文章编号：0258-7106（2019）05-1069-8 Doi: 10. 16111/j. 0258-7106. 2019. 05. 008

幕阜山西南缘黄柏山稀有金属伟晶岩密集区的发现及意义*

李 鹏[1]，李建康[1**]，张立平[2]，黄志飚[2]，刘 翔[3]，周芳春[2]，曾 乐[2]
（1 中国地质科学院矿产资源研究所 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室，北京 100037；2 湖南省核工业地质局三一一大队，湖南 长沙 410100；3 湖南省核工业地质局，湖南 长沙 410011）

摘 要 幕阜山地区是中国重要的稀有金属矿集区。中国地质科学院矿产资源研究所与湖南省核工业地质局三一一大队在总结区域稀有金属成矿规律的基础上，于2019年度在幕阜山西南缘黄柏山地区新发现稀有金属伟晶岩密集区一处。区内伟晶岩呈现出良好的铌钽锂成矿性，易于开采、分选及运输，具有较高的经济价值。区域伟晶岩具较高的岩浆分异演化程度，且呈现出较为清晰的稀有金属矿化分带，具有良好的成矿潜力。

关键词 地球化学；稀有金属；花岗伟晶岩；找矿发现；黄柏山；幕阜山
中图分类号：P618.71; P618.79; P618.86 **文献标志码**：A

Discovery and significance of Huangbaishan rare metal pegmatite concentration area on southern margin of Mufushan

LI Peng[1], LI JianKang[1], ZHANG LiPing[2], HUNAG ZhiBiao[2], LIU Xiang[3], ZHOU FangChun[2] and ZENG Le[2]
(1 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 No. 311 Geological Party of Hunan Nuclear Geology, Changsha 410100, Hunan, China; 3 Hunan Nuclear Geology, Changsha 410011, Hunan, China)

Abstract

Mufushan is an important rare metal concentration area in China. On the basis of summarizing the regional rare metal metallogenic regularity, the Institute of Mineral Resources of the Chinese Academy of Geological Sciences and the No. 311 Geological Party of Hunan Nuclear Geology discovered a new rare metal pegmatite concentration area in Huangbaishan area on the southern margin of Mufushan in 2019. Pegmatites show obvious Nb, Ta and Li mineralization, and are easy to be mined, sorted and transported, thus having high economic value. Regional pegmatites have experienced high degree of magmatic differentiation and evolution and show clear rare metal mineralization zoning, thus having good ore-prospecting potential.

Key words: geochemistry, rare metal, granitic pegmatite, prospecting finding, Huangbaishan, Mufushan

位于湘鄂赣三省交界的幕阜山地区，地处长江经济带的核心部位，是中国东部极具经济价值和战略意义的稀有金属矿集区，近年来在其南缘取得重大找矿突破，新发现仁里花岗伟晶岩型超大型铌钽矿床（刘翔等，2018）。作为中国少有的成矿性良好的大型复式岩基，幕阜山是由同源的多个单一侵入

* 本文得到国家自然科学基金面上项目(编号：41872096)、国家重点研发计划(编号：2017YFC0602701)、中央级公益性科研院所基本科研业务费(编号：JYYWF201814)、湖南省核工业地质局科研基金(编号：KY2016-311-01)和湖南省国土资源厅科研项目(编号：2018-02)联合资助
第一作者简介 李 鹏，男，1988年生，博士，助理研究员，研究方向为稀有金属成矿。Email: Lipeng031111@163.com
** 通讯作者 李建康，男，1976年生，研究员，博士生导师，研究方向为稀有金属成矿。Email: Li9968@126.com
收稿日期 2019-08-28；改回日期 2019-09-08。秦思婷编辑。

体先后相继侵位构成的“体中体”模式复式岩基。区域显示出完整的岩浆分异演化序列及典型的稀有金属矿化分带性，李鹏等(2017)将区域岩浆演化与稀有金属成矿规律总结为：由东北向西南岩浆岩年龄由古至新，岩浆分异演化程度逐渐增高，稀有金属矿化种类显示出由单一的铍矿化向铍铌钽锂铯综合演化的变化趋势，成矿规模也逐渐变大。幕阜山岩体的西南部，距岩体超过 9 km 仍有锂伟晶岩脉出现。

在总结此规律的基础上，李鹏(2017)提出幕阜山复式岩基西南缘具有较大找矿潜力。2019年，中国地质科学院矿产资源研究所与湖南省核工业地质局三一一大队加大对幕阜山西南缘投入工作，在黄柏山地区新发现稀有金属伟晶岩密集区一处(图1a)，初步圈定伟晶岩脉9条，已鉴定出1条高品位锂伟晶岩脉和2条铌钽伟晶岩脉(图1b)。经查区域地质资料中未见相关记载，且黄柏山地区尚未有发现稀有金属伟晶岩脉的报道，本文是对此新发现的首次报道。

1 矿床地质特征

黄柏山稀有金属伟晶岩密集区位于湘北平江县，幕阜山岩体西南外接触带云母片岩内，距接触带约 1.2 km，东部临近仁里超大型铌钽矿床(图1a)。区域出露岩浆岩主要包括北部幕阜山复式花岗岩基以及西南部梅仙花岗岩体，地层属新元古代冷家溪群第四岩组，主要由深灰色绢云母片岩、(含石榴子

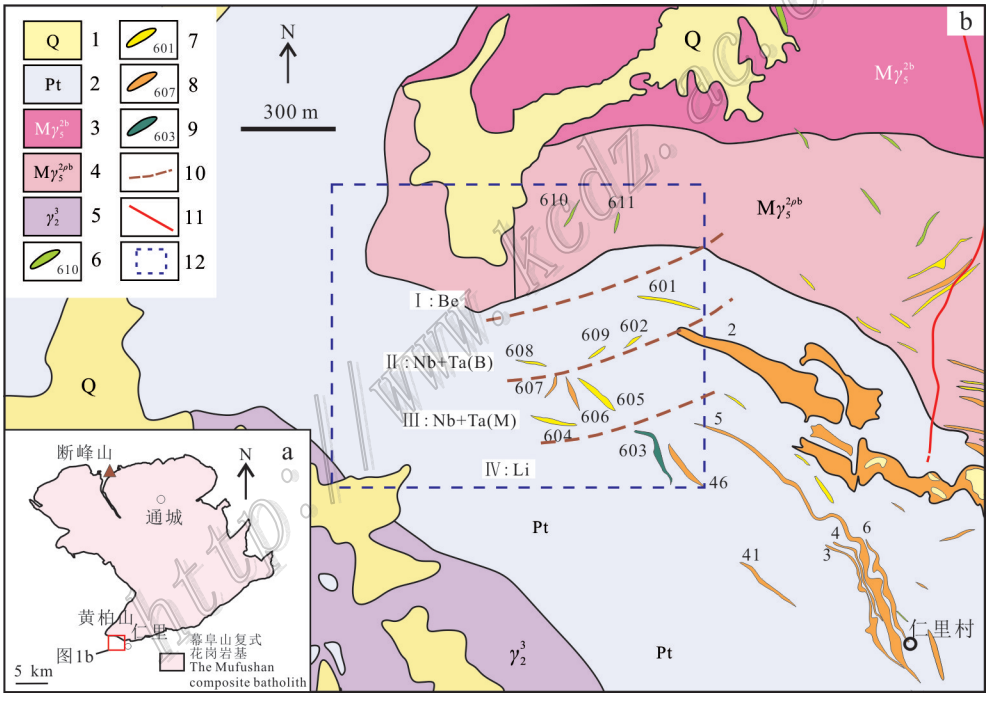


图1 湘北平江县黄柏山稀有金属伟晶岩密集区位置(a)和区域地质简图(b)

1—第四系；2—冷家溪群；3—粗中粒似斑状黑云母二长花岗岩；4—粗中粒片麻状黑云母二长花岗岩；5—新元古代二云母斜长花岗岩；6—含绿柱石微斜长石钠长石伟晶岩及编号；7—含铌钽铁矿钠长石伟晶岩及编号；8—铌钽矿化钠长石伟晶岩及编号；9—锂辉石钠长石伟晶岩及编号；10—伟晶岩类型初步分带：Ⅰ—铍伟晶岩；Ⅱ—含铌钽伟晶岩；Ⅲ—铌钽矿化伟晶岩；Ⅳ—锂伟晶岩；11—主要断裂；12—黄柏山稀有金属伟晶岩密集区范围

Fig. 1 Location (a) and geological map (b) of the Huangbaishan rare metal pegmatite concentration area

1—Quaternary alluvium; 2—Lengjiaxi Group; 3—Medium-grained porphyritic biotite monzogranite; 4—Medium-grained gneissic biotite monzogranite; 5—Neoproterozoic two-mica plagioclase granite; 6—Beryl-bearing microcline albite pegmatite and its serial number; 7—Columbite-tantalite bearing albite pegmatite and its serial number; 8—Nb-Ta mineralized albite pegmatite and its serial number; 9—Spodumene albite pegmatite and its serial number; 10—Pegmatite type zoning: Ⅰ—Be pegmatite; Ⅱ—Nb-Ta bearing pegmatite; Ⅲ—Nb-Ta mineralization pegmatite; Ⅳ—Li pegmatite; 11—Main faults; 12—The Huangbaishan rare metal pegmatite concentration area

石)二云母片岩及局部粉砂质板岩组成,倾向210°~250°,倾角30°~45°。黄柏山压扭性断裂位于伟晶岩密集区东侧约1 km处。

在黄柏山稀有金属伟晶岩密集区的初步踏勘工作圈定了11条花岗伟晶岩脉(图1b,脉体601~脉体611),其中,603号脉为锂辉石钠长石伟晶岩,606号和607号脉为含铌钽铁矿钠长石伟晶岩。603号锂伟晶岩地表出露长度约200 m,走向北西,局部走向近南北向,倾向西南,倾角约32°~80°。矿脉呈透镜状产出,最宽处的宽度大于10 m。该伟晶岩脉沿走向具有分带现象,脉体膨胀部位主要岩性为锂辉石钠长石伟晶岩,约占伟晶岩脉的50%,两边分别为铌钽矿化叶片状钠长石伟晶岩带以及白云母钠长石伟晶岩带(图2a)。其中,锂辉石钠长石伟晶岩带延伸超过80 m,宽度6~15 m,地表出露最大真厚度超过2.5 m(图2b, 图3a),表面一层厚度约0.5~1.0 cm具风化、蚀变,而内部新鲜的岩石未见明显蚀变(图3b)。矿物组合为锂辉石、石英、钠长石、白云母,可见石榴子石等副矿物;锂辉石,白色,呈长条状,未见腐锂辉石化,晶体大小为(5~10)cm×(1~2)cm,常垂直接触面平行排列,矿物含量可达40%~60%,为高品质矿石(图3c)。606和607号铌钽伟晶岩产状分别为216°∠32°、323°∠60°,宽度0.8~1.5 m,长度尚未探明,肉眼可见较多针状、板状铌钽铁矿晶体,其中最大晶体可达3.5 mm×6.0 mm(图3d)。

2　样品采集及测试方法

本次研究在地质剖面HXP-1中,对603号锂伟晶岩脉露头内部新鲜岩石样品进行了刻槽采样,刻槽沿垂直脉体真厚度方向,宽15 cm,深4~5 cm,总长2.3 m(图3a)。由于锂辉石在伟晶岩中分布具有一定的随机性,故沿刻槽采集了5件样品(编号:HXP-tc1~HXP-tc5),每个样品长40~50 cm,使测试结果尽可能排除随机性。锂辉石钠长石伟晶岩样品主要由锂辉石(含量40%)、钠长石(含量35%)、石英(含量15%)、白云母(含量7%)和石榴子石(含量3%)组成,其中,锂辉石呈长柱状垂直脉体与围岩接触带平行排列(图3b)。在显微镜下,锂辉石具平行长轴方向一组解理(图4a),正交偏光下干涉色呈浅黄色-淡紫色,部分晶体具程度不一的碎裂化(图4b),晶体边部及内部裂隙可见轻微绢云母化。在BSE图像中,可见锂辉石裂隙中有钠长石贯入(图4c),局部分布溶蚀状石英颗粒(图4d),表明锂辉石伟晶岩形成后,还经历了后期弱强度的钠长石化和硅化。

HXP-tc1~HXP-tc5五个刻槽样品的主量、微量及稀土元素分析由核工业二三〇研究所完成测试分析,主量元素分析采用X射线荧光光谱仪(PW4400),执行标准为GB/T 14506.28-2010;微量元素及稀土元素分析采用等离子体质谱仪(PE300Q),执行标准为GB/T 14506.30-2010。

锂辉石伟晶岩样品电子探针测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成,仪器型号为JXA-8230,加速电压15 kV,电流20 nA,束斑直径5 μm或1 μm,标样采用天然矿物或合成金属氧化物国家标准,检出限约为0.01%。数据采用ZAF方法(Armstrong,

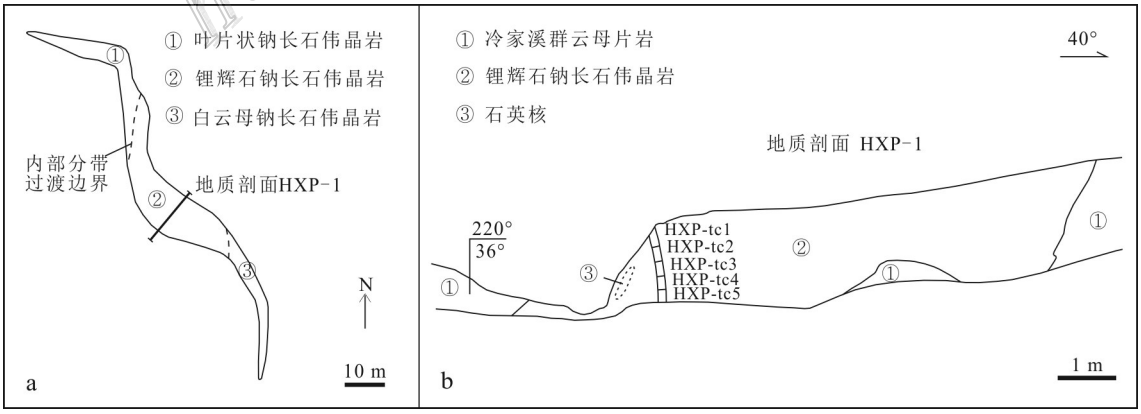


图2　黄柏山603号脉平面示意图(a)及剖面HXP-1素描图(b)

Fig. 2　Sketch map of the Huangbaishan No. 603 pegmatite (a) and section HXP-1 (b)

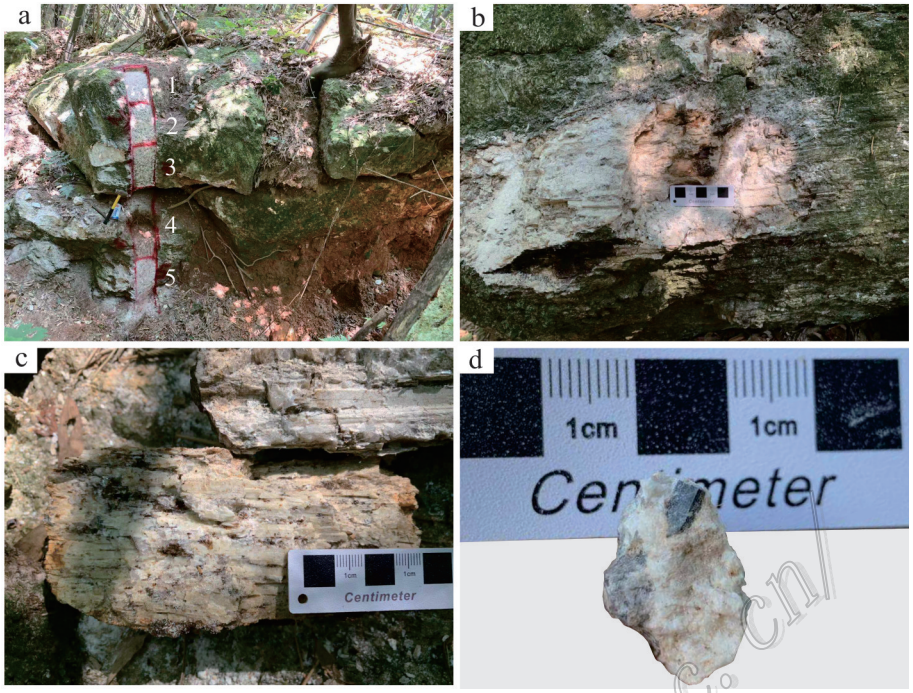


图3 黄柏山稀有金属伟晶岩密集区野外照片

a. 603号锂伟晶岩脉露头及刻槽采样位置(数字1~5对应刻槽样品HXP-tc1~HXP-tc5);b. 603号锂伟晶岩中锂辉石定向排列;c. 603号锂伟晶岩样品锂辉石含量可达60%;d. 606号铌钽伟晶岩中板状铌钽铁矿

Fig. 3 Field photos of the Huangbaishan rare metal pegmatite concentration area

a. Outcrop and sampling location of the No.603 pegmatite (numbers 1~5 correspond to groove samples HXP-tc1~HXP-tc5); b. Directional arrangement of spodumene in the No.603 pegmatite; c. The spodumene content reaching to 60%; d. Tabular columbite-tantalite in the No.606 pegmatite

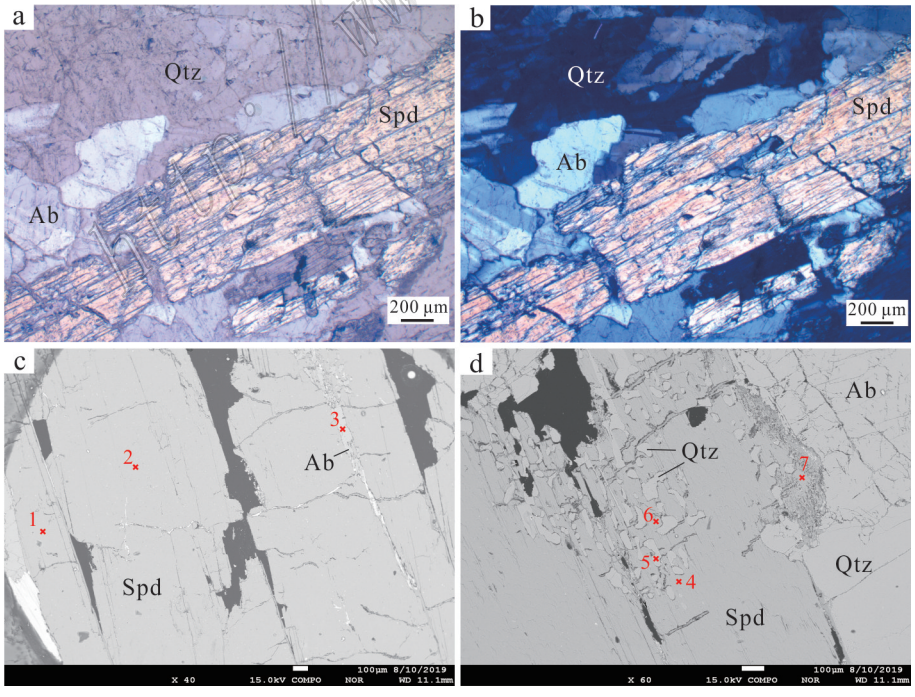


图4 黄柏山锂辉石伟晶岩显微镜下及BSE照片("×"号及数字表示电子探针分析的位置及编号)

a. 锂辉石伟晶岩显微镜单偏光照片;b. 锂辉石伟晶岩显微镜正交偏光照片;c. 锂辉石中沿裂隙充填的钠长石细脉(BSE图像);
d. 锂辉石中溶蚀状石英颗粒(BSE图像)
Qtz—石英;Ab—钠长石;Spd—锂辉石

Fig. 4　Photomicrographs and BSE images of the Huangbaishan rare metal pegmatite concentration area
(the sign "×" and number stand for the location and number of electron microprobe analysis)
a. Photomicrographs of spodumene albite pegmatite (plainlight); b. Photomicrographs of spodumene albite pegmatite (crossed nicols);
c. Albite veins in spodumene (BSE images); d. Dissolution quartz particles in spodumene (BSE images)
Qtz—Quartz; Ab—Albite; Spd—Spodumene

1995)校正。其中,锂辉石中$w(Li_2O)$根据化学计量法计算获得,计算过程详见王濮等(1982)。

3　测试结果

黄柏山稀有金属伟晶岩密集区锂辉石钠长石伟晶岩(603号脉)刻槽样品全岩地球化学分析结果见表1。测试结果显示,5个刻槽样品的$w(Li)$为3780×10^{-6}~8027×10^{-6}(平均值6421×10^{-6}),均超过花岗伟晶岩型矿床中锂最低工业品位(邵厥年等, 2010);5个刻槽样品的$w(Be)$为91×10^{-6}~1636×10^{-6}(平均值452×10^{-6}),已达到花岗伟晶岩型矿床中铍最低工业品位(邵厥年等, 2010)。铌钽含量相对较低,未达到矿化。刻槽样品的锂含量与野外根据锂辉石矿物含量预估的锂品位接近,表明黄柏山603号脉中锂辉石较为新鲜,后期经风化淋滤导致Li流失的现象不明显,但仍需结合微区矿物分析进一步验证。

本次研究通过电子探针分析,对黄柏山锂辉石

表1　黄柏山锂辉石钠长石伟晶岩样品微量、稀土元素分析结果

Table 1　Trace and rare earth elements composition of the Huangbaishan spodumene albite pegmatite

组分	$w(B)/10^{-6}$					组分	$w(B)/10^{-6}$				
	HXP-tc1	HXP-tc2	HXP-tc3	HXP-tc4	HXP-tc5		HXP-tc1	HXP-tc2	HXP-tc3	HXP-tc4	HXP-tc5
Li	6440	6720	3780	8027	7140	Sb	0.41	0.09	0.1	0.09	0.11
Be	225	117	191	1636	91.1	Cs	39.5	31	60.8	101	50.1
Nb	13.2	14.9	31.7	20.4	18.9	Ba	13.3	6.67	6.19	6.37	7.81
Ta	7.99	6.91	20.7	17.5	13.5	La	1.3	0.97	0.62	0.5	0.38
Sc	0.43	0.32	0.26	0.32	0.34	Ce	2	1.19	0.56	0.63	0.52
Ti	106	36.5	33.6	25.2	26.6	Pr	0.22	0.12	0.08	0.07	0.05
V	2.53	0.57	0.68	0.64	0.61	Nd	0.77	0.42	0.27	0.23	0.16
Cr	28.4	11.9	21.4	17.4	26.5	Sm	0.14	0.07	0.05	<0.05	<0.05
Mn	1168	701	664	675	743	Eu	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Co	1.82	2.33	0.75	0.94	1.07	Gd	0.12	0.07	<0.05	<0.05	<0.05
Ni	2.55	1.75	1.53	1.28	1.46	Tb	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Cu	4.86	4.08	2.89	3.42	3.1	Dy	0.11	0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Zn	50.5	52.5	63.1	53.9	40.7	Ho	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Ga	26.2	28.7	31.2	28.7	28.2	Er	0.06	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Ge	5.37	5.14	5.52	5.03	5.61	Tm	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
As	1.74	0.37	0.9	0.68	0.91	Yb	0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Rb	269	252	534	209	550	Lu	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Sr	8.37	7.09	5.08	8.14	10.2	Hf	0.66	0.28	0.96	0.73	0.45
Y	0.59	0.36	0.26	0.16	0.17	W	4.67	16.4	1.26	1.91	4.44
Zr	12.8	7.19	13.1	10.7	9.21	Tl	1.57	1.31	3.07	1.07	3.46
Mo	0.35	0.26	0.27	0.29	0.26	Pb	87.2	10.6	17.8	8	25.5
Cd	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	Bi	5.44	5.8	2.24	4.79	4.02
In	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	Th	0.96	1.28	2.26	1.2	1.45
Sn	28.8	13.6	21	12.7	12	U	0.84	0.97	1.28	0.83	0.73

http://www.kcdz.ac.cn

钠长石伟晶岩(603号脉)样品中锂辉石及其包裹矿物开展了主量元素测试,测点位置标于图4,测试结果列于表2。研究结果显示,黄柏山锂辉石钠长石伟晶岩(603号脉)中,锂辉石$w(Li_2O)$为7.91%~8.07%,接近锂辉石中$w(Li_2O)$的上限(5.8%~8.1%; 邵厥年等, 2010),表明伟晶岩中锂辉石非常新鲜,Li流失量极小,为高品质矿石。锂辉石裂隙中有钠长石灌入(表2,HXP-3-3;图4c),局部分布溶蚀状石英颗粒(表2,HXP-3-5;图4d)。

4 初步认识

4.1 伟晶岩地球化学特征

由全岩地球化学测试结果(表1)显示,黄柏山锂辉石钠长石伟晶岩总体富稀有金属元素,贫幔源岩浆元素组合(如Sr、Ba、Cr、V、Ti; Wood, 1979),显示出典型的壳源岩浆特性。HXP-tc1~HXP-tc5五个刻槽样品对应锂伟晶岩脉边部→核部→边部,总体未显示出明显的稀有金属及其他元素的演化规律。伟晶岩浆在分异演化过程中H_2O和挥发分不断富集,Zr-Hf、Rb-Cs等元素对由于其元素地球化学性质的差异(刘英俊等,1984),Zr/Hf、Rb/Cs比值等常用于指示岩浆分异演化程度。黄柏山锂辉石伟晶岩岩石化学指数变化趋势图(图5)显示,由伟晶岩边部→核部→边部,Li含量、稀碱总量(w(稀碱总量)=w(Li)+w(Rb)+w(Cs))、Zr/Hf、Rb/Cs等化学指数变化无明显规律,除个别样品偏差较大外,总体在小范围内变化,表明脉体没有明显的内部分带性,但内部结构不均一,局部存在矿化强度和岩浆演化程度的差异。

由于黄柏山伟晶岩密集区与仁里超大型铌钽矿床临近,本次研究选择仁里矿床分异演化程度最高、稀有金属矿化最好的仁里5号伟晶岩脉进行对比。如图5所示,黄柏山603号脉Li含量及稀碱总量总体明显高于仁里5号脉(5号脉核部体积很小),Zr/Hf、Rb/Cs比值等化学指数与仁里矿床接近,表现出相近的岩浆分异演化程度,暗示着黄柏山地区也有与仁里矿床相似的巨大成矿潜力。二者明显的不同在于,仁里5号脉具有良好的内部分带,化学指数呈现出明显的变化趋势,而黄柏山603号脉无明显内部分带,可能与伟晶岩结晶的封闭环境及岩浆冷却速率差异有关。

4.2 稀有金属成矿特征

黄柏山锂辉石钠长石伟晶岩(603号脉)中,锂辉石新鲜无蚀变,且具有很高的Li_2O含量,可保证金属锂的高效提取;铌钽矿化伟晶岩中,铌钽铁矿颗粒较大((0.5×2) mm~(3.5×6) mm),也非常利于稀有金属矿物分选。区域伟晶岩沿冷家溪群片岩的片理分布,产出规律清晰,勘查工作易于开展。同时,黄柏

表2 黄柏山锂辉石钠长石伟晶岩样品矿物主量元素分析结果

Table 2 Major elements composition of minerals from the Huangbaishan spodumene albite pegmatite

组分	w(B)/%						
	HXP-3-1	HXP-3-2	HXP-3-3	HXP-3-4	HXP-3-5	HXP-3-6	HXP-3-7
Na_2O	0.09	0.06	12.28	0.13	0.01	0.13	0.08
MgO	0	0	0.01	0	0	0	0
Al_2O_3	27.15	27.25	19.84	28.09	0.07	27.27	27.11
SiO_2	65.29	64.19	68.98	64.53	98.36	64.13	64.19
K_2O	0	0	0.04	0	0.02	0	0.05
BaO	0	0	0.02	0	0.03	0.06	0
CaO	0	0.01	0.09	0.02	0	0.02	0.03
P_2O_5	0	0	0.05	0.02	0	0.02	0
MnO	0.03	0.04	0	0.07	0.03	0.05	0.03
Cs_2O	0	0	0	0.52	0.70	0.27	0
Rb_2O	0	0	0	0	0	0	0
Nb_2O_5	0.02	0	0	0.01	0	0	0.01
Li_2O	8.07	7.95	0	7.96	0	7.91	7.94
总和	100.65	99.50	101.31	100.35	99.22	99.86	99.44
矿物名称	锂辉石	锂辉石	钠长石	锂辉石	石英	锂辉石	锂辉石

注:Li_2O含量根据化学计量法计算获得。

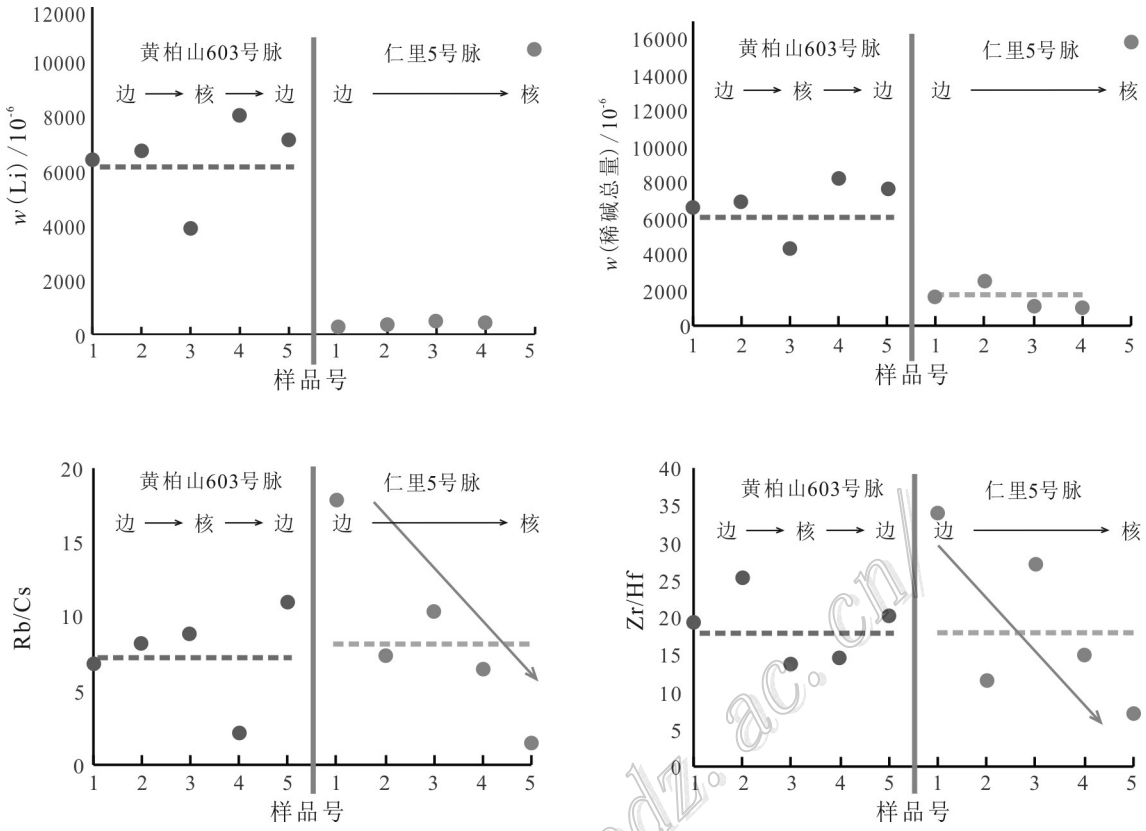


图5　黄柏山603号脉与仁里5号脉锂含量、稀碱总量、Rb/Cs及Zr/Hf比值变化趋势对比图(仁里数据引自李鹏, 2017)

Fig. 5　Comparison of *w*(Li), *w*(Li+Rb+Cs), Rb/Cs and Zr/Hf change trend between the Huangbaishan No. 603 pegmatite and the Renli No.5 pegmatite (data of Renli after Li, 2017)

山稀有金属伟晶岩密集区交通便利,伟晶岩多出露地表,埋藏较浅,开采及运输成本极低,具有较高的经济价值。

黄柏山稀有金属伟晶岩密集区显示出较为清晰的稀有金属矿化分带,自幕阜山岩体南缘向东南方向冷家溪群,伟晶岩类型由低到高依次为:含绿柱石微斜长石钠长石伟晶岩→含铌钽铁矿钠长石伟晶岩→铌钽矿化钠长石伟晶岩→锂辉石钠长石伟晶岩(图1),显示出矿化强度逐渐升高、矿化类型由Be→Nb+Ta→Li的变化规律,表明由西北至东南方向岩浆分异演化程度逐渐升高,暗示稀有金属伟晶岩的成矿母岩体可能位于伟晶岩密集区的西北部。上述稀有金属矿化分带规律与其东侧仁里铌钽矿床的自北西向东南分带的特征明显不同(李鹏等, 2017; 周芳春等, 2019; 刘翔等, 2019),暗示黄柏山地区稀有金属伟晶岩脉的成矿母岩和物质来源可能不同于仁里矿床,亟待进一步研究工作的验证。

黄柏山地区稀有金属伟晶岩脉的发现,进一步说明幕阜山西南缘具有巨大的找矿潜力,该地区有望继发现仁里特大型铌钽矿床后,再发现一处大型-特大型锂铍铌钽矿床。

致　谢　感谢陈振宇教授级高工、郭唯明工程师、王臻博士、杨晗硕士在实验过程中的帮助,感谢王登红研究员、苏俊男工程师、陈虎工程师对野外工作的指导与帮助。

References

Armstrong J T. 1995. CITZAF: A package of correction programs for the quantitative electron microbeam X-ray analysis of thick polished materials, thin films, and particles[J]. Microbeam Analysis, 4:177-200.

Li P. 2017. Magmatic activities and metallogenic regularity of rare metals of Mmufushan area (Postdoctor)[D]. Supervisor: Pei R F and

http://www.kcdz.ac.cn/

Li J K. Beijing: Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences. 170p(in Chinese with English abstract).

Li P, Li J K, Pei R F, Leng S L, Zhang X, Zhou F C and Li S M. 2017. Multistage magmatic evolution and Cretaceous peak metallogenic epochs of Mufushan composite granite mass: Constrains from geochronological evidence[J]. Earth Science, 42(10): 1684-1696 (in Chinese with English abstract).

Liu X, Zhou F C, Huang Z B, Li J K, Zhou H X, Xiao G Q, Bao Y H, Li P, Tan L M, Shi W K, Su J N, Huang X Q, Chen H, Wang X M, Lin Y and Liu X M. 2018. Discovery of Renli superlarge pegmatite-type Nb-Ta polymetallic deposit in Pingjiang, Hunan Province and its significances[J]. Geotectonica et Metallogenia, 42(2): 45-53(in Chinese with English abstract).

Liu X, Zhou F C, Li P, Li J K, Huang Z B, Shi W K, Huang X Q, Zhang L P and Su J N. 2019. Geological characteristics and metallogenic age of Renli rare metal orefield in Hunan and its prospecting significance[J]. Mineral Deposits, 38(4): 771-791(in Chinese with English abstract).

Liu Y J, Cao L M and Li Z L. 1984. Elemental geochemistry[M]. Beijing: Science Press. 169-179(in Chinese).

Shao J N and Tao W P. 2010. Mineral resources industry requirements manual[M]. Beijing: Geological Publishing House. 231-237(in Chinese).

Wang P, Pan Z L and Weng L B. 1982. Systematic mineralogy[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1339p(in Chinese).

Wood D A. 1979. A variably veined suboceanic upper mantle—genetic significance for mid-ocean ridge basalts from geochemical evidence[J]. Geology, (7): 499-503.

Zhou F, Liu X, Li J K, Huang Z B, Xiao G Q, Li P, Zhou H X, Shi W K, Tan L M, Su J N, Chen H and Wang X M. 2019. Metallogenic characteristics and prospecting direction of Renli super-large rare metal deposit in Hunan Province, China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(1): 77-91(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

李鹏. 2017. 幕阜山地区岩浆活动及稀有金属成矿规律(博士后)[D]. 导师:裴荣富, 李建康. 北京: 中国地质科学院矿产资源研究所. 170页.

李鹏, 李建康, 裴荣富, 冷双梁, 张旭, 周芳春, 李胜苗. 2017. 幕阜山复式花岗岩体多期次演化与白垩纪稀有金属成矿高峰:年代学依据[J]. 地球科学, 42(10): 1684-1696.

刘翔, 周芳春, 黄志飚, 李建康, 周厚祥, 肖国强, 包云河, 李鹏, 谭黎明, 石威科, 苏俊男, 黄小强, 陈虎, 汪宣民, 林跃, 刘晓敏. 2018. 湖南平江县仁里超大型伟晶岩型铌钽多金属矿床的发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 42(2): 45-53.

刘翔, 周芳春, 李鹏, 李建康, 黄志飚, 石威科, 黄小强, 张立平, 苏俊男. 2019. 湖南仁里稀有金属矿田地质特征、成矿时代及其找矿意义[J]. 矿床地质, 38(4): 771-791.

刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 169-179.

邵厥年, 陶维屏. 2010. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社. 231-237.

王璞, 潘兆橹, 翁玲宝. 1982. 系统矿物学[M]. 北京: 地质出版社. 1339页.

周芳春, 刘翔, 李建康, 黄志飚, 肖国强, 李鹏, 周厚祥, 石威科, 谭黎明, 苏俊男, 陈虎, 汪宣民. 2019. 湖南仁里超大型稀有金属矿床的成矿特征与成矿模型[J]. 大地构造与成矿学, 43(1): 77-91.

http://www.kcdz.ac.cn