

文章编号:0258-7106(2004)04-0411-11

# 新疆阿尔泰 3 号伟晶岩脉中的铯沸石:内部成分不均一性与岩浆-热液作用\*

胡 欢 王汝成 张爱铨 徐士进

(南京大学地球科学系,江苏 南京 210093)

**摘 要** 通过运用 X 射线粉晶衍射技术和电子探针定量分析、面分析技术,对阿尔泰 3 号伟晶岩脉各结构带中共生矿物及其化学成分进行了研究。在不同结构带中,铯沸石有着不同的共生矿物和化学成分。在叶钠长石-锂辉石带形成早期,铯沸石常和电气石、富铯的锂云母共生,为成分均一的原生铯沸石,其 CRK 和 Si/Al 平均值分别为 74.5 和 2.34。到叶钠长石-锂辉石带形成晚期及石英-锂辉石带形成阶段,原生铯沸石发生再平衡作用,在相对封闭体系中经历出溶作用后,形成团块状的富 Na 铯沸石和富 Cs 的铯沸石脉,并与富铯的锂云母共生。到白云母-薄片钠长石带阶段,在热液作用下,原生铯沸石被次生铯沸石所交代。该次生端员铯沸石的 CRK 和 Si/Al 平均值分别为 93.4 和 2.05,它的出现表明岩浆演化从岩浆-热液阶段进入热液阶段。总之,铯沸石作为原始伟晶岩熔体最晚期的产物,记录了 3 号伟晶岩脉原始岩浆中碱金属经过了极度分异作用。

**关键词** 地质学 铯沸石 伟晶岩 岩浆-热液作用 阿尔泰 新疆

**中图分类号**: P581; P595

**文献标识码**: A

自然界中铯矿物数量很少,主要有铯沸石、富铯的锰星叶石、南平石、氟硼钾石等,其中铯沸石是分布最广的铯矿物。铯沸石中 Cs<sub>2</sub>O 含量高达 45%,它不仅是 Cs 最重要的工业来源,而且其合成相可作为核废料中放射性元素 Cs 的载体相。因此对天然铯沸石的矿物学性质、形成条件和蚀变作用的研究具有重要意义。

铯沸石(Pollucite,简称为 Poll)的理想成分为 CsAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>·nH<sub>2</sub>O,属于等轴晶系,空间群为 Ia3d, a ≈ 13.7 × 10<sup>-10</sup> m, Z = 16。铯沸石为白色-粉色,玻璃-油脂光泽。在化学成分上,铯沸石与方沸石 NaAlSi<sub>2</sub>O<sub>6</sub>·H<sub>2</sub>O(Analcime,简称为 Anl)构成类质同像系列,表现为 Cs<sup>+</sup> ↔ Na<sup>+</sup> + H<sub>2</sub>O 之间的相互取代关系(当 Cs 与 Na 发生离子交换时,由于 Cs 离子半径较大,未占据 Na 离子的位置,而是占据 H<sub>2</sub>O 分子的位置,从而导致失去相等数目的 H<sub>2</sub>O 分子)。根据铯沸石的结构模式和电价平衡原则,可得出铯沸石的通式为 Na<sub>x</sub>Cs<sub>y</sub>Al<sub>x+y</sub>Si<sub>3-x-y</sub>O<sub>6</sub>·xH<sub>2</sub>O,其中 Cs + H<sub>2</sub>O = 1, Na < H<sub>2</sub>O, Cs + Na < 1, Al < 1 和 Si/Al > 2

(Černý, 1974)。

天然铯沸石常见于高度分异的伟晶岩脉中心部位,它的出现表明岩浆经历了高度的结晶分异作用(Černý, 1974; Černý et al., 1978; Teertstra et al., 1992; 1995; 1997; 王贤觉等, 1981; 杨岳清等, 1995)。在天然原生铯沸石成分中,普遍含有方沸石(Anl)固溶体,Anl 的摩尔分数在 15% ~ 30% 之间,其 Si/Al 比值为 2.1 ~ 2.6。在少数接近理论成分的铯沸石端员中,其 Si/Al 比值接近 2.0。

到目前为止,世界上共有 90 多个地区报道过有铯沸石产出。在中国,铯沸石的产地主要为新疆阿尔泰伟晶岩、福建南平伟晶岩(杨岳清等, 1995)和江西宜春雅山黄玉花岗岩(胡欢等, 2003)等。在前人的文献中多次提到新疆阿尔泰伟晶岩中的铯沸石,其中,王贤觉等(1981)从传统矿物学角度对其产状和矿物学性质进行了系统的研究,但对铯沸石成分的不均一性及变化与岩浆-热液作用的关系未能深入探讨,本文主要从阿尔泰伟晶岩 3 号脉中铯沸石的微区特征和化学成分入手,研究铯沸石从岩浆-热

\* 本文受国家自然科学基金(批准号:40025209 和 40221301)和教育部博士点基金(资助号:2000028431)资助  
第一作者简介 胡 欢,女,1972 年生,讲师,主要从事矿物学研究。  
收稿日期 2003-07-28;改回日期 2003-10-31。张绮玲编辑。

液阶段进入热液作用阶段的演化过程。

## 1 阿尔泰3号伟晶岩脉概况

新疆阿尔泰可可托海是中国重要的稀有元素花岗伟晶岩区,其中的3号脉更是闻名于世。3号脉由上部椭圆形的岩钟体和下部缓倾斜的板状体组成。其中岩钟体自边部向中心依次划分出9个矿物共生结构带:(一)文象、准文象伟晶岩带;(二)糖粒状钠长石带;(三)块体微斜长石带;(四)白云母-石英带;(五)叶钠长石-锂辉石带;(六)石英-锂辉石带;(七)白云母-薄片钠长石带;(八)薄片钠长石-锂云母带;(九)核部块体微斜长石和石英核带(图1)。

根据前人对3号伟晶岩脉的报道,铯沸石主要位于脉体的核心部位,从五带到九带均有产出,但主要富集于七带和八带(王贤觉等,1981;吴长年,1994;朱金初等,2002)。本次研究的铯沸石主要产于五带、六带和七带,而八带和九带的样品中未见铯沸石,可能是样品的局限性造成的。

## 2 样品和分析方法

本次研究的样品主要由王贤觉研究员(中国科

学院广州地球化学研究所)、张辉博士(中国科学院贵阳地球化学研究所)和朱金初教授(南京大学)提供。含铯沸石的样品主要为:3-3(五带),BR-1(五带),kp03-423(六带)和1-2(七带)。

在研究过程中,对六带和七带样品中的铯沸石进行了X射线粉晶衍射分析,而五带的铯沸石,由于其颗粒较小,未进行粉晶衍射分析。另外,运用电子探针对各样品中铯沸石的产状、共生组合及化学成分进行了详细的研究和分析,还结合电子探针面分析技术,对同一铯沸石颗粒中Cs、Na元素的含量变化进行了研究。

X射线粉晶衍射在南京大学地球科学系的日本理学IIIA型X射线粉晶衍射仪上测试,工作条件为:Cu靶,电压35kV,电流20mA,步幅 $0.01^\circ$ /步。使用的电子探针型号为JEOL JXA8800,工作条件是:电压15kV,电流20nA,主要标样为加拿大Manitoba地区Tanco伟晶岩中的铯沸石(Na K $\alpha$ , Si K $\alpha$ , Al K $\alpha$ , Cs L $\alpha$ )。

在对化学成分分析结果进行处理的过程中,以每单位晶胞6个氧原子计算化学式,铯沸石百分比指数 $CRK(\%) = 100 \times (Cs + K + Rb) / \sum(Cs + Na + K + Rb + Ca + Mg)$ (Černý,1974)。

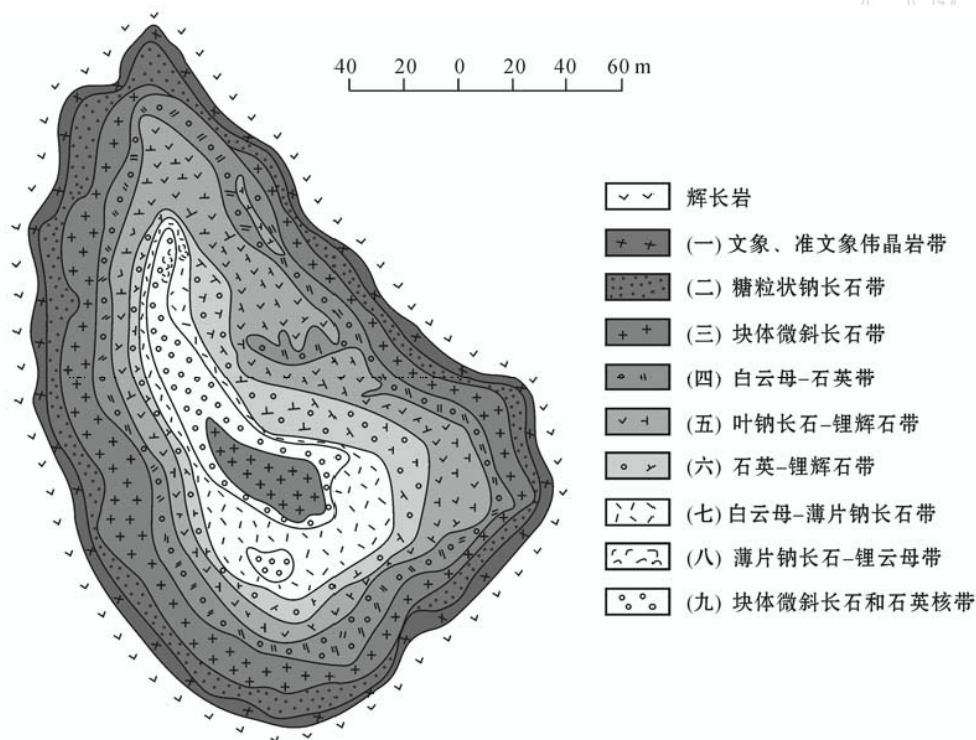


图1 3号伟晶岩脉的平面地质示意图(+1186中段)(引自王贤觉等,1981)

Fig.1 Horizontal zonal structure of No.3 pegmatite vein at +1186 level, Altay, Xinjiang(after Wang et al.,1981)

表 1 铯沸石的 X 射线粉晶衍射数据

Table 1 X ray powder diffraction data of pollucites

hkl	六带铯沸石		七带铯沸石		阿尔泰铯沸石*		JCPDS-25-194**	
	I	d/10 <sup>-10</sup> m	I	d/10 <sup>-10</sup> m	I	d/10 <sup>-10</sup> m	I	d/10 <sup>-10</sup> m
211	8	5.594	3	5.583	1	5.6	2	5.56
220	7	4.844	2	4.841	1	4.9	2	4.83
321	39	3.660	33	3.655	6	3.65	30	3.65
400	99	3.423	100	3.419	10	3.42	100	3.42
420	7	3.059	3	3.057			3	3.06
332	34	2.917	48	2.916	9	2.92	45	2.913
422			1	2.793			1	2.791
510,431	6	2.683	4	2.684	5	2.67	7	2.682
521	8	2.499	6	2.497			4	2.497
440	15	2.419	24	2.418	8	2.42	24	2.416
532,611	11	2.220	14	2.219	6	2.22	17	2.218
631	6	2.018	5	2.017	2	2.02	6	2.015
444	4	1.977	3	1.974	1	1.97	4	1.973
640			2	1.899	1	1.91	3	1.897
633	8	1.862	14	1.861	5	1.85	18	1.860
651			15	1.737	6	1.735	22	1.736
800	5	1.717	5	1.710	2	1.710	10	1.709
811	1	1.689	1	1.684	1	1.685	3	1.683
644			1	1.658			2	1.658
653			2	1.635	1	1.635	3	1.634
750	2	1.598	2	1.591	1	1.595	3	1.589
752			2	1.549	2	1.550	4	1.548
840	5	1.535	4	1.530	3	1.530	7	1.529
761,655,921			2	1.476	1	1.475		
763,932	5	1.416	4	1.411	3	1.410		
10.1.1,722	5	1.359	5	1.355	4	1.352		

\* 据王贤觉等,1981; \*\* 据 JCPDS 粉晶数据库。

### 3 X 射线粉晶衍射分析

铯沸石的 X 射线粉晶衍射分析结果见表 1。它们与 JCPDS 粉晶数据库中铯沸石的标准数据、王贤觉等(1981)的粉晶分析数据相比较,基本一致。在对铯沸石的 X 射线粉晶衍射分析结果指标化后,计算了相应的 a 值。六带铯沸石的晶胞参数 a = 13.691 × 10<sup>-10</sup> m,七带铯沸石的 a = 13.676 × 10<sup>-10</sup> m,均位于自然界铯沸石的 a 值范围(13.64 ~ 13.71) × 10<sup>-10</sup> m 之间(Cerný,1974)。

### 4 铯沸石的产状、共生矿物和成分

#### 4.1 五带铯沸石

在该带获取的样品中,主要组成矿物为淡绿色的叶钠长石、电气石等。铯沸石均包裹于电气石柱状晶体的核部。由于铯沸石颗粒较小,肉眼不可见,因此主要通过电子探针背散射图像来观察(图2)。

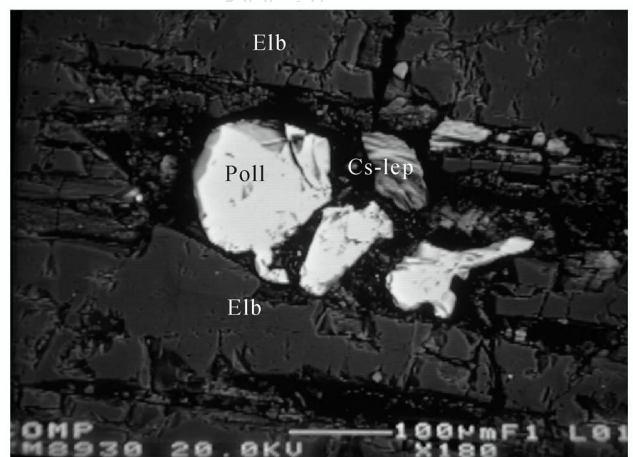


图 2 3 号伟晶岩脉五带样品 3-3 中铯沸石的背散射图像  
Poll:原生铯沸石;Cs-lep:富铯的锂云母;Elb:锂电气石  
Fig.2 Back-scattered electron images of pollucite in Sample 3-3 from the fifth zone of No. 3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang  
Poll:Primary pollucite;Cs-lep:Cs-enriched lepidolite;Elb:Elbaite

其中样品 3-3 的电气石柱状晶体,其核部呈玫瑰色,边缘部位为宽 1 mm 左右的绿色电气石,而样品 BR-

1 不同于 3-3,柱状晶体边缘虽仍为绿色电气石,而核部却为白云母和少量玫瑰色电气石所占据。

样品 3-3 中铯沸石大小为几十至几百微米,周围共生矿物为锂云母和富铯的锂云母(图 2)。该样品中铯沸石成分均匀,Cs<sub>2</sub>O 含量变化范围窄,介于 31.99%~34.71%之间,CRK 和 Si/Al 比值分别为 70.6~78.5 和 2.26~2.43。CRK 和 Si/Al 平均值分别为 74.5 和 2.34,属于成分均一的原生铯沸石(表 2 和图 3a)。

样品 BR-1 中铯沸石颗粒相对较大,一般为几百微米,最大可达 1.6 mm。在电子探针背散射图像中,铯沸石为许多小颗粒构成的集合体,细小颗粒之间充填着电气石和白云母细脉。单个铯沸石颗粒边缘成分不均一,电子探针背散射图像呈现亮度上的差异。经电子探针成分和面分析,与中心成分均一的铯沸石相比较,可知暗色区域为相对富 Na 的铯沸石相,而相对亮的区域为相对富 Cs 的铯沸石相(图 4a,b,c)。在单个铯沸石颗粒中,以成分均匀的铯沸石为主,还有富 Na 和富 Cs 的团块,大小多为几十微米,这 3 个相之间界限十分明显。成分均匀的铯沸石 CRK 和 Si/Al 比值分别为 75.9~78.7 和 2.19~2.40。富 Na 铯沸石的 CRK 和 Si/Al 比值分别为 73.4~74.8 和 2.20~2.38,富 Cs 铯沸石的 CRK 和 Si/Al 比值为 81.5~85.8 和 2.13~2.32。可见,富

表 2 五带样品 3-3 中铯沸石的电子探针成分 [w(B)/%]  
Table 2 Electron microprobe compositions of pollucite in Sample 3-3 from the fifth zone of No. 3 pegmatite vein [w(B)/%]

成分	电子探针点号				平均值 (n=20)
	1	5	11	18	
SiO <sub>2</sub>	44.85	45.25	44.67	46.12	45.17
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.04	15.98	16.52	16.68	16.40
FeO	0.04	0.02	0.04	0.06	0.04
MnO	0.21	bd	bd	0.17	0.14
MgO	0.02	0.28	bd	0.04	0.07
Na <sub>2</sub> O	2.22	1.88	2.43	2.84	2.48
K <sub>2</sub> O	0.02	bd	0.00	bd	0.01
Rb <sub>2</sub> O	0.22	0.13	0.04	0.12	0.09
Cs <sub>2</sub> O	34.66	34.71	33.99	31.96	33.60
CaO	0.00	0.02	bd	0.01	0.01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03	0.08	0.07	0.06	0.04
总和	98.31	98.35	97.76	98.06	98.05
Si/Al*	2.37	2.40	2.29	2.35	2.34
CRK	77.5	78.5	75.5	71.1	74.5

注:FeO 为全铁;bd 表示低于电子探针检测限;n 为分析点数,1、5、11、18 为所分析 20 个点中有代表性的点;CRK (%) = (Cs + K + Rb) × 100 / Σ(Cs + Na + K + Rb + Ca + Mg);\* 单位为 1。

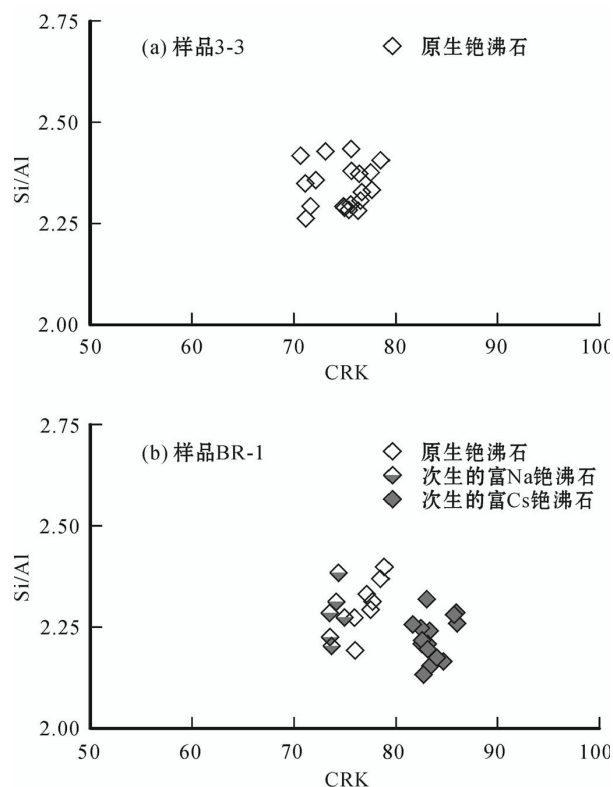


图 3 3 号伟晶岩脉五带样品中铯沸石的 CRK-Si/Al 变化  
Fig. 3 CRK versus Si/Al ratio of pollucite from the fifth zone of No. 3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang

Na 铯沸石和富 Cs 铯沸石的 Si/Al 比值基本不变。这 3 个铯沸石相的 CRK-Si/Al 关系见图 3b,代表性成分和平均成分列于表 3。

#### 4.2 六带铯沸石

六带样品 kp03-423 中铯沸石颗粒在大小、形态、成分、共生矿物等特征上明显不同于五带。手标本上,铯沸石为白色,略带粉色调,形状为不规则的团块状,断面呈油脂光泽。与其共生的矿物有无色透明的石英、肉红色板状锂辉石、深玫瑰红色柱状电气石、黑色板状磷酸盐矿物及紫色细脉状锂云母。

通过电子探针背散射图像观察,在均一的铯沸石相中常见大小为几十至 100 μm 的不规则暗色团块(图 5a),而且铯沸石颗粒总被宽约 100 μm 的富铯锂云母所包围,两者的边界呈锯齿状,并可见残余的铯沸石相(图 5b)。成分分析表明,铯沸石均一相的 Cs 含量为 34.64%~37.48%,CRK 和 Si/Al 比值分别为 79.2~86.5 和 2.19~2.39,属于原生铯沸石。颗粒内部暗色团块的铯含量均低于原生铯沸石,为 33.08%~34.6%,CRK 和 Si/Al 比值分别为 76.6~

表 3 3 号伟晶岩脉五带样品 BR-1 中铯沸石的电子探针成分 [w(B)/ %]

**Table 3 Electron microprobe compositions of pollucite in Sample BR-1 from the fifth zone of No. 3 pegmatite vein [w(B)/ %]**

成分	原生铯沸石				次生富 Na 铯沸石				次生富 Cs 铯沸石			
	16	25	26	平均(n=7)	2	8	34	平均(n=6)	23	27	29	平均(n=15)
SiO <sub>2</sub>	44.97	45.34	45.05	45.44	45.94	44.94	46.61	45.29	42.33	43.86	43.02	43.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.10	17.54	15.94	16.70	17.06	16.77	16.59	16.85	16.51	16.31	16.45	16.51
FeO	bd	0.04	bd	0.04	bd	bd	bd	bd	bd	bd	0.01	0.05
MnO	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	0.08	bd	0.19	0.26	0.21
MgO	bd	bd	bd	0.02	0.01	0.02	bd	0.02	0.04	bd	0.04	0.02
Na <sub>2</sub> O	2.14	2.41	2.07	2.25	2.58	2.46	2.50	2.54	1.55	1.38	1.73	1.63
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.00	0.01	0.03	0.03	0.01	0.02	0.00	0.00	bd	0.01
Rb <sub>2</sub> O	0.12	0.04	0.11	0.08	0.03	0.09	0.03	0.04	0.08	0.13	0.18	0.11
Cs <sub>2</sub> O	34.93	34.33	34.81	34.74	32.41	33.27	32.71	32.85	37.59	36.83	37.08	37.21
CaO	bd	bd	0.03	0.02	0.02	0.01	bd	0.02	0.03	bd	bd	0.02
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.26	0.19	0.20	0.20	0.19	0.28	0.23	0.21	0.06	0.05	0.08	0.06
总量	98.53	99.90	98.21	99.50	98.27	97.87	98.68	97.92	98.19	98.75	98.85	99.08
Si/ Al*	2.37	2.19	2.40	2.31	2.28	2.27	2.38	2.28	2.18	2.28	2.22	2.22
CRK	78.3	75.9	78.7	77.1	73.4	74.8	74.2	73.8	83.8	85.5	82.4	83.2

注：同表 2。

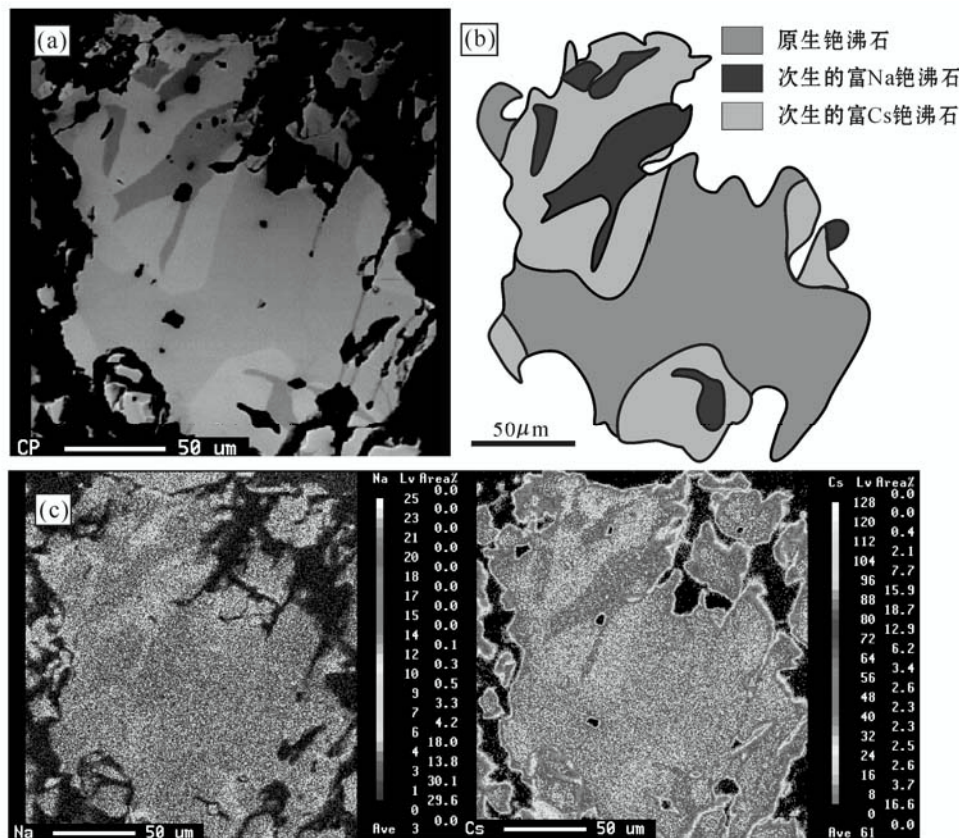


图 4 3 号伟晶岩脉五带样品 BR-1 中铯沸石的面分析图像和背散射图像(单个成分相的亮度和 Cs 含量呈正比)

a. 背散射成分像 ; b. 背散射成分像示意图 ; c. 元素 Na 和 Cs 的面分析图

Fig.4 Plane analysis and backscattered electron images of pollucite in Sample BR-1 from the fifth zone of No. 3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang (the brightness of compositional images increases with the Cs concentration)

a. Backscattered electron images ; b. Outline of backscattered electron images ; c. Plane analysis images of elements Na and Cs

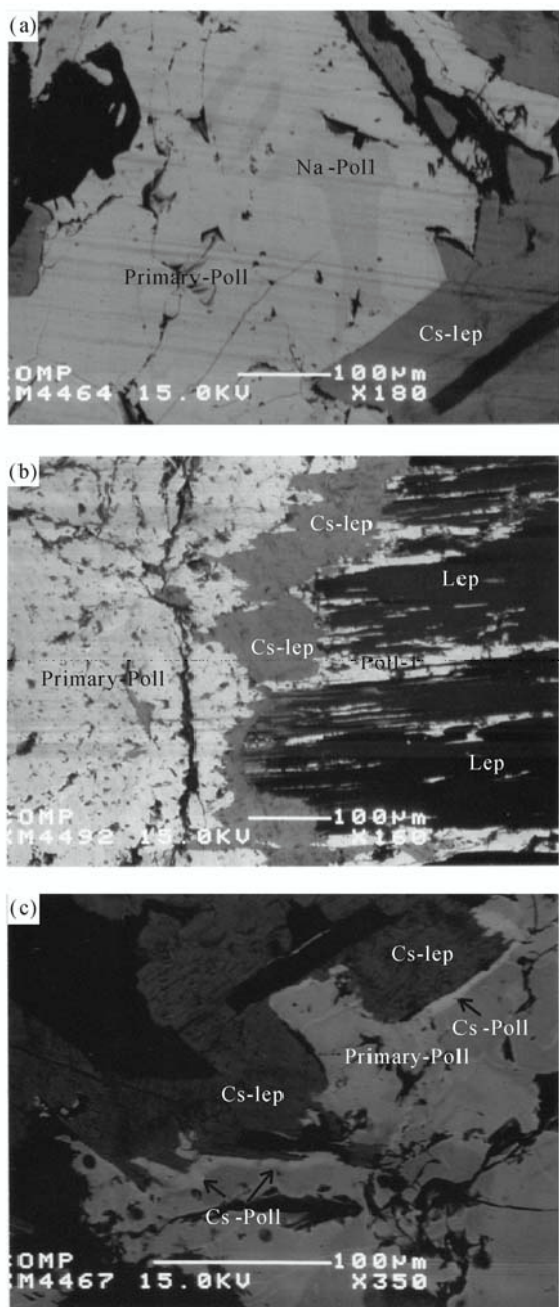


图5 3号伟晶岩脉六带样品中铯沸石的背散射图像  
a. 原生铯沸石中包裹的富铯锂云母和次生富 Na 铯沸石;b. 被富铯锂云母围绕的原生铯沸石;c. 原生铯沸石和富铯锂云母共生处的次生富 Cs 铯沸石. Primary-Poll:原生铯沸石;Na-Poll:次生富 Na 铯沸石;Cs-Poll:次生富 Cs 铯沸石;Cs-lep:富铯锂云母;Lep:锂云母

Fig.5 Backscattered electron image of pollucite in the sixth zone of No. 3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang

a. Cs-enriched lepidolite and Na-rich pollucite wrapped in primary pollucite;b. Primary pollucite encircled by Cs-enriched lepidolite;c. Cs-rich pollucite between primary pollucite and Cs-enriched lepidolite; Primary-Poll:Primary pollucite;Na-Poll:Na-rich pollucite;Cs-Poll:Cs-rich pollucite;Cs-lep:Cs-enriched lepidolite;Lep:Lepidolite

83.1 和 2.27 ~ 2.49,为相对富 Na 的铯沸石相。而富铯锂云母中 Cs 的含量高达 27.68%,基本不含 K,相当于锂云母的铯端员成分。另外,在某些原生铯沸石和富铯锂云母的边界处,常出现一亮的条带(图 5c),经分析其成分仍为铯沸石,但铯含量  $w_{Cs}$  最高可达 40.64%,CRK 为 92.3,接近铯沸石的理论成分,为次生的富 Cs 的铯沸石相。富 Cs 的铯沸石相 Cs 平均含量为 39.67%,CRK 和 Si/Al 平均值为 90.2 和 2.14(图 6 和表 4)。

### 4.3 七带铯沸石

该带样品 1-2 为白色块状铯沸石,大小为 4 cm 左右,中间有少量绿色电气石细脉。

在电子探针背散射图像中,铯沸石中间常包裹有钠长石、电气石、锂云母和富铯的锂云母及白云母细脉等矿物。铯沸石大部分成分均匀,铯含量  $w_{Cs}$  为 33.32% ~ 35.22%,CRK 和 Si/Al 比值分别为 76.0 ~ 80.9 和 2.21 ~ 2.38,相当于原生铯沸石。在成分均匀的铯沸石和钠长石的边界处经常有一宽约几十微米、较亮的带(图 7),放大观察和成分分析表明该带与原生铯沸石、长石之间没有平直清晰的边界,带中还常有一些暗色区域,具有显著的交代特征。带的主要成分为铯沸石,其中较亮的部分铯含量  $w_{Cs}$  为 40.26% ~ 41.97%,CRK 和 Si/Al 比值分别为 91.2 ~ 96.4 和 2.00 ~ 2.15,相当于铯沸石端员组分,而带中暗色区域为原生铯沸石的残余和相对富 Na 的铯沸石,后者的 Si/Al 比值和原生铯沸石的基本一致,为 2.23 ~ 2.39,但 CRK 略低,为 73.7 ~ 75.0(图 8)。

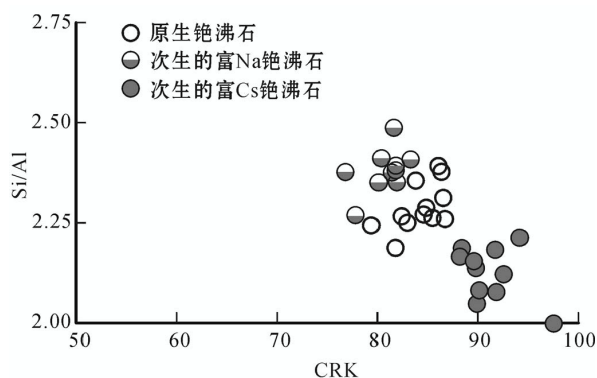


图6 3号伟晶岩脉六带样品中铯沸石的 CRK-Si/Al 变化

Fig.6 CRK versus Si/Al ratio of pollucite from the sixth zone of No.3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang

表 4 3 号伟晶岩脉六带样品 k<sub>p</sub>03-423 中铯沸石的电子探针成分 [w(B)/ %]

Table 4 Electron microprobe compositions of pollucite in Sample k<sub>p</sub>03-423 from the sixth zone of No. 3 pegmatite vein [w(B)/ %]

成分	原生铯沸石					次生富 Na 铯沸石				次生富 Cs 铯沸石			
	2	7	19	33	平均(n=12)	4	11	30	平均(n=10)	6	15	21	平均(n=10)
SiO <sub>2</sub>	44.08	44.16	43.93	43.92	44.21	45.04	46.17	45.63	45.71	42.41	41.55	40.94	41.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.17	16.65	15.68	15.58	16.39	16.09	16.25	16.26	16.30	16.45	16.61	16.68	16.51
FeO	bd	bd	0.03	0.00	0.04	0.05	0.02	bd	0.03	0.05	bd	0.04	0.05
MnO	bd	bd	bd	bd	0.15	bd	0.03	bd	0.11	bd	bd	0.12	0.18
MgO	bd	0.01	0.05	bd	0.02	bd	0.02	bd	0.02	bd	bd	0.02	0.02
Na <sub>2</sub> O	1.25	1.59	1.28	1.34	1.52	1.69	1.87	1.72	1.81	1.15	0.74	0.91	0.91
K <sub>2</sub> O	0.02	bd	bd	0.01	0.02	bd	0.03	0.01	0.02	0.02	bd	0.02	0.03
Rb <sub>2</sub> O	0.11	0.08	bd	0.07	0.10	0.18	0.12	0.09	0.13	0.12	0.11	bd	0.06
Cs <sub>2</sub> O	35.85	34.65	37.24	36.82	36.32	32.91	34.28	34.56	33.85	38.70	40.64	39.84	39.67
CaO	0.00	bd	0.00	bd	0.02	0.00	bd	0.00	0.01	bd	bd	0.12	0.04
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.15	0.13	0.09	0.10	0.22	0.24	0.23	0.23	bd	0.04	0.13	0.04
总和	97.55	97.29	98.34	97.83	98.89	96.18	99.03	98.50	98.22	98.90	99.69	98.82	99.12
Si/Al*	2.31	2.25	2.38	2.39	2.29	2.38	2.41	2.38	2.38	2.19	2.12	2.08	2.14
CRK	86.3	82.8	86.1	85.8	83.9	81.2	80.2	81.6	80.4	88.2	92.3	89.9	90.2

注：同表 2。

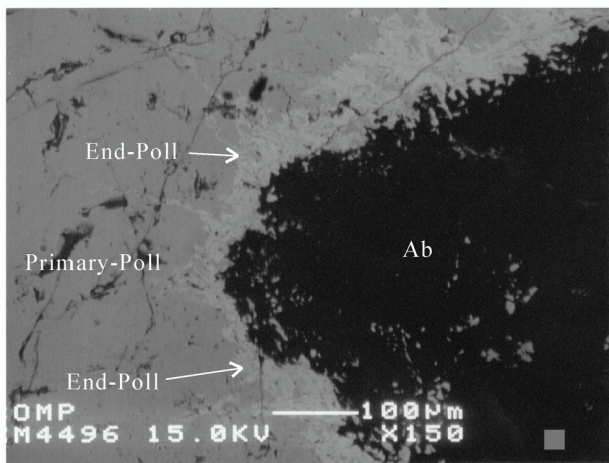


图 7 3 号伟晶岩脉七带样品中原生铯沸石和长石共生边界处的端员铯沸石带

Primary-Poll:原生铯沸石;End-Poll:次生的端员铯沸石;Ab:钠长石  
 Fig.7 End-member pollucite rim between primary pollucite and feldspar in the seventh zone of No.3 pegmatite vein  
 Primary-Poll:Primary pollucite;End-Poll:Secondary end-member pollucite;Ab:Albite

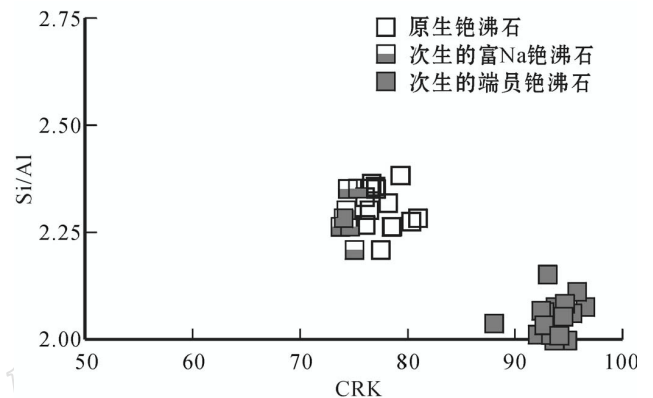


图 8 3 号伟晶岩脉七带样品中铯沸石的 CRK-Si/Al 变化

Fig.8 CRK versus Si/Al ratio of pollucite from the seventh zone of No.3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang

## 5 讨论

### 5.1 铯沸石内部成分的不均一性

通过对所获取的阿尔泰伟晶岩脉样品的研究,可知铯沸石主要分布于 3 号伟晶岩脉内部,且其共生矿物和成分有着明显的差别。

在五带叶钠长石-锂辉石形成阶段,铯沸石和电气石、锂云母、富铯的锂云母共生关系密切。早期铯

沸石的成分均一,未发生蚀变,属于原生铯沸石。随着岩浆的演化,到该阶段晚期,铯沸石开始发生热液演化,在颗粒的边部出现次生的富 Na 和富 Cs 铯沸石相。到石英-锂辉石带,铯沸石的共生矿物和成分变得更复杂,不仅在其内部出现次生富 Na 的铯沸石相,而且边部常被富铯锂云母围绕。另一方面,在原生铯沸石和某些富铯锂云母的边界出现次生富 Cs 的铯沸石相。在该阶段,铯沸石和锂云母、富铯锂云母密切共生。到七带白云母-薄片钠长石带,在原生铯沸石和长石的边界处出现次生的端员铯沸石带。从端员铯沸石的产状可知,它是热液交代的产物。

在化学成分上,五带至七带的原生铯沸石、次生的富 Na 和富 Cs 铯沸石相均有变化。对于原生铯沸

石而言,各阶段铯沸石的 Si/Al 比值基本不变,CRK 值从五带到六带逐渐增加,而七带原生铯沸石的 CRK 值则呈下降趋势。另外,次生的富 Na 铯沸石相,其 CRK 和 Si/Al 比值在各带的变化趋势基本一致,从五带到六带逐渐增加,到七带则降低,而次生的富 Cs 铯沸石相,CRK 则呈显著增加趋势,Si/Al 比值降低,直到出现次生的铯沸石端员相(图 9),表明从五带到七带,铯沸石的热液演化特征趋向显著,而七带中次生端员铯沸石的出现则表明岩浆演化由岩浆-热液阶段进入热液阶段。

## 5.2 原生铯沸石的结晶作用

通过对 3 号伟晶岩脉中铯沸石的成分、共生组合等方面的研究,可知该伟晶岩中的原生铯沸石和世界其他地区伟晶岩中的原生铯沸石相一致,均位于伟晶岩脉的中心部位,与其共生的矿物也主要为晚期的钠长石、锂云母、锂辉石、电气石等。各带原生铯沸石成分均一,CRK 总的范围为 71.1 ~ 86.5,集中于  $\text{Poll}_{70}\text{Anl}_{30}$ — $\text{Poll}_{88}\text{Anl}_{12}$ 。这些均表明原生铯沸石是原始伟晶岩结晶分异作用最晚期的产物,形成于残余熔体和热液共存的体系,它的出现说明伟晶岩经历了极端分异作用(Cerný et al., 1985)。

从原生铯沸石出现于伟晶岩的中心部位,可知其结晶温度和岩体中心的近固相温度相接近,另一方面,花岗质熔体实验也证实原生铯沸石结晶温度约为 600 ~ 450 °C(Cerný et al., 1985),由于天然熔体

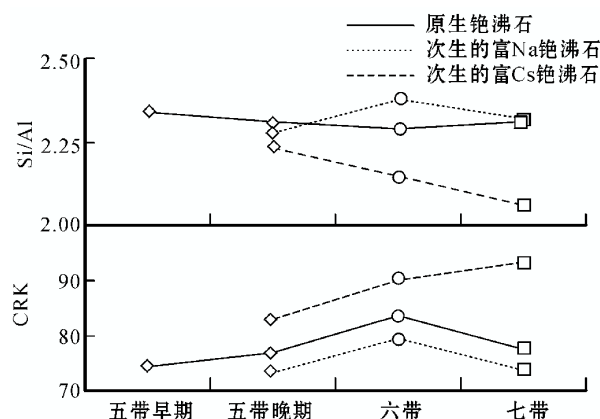


图 9 3 号伟晶岩脉中五带至七带铯沸石成分 CRK 和 Si/Al 变化趋势示意图(根据各带铯沸石的平均值)

Fig. 9 CRK and Si/Al ratio of pollucite from the fifth to the seventh zone of No. 3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang (based on the average value of pollucite from various zones)

富含 B、F、Li 等挥发组分,铯沸石的结晶温度常低于这个范围,在 400 ~ 550 °C 之间。在原生铯沸石的结晶过程中,由于受钠长石和石英的影响,其成分中经常有方沸石固溶体。Sebastian 等(1990)提出,当温度高于 450 °C(150 MPa)时,铯沸石中的方沸石摩尔分数不超过 20%,成分变化范围在  $\text{Poll}_{80}\text{Anl}_{20}$  附近。最近的实验证据也表明,在原生铯沸石的结晶温度范围内,其 Si/Al 比值范围在 2.3 ~ 2.4 之间(Lagache, 1995)。

表 5 3 号伟晶岩脉七带样品 1-2 中铯沸石的电子探针成分 [w(B)/%]

Table 5 Electron microprobe compositions of pollucite in Sample 1-2 from the seventh zone of No. 3 pegmatite vein [w(B)/%]

成分	原生铯沸石				次生富 Na 铯沸石				次生端员铯沸石			
	5	41	49	平均(14)	38	39	40	平均(7)	28	29	42	平均(21)
SiO <sub>2</sub>	46.46	44.22	45.07	45.13	46.76	45.79	47.31	46.24	40.37	40.67	40.14	40.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17.11	16.54	16.80	16.59	17.02	17.04	16.77	16.90	17.01	16.79	17.09	16.71
FeO	bd	0.06	bd	0.07	0.01	bd	bd	0.03	0.05	0.16	bd	0.04
MnO	0.14	bd	bd	0.12	bd	bd	bd	0.13	bd	bd	bd	0.05
MgO	bd	0.03	bd	0.02	bd	bd	bd	0.03	bd	bd	bd	0.01
Na <sub>2</sub> O	2.26	2.35	1.91	2.16	2.48	2.45	2.52	2.46	0.61	0.54	0.63	0.62
K <sub>2</sub> O	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	bd	0.01	0.01	0.05	bd	0.01	0.02
Rb <sub>2</sub> O	0.02	0.07	0.10	0.05	0.12	0.01	0.04	0.06	0.03	0.09	0.04	0.07
Cs <sub>2</sub> O	33.32	34.16	35.22	34.34	32.54	33.61	32.02	32.63	40.26	41.62	41.97	41.20
CaO	0.03	bd	0.01	0.02	0.01	0.03	bd	0.02	0.07	0.02	0.01	0.03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	0.13	0.07	0.11	0.20	0.21	0.24	0.20	0.05	0.02	0.06	0.04
总和	99.56	97.58	99.19	98.62	99.16	99.14	98.91	98.71	98.50	99.91	99.95	99.18
Si/Al*	2.30	2.27	2.28	2.31	2.33	2.28	2.39	2.32	2.01	2.06	1.99	2.05
CRK	76.4	76.0	80.3	77.6	74.4	75.0	73.7	74.0	93.2	94.3	93.5	93.4

注:同表 2。



对于阿尔泰伟晶岩中的原生铯沸石,其成分中含有 13.5%~28.9%的方沸石固溶体, Si/Al 比值为 2.2~2.4, 偏离铯沸石的理论值 2.0, 说明原生铯沸石在结晶过程中受钠长石和石英缓冲作用的影响, 使其化学成分偏离理论值, 为非平衡结晶条件下的产物, 因此其热力学稳定程度相对较低, 只有近理论成分的端员铯沸石在热力学上最稳定( Teertstra et al., 1995)。因此, 在岩浆演化过程中, 当周围的条件发生变化时, 原生铯沸石的成分会发生变化, 向更稳定的铯沸石端员演化。

### 5.3 铯沸石的再平衡和热液蚀变作用

早已认识到铯沸石可被云母、长石和粘土矿物等交代蚀变, 但对其富 Na 和富 Cs 铯沸石相的再平衡作用是近几年才认识到的。根据铯沸石的 Na/Cs 和 Si/Al 比值, Teertstra 等(1995;1997) 在对世界许多地区铯沸石的研究中, 发现铯沸石都有程度不同的成分不均一性, 由此指出铯沸石在低温时经历了再平衡作用, 并且提出两种出溶机制——富 Cs、Al + 富 Na、Si 铯沸石相的出溶作用; 在 CRK 比率恒定下, 石英 + 阳离子、富 Al 铯沸石相的出溶作用, 来解释铯沸石局部的再平衡作用。Teertstra 等(1995; 1997) 总结了成分均一的原生铯沸石自结晶→热液蚀变→完全分解过程中的 6 个主要阶段(图 10):

(1) 随着温度降低, 先演化成分别富 Na、Si + 富 Cs、Al 的团块状铯沸石相(大小 < 500 μm), 再逐渐演化成与石英紧密共生的、且仅富 Cs、Al 的团块状铯沸石相(常贯穿有粗粒石英、锂云母、钾长石或钠

长石的细脉);

(2) 富 Cs、Al 的团块状铯沸石演化成宽的、沿裂隙充填且不含石英的铯沸石细脉;

(3) 在经历出溶作用后, 演化成富 Cs、Al 细脉(±石英), 其边缘为明显富 Na、Si 的铯沸石晕;

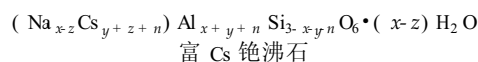
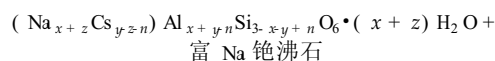
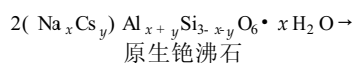
(4) 再逐渐演化成富石英的 Cs、Al 细脉, 但不再有富 Na、Si 的铯沸石边(与白云母和锂辉石±冰长石细脉共生);

(5) 经过溶解-再沉淀作用, 形成次生端员铯沸石(常与钾长石或富 Rb 长石、钠长石和石英共生);

(6) 经历方沸石化作用后, 形成纯的方沸石(后经淋滤和蚀变作用成粘土矿物)。

与世界其他地区伟晶岩中铯沸石比较, 3 号脉伟晶岩中铯沸石大部分仍属于原生铯沸石, 再平衡作用和热液蚀变作用相对较弱。在 3 号脉伟晶岩中的铯沸石, 本次研究仅见到上述 6 个阶段中的第一、五阶段, 并未观察到第二、三、四阶段中沿裂隙充填的富 Cs、Al 细脉和富 Na、Si 铯沸石晕, 另外, 3 号脉伟晶岩中铯沸石很少和石英共生, 却和富铯锂云母密切共生, 如在铯沸石内部包裹有富铯锂云母, 而且边部具有富铯的锂云母晕。因此本文将阿尔泰伟晶岩中铯沸石的再平衡作用和热液蚀变作用归结为 3 个阶段:

(1) 自原生铯沸石结晶后, 随着温度的不断降低, 开始发生蚀变作用, 形成分别富 Cs、Al 铯沸石和富 Na、Si 的铯沸石相, 其共生矿物为电气石、锂云母、富铯锂云母, 相当于铯沸石再平衡作用的第一阶段, 可表示为:



(2) 随着蚀变作用的进行, 在铯沸石内部出现富 Na 的铯沸石暗色团块, 释放出铯。富铯的热液交代早期的原生铯沸石, 形成富 Cs 的铯沸石相, 同时也交代较早形成的锂云母, 从而在均质铯沸石和锂云母的边界处形成铯锂云母边。

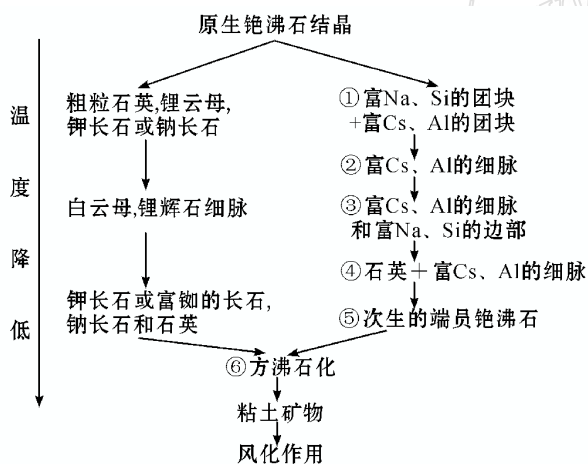
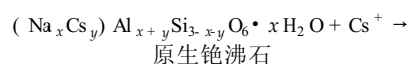
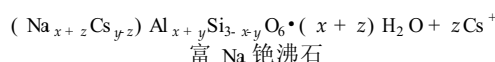
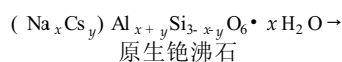


图 10 铯沸石再平衡作用的 6 个阶段及相应蚀变产物 (据 Teertstra et al., 1995;1997)

Fig.10 Six re-equilibration stages and alteration products of pollucite(after Teertstra et al., 1995;1997)



jing University. 132p(in Chinese) .

Yang Y Q, Wang W Y, Ni Y X, et al. 1995. Study on the pollucite in Granitic Pegmatites in Nanping, Fujian Province [ J ]. *Geology of Fujian*, 14(2) :109 ~ 117(in Chinese with English abstract) .

Zhu J C, Wu C N, Liu C S, et al. 2002. 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) .

#### 附中文参考文献

胡 欢, 王汝成, 张爱铖, 等. 2003. 江西雅山黄玉锂云母花岗岩中

铯矿物的电子探针研究 [ J ]. *地球化学*, 32(1) :62 ~ 74 .

王贤觉, 邹天人, 徐建国, 等. 1981. 阿尔泰伟晶岩矿物研究 [ M ]. 北京:科学出版社. 76 ~ 81 .

吴长年. 1994. 新疆可可托海 3 号伟晶岩脉地球化学演化与成矿作用研究 [ D ]. 博士学位. 导师:朱金初. 南京:南京大学地球科学系. 132 页 .

杨岳清, 王文瑛, 倪云祥, 等. 1995. 南平花岗伟晶岩中铯沸石的研究 [ J ]. *福建地质*, 14(2) :109 ~ 117 .

朱金初, 吴常年, 刘昌实, 等. 2002. 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 .

## Compositional Heterogeneity and Magmatic-Hydrothermal Evolution of Pollucite in No.3 Rare Metal Pegmatite Dyke of Altay, Xinjiang

Hu Huan, Wang Rucheng, Zhang Aicheng and Xu Shijin

( Department of Earth Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

#### Abstract

The primary homogeneous pollucite in the No.3 rare metal pegmatite dyke is typically associated with spodumene, elbaite, lepidolite, Cs-enriched lepidolite and albite and has an average composition of  $\text{Na}_{0.189}\text{Cs}_{0.689}\text{K}_{0.001}\text{Rb}_{0.002}\text{Mg}_{0.002}\text{Al}_{0.905}\text{Si}_{2.091}\text{O}_6$ . With Si/Al ratio of 2.19 ~ 2.43 and  $\text{CRK} [ = 100 \times ( \text{K} + \text{Rb} + \text{Cs} ) / \Sigma ( \text{Cs} + \text{Na} + \text{K} + \text{Rb} + \text{Ca} + \text{Mg} ) ]$  between 70.6 and 86.5, the primary homogeneous pollucite has locally evolved into a mosaic of Na-enriched and Cs-enriched domains. The process experienced re-equilibration of primary pollucite, forming a two-phase product at decreasing temperature and in a relatively closed system. During the late hydrothermal alteration stage, pollucite extremely close to the ideal end-member composition occurred with the albite. With an average CRK of 93.4 and Si/Al ratio of 2.05, the end-member pollucite was formed as a replacement product of the primary pollucite under the hydrothermal condition in an open system. The researches on the diversity and complexity of pollucite in granitic pegmatities not only reveal the evolution of late pegmatite from the magmatic-hydrothermal stage to the hydrothermal stage but also open up a greater predictive potential for long-term containment of nuclear wastes in analogous storage phases.

**Key words:** geology, pollucite, pegmatite, magmatic-hydrothermal evolution, Altay, Xinjiang