

文章编号: 0254-5357(2015)03-0359-07

DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.2015.03.017

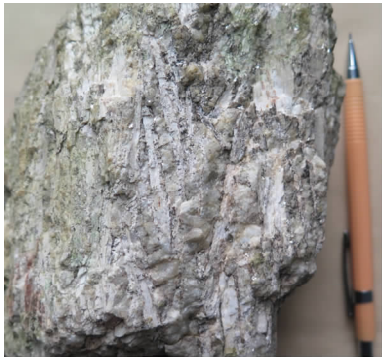
# 应用 X 射线荧光光谱 - 电感耦合等离子体质谱法研究湖南传梓源地区稀有金属矿床伟晶岩地球化学特征

文春华<sup>1</sup>, 罗小亚<sup>1</sup>, 李胜苗<sup>1</sup>, 李建康<sup>2</sup>  
(1. 湖南省地质调查院, 湖南 长沙 410116;  
2. 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

**摘要:** 本文利用 X 射线荧光光谱和电感耦合等离子体质谱分析技术对传梓源地区锂辉石伟晶岩、钠长石伟晶岩和钾长石伟晶岩开展研究, 获得三种类型伟晶岩地球化学特征。锂辉石伟晶岩具高  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (16.23% ~ 16.4%)、高  $\text{K}_2\text{O}$  (3.05% ~ 5.22%) 和高分异指数 ( $\text{DI} = 91.13 \sim 94.9$ ), 微量元素富集 Rb、K 而亏损 Ba、Sr、Ti, 稀土元素含量低 ( $\sum\text{REEs} = 2.9 \times 10^{-6} \sim 3.5 \times 10^{-6}$ ); 钠长石伟晶岩富  $\text{Na}_2\text{O}$  (5.58% ~ 7.41%) 而贫  $\text{K}_2\text{O}$  (0.98% ~ 2.62%), 微量元素 Rb/Sr 值相对于锂辉石伟晶岩呈降低变化而稀土元素为升高变化; 钾长石伟晶岩富  $\text{K}_2\text{O}$  (9.13%) 而贫  $\text{Na}_2\text{O}$  (1.69%), 微量元素 Zr/Hf 和 K/Rb 值相对于锂辉石伟晶岩和钠长石伟晶岩呈升高变化的特征。表明岩浆在演化过程中发生了不混溶作用、钠长石交代作用和钾长石交代作用, 分别形成了 Li、Rb 矿化锂辉石伟晶岩, Nb、Ta、Be 矿化钠长石伟晶岩和无矿化钾长石伟晶岩, 这些地球化学特征是稀有金属矿床找矿地球化学标志。

**关键词:** X 射线荧光光谱法; 电感耦合等离子体质谱法; 传梓源地区稀有金属矿床; 地球化学特征; 锂辉石伟晶岩; 钠长石伟晶岩; 钾长石伟晶岩

**中图分类号:** O657.34; O657.63; P611.12      **文献标识码:** A



传梓源稀有金属矿床位于湖南省平江县城东北 20 km 处, 是一处大型富锂、铌和钽稀有金属伟晶岩型矿床。该地区伟晶岩分布十分广泛且类型复杂, 前人对该地区的花岗岩开展了矿物学研究<sup>[1]</sup>, 对其伟晶岩脉开展了地质特征及成矿规律的研究<sup>[2-3]</sup>, 但在地球化学方面的研究几乎空白。随着科学研究的需要, 现代分析测试技术以及新的地球化学研究方法在地质上得到很好的应用, 如 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测定硅酸盐矿物中的主量元素已成为经典的主量元素分析方法<sup>[4]</sup>, 特别是对测定高铯高钡的硅酸盐样品中主量元素有着很好的应用<sup>[5]</sup>; 电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 是目前公认的最强有力的元素分析技术, 在地质样品稀土、稀散等痕量、超痕量多元素分析方面数据精准、可靠<sup>[6-8]</sup>, 如能精确测定稀有元素锆、铌、钽和稀散元素铬、镓、铟、碲、铊等微量元素<sup>[9-11]</sup>。本文在前人研究的基础上采用 XRF 和 ICP-MS 技术分析传梓源地区锂辉石伟晶岩、钠长石伟晶岩和钾长石伟晶岩样品中的主量和微量元素, 详细剖析了该地区伟晶岩地球化学特征, 并探索不同类型伟晶岩与稀有金属矿化关系, 以期为传梓源地区找矿工作提供参考依据。

## 1 伟晶岩样品选取和采集

传梓源地区伟晶岩数量众多且类型复杂, 分为锂辉石伟晶岩、钠长石伟晶岩和钾长石伟晶岩三种类型。本次实验采集了具代表性新鲜岩石样品 7 件, 分别为: 锂辉石伟晶岩 (锂辉石伟晶岩和含锂辉石伟晶岩) 样品 2 件, 钠长石伟晶岩 (糖粒状钠长石伟晶岩、

白云母-钠长石伟晶岩、含绿柱石钠长石伟晶岩和细粒钠长石伟晶岩)样品 4 件和钾长石伟晶岩(细粒钾长石伟晶岩)样品 1 件。三类样品详细描述如下。

锂辉石伟晶岩:岩石呈灰白色,矿物组成为石英(20%~30%)、白云母(5%~8%)、锂辉石(30%~45%)、钠长石(25%~30%)及其他副矿物。其中石英呈灰色,半自形-他形粒状,粒径一般为 0.4~1.5 cm;白云母呈细片状,片径为 0.7~2 cm;锂辉石呈灰白色,自形-半自形柱状晶形,解理发育;钠长石呈灰白色,自形-半自形短柱状,粒径一般为 0.8~1.5 cm;副矿物见有石榴石等。

钠长石伟晶岩:岩石呈灰白色,矿物组成为钠长石(40%~50%)、石英(30%~40%)、白云母(10%~15%)及少量钾长石(5%~10%)和其他副矿物。其中钠长石呈灰白色,自形-半自形短柱状、糖粒状、叶片状,粒径一般为 2~3.5 cm;石英呈灰白色,半自形-他形粒状,粒径一般为 0.8~3 cm;白云母呈细片状,片径为 1~2.5 cm;副矿物见有浅绿色柱状绿柱石和石榴石等。

钾长石伟晶岩:矿物组成为钾长石(35%~45%)、石英(25%~35%)、白云母(8%~15%)、黑云母(5%~8%)及少量钠长石(5%~10%)和其他副矿物。矿物颗粒均较细,以他形为主,粒径一般为 0.1~0.7 cm。

表 1 传梓源地区伟晶岩的主量元素含量分析结果

Table 1 Analytical data of major elements of pegmatite samples from Chuan-ziyuan deposit by XRF

主量元素	锂辉石伟晶岩含量(%)		钠长石伟晶岩含量(%)				钾长石伟晶岩含量(%)
	PJ-CZY-6-3	PJ-CZY-6-6	PJ-CZY-5-5	PJ-6-2-1	PJ-9-4-2	PJ-9-4-4	PJ-9-5-2
SiO <sub>2</sub>	73.3	71.87	73.1	75	77.3	73.4	73.2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.4	16.23	16.5	15.5	13.4	14.7	14.4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.21	0.12	0.1	0.07	0.34	0.45	0.14
FeO	0.45	0.34	0.31	0.34	0.47	0.45	0.38
CaO	0.19	0.18	0.18	0.16	0.39	0.89	0.24
MgO	0.08	0.06	0.08	0.07	0.09	0.23	0.09
K <sub>2</sub> O	3.05	5.22	2.59	0.99	0.98	2.62	9.13
Na <sub>2</sub> O	4.38	4.93	5.58	7.41	6.29	5.67	1.69
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
MnO	0.24	0.24	0.1	0.12	0.17	0.16	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.08	0.09	0.07	0.04	0.14	0.1	0.15
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	0.34	0.26	0.25	0.24	0.26	0.4	0.14
CO <sub>2</sub>	0.26	0.26	0.39	0.09	0.26	0.43	0.34
Total	98.99	99.81	99.2	100	100	99.5	100
Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	7.43	10.15	8.17	8.4	7.27	8.29	10.8
分异指数(DI)	91.13	94.9	92.6	96.4	95.3	93.6	95.3

2 伟晶岩分析方法和测试结果

2.1 X 射线荧光光谱法分析主量元素

利用 X 射线荧光光谱分析方法对研究区不同类型伟晶岩样品进行测试。分析测试由本文作者在国家地质实验测试中心实验室完成。仪器型号为荷兰帕纳科公司 PANalytical AXIOS 型光谱仪,主要工作条件为:端窗铑靶 X 射线管,SuperQ 软件,4.0 kW 满功率,X 光管最大电压 66 kV,最大电流 125 mA。

主量元素的测试结果见表 1,分析图见图 1a。

2.2 ICP-MS 法分析微量元素和稀有元素

锂辉石伟晶岩、钠长石伟晶岩和钾长石伟晶岩中的微量元素和稀有元素由作者在国家地质实验测试中心实验室采用 TJA X-Series 电感耦合等离子体质谱仪(美国 ThermoFisher 公司)分析。

微量元素和稀有元素的分析结果见表 2,分析图见图 1b、c、d。

3 伟晶岩元素地球化学特征及伟晶岩与矿化关系

3.1 主量元素特征

从表 1 和图 1a 中可以看出,伟晶岩具高 SiO<sub>2</sub>(71.87%~77.3%)、高 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(13.4%~16.5%)和高碱(Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O=7.27%~10.8%),低 MnO、CaO、MgO、TiO<sub>2</sub>、FeO 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,其含量均小于 1%。

表2 传梓源地区伟晶岩的微量元素和稀有元素含量分析结果

Table 2 Analytical data of trace elements and rare metal elements of pegmatite samples from Chuan-ziyuan deposit by ICP-MS

微量元素和稀有元素	锂辉石伟晶岩 (含量×10 <sup>-6</sup> )		钠长石伟晶岩 (含量×10 <sup>-6</sup> )				钾长石伟晶岩 (含量×10 <sup>-6</sup> )
	PJ-CZY-6-3	PJ-CZY-6-6	PJ-CZY-5-5	PJ-6-2-1	PJ-9-4-2	PJ-9-4-4	PJ-9-5-2
ΣREEs	3.5	2.9	14.36	2.88	10.96	78.52	4.27
LREEs	2.85	2.33	13.73	1.8	8.43	73.93	3.15
HREEs	0.65	0.57	0.63	1.08	2.53	4.59	1.12
LREEs/HREEs	4.4	4.1	21.8	1.7	3.3	16.1	2.8
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.7	8.3	24.4	2.2	3.5	27.6	3.9
δEu	1.1	1.0	0.8	0.8	0.6	0.9	0.8
K/Rb	31.6	34.4	23.9	40.5	60.7	70.8	259.6
Rb/Sr	65.6	86.8	70.2	17.2	9.6	7.8	14.1
Zr/Hf	15.4	10.2	7.9	10.6	16.7	14.4	22.6
Li	1211	189	1036	106	61.5	66.4	26
Be	134	98.9	131	109	435	20.9	4.35
Rb	800	1259	899	203	134	307	292
Nb	15.5	26.8	101	58.7	11.9	17.3	2.32
Ta	3.28	11.4	66.8	22.2	4.19	5.08	0.66

总体表现为基性元素(Fe、Mg、Ca)减少,而碱性元素(Al、Na)增加,与前人的研究结果类似<sup>[12-14]</sup>。分异指数DI(91.13~96.4)高,表明岩浆发生了高程度分异演化作用。锂辉石伟晶岩、钠长石伟晶岩和钾长石伟晶岩的主量元素存在区别,其中锂辉石伟晶岩具高Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(16.23%~16.4%)和高K<sub>2</sub>O(3.05%~5.22%)的特征;钠长石伟晶岩富Na<sub>2</sub>O(5.58%~7.41%)和而贫K<sub>2</sub>O(0.98%~2.62%),Na<sub>2</sub>O的升高可能与钠长石化作用相关;钾长石伟晶岩富K<sub>2</sub>O(9.13%)而贫Na<sub>2</sub>O(1.69%),K<sub>2</sub>O的突然升高推测与钾长石交代作用相关。

3.2 微量元素特征

微量元素原始地幔标准化蛛网图(图1c)显示:锂辉石伟晶岩、钠长石伟晶岩和钾长石伟晶岩微量元素整体呈现右倾模式,碱性元素Rb、K明显富集,而高场强元素Ba、Sr、Ti等均强烈亏损,这些特征与新疆阿尔泰地区高纯石英伟晶岩<sup>[15]</sup>和可可托海3号伟晶岩<sup>[14]</sup>相类似。Ba和Sr元素亏损推测与斜长石的结晶分异作用有关,Ti亏损推测与钛铁矿结晶分异作用有关。图1c显示钾长石伟晶岩微量元素Ta、Nb和Zr明显降低,K明显升高,Zr/Hf和K/Rb比值表现为升高变化。这种微量元素变化特征反映出岩浆后期流体演化过程中发生了钾长石交代作用,导致了亲岩浆元素Ta、Nb和Zr强烈亏损,而K强烈富集形成钾长石伟晶岩。

从图1d和表2看出伟晶岩总稀土含量较低(ΣREEs=2.88×10<sup>-6</sup>~78.52×10<sup>-6</sup>),LREEs/HREEs值为1.7~16.1,轻重稀土分馏作用明显,δEu

(0.6~1.1)显示为弱负异常,这些特征与东秦岭花岗伟晶岩相类似<sup>[16]</sup>,表明岩浆演化过程由偏基性向碱性演化,稀土元素是逐渐减少的。但是钠长石伟晶岩稀土元素明显增高(图1d),表明稀土元素变化与钠长石化相关,钠长石交代作用导致Rb/Sr比呈降低变化,并且对稀土元素具搬运作用而逐渐富集。

3.3 稀有元素特征

从表2和图1b中可以看出,不同类型伟晶岩中稀有元素含量变化较大。其中,锂辉石伟晶岩富集Li(189×10<sup>-6</sup>~1211×10<sup>-6</sup>)和Rb(800×10<sup>-6</sup>~1259×10<sup>-6</sup>),糖粒状钠长石和白云母钠长石伟晶岩富集Nb(58.7×10<sup>-6</sup>~101×10<sup>-6</sup>)和Ta(22.2×10<sup>-6</sup>~66.8×10<sup>-6</sup>),含绿柱石钠长石伟晶岩富集Be(435×10<sup>-6</sup>),细粒钠长石伟晶岩和细粒钾长石伟晶岩中稀有元素较低。反映出Li和Rb趋向于锂辉石伟晶岩中富集,Nb、Ta和Be趋向于钠长石伟晶岩中富集,而稀有金属元素在钾长石伟晶岩中含量呈明显降低变化趋势。

3.4 伟晶岩类型与矿化关系

前人研究认为伟晶岩中稀有金属元素是通过岩浆结晶分异过程逐渐富集<sup>[18-19]</sup>。由于伟晶岩富含水等挥发份,对稀有金属具亲和力<sup>[20]</sup>并能够与稀有金属组成各类络合物,携带成矿元素一起迁移和富集。在岩浆向上侵位过程中,挥发份与稀有金属络合物快速迁移至岩体顶部逐渐富集,随温度下降,岩浆不混溶作用导致了Na、Li与K的分离<sup>[21]</sup>,由于挥发份的存在降低了岩浆结晶速度,形成晶体较好的锂辉石伟晶岩,同时形成了Li、Rb矿化。

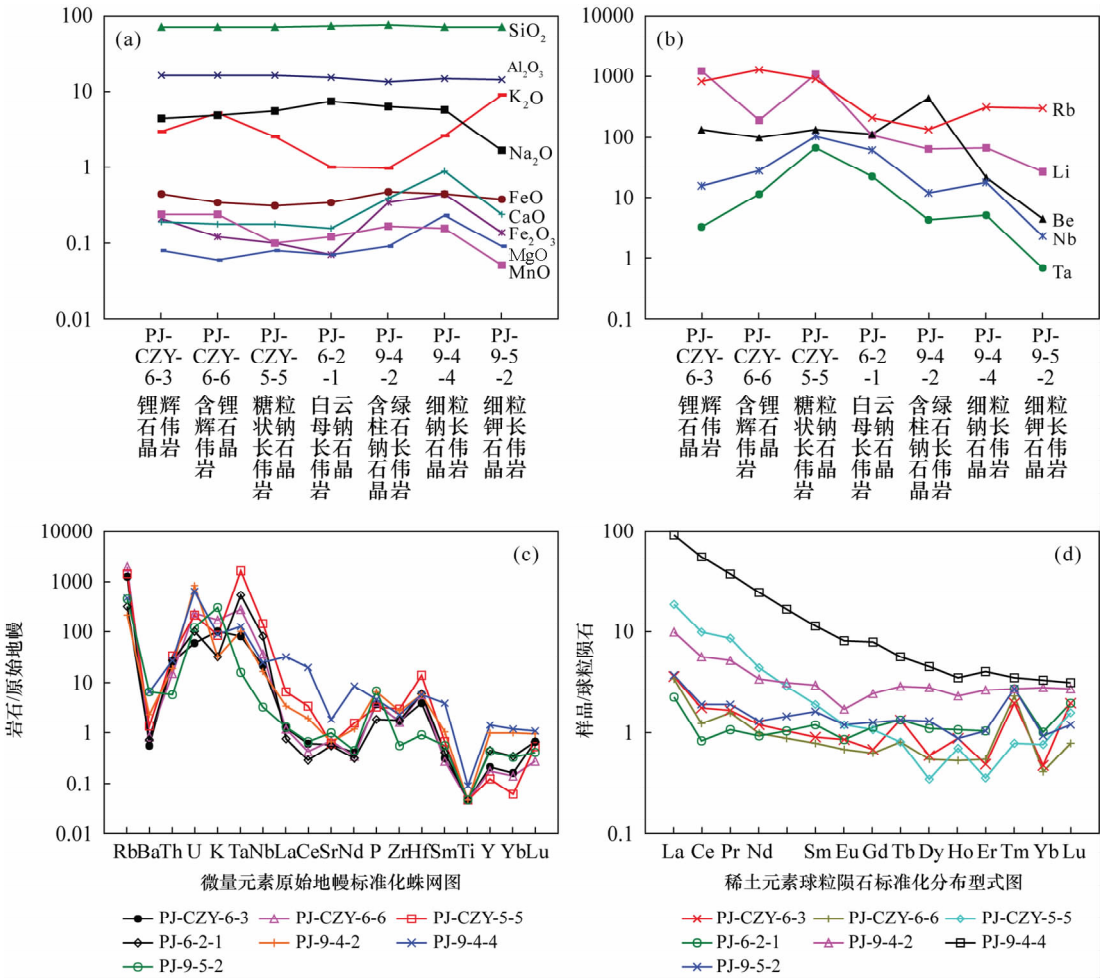


图 1 传梓源地区代表性样品主量元素(a)、稀有元素含量变化(b)及微量元素蛛网图(c)和稀土配分图(d),其中 c、d 标准值据 Sun and McDonough,1989<sup>[17]</sup>

Fig.1 Major elements (a), rare metal elements diagram (b), primitivemantle (PM) normalized spidergrams (c) and chondrite-normalized REE patterns (d) for representative samples from Chuan-ziyuan area (the chondrite and primitive mantle values after Sun and McDonough,1989<sup>[17]</sup>)

钽、铌矿化与高度分异演化的钠长石花岗岩或钠长石化作用密切相关<sup>[22-23]</sup>,实验模拟也表明钠长石中 Nb、Ta 含量最高<sup>[24]</sup>。上述地球化学特征表明传梓源地区伟晶岩钠长石交代作用较强,并且伟晶岩自身的分异作用程度是稀有元素矿化的决定因素。如结晶较好的糖粒状伟晶岩、白云母-钠长石伟晶岩和含绿柱石钠长石伟晶岩形成了 Nb、Ta 和 Be 矿化,而结晶差的细粒钠长石伟晶岩矿化程度明显降低。

从上述实验数据分析来看(表 2 和图 1b),钾长石伟晶岩中稀有金属含量明显较低,表明稀有金属在岩浆演化过程到钾长石化伟晶岩阶段,矿化终止。

伟晶岩类型对稀有元素矿化有控制作用,二者有明显的依存关系,如 Li 和 Rb 矿化与锂辉石伟晶

岩相关,Nb、Ta 和 Be 矿化与钠长石伟晶岩密切相关,而钾长石伟晶岩与矿化无关。这些特征可以用作在传梓源地区寻找稀有金属矿化伟晶岩的标志。

4 结论

本文采用 XRF、ICP-MS 分析技术对传梓源地区锂辉石伟晶岩、钠长石伟晶岩、钾长石伟晶岩开展了主量、微量和稀有元素地球化学研究,结果表明在岩浆演化过程中稀有金属在不同的地球化学条件下富集。其中锂辉石伟晶岩中稀有金属是岩浆后期不混溶作用促进了 Li 和 Rb 在锂辉石伟晶岩中高度富集;钠长石化过程中,Nb、Ta 和 Be 在钠长石伟晶岩中富集;钾长石交代作用过程中,稀有元素含量明显降低。

本次研究从地球化学角度对传梓源地区不同类型伟晶岩的主量、微量和稀有元素进行了初步探讨,既是对传梓源地区稀有金属伟晶岩地球化学研究资料的补充,也是为下一步开展成矿物质来源、成矿流体演化等方面关系的研究提供思路 and 基础数据。

5 参考文献

[1] 邹慧娟,马昌前,王连训.湘东北幕阜山含绿帘石花岗岩闪长岩岩浆的上升速率:岩相学和矿物化学证据[J].地质学报,2011,85(3):366-378.  
Zou H J, Ma C Q, Wang L X. A Magma Ascent Rate of Epidote-bearing Granodioritic Magma in the Mufushan Complex Batholith of NE Hunan Province: Evidence from Petrography and Mineral Chemistry [J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(3): 366-378.

[2] 谢文安,申志军,谢玲琳.湖南省稀有稀土贵金属矿床特征与成矿规律[J].地质与勘探,1996,32(4):19-25.  
Xie W A, Shen Z J, Xie L L. Characteristics and Metallogenic Pattern of Rare Metal, Rare-earth Metal and Precious Metal Deposit [J]. Geology and Prospecting, 1996, 32(4): 19-25.

[3] 申志军,谢玲琳,权正钰.湖南省主要稀有稀土金属矿床特征[J].湖南地质,2003,22(1):30-33.  
Shen Z J, Xie L L, Quan Z Y. Characters of Main Rare Metal and Re Deposits in Hunan Province [J]. Hunan Geology, 2003, 22(1): 30-33.

[4] 罗立强,梁国立,马光祖,等.地质样品中岩性自动分类X射线荧光光谱分析研究[J].分析科学学报,1996,12(3):189-193.  
Luo L Q, Liang G L, Ma G Z, et al. X-ray Fluorescence Analysis Arranging Geological Samples under Automatically Categories [J]. Journal of Analytical Science, 1996, 12(3): 189-193.

[5] 李迎春,周伟,王健,等.X射线荧光光谱法测定高铈高钡的硅酸盐样品中主量元素[J].岩矿测试,2013,32(2):249-253.  
Li Y C, Zhou W, Wang J, et al. Determination of Major Elements in Silicate Samples with High Content Strontium and Barium by X-ray Fluorescence Spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(2): 249-253.

[6] 李冰,杨红霞.电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)技术在地学研究中的应用[J].地学前缘,2003,10(2):367-378.  
Li B, Yang H X. Applications of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry in Earth Science [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(2): 367-378.

[7] 王君玉,吴葆存,李志伟,等.敞口酸溶-电感耦合等离子体质谱法同时测定地质样品中45个元素[J].岩矿测试,2011,30(4):440-445.  
Wang J Y, Wu B C, Li Z W, et al. Determination of Elemental Content in Geological Samples by One-time Acid Dissolution and Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2011, 30(4): 440-445.

[8] 张保科,温宏利,王蕾,等.封闭压力酸溶-盐酸提取-电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中的多元素[J].岩矿测试,2011,30(6):737-744.  
Zhang B K, Wen H L, Wang L, et al. Quantification of Multi Elements in Geological Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry with Pressurized Decomposition-Hydrochloric Acid Extraction [J]. Rock and Mineral Analysis, 2011, 30(6): 737-744.

[9] 时晓露,刘洪青,孙月婷,等.电感耦合等离子体质谱法测定岩石样品中的锆铌钽两种预处理方法的比较[J].岩矿测试,2009,28(5):427-430.  
Shi X L, Liu H Q, Sun Y T, et al. Comparison of Two Different Sample Pretreatment Methods in Determination of Zr, Nb, Hf, Ta in Rocks by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(5): 427-430.

[10] 李国榕,王亚平,孙元方,等.电感耦合等离子体质谱法测定地质样品中稀散元素铬镓铟碲[J].岩矿测试,2010,29(3):255-258.  
Li G R, Wang Y P, Sun Y Y, et al. Determination of Cr, Ga, In, Te and Tl in Geological Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(3): 255-258.

[11] 高贺凤,王超,张立纲.电感耦合等离子体质谱法精确测定地质样品中的微量元素镓[J].岩矿测试,2013,32(5):709-714.  
Gao H F, Wang C, Zhang L G, et al. Accurate Determination of Trace Gallium in Geological Samples by Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2013, 32(5): 709-714.

[12] 肖朝阳.平江瑚佩伟晶岩型铌钽矿床地质特征及成因[J].华南地质与矿产,2003,61(2):63-67.  
Xiao C Y. Characteristics and Genesis of Hupei Pegmatite Nb-Ta Deposit in Pingjiang, Hunan [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2003, 61(2): 63-67.

[13] 周建廷,王小颖,李自敏,等.江西省广昌县头陂花岗岩伟晶岩型锂辉石矿矿床地质特征及其成矿机制探讨[J].东华理工大学学报(自然科学版),2012,35(4):378-387.

- Zhou J T, Wang X Y, Li Z M, et al. Geological Characteristics and Metallogenic Mechanism of the Toupai Granitic Pegmatite Type Spodumene Deposit in Guangchang County Jiangxi Province[J]. Journal of East China Institute of Technology (Natural Sciences), 2012, 35(4): 378–387.
- [14] 冷成彪,王守旭,苟体忠,等. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉研究[J]. 华南地质与矿产, 2007, 13(1): 14–21.
- Leng C B, Wang S X, Gou T Z, et al. A Review of the Research on the Koktokay No. 3 Granitic Pegmatite Dyke, Altai, Xinjiang [J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2007, 13(1): 14–21.
- [15] 张晔,陈培荣. 美国 Spruce Pine 与新疆阿尔泰地区高纯石英伟晶岩的对比研究[J]. 高校地质学报, 2010, 16(4): 426–435.
- Zhang Y, Chen P R. Characteristics of Granitic Pegmatite with High-purity Quartz in Spruce Pine Region, USA and Altay Region of Xinjiang, China [J]. Geological Journal of China Universities, 2010, 16(4): 426–435.
- [16] 卢欣祥,祝朝辉,谷德敏,等. 东秦岭花岗岩伟晶岩的基本地质矿化特征[J]. 地质论评, 2010, 56(1): 21–30.
- Lu X X, Zhu C H, Gu D M, et al. The Main Geological and Metallogenic Characteristics of Granitic Pegmatite in Eastern Qinling Belt [J]. Geological Review, 2010, 56(1): 21–30.
- [17] Sun S S, McDonough W F. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [M]//Saunders A D, Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. London: Geological Society, 1989: 313–345.
- [18] Zhu J C, Li R K, Li F C, et al. Topaz-albite Granites and Rare-metal Mineralization in the Limu District, Guangxi Province, Southeast China [J]. Mineralium Desposita, 2001, 36(5): 393–405.
- [19] Evensen J M, London D. Experimental Silicate Mineral/Melt Partition Coefficients for Beryllium, and the Beryllium Cycle from Migmatite to Pegmatite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2002, 66(12): 2239–2265.
- [20] Thomas R, Forster H, Rickers K, et al. Formation of Extremely F-rich Hydrous Melt Fractions and Hydrothermal Fluid during Differentiation of Highly Evolved Tin-granite Magmas: A Melt/Fluid-inclusion Study [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2005, 148(5): 582–601.
- [21] 王联魁,王慧芬,黄智龙. Li–F 花岗岩液态分离的微量元素地球化学标志[J]. 岩石学报, 2000, 16(2): 145–152.
- Wang L K, Wang H F, Huang Z L. Geochemical Indicators of Trace Element in Li-F Granite Liquid Segregation [J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(2): 145–152.
- [22] 陈骏,陆建军,陈卫锋,等. 南岭地区钨锡铌钽花岗岩及其成矿作用[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 459–473.
- Chen J, Lu J J, Chen W F, et al. W-Sn-Nb-Ta-bearing Granites in the Nanling Range and Their Relationship to Metallogenesis [J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(4): 459–473.
- [23] 陈国建. 福建南平花岗伟晶岩型钽铌矿床地质特征与成因[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1550–1561.
- Chen G J. Geological Characteristics and Genesis of the Nanping Granitic Pegmatite Type Ta-Nb Deposit, Fujian Province [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(10): 1550–1561.
- [24] 赵劲松,赵斌,饶冰. 初论铌、钽和钨的成矿作用: 实验研究[J]. 地球化学, 1996, 25(3): 286–295.
- Zhao J S, Zhao B, Rao B. A Preliminary Experimental Study on Mineralization of Nb, Ta, and W [J]. Geochimica, 1996, 25(3): 286–295.

# Application of X-ray Fluorescence Spectrometry and Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry in the Geochemical Study of Rare Metal Deposits in Chuan-ziyuan Area, Hunan Province

WEN Chun-hua<sup>1</sup>, LUO Xiao-ya<sup>1</sup>, LI Sheng-miao<sup>1</sup>, LI Jian-kang<sup>2</sup>

- (1. Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, China;
- 2. Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of Land and Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

**Abstract:** X-ray Fluorescence Spectrometry (XRF) and Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) were used to obtain the geochemical data of podumene pegmatite, albite pegmatite and potash feldspar pegmatite in the Chuan-ziyuan area. Podumene pegmatite contains high  $Al_2O_3$  (16.23% – 16.4%) and  $K_2O$  (3.05% – 5.22%) with high differentiation index (91.13 – 94.9). Podumene pegmatite is enriched in Rb and K but depleted in Ba, Sr and Ti with  $\Sigma REEs$  of  $2.9 \times 10^{-6}$  –  $3.5 \times 10^{-6}$ . Albite pegmatite is characterized by high  $Na_2O$  (5.58% – 7.41%) and low  $K_2O$  (0.98% – 2.62%). Compared to podumene pegmatite, the Rb/Sr ratios of albite pegmatite decreased and REEs increased. Potash feldspar pegmatite contains high  $K_2O$  (9.13%) and low  $Na_2O$  (1.69%), the Zr/Hf and K/Rb ratios increased compared to podumene pegmatite and albite pegmatite. The geochemical characteristics of these rocks indicate that liquid immiscibility, albitization metasomatism and potash feldspathization metasomatism resulted in Li and Rb mineralization in podumene pegmatite, Nb, Ta and Be mineralization in albite pegmatite and potash feldspar pegmatite, respectively. These observations are geochemical indicators for exploration of the rare metal deposits.

**Key words:** X-ray Fluorescence Spectrometry; Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry; rare metal deposit of Chuan-ziyuan area; geochemical characteristics; spodumene pegmatite; albite pegmatite; potash feldspar pegmatite