


图2 不同产地的绿柱石样品

Fig. 2 Green beryl samples from different source areas

Brl—绿柱石; Qtz—石英; Ab—钠长石; Mc—微斜长石; Ms—白云母

Brl—beryl; Qtz—quartz; Ab—albite; Mc—microcline; Ms—muscovite

## 2.2 实验原理、方法

绿柱石与海蓝宝石的化学式为  $\text{Be}_3\text{Al}_2[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ , 是具六方环状结构的铍铝硅酸盐。六方柱状通道内主要包含  $\text{H}_2\text{O}$  分子、 $\text{CO}_2$  和一些惰性气体(Kolesov, 2008)。理想状态下水分子的二次对称轴垂直于绿柱石晶体  $c$  轴, 称 I 型结构水; 当类质同像替代发生时, 为平衡阳离子电价, 少量碱性金属离子进入绿柱石晶格, 水分子中氧离子受电荷吸引旋转  $90^\circ$ , 使水分子的二次对称轴平行于通道长轴方向, 形成第 2 种排列形式, 称 II 型结构水。理论上绿柱石的结构水峰集中于  $3\,590\text{ cm}^{-1}$  至  $3\,700\text{ cm}^{-1}$  之间, 可再细分为  $\nu_1$ 、 $\nu_2$ 、 $\nu_3$  3 种拉曼活性振动模式, 前两种为对称振动, 后者为非对称振动(Charoy *et al.*, 1996)。

利用显微拉曼光谱对可可托海3号脉绿柱石、

阿祖拜328号和528号脉海蓝宝石进行无损微区研究。实验仪器采用英国 Renishaw inVia Reflex 型的显微共聚焦激光拉曼光谱仪, 在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。测试条件如下: 激发光源  $514.5\text{ nm}$ , 空间分辨率为  $2\ \mu\text{m}$ , 测试范围为  $1\,500\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ , 薄片沿绿柱石晶体长轴切制。

## 3 结果与讨论

### 3.1 矿物包体特征

与已有的报道(阮青锋等, 2008)相似, 本次在可可托海3号脉中绿柱石矿物中可观察到大量深红色微透明枝状、羊齿状赤铁矿, 无色透明浑圆柱状矿

长石、冰晶石及少量不规则分布的褐色立方体锌尖晶石、浅橘色粒状锰铝榴石及电气石等固体包体，大

小从数十至数百微米不等(图 3)。

阿祖拜 328 号的绿柱石中的固体包体含量丰

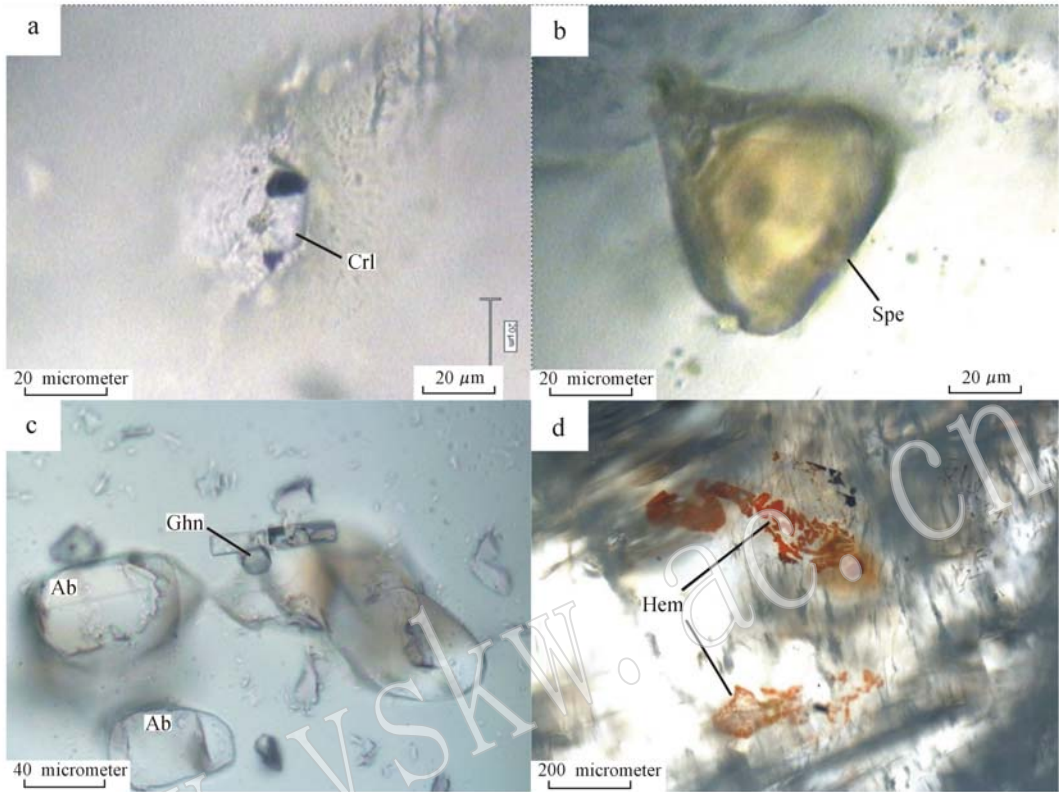


图 3 KK3 绿柱石中的矿物包体

Fig. 3 Mineral inclusions in green beryls from KK3

CrI—冰晶石; Spe—锰铝榴石; Ghn—锌尖晶石; Hem—赤铁矿  
CrI—cryolite; Spe—spessartine; Ghn—gahnite; Hem—hematite

富、种类繁多、大小不一，常见有正高突起、浅褐黄色数微米大小的八面体-六边形细粒状锌尖晶石，棕色-浅灰色柱状至参差状冰晶石，黑色六方板状-他形块状磁铁矿，橙红色长方片状假像的赤铁矿，此外，包体矿物还有钠长石、钾长石、闪锌矿、金红石和体积达  $200\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$  的二氧化钛(图 4)。

阿祖拜 528 号绿柱石主晶中的固体包裹体组合较 328 号脉的简单，主要以赤铁矿、锌尖晶石、冰晶石为主，晚期结构带含少量石英微晶。包裹体大小介于十至数十微米之间。

本研究首次在新疆阿尔泰地区绿柱石矿物中发现了冰晶石包体。绿柱石矿物中存在冰晶石包体，指示形成绿柱石之前的岩浆体系含有较高的 F 含量。此外，在可可托海 3 号脉绿柱石中存在赤铁矿，而在阿祖拜 328 号脉海蓝宝石中存在磁铁矿及赤铁矿假像，指示形成可可托海 3 号脉的岩浆氧逸度相

对较高，而形成阿祖拜 328 号脉的岩浆氧逸度相对较低。

### 3.2 绿柱石通道水拉曼光谱特征

由于可可托海 3 号脉和阿祖拜绿柱石中结构水的赋存状态存在一定的差异，透过拉曼探针所提供有关绿柱石分子基团对称性、振动频率、离子有序度、缺陷等的信息，可以揭示不同产地绿柱石的晶体结构特征。

绿柱石拉曼光谱测试结果显示，可可托海 3 号脉中绿柱石与阿祖拜 328、528 号脉中绿柱石的  $\nu_1$  对称伸缩振动光谱有明显的区别。可可托海 3 号脉绿柱石结构水出现的组合比较复杂，其中岩浆阶段形成的绿柱石(Ⅲ带)以及岩浆-热液过渡阶段体系形成的绿柱石(V带)以 II 型水为主，II 型水的拉曼峰宽而弱，拉曼位移在  $3\ 596\ \text{cm}^{-1}$  至  $3\ 600\ \text{cm}^{-1}$  之间，即对称伸缩振动为碱金属—O—H 键的振动，其含量

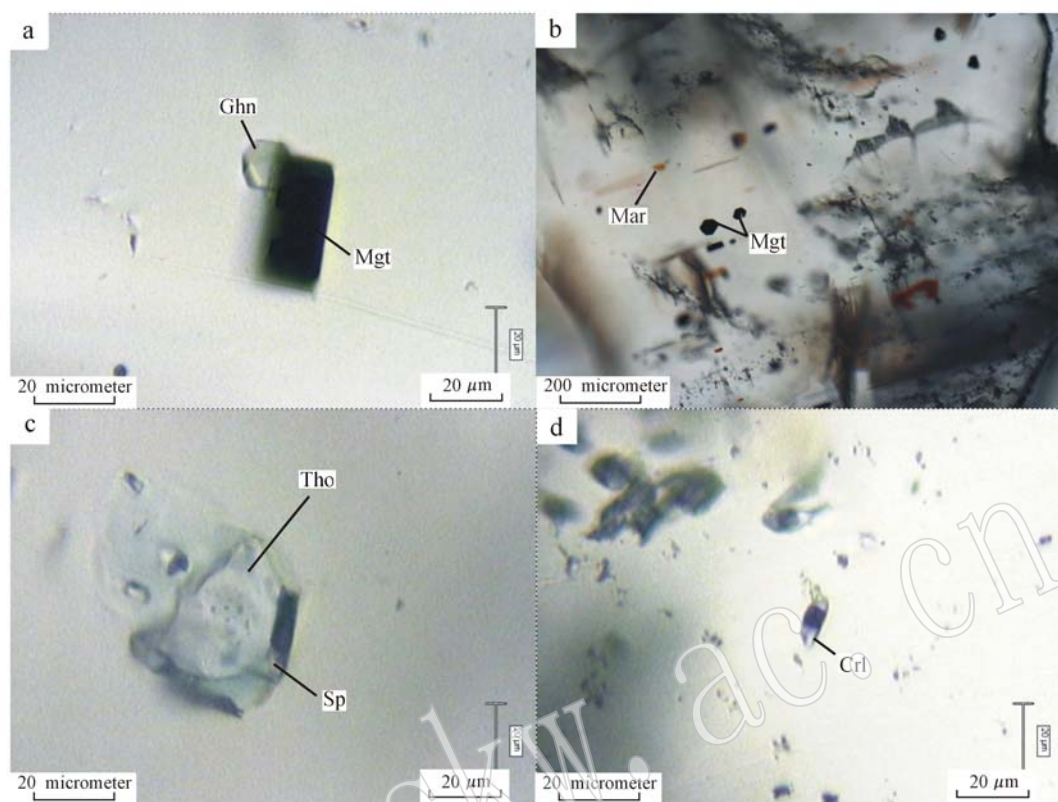


图4 阿祖拜328号脉绿柱石中的矿物包体

Fig. 4 Mineral inclusions in green beryls from Azubai No. 328 pegmatite

Ghn—锌尖晶石; Mgt—磁铁矿; Mar—赤铁矿假像; Sp—闪锌矿; Crl—冰晶石; Tho—方钍石

Ghn—gahnite; Mgt—magnetite; Mar—martite; Sp—sphalerite; Crl—cryolite; Tho—thorianite

比值高达 $>80\%$ ,而岩浆早期形成的结构带中绿柱石(I带)以及相对富 $H_2O$ 的岩浆中结晶的绿柱石(II、IV带)则呈现相反的现象,以I型结构水H—O—H键的振动为主。相比较,阿祖拜地区的更稳定单一,328号和528号脉中海蓝宝石均以I型水为主,其拉曼峰窄而强,拉曼位移为 $3609\text{ cm}^{-1}$ 至 $3611\text{ cm}^{-1}$ 。通过面积比计算,得出I型水的含量比值占 $70\% \sim 90\%$ 不等。阿祖拜328号脉海蓝宝石显示其拉曼光谱峰值强度远高于可可托海3号脉中绿柱石和阿祖拜528号脉中的海蓝宝石(图5)。

$Fe^{2+}$ 是海蓝宝石的主要致色离子,在绿柱石环状通道内与水分子结合成 $[Fe^{2+}(H_2O)]$ 水合离子导致蓝色(彭明生等,1985)。邹天人(1996)认为结构水的类型、含量可以间接反映有利不同价态Fe水合离子生成的环境,当I型水和II型水的比例达到1:1

的时候,海蓝宝石将能呈现最鲜艳的海蓝色;而当I型水的比例越高,透明度亦越高(透绿柱石)。阿祖拜的海蓝宝石透明度较高但颜色偏浅可能与其I型水的高含量有关。

已有研究显示,绿柱石中结构水的类型与赋存于晶体结构通道中的碱金属含量亦息息相关,碱金属存在与否促使I型水与II型水之间的转化(Charoy *et al.*, 1996; 郭延军等, 2000)。由于I型 $H_2O$ 分子是未键合的,而II型 $H_2O$ 分子是与通道中碱金属离子键合的,因此,岩浆演化早期阶段形成的绿柱石以含有I型 $H_2O$ 为主,而岩浆高度分异演化晚期阶段形成的绿柱石以含有II型 $H_2O$ 为特征。至于阿祖拜328号脉海蓝宝石显示较强的拉曼光谱峰值,表明具有较高通道 $H_2O$ 含量,很可能指示其形成于相对富 $H_2O$ 的岩浆体系。

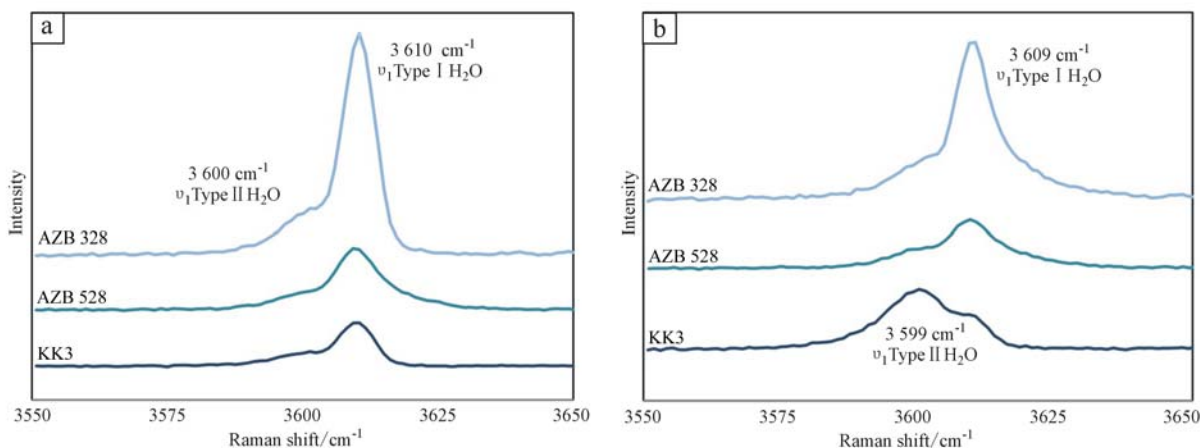


图 5 不同结构带绿柱石的结构水  $\nu_1$  对称伸缩振动的拉曼光谱特征 (范围:  $3\ 550\sim 3\ 650\ \text{cm}^{-1}$ , 室温)

Fig. 5 Single-crystal Raman spectra ( $3\ 550\sim 3\ 650\ \text{cm}^{-1}$  at room temperature) of  $\nu_1$  symmetric stretching vibrations of channel water in beryls from different textural zones.

a—石英-白云母带中的绿柱石(KK3 对应的结构带为Ⅳ带); b—为块体微斜长石带中的绿柱石(KK3 对应的结构带为Ⅲ带)  
a—beryls are from the quartz-muscovite zones (zoneⅣ for KK3); b—beryls are from the massive microcline zones (zoneⅢ for KK3)

## 4 结论

本文通过对阿尔泰伟晶岩中绿柱石矿物拉曼光谱研究,揭示可可托海 3 号脉与阿祖拜绿柱石水分子  $\nu_1$  模式振动的差异,根据Ⅰ、Ⅱ型  $\text{H}_2\text{O}$  水比例、含量的不同,提出可有效区别绿柱石与海蓝宝石。

## References

Charoy B, de Donato P, Barres O *et al.*, 1996. Channel occupancy in an alkali-poor beryl from Serra Branca (Goias, Brazil): Spectroscopic characterization[J]. *American Mineralogist*, 81: 395~403.

Kolesov B. 2008. Vibrational states of  $\text{H}_2\text{O}$  in beryl physical aspects[J]. *Phys. Chem. Minerals*, 35: 271~278.

Chen Jianfeng. 2011. Geochemistry of the Plate Part in Altai No. 3 Pegmatite and Its Formation and Evolution[D]. A dissertation submitted to graduate university of Chinese Academy of Sciences for the degree of Master of Philosophy (in Chinese with English abstract).

Guo Yanjun, Wang Rucheng and Xu Shijin. 2000. Vibrational spectra of Beryl from Xuebaoding, Pingwu County, Sichuan Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(2): 201~204 (in Chinese with English abstract).

Liu Feng, Zhang Zhixin, Li Qiang, *et al.* 2012. New age constraints on Kokotokay pegmatite No. 3 Vein, Altay Mountains, Xinjiang: Evidence from molybdenite Re-Os dating[J]. *Mineral Deposits*, 31

(5): 1 111~1 118 (in Chinese with English abstract).

Lü Z H, Zhang H, Tang Y, *et al.* 2012. Petrogenesis and magmatic-hydrothermal evolution time limitation of Kelumute No. 112 pegmatite in Altay, Northwestern China: Evidence from zircon U-Pb and Hf isotopes[J]. *Lithos*, 154: 374~391.

Peng Mingsheng, Zheng Chusheng, Wen Yuankai, *et al.* 1985. Spectroscopic studies of aquamarine from Altay[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 5(2): 140~146 (in Chinese with English abstract).

Ruan Qingfeng, Zhang Liangju, Zhang Changlong, *et al.* 2008. Genesis and characteristics of beryl[J]. *Mineral Resources and Geology*, 22(3): 265~269 (in Chinese with English abstract).

Wang Denghong, Chen Yuchuan, Zou Tianren, *et al.* 2000.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating for the Azubai rare metal-gem deposit in Altay, Xinjiang—New evidence for Yanshanian mineralization of rare metals[J]. *Geological Review*, 46(3): 307~311 (in Chinese with English abstract).

Wang Rucheng, Che Dongxu, Zhang Wenlan, *et al.* 2009. Geochemical evolution and late re-equilibration of Na-Cs-rich beryl from the Koktokay # 3 pegmatite (Altai, NW China)[J]. *Eur. J. Mineral.*, 21: 795~809.

Wang Shuzhen, Wang Yuanlong, Liao Youwei, *et al.* 1994. Chrysoberyl in the granite pegmatite of Xinjiang Altai[J]. *Journal of Xinjiang Institute of Technology*, 15(2): 142~149 (in Chinese with English abstract).

Wang Tao, Tong Ying, Jahn Bor-ming, *et al.* 2007. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of the Altai No. 3 Pegmatite, NW China, and

- its implications for the origin and tectonic setting of the pegmatite [J]. *Ore Geology Review*, 32: 325~336.
- Windley B F, Kroener A, Guo J, *et al.* 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai Orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution[J]. *Journal of Geology*, 110(6): 719~737.
- Zhu Y F, Zeng Yishan and Gu Libing. 2006. Geochemistry of the rare metal bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altai Mountains, northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27: 61~77.
- Zhu Jinchu, Wu Changnian, Liu Changshi, *et al.* 2000. Magmatic-hydrothermal evolution and genesis of Kokotokay No. 3 rare metal pegmatite dyke, Altai, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 6(1): 40~52 (in Chinese with English abstract).
- Zou Tianren. 1996. Mechanism and controlling factors of colour formation of aquamarines in China[J]. *Mineral Deposits*, 15 (Sup): 55~61 (in Chinese with English abstract).
- 中国科学院地球化学研究所硕士学位论文.
- 郭延军, 王汝成, 徐士进. 2000. 四川平武雪宝顶绿柱石的振动光谱[J]. *高校地质学报*, 6(2): 201~204.
- 刘 锋, 张志欣, 李 强, 等. 2012. 新疆可可托海3号伟晶岩脉成岩时代的限定: 来自铪钼矿 Re-Os 定年的证据[J]. *矿床地质*, 31(5): 1111~1118.
- 彭明生, 郑楚生, 温元凯, 等. 1985. 阿尔泰海蓝宝石的谱学研究[J]. *矿物学报*, 5(2): 140~146.
- 阮青锋, 张良钜, 张昌龙, 等. 2008. 绿柱石的成因与特征的研究[J]. *矿产与地质*, 22(3): 265~269.
- 王登红, 陈毓川, 邹天人, 等. 2000. 新疆阿尔泰阿祖拜稀有金属-宝石矿床的成矿时代——燕山期稀有金属成矿的新证据[J]. *地质论评*, 46(3): 307~311.
- 王淑珍, 王元龙, 廖有炜, 等. 1994. 阿尔泰花岗伟晶岩中的金绿宝石[J]. *新疆工学院学报*, 15(2): 142~149.
- 朱金初, 吴长年, 刘昌实, 等. 2000. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉岩浆-热液演化和成因[J]. *高校地质学报*, 6(1): 40~52.
- 邹天人. 1996. 中国海蓝宝石的成色机理及控制因素[J]. *矿床地质*, 15(增刊): 55~61.

#### 附中文参考文献

陈剑锋. 2011. 阿尔泰3号脉缓倾斜部分的形成和演化[D]. 贵阳: