# 川西上基拱伟晶岩型铍矿绿柱石矿物化学特征

罗丽萍', 胡军亮1.2, 谭洪旗', 周涛'

### (1. 中国地质科学院矿产综合利用研究所,中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研 究中心,四川 成都 610041;2. 成都理工大学 地球科学学院,四川 成都 610059)

摘要:绿柱石作为铍的矿石原料和祖母绿的来源,有重要的工业价值和欣赏价值,其化学组成可以反映形成的物理化学条件。本文通过对川西九龙上基拱伟晶岩型绿柱石开展 LA-ICP-MS 原位测试,查明不同矿化类型伟晶岩中绿柱石的元素替代机制,探讨上基拱伟晶岩的稀有金属成矿过程和成矿机制。结果表明,九龙上基拱地区绿柱石的 SiO<sub>2</sub>含量为 64.25% ~ 67.19% (平均 65.82%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为 16.71% ~ 18.54% (平均 17.40%), BeO 含量为 14.97% ~ 16.46% (平均 15.67%),富含 Li、S、Zn、Se、Cs 等微量元素,与标准绿柱石的化学组成存在差异。绿柱石中 Si 与 Al、Be 具有明显的负相关性,与 Na、Li、Fe、Mg 不具相关性,且 Cs-Na/Cs 和 Cs-Mg/Fe 图解显示,具高分异演化的特征。

关键词:松潘-甘孜;川西;绿柱石;伟晶岩;花岗岩
 doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2021.05.017
 中图分类号:TD981 文献标志码:A 文章编号:1000-6532 (2021) 05-0013-07

绿柱石是花岗伟晶岩中最常见和最重要的铍 矿石矿物,其化学式为 Be<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>。纯的绿柱石 是 无 色 的,由于 Cr<sup>3+</sup>、V<sup>5+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>、Mn<sup>2+</sup>、 Rb<sup>+</sup>、Cs<sup>+</sup>等金属离子的混入,产生黄绿色、绿色、 蓝色、灰白色、浅玫瑰色等多种颜色<sup>[1-3]</sup>。绿柱石 晶体多为长柱状,少量为板柱状,由于 Cs 和 Li 等 元素进入晶格,使得绿柱石由六方晶体向斜方晶 体转变<sup>[4]</sup>。绿柱石的化学组成和内部分带特征可 指示伟晶岩的分异程度,并示踪伟晶岩岩浆演化 过程<sup>[5-7]</sup>。

川西绿柱石成矿带主要产于松潘-甘孜造山 带内,已发现的矿床主要分布于平武、马尔康、 雅江、康定、九龙、石渠等地区,典型矿床为甲 基卡、李家沟、扎乌龙、可尔因、党坝、打枪沟 等,大多以伴生铍矿形式出现。九龙地区仅打枪 沟锂铍矿床和洛莫铍矿床规模达中型,若登铍矿、 埃今铍矿、上基拱铍矿等均为小型-矿化点。本文 主要以上基拱矿床中绿柱石为主要研究对象,通 过开展绿柱石 LA-ICP-MS 原位测试,揭示绿柱石 化学组成和元素替代机制,讨论绿柱石矿床的形 成机制。

### 1 区域地质背景

川西九龙地区位于扬子地块西缘、松潘-甘 孜地块东南缘,被鲜水河断裂、小金河断裂及甘孜-理塘断裂所围限的九龙断块。该区主要发育三叠 系西康群地层。九龙断块内部被三岩龙断裂和与 玉农希断裂分为东西两块,以花岗岩为核部,背、

收稿日期: 2020-06-28; 改回日期: 2020-07-21

基金项目:中国地质调查项目 (DD20190185) 资助

作者简介:罗丽萍 (1981-),女,硕士,工程师,主要从事地质矿产勘查及矿山环境调查工作。

通讯作者: 谭洪旗(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事基础地质调查工作, Email:hong qi tan@163.com。

向斜褶皱较为发育。区域上,岩浆岩主要分为印 支期(205~220 Ma)I型和燕山早期(150~165 Ma)花岗岩。其中印支期(205~220 Ma)I型花 岗岩有兰尼巴岩体、羊房沟岩体、三岩龙-放马坪 岩体、嘎啦子岩体等,燕山早期(150~165 Ma) 花岗岩有新火山岩体(又称文家坪)、铁厂河岩 体(又称乌拉溪岩体)和桥棚子岩体。变质作用 以区域变质作用(低绿片岩相)为主,后围绕不 同花岗岩体周边出现接触变质作用。伟晶岩脉基 本出现在三叠系西康群地层中,极少数出现在岩 体内部,主要以稀有金属矿化为特征。

2 矿床地质和样品采集

上基拱矿点位于三岩龙断层的西侧,产于 区内二长花岗岩的接触带上。这些花岗岩多具花 岗结构、少为似斑状结构、块状构造等, 主要成 分为微斜长石 (10%~15%)、更中长石 (45% ~60%)、石英(20%~25%),黑云母(10%~ 15%)、白云母(0~5%)。围岩主要为三叠系西 康群的变质砂岩、粉砂岩及石英片岩,在接触带 附近分布有 50 余条伟晶岩脉。这些伟晶岩脉一般 长 5~150 m, 厚 1~5 m, 多为石英微斜条纹长石 型、石英白云钠长石型,分异性差,分带现象不明, 以中粗粒结构为主,局部呈块状结构。蚀变交代 作用以钠长石化为主,次为白云母化和云英岩化。 初步调查,有11条具铍矿化,1条铍铌矿化,2条 铌矿化。在这些矿化脉中,有4条矿脉沿花岗岩 体与围岩接触面产出,矿体形态近似于脉体形态, 倾向北东,倾角 30~60°。其余矿体多呈脉状或 分枝脉状,长110~120m,厚3~8m,矿化不均匀, 不连续。绿柱石主要产在脉体中段上部的块状结 构带或粗粒结构带中,并呈巢状富集。绿柱石呈 浅绿、亮绿及灰白色产出, 自形、半自形六方柱 状及锥状,偶见他形粒状;粒径多大于 5 mm,一 般 5 cm 左右,个别达 10 cm。前人也发现在中细 粒结构带中发现粒径小于 2 mm 的呈巢状产出的浅 色细晶绿柱石。本次绿柱石采集在伟晶岩中,浅 绿色,六方柱状,约 7 cm×7 cm,与其接触的矿 物为石英、钠长石等矿物(图 1)。



图 1 九龙上基拱绿柱石的产出状态 Fig.1 Occurrence of beryl in Shangjigong, Jiulong region

### 3 分析方法

绿柱石采用 LA-ICP-MS 微区原位分析主微量 元素,在北京科荟测试技术有限公司完成。将绿柱 石晶体切片,然后采用 RESOlution 193 nm 激光剥 蚀系统和 Jena PQMS/Agilent 7500 共同完成。分析采 用的激光剥蚀孔径为 40 µm,剥蚀时间为 40 s,以 He 为载气。标准参考物质 SRM 610, SRM 612, BCR-2G 用于外表校正。分析数据的离线处理采用 软件 ICPMSDataCal 完成<sup>[8]</sup>。微量元素的精确度优 于 10%。

## 4 结 果

#### 4.1 主量元素

LA-ICP-MS 主量元素显示,上基拱绿柱石 主要以 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、BeO 为主,其余元素含量 均低于 1%。SiO<sub>2</sub>含量为64.25%~67.19%(平 均65.82%),Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为16.71%~18.54%(平 均17.40%),BeO含量为14.97%~16.46%(平均 15.67%),FeO含量为0.12%~0.32%(平均0.20%)。 以18个氧原子为基准进行计算,结果见表1。 \_

表 1 九龙上基拱绿柱石主量元素测试结果 /% Table 1 Major elements of beryl in Shangjigong, Jiulong region

	Table 1 Major elements of bery in Shangjigong, Juliong region																			
元素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Na <sub>2</sub> O	0.23	0.27	0.26	0.25	0.29	0.28	0.33	0.28	0.31	0.40	0.43	0.34	0.35	0.31	0.27	0.27	0.31	0.28	0.29	0.24
MgO	0.09	0.09	0.10	0.09	0.08	0.09	0.10	0.09	0.10	0.11	0.11	0.10	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10./1	18.54	1/.00	1/.12	16./4	1/.42	17.88	1/./3	1/.90	1/.24	1/.18	1/.00	1/.33	1/.08	1/.09	16.96	10./3	1/.2/	1/.43	1/./1
SIO <sub>2</sub>	00.99	04.23	03.23	00.01	00.97	00.24	03.43	03.07	04.84	03.84	00.14	03.48	00.04	03.20	00.13	03.93	0/.19	00.13	03.97	03.22
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01
$K_2O$	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
CaO	0.04	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.00	0.07	0.02	0.01	0.11	0.00	0.01	0.00	0.03	0.02	0.18	0.00	0.03	0.03
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
FeO	0.27	0.14	0.26	0.18	0.22	0.21	0.20	0.15	0.19	0.19	0.32	0.22	0.22	0.12	0.20	0.13	0.17	0.17	0.15	0.22
Li <sub>2</sub> O	0.04	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.06	0.09	0.08	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05
BeO	15.14	16.46	16.22	15.53	15.24	15.52	15.87	16.07	16.09	15.73	15.22	15.78	15.70	16.13	15.47	15.28	14.97	15.74	15.64	15.55
$B_2O_3$	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
合计	99.62	99.86	99.81	99.30	99.69	99.86	99.91	99.56	99.56	99.65	99.65	99.69	99.87	99.72	99.39	98.81	99.78	99.77	99.70	99.17
								Ľ	人18个	氧原	子计算	ſ								
Na	0.020	0.024	0.023	0.022	0.025	0.024	0.028	0.024	0.027	0.035	0.037	0.030	0.030	0.027	0.024	0.024	0.027	0.024	0.026	0.021
Mg	0.012	0.012	0.013	0.012	0.011	0.012	0.013	0.013	0.014	0.014	0.015	0.014	0.015	0.013	0.013	0.013	0.010	0.012	0.012	0.012
Al	1.766	1.952	1.859	1.812	1.767	1.835	1.883	1.873	1.891	1.820	1.818	1.864	1.826	1.864	1.809	1.805	1.766	1.820	1.839	1.880
Si	6.005	5 739	5 830	5 931	5 998	5 922	5 847	5 831	5 812	5 898	5 938	5 866	5 904	5 836	5 939	5 954	6.019	5 912	5 906	5 873
р	0.003	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
ĸ	0.002	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001
Ca	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001
Са Ті	0.004	0.000	0.000	0.002	0.004	0.000	0.000	0.000	0.002	0.001	0.011	0.000	0.001	0.000	0.003	0.002	0.017	0.000	0.003	0.003
11 Mn	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
E	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000	0.000
ге	0.020	0.010	0.020	0.014	0.016	0.015	0.015	0.011	0.014	0.014	0.024	0.017	0.016	0.009	0.015	0.010	0.013	0.013	0.011	0.010
LI	0.015	0.021	0.018	0.020	0.021	0.019	0.022	0.019	0.020	0.031	0.030	0.022	0.022	0.022	0.018	0.020	0.023	0.019	0.022	0.019
Ве	3.260	3.531	5.482	3.353	3.280	3.334	3.407	3.459	3.464	3.385	3.283	3.395	3.372	3.466	3.337	3.315	3.223	3.380	3.362	3.364
В	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
						+ ~ .	L _L	++ 111	ハコエキコ		· — ± ·	11 L		< 1 0=6						

	$ $																			
Table 2 Trace elements of beryl in Shangjigong, Jiulong region																				
元素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Li	192	271	229	256	273	250	286	244	258	404	380	287	281	289	226	259	291	248	281	245
B	39.6	9.0	2.1	4.5	1.8	11.6	9.6	8.4	5.7	4.2	4.2	3.5	6.2	10.5	5.2	11.0	6.8	3.2	5.2	7.3
S	300	0	0	1385	850	14	0	11	41	1109	622	757	0	$\frac{0}{2}$	603	10/0	4/3	0	386	566
SC	2.0	2.4	0.0	0.8	1.3	0.5	2.3	1./	4.1	0.4	2.1	0.0	1.8	2.3	2.8	1.2	1.4	2.1	1./	2.2
V	23.4	0.0	1.9	22.0	18.6	17.2	0.0	0.0	15.9	26.8	0.0	11.5	0.0	12.9	11.2	21.0	42.9	2.4	0.0	9.2
Cr	318.9	42.9	45.8	55.4	53.6	41.4	29.9	63.2	44.2	28.6	43.9	50.0	1.6	20.0	23.2	47.0	26.5	39.0	27.1	36.8
Co	2.4	0.0	0.0	0.0	1.7	0.0	0.6	2.0	0.0	1.9	0.0	0.0	3.4	3.7	0.9	3.0	0.0	1.2	0.0	0.0
Ni	17.9	0.0	0.4	0.0	0.0	1.7	2.3	0.0	12.7	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.3	6.9	19.2	10.1	17.8
Cu	5.3	0.3	1.0	0.0	0.1	0.5	0.4	0.0	0.3	0.0	0.3	1.7	0.0	1.8	0.0	4.1	1.2	0.3	4.1	0.5
Zn	155.3	152.7	169.8	167.9	133.6	175.8	179.8	181.0	164.3	156.8	191.0	170.6	192.7	174.3	151.8	169.7	108.6	160.7	152.0	153.9
Ga	18.6	22.0	17.8	19.7	18.5	19.8	22.7	21.3	23.1	22.8	25.0	18.6	23.4	19.8	22.4	23.1	17.4	22.7	19.8	22.3
As	5.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	8.1	13.2	5.3	0.6	0.0	0.0	11.7	0.0	18.8	0.0	0.0
Se	0.0	0.0	284.5	0.0	433.7	112.0	6.1	44.2	0.0	225.6	342.5	145.2	16.9	137.3	0.0	0.0	186.9	0.0	233.2	0.0
Rb	17.8	18.5	18.9	19.5	14.1	19.6	18.5	19.9	18.0	17.0	21.2	19.1	19.6	18.9	15.2	17.7	6.7	16.7	14.2	21.0
Sr	2.0	0.0	0.4	0.1	0.7	0.3	1.3	0.4	0.3	0.8	6.7	0.0	0.1	0.6	0.7	0.7	6.8	0.0	0.1	0.0
Y	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.5	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Zr	2.6	0.7	0.0	0.0	0.1	0.5	0.8	0.8	0.9	0.0	0.0	0.9	0.1	2.1	0.0	1.5	0.9	0.0	1.2	1.1
Nb	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Mo	0.4	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.2	0.1	0.3
Ag	0.0	0.0	1.4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.6	0.0	0.2	0.0	0.0
Cd	6.2	0.0	0.0	4.5	0.2	0.0	1.1	0.0	0.0	8.9	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sn	2.5	0.3	1.0	0.4	1.6	2.2	0.2	0.6	1.0	0.8	2.6	0.0	0.0	0.3	0.9	0.7	1.8	0.0	0.2	0.0
Cs	102.1	101.6	113.2	154.1	112.4	136.9	172.3	142.0	128.9	201.2	700.0	203.5	209.4	235.7	179.7	162.5	101.3	106.0	116.4	128.8
Та	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.5	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
Cr	348.0	0.0	0.0	86.1	73.5	51.8	0.0	0.0	37.0	74.3	0.0	35.7	0.0	28.4	0.0	62.4	142.3	0.0	0.0	19.4
Cd	125.5	0.0	37.3	52.6	0.0	22.5	18.6	0.0	0.0	0.0	0.0	80.3	0.0	110.8	31.3	40.7	8.8	0.0	0.0	68.7

其中 Si(apfu) 为 5.739 ~ 6.039, Al(apfu) 为 1.952 ~ 1.766, Be (apfu) 为 3.531 ~ 3.223。因一般不将微量元 素写入绿柱石的晶体化学式中,因此上基拱绿柱石的 晶体化学式可写为 Be3.531~3.223Al1.952~1.766Si5.739~6.039O18, 与绿柱石的标准化学式(Be3Al2Si6O18) 相比,铍 高铝低。

#### 4.2 微量元素

微量元素显示,上基拱绿柱石富Li、S、Zn、 Se、Cs,含量均大于100×10<sup>6</sup>,其余元素含量较低。 部分元素含量偏差较大,如Cr为0~348.02×10<sup>6</sup> (平均为47.94×10<sup>6</sup>),Se为0~433.66×10<sup>6</sup>(平均 为108.40×10<sup>6</sup>)。Rb含量为6.67×10<sup>6</sup>~21.22×10<sup>6</sup> (平均为17.59×10<sup>6</sup>),Ga含量为17.39×10-6~ 24.95×10<sup>6</sup>(平均为21.04×10<sup>-6</sup>),B含量为 1.81×10<sup>-6</sup>~39.64×10<sup>-6</sup>(平均为7.98×10<sup>-6</sup>)。绿 柱石中元素含量不均匀,致使上基拱绿柱石出现 无色、浅蓝色等现象。

5 讨论

#### 5.1 绿柱石的分类

前人研究认为,绿柱石矿物通式为 <sup>CH</sup>(Na,Cs,Rb,K,H<sub>2</sub>O,He,Ar)<sup>T(2)</sup>(Be,Li)<sub>3</sub><sup>O</sup>(Al,Sc,Cr,V,Fe<sup>2+</sup>, Mg,Mn,Fe<sup>3+</sup>)<sup>2<sup>T(1)</sup></sup>[Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>]<sup>[9]</sup>。前人根据CH位置上碱 金属元素(K、Na、Li、Cs)的含量,将绿柱石划 分为无碱绿柱石、含碱(K、Na)绿柱石、钠绿柱石、 钠锂绿柱石、锂-铯绿柱石等。根据矿物化学特征 分析,上基拱绿柱石属于钠锂绿柱石。与同属松潘-甘孜造山带的雪宝顶绿柱石相比,Li、Cs元素明 显含量较低<sup>[10]</sup>。

#### 5.2 绿柱石的形成环境

一般认为,上地壳中 Be 的丰度为 2×10<sup>6</sup>, 主要赋存在花岗岩、伟晶岩和黑色页岩,也可以 存在于云母和钠长石等矿物中。前人研究认为, 绿柱石形成于过铝的花岗质成矿系统,受 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的活度和温度(450~550℃)及助熔剂(F、 B、Li、P) 和挥发分 (H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>) 共同影响<sup>[11]</sup>。

绿柱石属六方晶系硅酸盐矿物, Na<sup>+</sup>、Li<sup>+</sup>、 Cs<sup>+</sup>、Fe<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Fe<sup>3+</sup>等阳离子可占据晶格中替代 Be<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>等金属阳离子。通过对上基拱伟晶岩绿 柱石主量、微量元素分析,显示出具有较高的 Be 含量,以及较低的 Na、Li、Cs、Fe、Mg。Na 与 Cs 呈弱正相关关系, Na 与Li呈较明显的正相关关系(图 2a、c),具有 Na<sup>+</sup>、Li<sup>+</sup>、Cs<sup>+</sup>等一价碱金属阳离子 占据晶格通道的特征,以及在通道中 Na<sup>+</sup>、Li<sup>+</sup>、Cs<sup>+</sup> 等碱金属相互置换。Al 和 Mg、Al 和 Fe 相关性较弱, Mg 趋于稳定(图 2b、d),说明 Mg 未占据替代机 制的主导作用,仅有少量的 Mg<sup>2+</sup>发生置换,同时 也暗示绿柱石结晶时,伟晶岩熔体中 Mg 含量较低。 主量元素图解(图 3)中 Si 与 Al、Be 具有明显的 负相关性,与 Na、Li、Fe、Mg 不具相关性。





与稀有金属矿化有关的花岗伟晶岩是经历过 高分异演化的岩浆结晶形成,其分异程度与稀有 金属矿化密切相关<sup>[12]</sup>。不同的演化程度的岩浆, 结晶形成的矿物具有一定的矿物化学特征,因此 较多学者通过矿物化学角度用来指示岩浆演化程 度<sup>[5-7]</sup>,如伟晶岩演化程度越高,云母中Li、Rb 等元素含量越高 K/Rb 值越低 [13-14]。伟晶岩中绿柱 石矿物 Cs、Na/Cs 等可以作为伟晶岩岩浆分异演 化程度的指示标志,花岗伟晶岩岩浆分异演化程 度加大,绿柱石 Cs含量逐渐升高<sup>[7,15]</sup>;此外,绿 柱石的分带特征和 FeO 含量可以作为伟晶岩岩浆 分异演化程度的潜在标志<sup>[7]</sup>。九龙上基拱地区绿 柱石Cs (101.3~700.0) ×10<sup>-6</sup>, Na/Cs 值 (4.55~ 22.70) , 与东秦岭卢氏稀有金属伟晶岩中绿柱石 Na/Cs 值 (2.68~19.24) 基本相当, 说明上基拱伟 晶岩与卢氏伟晶岩演化程度相近,具有较高的演 化程度<sup>[7]</sup>。在 Cs-Na/Cs 图解中,具有明显的负相 关趋势(图4a), Cs-Mg/Fe图解中, 具有明显的 正相关趋势(图4b),表明随着演化程度的增高, Na/Cs 值逐渐降低, Mg/Fe 值逐渐增高。



Fig.4 Diagrams of beryl in Shangjigong Jiulong region

#### 5.3 绿柱石的形成机制及找矿方向

伟晶岩阶段铍的富集与不同母岩有密切关系。 一般认为,花岗伟晶岩从早期到晚期发育过程中 可以形成一系列铍矿物,而碱性伟晶岩中铍矿物 则很少形成。铍的迁移富集与伟晶岩不同发育阶 段有着密切关系,花岗伟晶岩中铍的含量达18~ 720×10<sup>-6</sup>,比母岩高达2~100倍<sup>[11]</sup>。

前人研究认为, 铍一般富集在伟晶岩晚期结

晶阶段<sup>[11]</sup>。晚期阶段,挥发分(F、Cl、OH)的 增加易形成铍的络合物,铍也可以和硅、铝结合 而形成单独矿物-绿柱石析出。此外,在一定的成 矿构造条件下,某些早期阶段形成的微斜长石伟 晶岩中,可以产生局部的绿柱石富集,有时可以 形成有工业价值的铍矿床<sup>[22]</sup>。因此,铍的迁移主 要与两个因素有关:在相对封闭条件下,挥发分(如 F、OH、Cl、CO<sub>2</sub>)含量相对增加;碱金属浓度增 加,形成K<sub>2</sub>(BeF<sub>4</sub>),Na<sub>2</sub>(BeF<sub>4</sub>),K<sub>2</sub>(BeCO<sub>3</sub>)等络合物 进行迁移。索洛多夫按特征矿物将含铍伟晶岩分 成四类:①微斜长石伟晶岩、②钠长石云母伟晶岩、 ③钠长石伟晶岩和④钠长石锂辉石伟晶岩,边缘 带②、③的铍含量高于中心带①、④,钠长石化 带一般见绿柱石<sup>[11]</sup>。

原生结晶阶段早期的块状微斜长石伟晶岩可 以形成粗大结晶低碱绿柱石,晚期可以形成含高 碱绿柱石。伟晶岩不同交代阶段可以形成含碱绿 柱石或锂铯绿柱石。交代阶段除形成绿柱石外, 在晚期的酸性淋滤阶段的云英岩化作用,可以使 早期形成的铍矿物受到溶解,重新形成许多次生 铍矿物 (如似晶石、硅铍石、含水硅铍石和磷酸 盐矿物)。但在交代阶段形成的铍矿物,除白云 母化,钠长石化阶段形成的绿柱石外,一般很少 形成有工业价值的富集。

上述可知, 铍主要以富集成独立矿物形式出现, 只有少量呈分散状态在各矿物(如长石、云母)中。 因此, 绿柱石的寻找应集中在钠长石伟晶岩带上。

#### 6 结 论

(1) 九龙上基拱地区绿柱石的SiO2含量为64.25%~67.19%(平均65.82%),Al<sub>2</sub>O3含量为16.71%~18.54%(平均17.40%),BeO含量为14.97%~16.46%(平均15.67%),富含Li、S、Zn、Se、Cs等微量元素,与标准绿柱石的化学组成存在差异。根据矿物化学特征分析,上基拱绿

柱石属于钠锂绿柱石。

(2) 九龙上基拱地区绿柱石 Na 与 Cs 呈弱 正相关关系, Na 与 Li 呈较明显的正相关关系, Al 和 Mg、Al 和 Fe 相关性较弱, Si 与 Al、Be 具有明 显的负相关性, 与 Na、Li、Fe、Mg 不具相关性,

(3) 九龙上基拱地区绿柱石高 Cs、Na/Cs 值 说明绿柱石具有高分异演化的特征,并且随着演 化程度的增高, Na/Cs 值逐渐降低, Mg/Fe 值逐渐 增高。

(4) 铍主要以富集成独立矿物形式出现,只有少量呈分散状态在各矿物(如长石、云母)中。因此,绿柱石的寻找应集中在钠长石伟晶岩带上。

# 参考文献:

[1] Mihlynuk M G, Lett R. Composition of Logtung beryl (aquamarine) by ICPES/MS: A comparison with beryl worldwide. In: Geological Fieldwork 2003. British Columbia: Crown Publications Inc., 2003,141-146.

[2] Groat L A, Rossman G R, Dyar M D, et al. Crystal chemistry of dark blue aquamarine from the true blue showing, Yukon Territory, Canada[J]. The Canadian Mineralogist, 2010, 48(3): 597-613.

[3] Fridrichová J, Bačík P, Rusinová P, et al. Optical and crystal-chemical changes in aquamarines and yellow beryls from Thanh Hoa Province, Vietnam induced by heat treatment[J]. Physics and Chemistry of Minerals, 2015, 42(4): 287-302.

[4] Hawthorne F C, Cooper M A, Simmons W B, et al. Pezzottaite, Cs(Be<sub>2</sub>Li)Al<sub>2</sub>Si<sub>6</sub>O<sub>18</sub>: A spectacular new mineral related to the beryl group, from Madagascar[J]. Mineralogical Record, 2004, 35(5): 369-378.

[5] Wang R C, Che X D, Zhang W L, et al. Geochemical evolution and late re-equilibration of Na-Cs-rich beryl from the Koktokay #3 pegmatite (Altai, NW China) [J]. European Journal of Mineralogy, 2009, 21(4): 795-809.

[6] Merino E, Villaseca C, Orejana D, et al. Gahnite, chrysoberyl and beryl co-occurrence as accessory minerals in a highly evolved peraluminous pluton: The Belvís de Monroy leucogranite (Cáceres, Spain) [J]. Lithos, 2013, 179: 137-156. [7] 周起凤,秦克章,唐冬梅,等.东秦岭卢氏稀有金属伟晶 岩的绿柱石矿物学特征及其指示意义[J]. 岩石学报,2019, 35(7):1999-2012.

ZHOU Q F, QIN K Z, TANG D M, et al. The mineralogical characteristics of beryl in the rare metal pegmatite of Lushi in the Eastern Qinling and its indicative significance[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(7): 1999-2012.

[8] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34-43.

[9] Lum J E, Viljoen F, Cairncross B, et al. Mineralogical and geochemical characteristics of beryl (aquamarine) from the Erongo Volcanic Complex, Namibia. Journal of African Earth Sciences,2016,124: 104-125.

[10] 朱鑫祥,刘琰.四川雪宝顶 W-Sn-Be 矿床中矿物化学 组成及矿床成因 [J]. 岩矿测试, 2021, 40(2): 296-305.

ZHU X X, LIU Y. The chemical composition of minerals and the genesis of the W-Sn-Be deposit in Xuebaoding, Sichuan[J]. Rock and Mineral Testing, 2021, 40(2): 296-305.

[11] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等.元素地球化学[M].北京: 科学出版社,1984:1-548.

LIU Y J, CAO L M, LI Z L, et al. Element Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-548.

[12] Černý P. Petrogenesis of granitic pegmatites. In: Černý P
(ed.) .Granitic pegmatites in science and industry. Winnipeg,
Canada[J]. Mineralogical Association of Canada, 1982, 8: 405-462.

[13] Beurlen H, Muller A, Silva D, et al. Petrogenetic significance of LA-ICP-MS trace-element data on quartz from the Borborema pegmatite province, Northeast Brazil[J]. Mineralogical Magazine, 2011, 75(5): 2703-2719.

[14] 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等. 高分异花岗岩的识别与 研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(7): 745-765.

WU F Y, LIU X C, JI W Q, et al. Identification and research of highly differentiated granite[J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 47(7): 745-765.

[15] Cěrny P, Anderson A J, Tomascak P B, et al. Geochemical and morphological features of beryl from the Bikita granitic pegmatite, Zimbabwe[J]. The Canadian Mineralogist, 2003, 41(4): 1003-1011.

# Mineralogical Characteristics of the Pegmatite Type Beryl in Shangjigong, Western Sichuan Province

Luo Liping<sup>1</sup>, Hu Junliang<sup>1,2</sup>, Tan Hongqi<sup>1</sup>, Zhou Tao<sup>1</sup>

(1.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Technical Innovation Center of Rare Earth Resources, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China; 2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** Beryl, as the raw material of beryllium ore and the source of emerald, has important industrial value. Its chemical composition can reflect the physical and chemical conditions of its formation. In this paper, LA-ICP-MS in-situ tests were carried out on the beryl of shangjigong pegmatite type to find out the element substitution mechanism of beryl in different mineralization types of pegmatite, and to discuss the rare metal mineralization process and mechanism of shangjigong pegmatite, so as to provide the basis for the exploration and evaluation of beryl in Jiulong area. Results show that the content of SiO<sub>2</sub> in beryl is  $64.25\% \sim 67.19\%$  (average 65.82%), the content of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is  $16.71\% \sim 18.54\%$  (average 17.40%), and the content of BeO is  $14.97\% \sim 16.46\%$  (average 15.67%), otherwise is rich in trace elements such as Li, S, Zn, Se and Cs, which is different from the chemical composition of standard beryl. Si has obvious negative correlation with Al<sub>3</sub> Be, but has no relevance with Na<sub>3</sub> Li<sub>3</sub> Fe<sub>3</sub> Mg. Beryl has the feature of high evolution differentiation according to the diagrams of Cs-Na/Cs and the Cs-Mg/Fe.

Keywords: Songpan-Ganzi, Western Sichuan province, Beryl, Pegmatite, Granite

(上接128页)

# A Scarce Rare-Earth Mineral: Steenstrupine

Jiang Xiaoli<sup>1,2</sup>, Zhou Jiayun<sup>1,2</sup>

(1.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan, China; 2.Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China)

Abstract: Steenstrupine, also known as rhombohedral rare earth mineral, is an extremely rare rare-earth mineral, whose chemical formula is Na<sub>14</sub>Mn<sub>2</sub>(Fe,Mn)<sub>2</sub>REE<sub>6</sub>ZrSi<sub>12</sub>O<sub>36</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>7</sub>·3H<sub>2</sub>O. At present, the Ilimaussaq area in southern Greenland and Lovozero and Hibinet on the Koro Peninsula are its main reported sources of origin. Steenstrupine is rich in Uranium and REEs. The content of Steenstrupine  $\omega$ (REO) in the famous Ilimaussaq complex mass is 31.5% ~ 44.9%, with an average of 35.9%, mainly light rare earth and a small amount of heavy rare earth. Among them, the content of  $\omega$ (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>) is 0.2% ~ 1%, and the content of Th is very high, 0.5%. Therefore, steenstrupine is considered to produce more potential minerals such as uranium, zirconium, hafnium, and rare earths, which has a higher value. The formation of steenstrupine is closely related to high sodium alkaline magma. Before the formation of zircon, the content of Na<sub>2</sub>O is 0-14%, and the content of Na in anisotropic ring crystal is higher than that in crystal core, indicating the secondary enrichment of Na in minerals. The three types of steenstrupine formed naturally are reflected in the formation of Steenstrupine, which needs a certain range of temperature and pressure. It is worth noting that steenstrupine is easily replaced by monazite and uranothorite, and its heterogeneous banding edge is mainly explained by primary and secondary.

Keywords: Steenstrupine; Rare Earth Elements; Uranium Deposit