

四川平武板状绿柱石矿物学特征及板状成因

刘 琰^{1,2}, 邓 军^{1,2}, 蔡克勤², 周 彦³, 王庆飞^{1,2}, 周应华², 高帮飞²,
李德秀⁴, 徐福玉⁴, 朱悦荣⁴

1. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083
2. 中国地质大学 岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083
3. 中国地质大学 珠宝学院, 北京 100083
4. 山东招远市黄金集团有限公司大尹格庄金矿, 山东 招远 265414

LIU Yan^{1,2}, DENG Jun^{1,2}, CAI Ke-qin², ZHOU Yan³, WANG Qing-fei^{1,2}, ZHOU Ying-hua², GAO Bang-fei², LI De-xiu⁴, XU Fu-yu⁴, ZHU Yue-rong⁴

1. State Key Laboratory of Geol Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobng Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
3. Faculty of Gemmology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
4. Dayingezhuang Gold Mine, Shandong Zhaojin Group, Zhaoyuan 265414, China

LIU Yan, DENG Jun, CAI Ke-qin, et al. Mineralogical characteristics of beryl in Pingwu County, Sichuan Province, south west China. Earth Science Frontiers, 2005, 12(2): 324-331

Abstract: The colorless transparent tabular beryl in Pingwu County, Sichuan Province is a rare and special mineral among beryls. The unique tabular configuration and other characteristics of the beryl have drawn wide attention. The geologic setting, wall-rock alteration, accompanying mineral assemblages, crystal morphology and temperature and pressure of formation of the mineral, suggest that the beryl deposit is a shallow-seated hypothermal quartz vein type. Growth zoning on crystal faces are present. Samples of this beryl were tested by X-ray powder diffractometer and cell parameters were calculated. The chemical composition of the mineral was also analyzed by wet chemistry analysis and the formula derived. The Pingwu County beryl is sodic-lithium rich because it contains abundant Li^+ , Na^+ , Rb^+ and Cs^+ . The average content of alkali ($\text{Li}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Rb}_2\text{O} + \text{Cs}_2\text{O}$) is up to 2.412%. Tabular alkali-rich beryl can be found in granites, but tabular alkali-rich beryl in hypothermal deposit is very rare. This paper describes the geologic characteristics of deposits, the mineralogical characteristics of beryl, and the physical and chemical condition of mineralization, and explains the genesis of this tabular beryl.

Key words: beryl; crystal chemistry; genesis; Pingwu, Sichuan Province

摘 要: 在综合该区绿柱石产出背景的基础上, 从围岩蚀变、矿物共生组合、矿物标型形态和绿柱石测温测压等方面确定平武绿柱石矿床是气成高温浅成石英脉型矿床。文中对绿柱石矿物进行了湿法化学分析、X射线粉晶衍射分析、微形貌分析, 研究了该区绿柱石的形态、物性、化学成分及类质同象特征, 确定该区绿柱石为板状晶形的含铯钠-锂绿柱石, 碱金属平均质量分数为 2.412% ($\text{Li}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{Rb}_2\text{O} + \text{Cs}_2\text{O}$)。板状含碱绿柱石一般发育在伟晶岩中, 气成高温热液矿床中产出板状含碱绿柱石极为罕见。在以上工作基础上, 从绿柱石形成的内因和外因两方面探讨了绿柱石的板状成因。

关键词: 绿柱石; 晶体化学; 矿物成因; 四川平武

中图分类号: P578.953 文献标识码: A 文章编号: 1005-2321(2005)02-0324-08

收稿日期: 2004-12-31; 修回日期: 2005-01-10

基金项目: 教育部跨世纪优秀人才培养计划和科学技术研究重点项目 (03178, 01037); 国家自然科学基金项目 (40304007, 40172036)

作者简介: 刘 琰 (1982—), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: lybeautifulberyl@263.net

绿柱石多呈六方柱状产出,板状绿柱石十分少见。四川平武绿柱石呈板状产出,其晶体硕大、晶形完美、透明度高(照片1),并与云母、白钨矿、锡石等共生,具有极高的观赏和宝石学价值,因而备受瞩目。板状绿柱石国内外早有报道,如阿尔泰伟晶岩中出现板状绿柱石,也曾对绿柱石板状晶体成因进行过研究,并且明确指出板状绿柱石与碱金属含量有关^[1,2]。一般认为平武绿柱石矿床是中低温浅成热液矿床、气成热液矿床或其成矿溶液属于气成高温热水溶液^[3~6]。板状晶体被认为是绿柱石晶体中的线缺陷(螺旋位错)、面缺陷(层错、双晶)及点缺陷(空位、包裹体)协同作用的结果或成矿流体中Li浓度以及Si化学形态可能是影响绿柱石形貌的重要因素^[7,8]。但是,前人研究大多采用电子探针进行微区分析,对其板状成因研究主要集中于晶体缺陷和晶体结构探讨,缺乏与板状成因紧密相关的碱金属离子对结构形成和环境影响的探讨。由于前人较少使用化学全分析测试结果进行研究,这在一定程度上制约了对其板状晶形和矿床成因的深入认识,甚至在已发表文献中出现了GB/T 16552-2003《中华人民共和国标准珠宝玉石名称》中并未见到的“透绿宝石”一词。为进行对比研究,本文选用了3件四川平武板状绿柱石样品(Beryl1、Beryl2、Beryl4)和一件新疆阿尔泰海蓝色六方柱状绿柱石样品(Beryl3)进行测试分析。

1 地质产状

四川平武雪宝顶绿柱石-白钨矿脉状矿床位于四川省平武县境内,矿床位于磨子平-纳采倒转复向斜的次级子柏杉穹隆状背斜核部,其大地构造位置属龙门-大巴山台缘褶皱带。在背斜核部的中三叠统地层(钙质砂岩、粉砂质板岩、千枚岩夹薄层灰岩)中侵入有4个出露面积仅0.16~0.35 km²的燕山早期(同位素年龄为164 Ma)花岗岩小岩株^[9]。区域内构造运动频繁。矿脉与侵入碱性花岗岩关系极为密切^[4],矿脉的脉石矿物主要是石英,其次是钾长石、钠长石、白云母、方解石、楣石等,矿石矿物是绿柱石、白钨矿、锡石、磷灰石、电气石、石榴石、锆石、磁铁矿、钛铁矿、方铅矿、黄铁矿、硫砷锑铅。已知矿脉有40多条,长数十m,厚0.5~1.5 m,有的只有十几cm。其走向为NW-SE,倾向为E,倾角77°,部分倾向为SW,倾角40°^[10]。含矿石英脉呈网

脉状,由4种不同产状的石英脉组成,其产状为:第一组280°~55°;第二组190°~40°;第三组70°~77°;第四组235°~40°。其中,第一组为主干脉,长100 m以上,厚0.5~0.3 m,脉间距1~10 m。其他三组为与主干脉联通的次要脉,脉长数m至数十m,厚数十cm,平均延深3.5 m^[4]。其中出现了尚未有图片报道的宝石级白钨矿、电气石(照片2)。有的矿脉发育明显的带状构造。绿柱石、白钨矿、锡石常产于脉壁或晶洞中,呈团块状或晶簇状产出。在时间上,矿化形成于岩浆期后的气成-热液阶段^[3,4,11]。

表1 绿柱石的包裹体特征

Table 1 The inclusion parameters and its comparison with other beryls in Pingwu

包裹体 序号	包裹体 类型	大小 /μm	气液比 / %	CO ₂ 均一 温度/	均一温 度/	盐度 w(NaCl) / %
1	含 CO ₂	24	20	25	341	2.8
2	含 CO ₂	15	30	26	389	2.8
3	含 CO ₂	50	5	17.3	338	0.8
4	H ₂ O-NaCl	18	10	—	266	3.1
5	含 CO ₂	19	6	18.2	343	—
6	含 CO ₂	10	10	18.2	266	2.8

注:由北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室流体包裹体室测试。

2 矿床成因

地质体所经历的地质-地球化学作用过程及其强度、构造应力和流体相是决定矿化发生的重要因素之一^[12]。以往资料认为该区绿柱石矿床为气成热液矿床或气成中高温热液矿床。本研究以绿柱石为主要研究对象来研究该矿床成因。平武绿柱石内气液包裹体大而丰富,内部可见云雾状、羽状气液包裹体,包裹体大小一般为10~50 μm(表1),大者超过150 μm。晶体内部包裹体大部分属于含CO₂的NaCl-H₂O包裹体,室温下多为二相(LCO₂+LH₂O+VLCO₂),少数内部含有板状晶体子晶的三相包裹体。包裹体内部气液体积比为5%~30%,CO₂均一温度为17.3~26 °C,内部可能含有CH₄等杂质气体,致使CO₂均一温度偏低。绿柱石的气-液包裹体均一温度为266~389 °C;形成压力大于4.64~20.6 MPa;盐度范围是w(NaCl)=0.8%~3.1%。其绿柱石脉状矿体以静水压力(98 MPa/km)估算,得到的成矿深度为0.04~0.21 km,属浅成矿床。与平武绿柱石共生的矿物中出现了结晶程度较好的钠长石和钾长石,说明流体组分富碱,与绿

柱石中出现大量碱金属元素的现象一致。

共生矿物中出现了沿 c 轴延伸发育的板柱状钾长石, $m(110)$ 较为发育, 这种板柱状钾长石一般产于高温气成热液^[13], 锡石晶形为四方双锥状和短柱状, 也为高温成因; 高温矿物共生组合(白钨矿、锡石、电气石等), 结合测温测压说明该矿床是高温浅成热液石英脉型矿床。

总之, 平武绿柱石中出现 P_2O_5 、伴生矿物云母、电气石等挥发份物质和富含挥发份的矿物及矿物伴生关系, 表明它是岩浆期后气成中高温热液充填的矿物。与利用⁴⁰Ar/³⁹Ar 法测年结果表明成矿作用或成矿流体沉淀发生在燕山早期(186.902 ± 0.154) Ma^[3], 即矿物结晶形成于岩浆作用(224 Ma) 期后的结论一致。

3 绿柱石的形态、成分、结构及物性

3.1 形态特征和物性

平武绿柱石晶体呈板状, 常见单形有六方双锥面 $s\{11\bar{2}1\}$ 、 $p\{10\bar{1}1\}$, 六方柱 $m\{10\bar{1}0\}$ 、 $a\{11\bar{2}0\}$ 和平行双面 $\{0001\}$, 个别可见复六方双锥。其中平行双面与六方双锥常见, 外观呈板状, 有的样品缺失 $s\{11\bar{2}0\}$ 或 $p\{10\bar{1}1\}$, 呈碟状; 个别样品底面直径与柱高相差无几, 呈短柱状。以往曾对平武板状绿柱石晶体形态进行过图示^[8,14], 但是都未能很好地反映出平武板状绿柱石的形态特征。绿柱石晶体常常沿 c 轴紧密平行连生, 如照片(3), 有时被误认为是接触双晶。前人根据绿柱石结晶习性和形态认为平武绿柱石并不存在着双晶现象, 并画出了较为完整的晶体形貌图(图 1)^[15]。其晶面微形貌较为发育, 主要有螺旋纹(照片 4、5)、位错(照片 6)和生长丘(照片 7、8)。其中 $\{0001\}$ 面生长纹远比其他六方双锥和六方柱面螺旋生长纹发育, 螺旋生长现象较为显著。这种表面螺旋生长纹、位错发育与低饱和度有关。平

武绿柱石的颜色有无色、淡蓝色、淡绿色等, 以无色居多。从表 2 中颜色参数来看, 饱和度较低, 样品坐标基本位于色品图中的无色区域, 与肉眼观察一致。

表 2 四川平武绿柱石颜色参数

Table 2 The parameters of color of beryls in Pingwu				
样号	x	y	d/nm	p_e
Beryl1	0.320 4	0.361 4	550	0.131 5
Beryl2	0.343 4	0.377 0	564	0.193 5
Beryl4	0.324 9	0.354 0	553	0.104 1

注: 由中国地质大学(北京)材料科学与工程学院测试。测试仪器: 德国产“Leiz-MPV-3”型双光速分光光度计; 测试条件: 光源为 100 W 钨卤反光灯, 电压 8.380 V, 电流 0.83 A; 波长扫描范围: 400 ~ 700 nm。

平武绿柱石透明度很高, 光薄片透过率最高至 93.94%, 最低为 59.07%。实测折光率为: $N_o = 1.586 \sim 1.590$, $N_e = 1.575 \sim 1.580$ 。长、短波紫外光下呈惰性, 正交偏光镜下干涉色呈一级灰。由于其颜色太浅, 饱和度较低, 在台式分光镜下见不到特征的吸收谱线。无解理, 贝壳状断口。

3.2 化学组成

由各样品的化学全分析结果(表 3)可见:

(1) Beryl1 与 Beryl2 主要成分为 Al_2O_3 、 SiO_2 和 BeO, 约占总量的 93.76% 和 92.47%。Beryl3 中 Al_2O_3 、 SiO_2 和 BeO 占总量的 96%。

(2) 平武绿柱石中碱金属 Li_2O 、 Na_2O 、 K_2O 、 Rb_2O 和 CS_2O 平均质量分数分别为 0.81%、1.20%、0.072 5%、0.007 25% 和 0.335%, 明显高于其他地区, 可将其归为锂-钠绿柱石^[16]。

(3) 平武绿柱石中 FeO 和 Fe_2O_3 质量分数总和分别为 0.18% 和 0.21%, 远远低于新疆绿柱石 Beryl3 的 0.76% 与其他地区绿柱石的 0.61% ~ 1.48%。这说明其致色离子 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Mn^{2+} 的质量分数较低, 而其他致色离子基本缺失, 导致其颜色浅淡。 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 主要占位于 AlO_6 八面体 Al^{3+} 位置, 它们是平武绿柱石呈色的主要杂质离子^[15]。

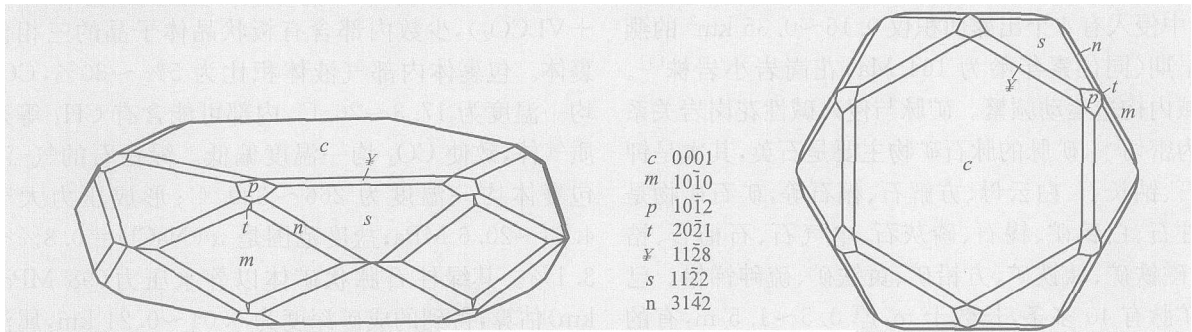


图 1 四川平武绿柱石晶体形态
(据 White 和 Richard, 1999^[15])

Fig. 1 Morphology of beryl crystal in Pingwu, Sichuan Province



照片(1) 新疆板状粉红色绿柱石平武板状绿柱石
Photo 1 Pink tabular beryl in Xinjiang and tabular beryl in Pingwu



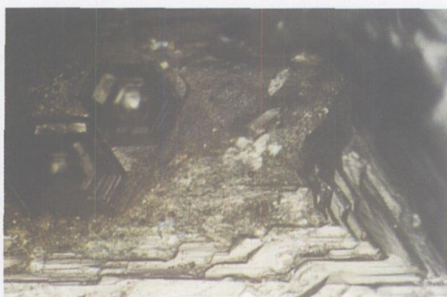
照片(2) 宝石级平武板状绿柱石、电气石和白钨矿
Photo 2 Gem-grade tabular beryl, tourmaline and scheelite



照片(3) 平行连生的平武绿柱石晶体与白钨矿
Photo 3 Parallel growth of beryl in Pingwu and scheelite



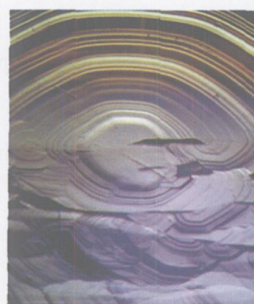
照片(4) 平武绿柱石晶体 $\{1010\}$ 螺旋生长纹
Photo 4 Spiral growth marks along $\{1010\}$



照片(5) 平武绿柱石晶体 $\{0001\}$ 六边形螺旋生长纹图
Photo 5 Hexagonal spiral growth marks along $\{0001\}$



照片(6) 平武绿柱石晶体 $\{1010\}$ 螺旋生长纹
Photo 6 Spiral growth marks along $\{1010\}$



照片(7) 平武绿柱石晶体 $\{11\bar{2}1\}$ 螺旋生长纹及位错
Photo 7 Spiral growth marks along $\{11\bar{2}1\}$ and dislocation



照片(8) 平武绿柱石晶体 $\{11\bar{2}1\}$ 三角形生长丘
Photo 8 Triangle growth hillock along $\{11\bar{2}1\}$

表 3 四川平武绿柱石与新疆阿尔泰绿柱石化学成分

Table 3 Chemical composition of beryl samples in Pingwu and Xinjiang

样号	w _B / %									
	SiO ₂	BeO	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	Na ₂ O
Beryl1	64.23	12.20	17.33	0.12	0.06	0.000	0.004 7	0.37	0.078	1.44
Beryl2	63.19	11.97	17.31	0.14	0.07	0.006 2	0.004	0.30	0.073	1.47
Beryl3	64.97	13.71	17.32	0.22	0.54	0.000	0.004 7	0.28	0.13	0.27
新疆花岗伟晶岩中绿柱石	64.31	13.98	18.71		0.64	0.03	0.006		0.06	
内蒙古花岗伟晶岩白云母集合体中绿柱石	63.92	13.32	18.75		0.61		0.02		0.08	1.04
江西花岗岩中钨铍石英脉中	61.16	12.09	19.30		1.00				0.26	1.6
广东云英岩中	66.27	13.04	15.33		2.50			0.06		0.13
前苏联花岗伟晶岩中	65.89	14.10	17.04			1.48				0.17

样号	w _B / %								参考文献
	K ₂ O	Li ₂ O	Rb ₂ O	Cs ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O ⁺	H ₂ O ⁻	总量	
Beryl1	0.054	0.77	0.005 4	0.36	0.000	3.04	0.10	100.16	本文
Beryl2	0.091	0.86	0.009 1	0.31	0.010	3.56	0.31	99.68	
Beryl3	0.027	0.032	0.000	0.11	0.006 1	1.97	0.081	99.67	
新疆花岗伟晶岩中绿柱石						2.22		100.136	王濮等
内蒙古花岗伟晶岩白云母集合体中绿柱石	0.05	0.34				0.58 0.33		99.72	1987
江西花岗岩中钨铍石英脉中	0.07	0.03				0.28 0.19		99.64	
广东云英岩中	0.07					1.57		100.53	
前苏联花岗伟晶岩中						0.82		99.84	

注:由中国地质大学(北京)化学分析室测试。

表 4 四川平武绿柱石化学成分

Table 4 Chemical composition of beryl samples in Pingwu

点号	wB/ %												
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	CoO	BeO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	总量
1	66.77	0.05	17.95	0.05	0.21	0.00	0.02	0.02	14.23	0.00	0.42	0.33	100.0
2	66.04	0.00	17.45	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	15.07	0.06	0.83	0.36	100.0
3	67.25	0.02	18.45	0.0	0.18	0.00	0.00	0.05	13.00	0.00	0.65	0.40	100.0

注:由中国地质大学(北京)电子探针室测试。

(4) 整体上,除去水中的 O 之外,以 O = 18 为基准,计算得到各样品的晶体化学式分别为:

Beryl1: (Li_{0.29}Be_{2.745}) (Mg_{0.01}Fe_{0.01}Al_{1.91}) Si_{6.01}O₁₈ · 0.95 H₂O, (0.26Na, 0.006 K, 0.014Cs);

Beryl2: (Li_{0.33}Be_{2.73}) (Mg_{0.01}Fe_{0.016}Al_{1.91}) Si_{5.996}O₁₈ · 1.12 H₂O, (0.27Na, 0.11 K, 0.012Cs);

Beryl3: (Li_{0.01}Be_{3.03}) (Mg_{0.018}Fe_{0.05}Al_{1.88}) Si_{5.991}O₁₈ · 1.21 H₂O, (0.01Li, 0.048Na, 0.003 K, 0.004Cs)

(5) 此外,利用电子探针对 Beryl4 进行测试(表 4),发现其化学成分中还有挥发性物质 P₂O₅,该绿

柱石脉中还出现大量电气石,这些说明热液中富含挥发份物质。

3.3 X射线粉晶衍射分析

对各样品进行 X 射线粉晶衍射分析并进一步确定其为绿柱石。在此基础上,经角标校正和最小二乘法精化,计算出各样品的晶胞参数(表 5)。在绿柱石结构中可以发生 Be²⁺ Li⁺, Al³⁺ Mg²⁺、Fe²⁺、Fe³⁺、Ti⁴⁺ 类质同象置换, Na⁺、K⁺、Rb⁺、Cs⁺ 等离子半径较大的碱金属离子则存在于由 SiO₄ 四面体连接而成的六方环之间的通道内。位于绿柱

石结构隧道内的碱金属离子不会引起晶胞参数的改变^[17]。对比几种绿柱石的晶胞参数可见,平武绿柱石在碱金属离子含量较高的情况下,晶胞参数增大,表明碱金属离子对 Be^{2+} 可能存在类质同象替代。在新疆可可托海绿柱石猫眼研究过程中,也存在着碱金属质量分数较低和类质同象较少的情况下,晶胞参数较为接近正常绿柱石晶胞参数值^[18]。

4 讨论

4.1 板状晶形分析

关于平武绿柱石的板状成因,有人研究认为是晶体中的线缺陷(螺旋位错)、面缺陷(层错双晶)及点缺陷(空位、包裹体)等协同作用的结果^[6]。事实上,产生线缺陷、面缺陷及点缺陷的原因,尤其是位错的成因有多种,构造活动也能够产生位错现象^[19]。

根据绿柱石中 BeO_4 四面体和 AlO_6 八面体的类质同象置换对 c/a 值即晶胞参数 c 、 a 的比值的影响情况提出绿柱石的端员模式,即“正常”绿柱石 ($\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}] \cdot \text{ZH}_2\text{O}$, c/a 值 0.997 ~ 0.998)、 “八面体”绿柱石 ($\text{Rf}^+ \text{AlMeBe}_3\text{Si}_6\text{O}_{18} \cdot \text{ZH}_2\text{O}$, c/a 值 0.991 ~ 0.996) 和 “四面体”绿柱石 ($\text{Rf}^+ \text{Al}_2\text{Be}_2\text{LiSi}_6\text{O}_{18} \cdot \text{ZH}_2\text{O}$, c/a 值 0.999 ~ 1.003)^[20]。其中, Rf^+ 为碱金属离子, Me 为二价金属阳离子。平武绿柱石 Beryl1 与 Beryl2 的 c/a 比值分别为 1 和 0.999,属于“四面体”绿柱石, Beryl3 的 c/a 值投影点对应于“正常”绿柱石,表征碱金属离子 Li^+ 等替代 Be^{2+} 并引起了 c/a 值的变化。

表 5 绿柱石的晶胞参数

Table 5 The lattice constants in Pingwu and its comparison with other beryls

样品	a/nm	c/nm	c/a
Beryl1	0.922 7	0.922 7	1.000 0
Beryl2	0.922 9	0.922 6	0.999 6
Beryl3	0.921 5	0.919 2	0.997 5
Beryl4	0.922 1	0.922 7	1.000 5

注:由中国地质大学(北京)X射线粉晶衍射实验室测试。

由上述研究可知(表 3), Beryl1、Beryl2 和 Beryl3 中 Al 元素质量分数变化不大(约为 0.057 7%)。在此条件下, Li^+ 质量分数增高,则替代 Be^{2+} 的量增加。这些离子的变化引起键长变化,而导致晶胞参

数 a 和 c 值略高于其他绿柱石;同时 c/a 比值接近于 1 且变化范围小。

研究表明富含碱金属的晶体多呈短柱状或沿 $\{0001\}$ 发育成板状^[21]。对 Na_2O 、 Li_2O 、 Cs_2O 和碱金属质量分数与长/宽值分析认为:在 Na_2O 质量分数为 1% ~ 2%、 Li_2O 质量分数为 0.7% ~ 1.3%、 Cs_2O 质量分数为 1% ~ 3.51%、碱金属质量分数为 2.94% ~ 7.92% 时,绿柱石长宽比为 1 ~ 1.5^[22],应该是短柱状,由于沿 c 轴养分供应充足,所以大部分发育板状,个别也有短柱状。根据王贤觉对新疆伟晶岩脉含碱绿柱石的分类,平武绿柱石属于 Na-Li 绿柱石且长宽比 1 ~ 2 成短柱状。

对马达加斯加草莓红“绿柱石”研究认为 Li^+ 与 Cs^+ 质量分数较高, Li^+ 大量地替代 Be^{2+} 致使绿柱石晶胞参数较大。该区绿柱石外形呈板柱状,其常见单形与平武绿柱石相似^[23]。

综上所述,(1)平武绿柱石中碱金属质量分数较高,较高质量分数的碱金属离子存在于孔道内可能使 $\{0001\}$ 面的面网密度增加,增加的结果使 $\{0001\}$ 面发育较为缓慢,而 $\{10\bar{1}0\}$ 面发育较快使 $\{10\bar{1}0\}$ 面在晶体生长中变得越来越小直至消失。最终成板状。(2)环境因素,在绿柱石生长过程中,四川平武绿柱石产于晶洞中,大部分绿柱石 c 轴垂直洞壁或是与洞壁呈锐角, $\{0001\}$ 面平行于脉壁。在晶体生长过程中,由于脉宽仅数十 cm 或更短,溶液平行脉壁供应,垂直脉壁供应较少,因此平行双面生长速度较慢,而 $\{10\bar{1}0\}$ 面供应较为充分而生长速度较快。与绿柱石共生也成厚板状或板状。白钨矿晶体四次对称轴一般也垂直于岩壁生,因此,绿柱石板状晶体是内因和外因综合作用的结果。

4.2 进一步找矿思路

平武地区构造运动复杂,缺乏从构造角度对平武绿柱石矿床进行研究及开发的工作,因此应加强其构造成矿动力学研究,以揭示成矿系统内部结构的时空协调规律,建立成矿模式和预测成矿远景区。

从流体与岩石-构造环境的相互作用及构造-流体演化的角度,进行构造演化、流体活动和成矿作用耦合效应及机制的研究,探讨成矿系统的形成过程和动力学特征,结合当地构造、区域地质概况分析其成岩-成矿效应,评估成矿元素运移平衡,解析成矿系统结构、聚矿功能和动力学特征,可以确定构造、流体和成矿元素的示踪标志^[24]。同时,采用地质-地球化学特征标识成矿流体多层循环与成矿物质活

化 运移 聚集 沉淀 定位的路径和动力学过程的思维模式^[25]对于寻找新的绿柱石原生矿特别是白钨矿和锡石矿床有重要作用。

5 结论

(1) 根据前人资料,热液成因的绿柱石一般为无碱绿柱石,热液成因的板状含碱绿柱石非常少见。通过测温、测压、围岩蚀变、矿物共生组合、矿物标型晶体形态和绿柱石测温测压等方面确定平武绿柱石矿床是气成高温浅成石英脉型矿床。平武地区构造运动复杂,从构造角度对平武绿柱石矿床进行研究与开发的工作相当缺乏,因此应加强其构造成矿动力学研究,以揭示成矿系统内部结构的时空协调规律,可以建立成矿模式和预测成矿远景区。

(2) 采用湿法化学全分析方法,测定了平武绿柱石的化学成分,并据此计算得出了其晶体化学式。进一步确定平武绿柱石属于含铯钠-锂绿柱石。平武绿柱石 Li_2O 、 Na_2O 和 Cs_2O 平均质量分数分别为 0.81%、1.20% 和 0.34%; Li^+ Be^{2+} 的类质同象现象伴随着 H_2O 、 CO_2 、 Na^+ 、 K^+ 、 Rb^+ 、 Cs^+ 进入通道使{0001}面网增大而形成短柱状晶体。成矿物质沿脉壁供应的不均匀,内因和外部环境的综合影响是平武绿柱石板状晶体的成因。

(3) 位错和层错等晶体缺陷并不是导致平武绿柱石板状晶体的直接原因。该矿床中绿柱石、白钨矿、锡石晶体平行连生现象较多,并不发育双晶。

(4) 碱金属含量升高、晶胞参数变大及晶体化学式均表明平武绿柱石存在着较多的类质同象。

孙岱生教授和杨立强副教授细心审阅了全文并提出了宝贵的修改意见,使作者受益匪浅。对他们的帮助和建议表示衷心感谢!

References :

- [1] WANG Xianjue, ZOU Tianren, XU Jianguo, et al. *Study on Minerals from Pegmatites, Altai* [M]. Beijing: Science Press, 1981: 56-59(in Chinese).
- [2] A A. M [M]. : , 1960: 21-110.
- [3] CAO Zhimin, LI Youguo, REN Jianguo, et al. Geologic and geochemical features of the volatile-rich ore fluid and its tracing and dating in the Xuebaoting Beryl-scheelite vein deposit China[J]. *China Science (Series D)*, 2002, 32(1): 64-72.
- [4] ZHOU Kaican, YUAN Lijian, XIANG Changjin, et al. Geologic characteristic of forming beryl gem Pingwu, Sichuan[J]. *Mineral Petrol*, 2002, 22(4): 1-7(in Chinese).
- [5] CHEN Zhijun, WAN Shiming, LU Xinbiao, et al. Study on fluid inclusions in beryl from Pingwu, Sichuan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2002, 21(3): 65-68(in Chinese).
- [6] LIN Jinhui, CAO Zhimin, LIU Jing, et al. Mineral spectroscopic studies of beryls from Xuebaoding Sichuan[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2000, 19(4): 369-375(in Chinese).
- [7] QI Lijian, PEI Jingcheng, ZHOU Kaican, et al. Crystal defect and growth mechanism of alkali-rich beryl crystal from Pingwu Sichuan, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(1): 64-70(in Chinese).
- [8] GUO Yanjun, WANG Rucheng, XU Shijin. A study of the structure of a rare tabular crystal of beryl[J]. *Geological Review*, 2000, 46(3): 313-317(in Chinese).
- [9] Regional Geology in Sichuan Province. *Bureau of Geology and Mineral Resources* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994: 21-25 (in Chinese).
- [10] WANG Shi. *A Book of Gem-Jade Resources in China* [M]. Beijing: Science and Technology Press, 1999: 307 (in Chinese).
- [11] YE Song, QI Lijian, LUO Yonggan, et al. Relationship between the rare-metal contained granitic intrusions and beryl mineralization in Pingwu Sichuan China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(2): 66-70(in Chinese).
- [12] DENG Jun, ZHAI Yusheng, YANG Liguang, et al. On ore-forming system of shear zone tectonics [J]. *Geoscience*, 1998, 12(4): 493-500(in Chinese).
- [13] CHEN Guangyuan, SUN Daisheng, YIN huan. *Genetic Mineralogy and Prospecting Mineralogy* [M]. Chongqing: Chongqing Press, 1987: 213-214(in Chinese).
- [14] LIU Yan, ZHANG Bin, YU Xiaoyan. The mineralogical characteristics and its application prospect of beryl in Pingwu, Sichuan[J]. *Geology and Prospecting*, 2001, 37(2): 55-57 (in Chinese).
- [15] WHITE J S, RICHARDS R P. Chinese beryl crystal mimic twinning[J]. *Rocks & Minerals*, 1999, 74: 318.
- [16] HAWTHORNE F C, ČERNÝ P. The alkali-metal position in Cs-Li beryl[J]. *Can Mineral*, 1977, 15: 414-421.
- [17] BLAKA R, ISOTANI S, WATANABE S, et al. Optical absorption and electron spin resonance in blue and green natural beryl[J]. *Phys Chem Mineral*, 1982, 8: 161-166.
- [18] LIU Yan, GAO Yan, HE Mingyue, et al. Mineralogical characteristic of Keketuojhai cat's-eye aquamarine in Xinjiang and its exploitation[J]. *Geology and Prospecting*, 2003, 39(3): 25-30(in Chinese).
- [19] LIAO Libing. *Crystal Chemistry and Crystal Physics* [M].

- Beijing: Geological Publishing House, 2000: 113-122 (in Chinese).
- [20] AURISICCHIO C, FIORAVANTI G, GRUBESSI O, et al. Reappraisal of the crystal chemistry of beryl[J]. *Am Mineral*, 1988, 73:826-837.
- [21] WANG Pu, PAN Zhaolu, WENG Lingbao. *Systematic Mineralogy* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987: 155-158(in Chinese).
- [22] ZOU Tianren. Colouration mechanism and main controlling factors of aquamarines from China [J]. *Mineral Deposits*, 1996, 15(Suppl): 55-61 (in Chinese).
- [23] LIAO Shangyi, PENG Mingsheng. Crystal chemistry of raspberry "beryl" [J]. *Acta Mineralogical Sinica*, 2003, 23(4): 319-322 (in Chinese).
- [24] DENG Jun, YANG Liqiang, SUN Zhongshi, et al. Ore forming dynamics of tectonic regime transformation and multi-layer fluid circulation[J]. *Earth Science*, 2000, 14(2): 397-403(in Chinese).
- [25] DENG Jun, YANG Liqiang, ZHAI Yusheng, et al. Theoretical framework and methodological system of tectonics-fluids-mineralization system and dynamics [J]. *Earth Science*, 2000, 25(1): 71-78(in Chinese).
- [6] 林金辉, 曹志敏, 刘菁, 等. 雪宝顶绿柱石的谱学研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(4): 369-375.
- [7] 元利剑, 裴景成, 周开灿, 等. 四川平武富碱型绿柱石晶体的晶格缺陷与生长机制[J]. 地质科技情报, 2001, 20(1): 64-70.
- [8] 郭延军, 王汝成, 徐士进. 板状绿柱石晶体的结构测定[J]. 地质论评, 2000, 46(3): 313-317.
- [9] 四川省地矿局. 四川省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1994: 21-25.
- [10] 王实. 中国宝石资源大全 [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 307.
- [11] 叶松, 元利剑, 罗永安, 等. 四川平武稀有金属花岗岩与绿柱石的成矿属性[J]. 地质科技情报, 2001, 20(2): 66-70.
- [12] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 论剪切带构造成矿系统[J]. 现代地质, 1998, 12(4): 493-500.
- [13] 陈光远, 孙岱生, 殷辉安. 成因矿物学与找矿矿物学 [M]. 重庆: 重庆出版社, 1987: 213-214.
- [14] 刘琰, 张斌, 余小艳. 四川平武绿柱石结晶学特征研究及发展前景[J]. 地质与勘探, 2001, 37(2): 55-57.
- [18] 刘琰, 高岩, 何明跃, 等. 新疆可可托海绿柱石猫眼矿物学特征及其开发探讨[J]. 地质与勘探, 2003, 39(3): 25-30.
- [19] 廖立兵. 晶体化学及晶体物理 [M]. 北京: 地质出版社, 2000: 113-122.
- [21] 王濮, 潘兆橹, 翁玲宝. 系统矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 155-158.
- [22] 邹天人. 中国海蓝宝石的呈色机理及控制因素[J]. 矿床地质, 1996, 15(增刊): 55-61.
- [23] 廖尚宜, 彭明生. 草莓红绿柱石的晶体化学研究[J]. 矿物学报, 2003, 23(4): 319-322.
- [24] 邓军, 杨立强, 孙忠实, 等. 构造体制转换与流体多层循环成矿动力学[J]. 地球科学, 2000, 14(2): 397-403.
- [25] 邓军, 杨立强, 翟裕生, 等. 构造-流体-成矿系统及其动力学的理论格架与方法体系[J]. 地球科学, 2000, 14(2): 71-78.

参考文献:

- [1] 王贤觉, 邹天人, 徐建国, 等. 阿尔泰伟晶岩矿物研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 56-59.
- [4] 周开灿, 元利剑, 向长金, 等. 四川平武绿柱石宝石成矿地质特征[J]. 矿物岩石, 2002, 22(4): 1-7.
- [5] 陈志军, 万世明, 吕新彪, 等. 四川省平武县绿柱石中的流体包裹体研究[J]. 地质科技情报, 2002, 21(3): 65-68.