

湘东北地区伟晶岩型锂矿成矿模型及找矿潜力分析

黄建中¹⁾, 陈剑锋^{2,3)}, 文春华^{2,3)*}, 周厚祥⁴⁾, 李胜苗²⁾, 张立平⁵⁾, 黄志飏⁵⁾,
成永生³⁾, 曹创华^{2,3)}, 刘 钧²⁾, 陈 虎⁵⁾

1)湖南省地质院, 湖南长沙 410014; 2)湖南省地质调查院, 湖南长沙 410116;

3)中南大学, 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083;

4)湖南省自然资源事务中心, 湖南长沙 410004; 5)湖南省核工业地质局三一一大队, 湖南长沙 410100

摘 要: 幕阜山地区在 20 世纪 70 年代发现了传梓源锂、铌钽矿床, 近年来在该区黄柏山、窄板洞地区亦有富锂伟晶岩报导, 但幕阜山地区锂矿资源尚未系统评价。锂矿资源作为新能源产业领域重要的原材料且需求日益增大, 开展幕阜山地区锂矿成矿潜力分析尤为重要。本文通过对黄柏山地区、传梓源矿区和窄板洞地区含锂伟晶岩详细的野外地质调查, 分析了含锂伟晶岩分布及含矿性特征, 认为含锂伟晶岩在空间上远离幕阜山岩体分布, 在垂向上锂矿化位于 LCT 型伟晶岩脉的上部。总结了湘东北地区铌钽矿伟晶岩和锂矿伟晶岩成岩、成矿年龄几近一致(140~130 Ma), 稍晚于区内二云母二长花岗岩形成年龄(143~138 Ma), 且同位素研究结果也指示花岗岩与伟晶岩有着相同的物质源区, 认为区内二云母二长花岗岩为稀有金属伟晶岩成矿母岩, 进而建立了伟晶岩型稀有金属成矿模型。依据成矿模型及区域稀有金属成矿的规律认识, 建立了“传梓源式”伟晶岩型锂矿预测要素, 首次对湘东北地区锂矿资源潜力开展预测评价, 初步预测黄柏山—传梓源和窄板洞—梭墩锂矿远景区内锂矿资源潜力达 10.19 万吨, 具备寻找大型锂矿产地(>10 万吨)的潜力。

关键词: 含锂伟晶岩; 锂辉石; 传梓源矿区; 黄柏山地区; 成矿模型; 成矿潜力

中图分类号: P618.71 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.042401

The Metallogenic Model and Prospecting Potentiality of the Pegmatite Type Li Deposit in Northwestern Hunan Province

HUANG Jian-zhong¹⁾, CHEN Jian-feng^{2,3)}, WEN Chun-hua^{2,3)*}, ZHOU Hou-xiang⁴⁾, LI Sheng-miao²⁾,
ZHANG Li-ping⁵⁾, HUANG Zhi-biao⁵⁾, CHENG Yong-sheng³⁾, CAO Chuang-hua^{2,3)}, LIU Jun²⁾, CHEN Hu⁵⁾

1) Geological Bureau of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014;

2) Hunan Institute of Geological Survey, Changsha, Hunan 410116;

3) Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University, Changsha, Hunan 410083;

4) Hunan Natural Resources Affairs Center, Changsha, Hunan 410004;

5) 311 Brigade of Hunan Nuclear Geological Bureau, Changsha, Hunan 410100

Abstract: The rare metal deposits in Mufushan district, such as the Chuanziyuan Li-Nb-Ta deposit found in the 1970s and the Huangboshan and Zhaibandong Li deposits found in recent years, presently lack proper system evaluation targeting Li resources. However, Li is a key raw material in new energy industry development, with a growing demand. It is therefore necessary to analyze the metallogenic potential of the Li deposits in the Mufushan area. Using systematic field geological surveys of the Li-pegmatites in the Chuanziyuan, Huangboshan, and Zhaibandong Li deposits, this study analyzed the characteristics of the distribution and potentiality of the Li-pegmatites and showed that they are distributed far from the Mufushan batholith and that the Li mineralization

本文由湖南省重点领域研发计划项目(编号: 2019SK2261)、国家重点研发计划项目(编号: 2017YFC0601402)、有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学)开放基金项目(编号: 2021YSJS04)、湖南省自然科学基金(编号: 2021JJ30387)、湖南省地质院科研项目(编号: HNGSTP202105)和湖南省专项科普专题(编号: 2020ZK4082)联合资助。

收稿日期: 2022-04-02; 改回日期: 2022-04-18; 网络首发日期: 2022-04-27。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 黄建中, 男, 1960 年生。研究员级高级工程师。主要从事区域地质调查及矿床学研究。E-mail: ddyhjz@126.com。

*通讯作者: 文春华, 男, 1982 年生。博士, 正高级工程师。主要从事战略性矿产综合研究。E-mail: herowch2004@163.com。

occurs in the top the LCT-type pegmatites. Both the Li-pegmatites and Nb-Ta-pegmatites have the same diagenesis and mineralization ages (140~130 Ma), which occurred slightly later than the two-mica monzogranite (143~138 Ma). Furthermore, the pegmatites in this area have the same provenance as the two-mica monzogranite. Thus, here, we propose that the two-mica monzogranite could be the parental rock of the rare metal (Li-Nb-Ta) pegmatites and established the metallogenic model accordingly. Based on this forecasting model for the “Chuanziyuan” type Li deposit, we concluded that there are 101 900 tonnes of Li_2O resources in the Huangboshan–Chuanziyuan and Zhaibandong–Suodun prospect area, showing that a large-scale Li deposit could exist in northwestern Hunan province.

Key words: Li bearing pegmatite; spodumene; Chuanziyuan deposit; Huangboshan; metallogenic model; metallogenic potential

Li、Nb、Ta 等稀有金属具有在新能源、航空航天、国防科技等领域发展方面的不可替代性,使其成为高科技产业发展必不可少的战略性矿产资源(毛景文等, 2019)。花岗伟晶岩作为一种赋存稀有金属的重要岩石类型而受到地质学者的持续关注(London 2014, 2018; 张辉等, 2019), 尤其是因富含“21 世纪的能源金属”的含锂伟晶岩成为了近年研究的热门(王登红等, 2016)。而伟晶岩成岩成矿模型的建立不仅可科学揭示稀有金属矿床的成因, 还将为稀有金属矿床的资源量预测及前景分析提供重要依据。

自 20 世纪 50 年代开始, 对幕阜山地区所开展的稀有金属矿产调查工作以来, 在岩体内部及周缘多处的 Li、Be、Nb、Ta 矿床(点)的发现, 显示出幕阜山岩体有着十分优越的稀有金属成矿条件及找矿前景, 特别是近年在其北部断峰山大型 Nb-Ta 矿床和南部仁里超大型 Ta-Nb 矿床的发现, 均属华南在稀有金属矿床找矿工作方面的重大突破, 也使得关于该区花岗伟晶岩的演化及成岩成矿作用的研究工作得到持续开展, 并发表了系列成果(李乐广等, 2019; 周芳春等, 2020; Xiong et al., 2020; Li et al., 2020, 2021; 魏均启等, 2021; 祝明明等, 2021)。尽管在该区的湖南省境内也有关于锂矿资源的报导, 如早在 1971 年湖北省第五地质队就发现了位于仁里南部的传梓源伟晶岩型铌-钽-锂矿床, 因受制于矿床的规模及当时矿种的经济价值, 对作为伴生矿种的锂资源仅进行了简单评价, 近年在该区黄柏山、窄板洞富锂伟晶岩的发现, 也显示出该区具有十分优越的锂矿成矿条件。

本文在对前人有关断峰山矿床与仁里矿床研究工作的系统总结基础上, 结合笔者近年在湖南省重点研发专项“湖南省锂铌钽等稀有金属资源高效勘查与开发”项目开展中所掌握的第一手野外地质资料, 通过对比幕阜山岩体南北成矿条件的异同, 剖析花岗岩与伟晶岩的成因联系, 探讨两者在矿床规模和矿化类型上差异性的原因, 建立起幕阜山地区伟晶岩稀有金属矿的成矿模型, 并尝试对湘东北

地区的锂矿产资源的找矿潜力作出分析与评价。

1 区域地质特征

幕阜山复式花岗岩基位于华夏与扬子板块之间的江南造山带的中段(图 1a), 除岩体东北部局部出露寒武系、奥陶系、志留系外, 区域围绕幕阜山岩体大面积分布、或呈孤立的残丘覆盖在花岗岩基上的为新元古界青白口系冷家溪群(图 1b), 其岩性为一套浅变质灰-灰绿色绢云母泥板岩、条带状板岩、粉砂质板岩、岩屑杂砂岩和片岩, 总厚 6 700 ~ 10 127 m (高林志等, 2011; 杨雪等, 2020)。其中片岩主要呈环带状分布于地层与幕阜山岩基周围的接触部位, 并且在岩基周围分布不均, 表现为岩基南北部周缘的断峰山及仁里地区片岩带较宽, 如在南部的仁里—传梓源地区片岩带宽在 10 km 以上, 而岩基其它部位的片岩带, 如在岩体西部及东南部区域其带宽一般不超过 1 km。岩性主要为石英云母片岩, 其中云母(包含白云母与黑云母)呈片状定向排列, 石英一般呈透镜状与眼球状夹于片状矿物间。整体上, 片岩的产状在走向上平行于岩层与岩体的接触界线, 显示出了片岩岩层的产状受制于幕阜山岩基以巨大穹隆形式上侵就位时的形态。

区内岩浆活动强烈, 幕阜山岩体为燕山期花岗岩(李乐广等, 2019)呈北西向展布的大型复式花岗岩基, 出露面积约 2400 km², 其岩性包括闪长岩(154 Ma; Wang et al., 2014)、花岗岩闪长岩(151~149 Ma; Wang et al., 2014; Ji et al., 2018), 黑云母二长花岗岩(155~148 Ma; 湖南省地质调查院, 2009; Wang et al., 2014; 李鹏等, 2017; Ji et al., 2017, 2018; Xiong et al., 2020), 中粒二云母二长花岗岩(146~138 Ma, Wang et al., 2014; Ji et al., 2017; Li et al., 2020)以及细粒二云母二长花岗岩(137 Ma; 湖南省地质调查院, 2009; 以上均为锆石 U-Pb 年龄), 整体呈现出随年龄由老到新而岩性由中性—酸性变化的岩浆演化序列, 岩体的形成与古太平洋板块的西向俯冲有关(Wang et al., 2014; Ji et al., 2017, 2018)。此外, 幕阜山岩体南部与西部的梅仙、三墩

等岩株为武陵期侵入的花岗闪长岩, 锆石 U-Pb 年龄为 822~810 Ma(未发表数据)。

区内围绕幕阜山岩体内部及周缘发育上万条伟晶岩脉, 其中位于岩基内部的伟晶岩脉产状杂乱无章, 与花岗岩间接接触界线或截然明显或呈不明显的过渡关系, 产于黑云母二长花岗岩中的伟晶岩通常不具稀有金属矿化, 少量具有 Be 矿化, 岩体内部具有 Be、Nb-Ta 矿化的伟晶岩脉基本产于二云母二长花岗岩内部或其附近(图 1b)。

岩体外的伟晶岩脉, 包括区域内稀有金属矿的典型代表仁里超大型 Nb-Ta 矿床以及断峰山大型 Nb-Ta 矿床均产于片岩内。区内云母片岩受构造作用表现出片岩沿岩层滑脱和膝折发育的特征, 为伟晶岩脉充填提供了空间。伟晶岩脉的产状基本平行于岩层片理产出, 局部岩脉呈膨大缩小部位有切层

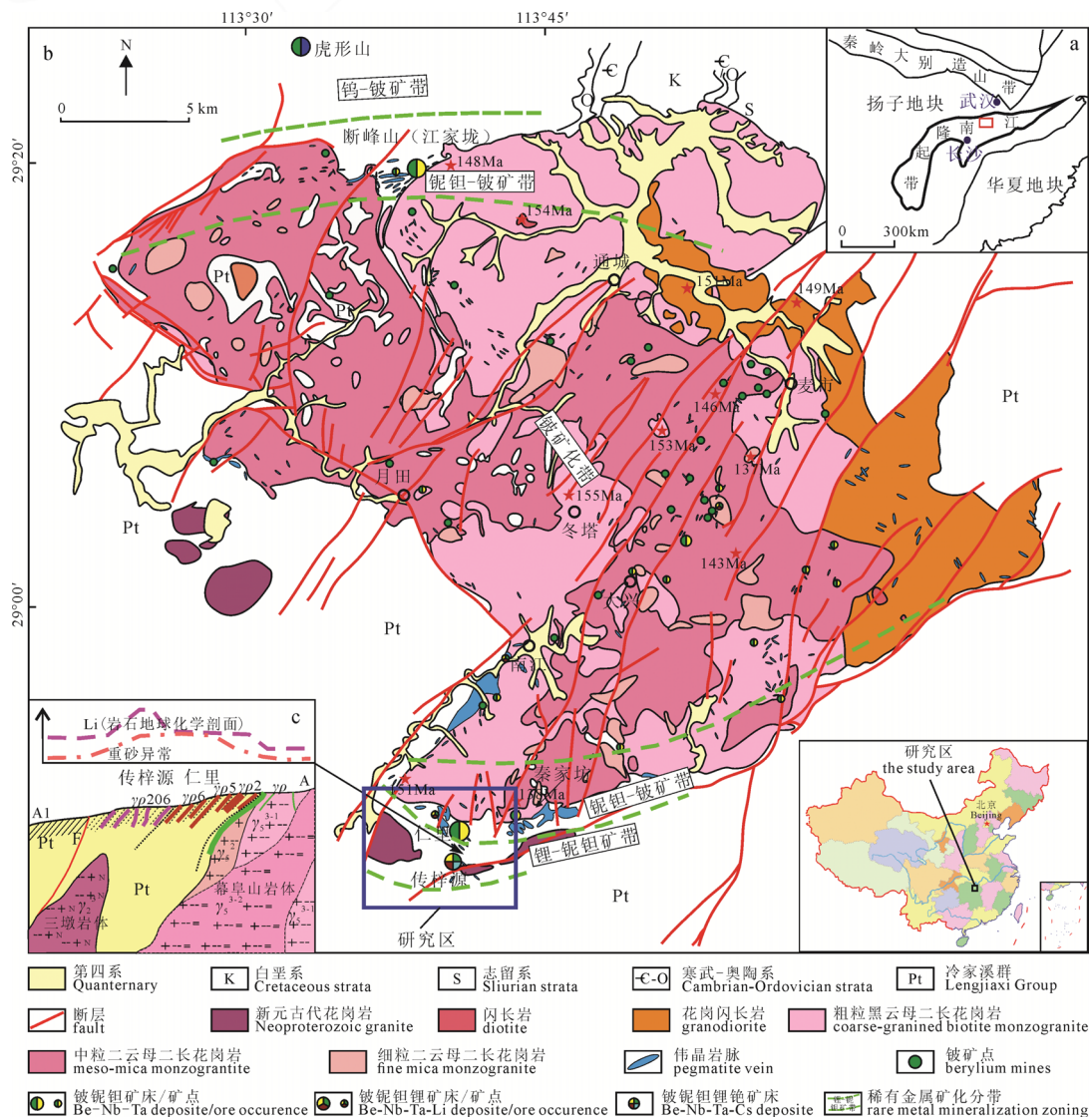
现象。一般表现为岩层产状陡的部位伟晶岩脉产状陡, 岩层产状缓的部位伟晶岩脉产状缓, 如在断峰山矿区伟晶岩脉的倾角多在 75°以上(祝明明等, 2021), 而仁里矿区的伟晶岩脉的倾角多介于 20°~40°之间(刘翔等, 2019)。

2 锂矿床(点)地质特征

区域内的 Li 赋矿岩石类型为伟晶岩, 根据伟晶岩稀有金属矿物的明显富集特征(Černý, 1991; Černý and Ercit, 2005), 该区的伟晶岩属 LCT(富集 Li-Cs-Ta)型伟晶岩。

2.1 黄柏山地区锂矿特征

该区紧邻仁里矿区西侧, 位于幕阜山岩体西南舌状凸起部位与梅仙岩体间的片岩带(图 2a), 最先由湖南省地质局(1977)在调查工作中发现并将其定



a—江南造山带构造轮廓; b—幕阜山稀有金属矿集区地质图; c—传梓源至仁里地质剖面图。

a—tectonic outline of Jiangnan Orogen Belt; b—geological map of the Mufushan rare metal ore concentration area; c—geological section diagram of Chuanziyuan to Renli.

图 1 幕阜山稀有金属矿集区地质矿产简图(据文春华等, 2019; 陈剑锋等, 2022)

Fig. 1 Geological and mineral resources map of the Mufushan rare metal ore concentration area (after WEN et al., 2019; CHEN et al., 2022)

为一处铌钽锂矿点。湖南省核工业局 311 队在仁里矿区调查中对该处的采样分析显示, 此处有含工业品位的锂辉石矿脉(李鹏等, 2019)。湖南省地质院承担的湖南省重点研发项目“湖南省铌钽等稀有金属高效勘查与开发”在实施过程将此区域作为重要的找矿靶区及钻探验证示范区, 在区内开展了系统的遥感、化探、物探、地气分析、异常验证及钻探验证等工作。区内见规模不一的伟晶岩脉 20 余条(图 2a), 伟晶岩脉沿片岩带内顺层或微切片岩层理产出, 走向北西, 倾向南西, 倾角 $20^{\circ}\sim 50^{\circ}$, 其中编号为 $\gamma p46$ 、 $\gamma p47$ 的伟晶岩脉富含锂辉石(表 1)。

$\gamma p47$ 号伟晶岩脉地表出露长约 1700 m, 宽 2~32 m(图 2a), 走向北西, 倾向南西。脉体顺片岩层理产出(图 3a), 具膨胀收缩处见切层现象。该脉体北西段的矿物组合以钠长石伟晶岩为主, 含少量铌钽铁矿、绿柱石等稀有金属矿物; 在中段和南东段矿物组合均以锂辉石和钠长石为主, 含铌钽铁矿、锂辉石等稀有金属矿物, 其中中段锂辉石呈白色板柱状, 晶体大小一般为长轴(5~10) cm×短轴(1~2) cm(图 3b, c), Li_2O 品位为 0.81%~1.72%; 南东段地表出露最宽达 30 余 m, 脉体中铌钽铁矿呈针

状、细粒状, Nb_2O_5 品位为 0.009%~0.024%, Ta_2O_5 品位为 0.008%~0.016%(张立平等, 2021), 靠近脉体上盘见锂辉石伟晶岩, Li_2O 品位达 2.02%, 锂矿体平均厚度 6.5 m。沿脉的走向从北西往南东, 脉体的规模逐渐变大, 其锂的含量(品位)也呈现出逐渐升高的趋势。土壤化探分析结果显示 $\gamma p47$ 号伟晶岩脉南东侧外延部位有明显的锂元素异常(图 2a), 吕维(2020)在该区东南部应用 X 荧光分析技术对土壤样品稀有金属元素异常特征研究认为 $\gamma p47$ 号伟晶岩脉往东南延伸可与 $\gamma p1$ 相联(图 2d), 反映出 $\gamma p47$ 号伟晶岩脉往南东方向呈隐伏再现特征。在对该脉南西侧施工完成的钻探工程显示, 由 ZK7201 所揭露的该岩脉在 33~39 m 之间锂矿品位较好(图 2b); 而 ZKA01 所揭露结果显示伟晶岩脉在 80~84 m 仅见少量锂辉石, 反映了该脉锂的矿化往深部变弱的特征, 表明该脉具备从深部往上其成矿作用由 Nb-Ta 为主转为以 Li 为主的 LCT 型伟晶岩的演化特征。

2.2 传梓源矿区锂矿特征

该区紧邻仁里矿区南部, 区内伟晶岩脉十分发育(图 2a), 按脉体走向可为北西向脉体和南北向脉体(湖北省第五地质队, 1971)。其中北西向脉体 16

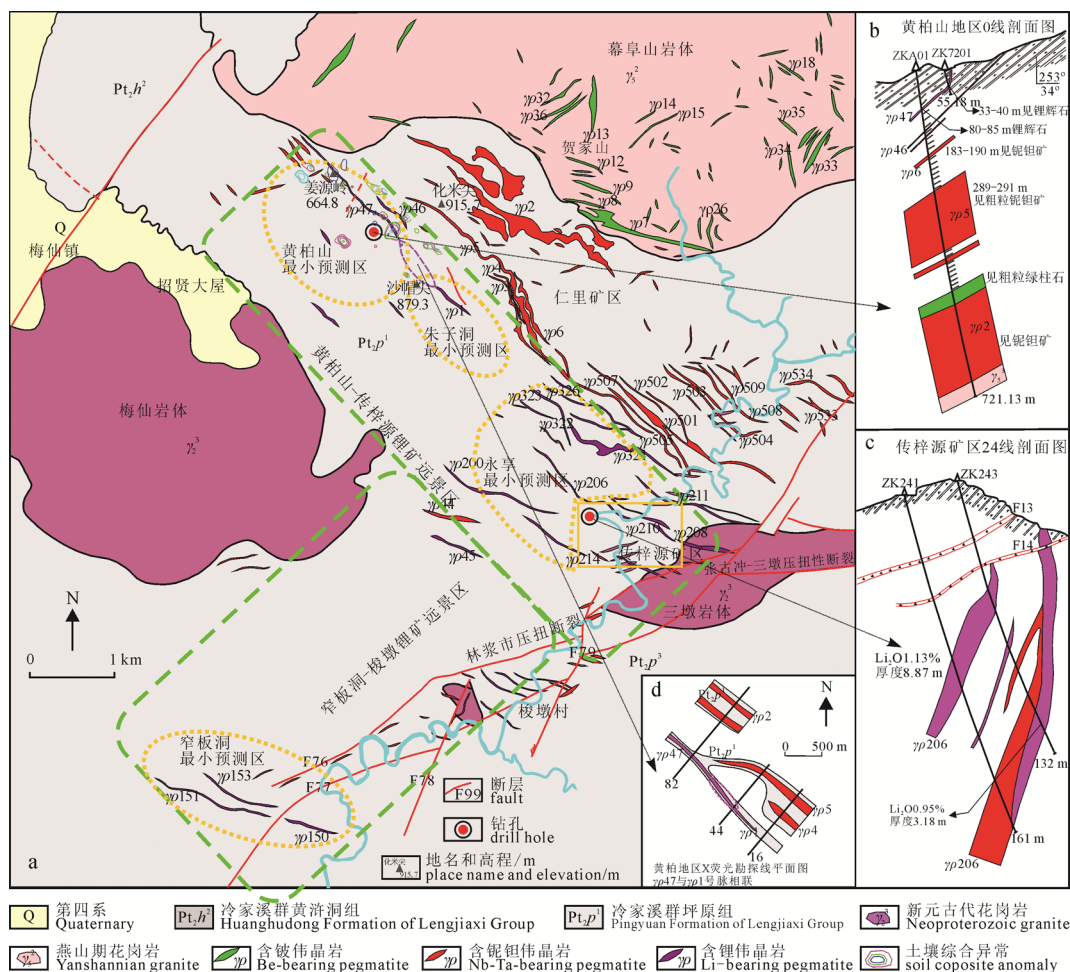


图 2 幕阜山南缘锂矿区分布特征

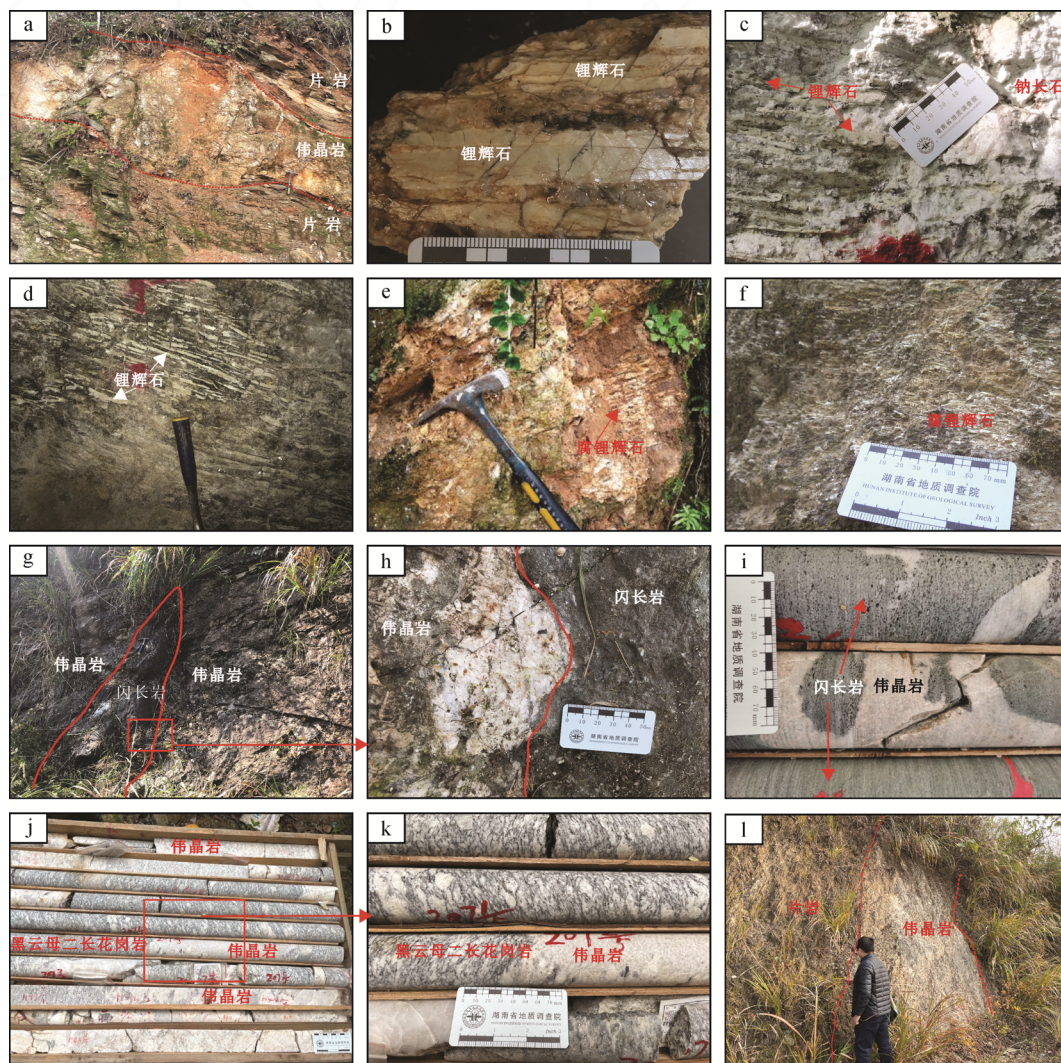
Fig. 2 The Li-deposit in the south margin of Mufushan batholith

条(106、116、202、204、206、208等),产状较陡,斜交层理产于云母片岩中;南北向脉9条(105、110、112、108、103、104、111等),均产于花岗岩株内的张裂隙中。南北向组的 $\gamma p104$ 号矿脉和北西向组的 $\gamma p106$ 、 $\gamma p202$ 、 $\gamma p206$ 、 $\gamma p208$ 等矿脉为区内的重要富锂伟晶岩脉(表1),锂辉石在地表或近地表蚀变成腐锂辉石, Li_2O 含量较低,深部为锂辉石(图3d), Li_2O 含量较高。规模较大的锂辉石伟晶岩主要为 $\gamma p206$ 号脉,脉体地表出露长约2.3 km,走向北西,倾向南西,倾角约 $47^\circ\sim 81^\circ$,脉宽14~25 m,厚度延深大于150 m(图2c);锂矿体中 Li_2O 含量0.49%~1.44%,平均厚度为9.92 m。含锂伟晶岩脉矿化深度可达100~150 m,岩脉中的锂辉石在地表经风化淋滤呈腐锂辉石,在地表以下20 m处风化较弱。

2.3 窄板洞地区锂矿特征

该区位于传梓源矿区西南部,距离幕阜山岩体西南约8 km的云母片岩带中,地层走向北西,倾向南西,区内目前发现大小伟晶岩脉15条,其中规模较大的为 $\gamma p150$ 、 $\gamma p151$ 、 $\gamma p153$ 。

锂矿化较好的为 $\gamma p150$ 与 $\gamma p151$ 号伟晶岩脉,两者产状一致,岩脉顺片岩层理产出,其中 $\gamma p151$ 岩脉北西走向,倾向 $175^\circ\sim 190^\circ$,倾角 $30^\circ\sim 40^\circ$,长1300 m,矿脉厚0.48~2.12 m(石威科等,2020), Li_2O 品位为0.017%~1.39%、 Nb_2O_5 为0.008%~0.021%、 Ta_2O_5 为0.006%~0.020%。伟晶岩呈似层状产出,主要矿物组成为钠长石、锂辉石、白云母、石英及锂辉石。锂辉石伟晶岩脉在地表风化强烈,局部呈白色细砂状,可见灰白色短柱状、条带状(腐)锂辉石(图3e)。



a—黄柏山47号伟晶岩脉; b, c—47号脉锂辉石照片; d—传梓源206号脉锂辉石照片; e—窄板洞地区锂辉石照片; f—白沙窝锂辉石照片; g, h—仁里7号伟晶岩脉及内部的闪长岩; i—深部钻孔揭露的2号伟晶岩脉中的闪长岩; j, k—深部钻孔揭露的仁里2号脉与黑云母二长花岗岩的接触关系; l—断峰山地区出露的伟晶岩。

a—the No. 47 pegmatite from Huangboshan; b, c—spodumene-albite pegmatite from No. 47; d—the No. 206 spodumene-bearing pegmatite from Chuanziyuan; e—spodumene-bearing pegmatite from Zhaibandong; f—spodumene-bearing pegmatite from Baishawo; g, h—the diorite in the No. 7 pegmatite of Renli; i—the diorite in the No. 2 pegmatite of Renli exposed by drill hole; j, k—the contact relationship between the No. 2 pegmatite and biotite monzogranite; l—the pegmatite in Duanfengshan.

图3 幕阜山地区花岗-伟晶岩照片

Fig. 3 Field photographs of pegmatites and granites in Mufushan

表 1 幕阜山南缘含锂伟晶岩矿体特征表
Table 1 The features of Li-bearing pegmatites in the south margin of the Mufushan batholith

产地	脉体编号	类型	形态	产状			规模		Li ₂ O 品位/%	矿体平均厚度/m	资料来源
				走向/°	倾向	倾角/°	长度/m	宽度/m			
黄柏山	$\gamma p47$	钠长石-锂辉	弯曲脉体	290~310	南西	23~54	1700	2~32	0.56~3.43	6.50	石威科等, 2020
	$\gamma p46$	石伟晶岩	板脉状	280~310	南西	25~50	500	1~15	0.12~0.22	4.45	
传梓源	$\gamma p106$	钠长石-锂辉石伟晶岩	弯曲分枝脉体	286	南	65~80	500	1.9~25.39	0.13~1.16	15.00	湖北省第五地质队, 1971
	$\gamma p107$		弯曲分枝脉体	277	南	60~80	350	1.09~5.14	0.05~0.63	2.59	
	$\gamma p116$		分枝脉体	286	总体向南	70~80	350	2~12	0.08~0.87	2.05	
	$\gamma p208$		弯曲分枝脉体	300	南	65~80	1100	4~8	0.06~1.01	9.00	
	$\gamma p204$		弯曲分支脉体	302	总体向南	70~80	650	1~9	0.16~1.41	8.33	
	$\gamma p202$		弯曲分支脉体	297	总体向南西	60~80	700	7~14	0.05~0.72	4.16	
	$\gamma p206$		弯曲分支脉体	294	总体向南	47~80	2300	5~25	0.49~1.44	9.92	
	$\gamma p200$		分支的脉状	309	南	60~70	820	1~8	0.04~0.62	3.11	
	$\gamma p301$		弯曲分枝脉体	272~299	总体向南	40~60	1900	5~15	0.07~0.58	4.91	
	$\gamma p150$		脉状	275~290	南	35~42	620	0.82~1.13	0.18~0.47	1.13	
窄板洞	$\gamma p151$	辉石伟晶岩	脉状	265~280	南	30~40	1300	0.48~2.12	0.17~1.39	2.12	石威科等, 2020; 张立平等, 2021

表 2 断峰山与仁里矿区花岗伟晶岩年龄及同位素值统计表
Table 2 The age and isotopic values statistics on granites and pegmatites from the Renli and Duanfengshan deposits

岩石类型	矿区	测试结果	测试内容	文献来源
黑云母二长花岗岩	断峰山	(152±1.2) Ma; (151.2±1.1) Ma $\epsilon_{Nd}(t) = -7.8, t_{DM2} = 1.58$ Ga	锆石 U-Pb 全岩 Sr-Nd-Pb	中国地质调查局武汉地质调查中心, 2018; Ji et al., 2018; 李鹏等, 2019; Xiong et al., 2020
	仁里	(154.1±2.5) Ma; (146.2±0.2) Ma $\epsilon_{Hf}(t) = -10.8 \sim -5.3, t_{DM2} = 1.54 \sim 1.88$ Ga	锆石 U-Pb 锆石 Hf 同位素	
二云母二长花岗岩	断峰山	(143.6±1.7) Ma $\epsilon_{Nd}(t) = -8.8, t_{DM2} = 1.65$ Ga	锆石 U-Pb 全岩 Sr-Nd-Pb	中国地质调查局武汉地质调查中心, 2018; 刘翔等, 2019; Li et al., 2020
	仁里	(141.0±1.2) Ma; (138.3±0.3) Ma $\epsilon_{Hf}(t) = -5.5 \sim -9.1, t_{DM2} = 1.53 \sim 1.78$ Ga	锆石 U-Pb 锆石 Hf 同位素	
白云母二长花岗岩	仁里	(140.7±2.2) Ma	独居石 U-Pb	Xiong et al., 2020
微斜长石(二云母)伟晶岩	仁里	(141.5±0.8) Ma $\epsilon_{Hf}(t) = -8.7 \sim -7.6, t_{DM2} = 1.68 \sim 1.73$ Ga	锆石 U-Pb 锆石 Hf 同位素	陈剑锋等, 2022
	断峰山	(136.6±0.9) Ma (136.2±0.4) Ma	铌钽矿 U-Pb	祝明明等, 2021
二长伟晶岩(铌钽矿化)	仁里	(140.2±0.95) Ma (140.7±0.50) Ma	钽铁矿 U-Pb 独居石 U-Pb	Xiong et al., 2020
		(130.1±1.1) Ma	辉钼矿 Re-Os	周芳春等, 2020
		(133.0±2.6) Ma (131.2±2.4) Ma	钽铁矿 U-Pb 锆石 U-Pb	Li et al., 2020
		$\epsilon_{Hf}(t) = -8.3 \sim -6.6, t_{DM2} = 1.68 \sim 1.73$ Ga	锆石 Hf 同位素	
		(36.6±1.4) Ma	白云母 Ar-Ar	黄小强等, 2021
钠长石(锂辉石)伟晶岩	仁里	(134.5±0.8) Ma $\epsilon_{Hf}(t) = -9.2 \sim -4.2, t_{DM2} = 1.56 \sim 1.74$ Ga	锆石 U-Pb 锆石 Hf 同位素	未发表
	传梓源	(135.4±1.4) Ma	白云母 Ar-Ar	张立平等, 2021
二长伟晶岩(铌钽矿化)	白沙窝	(140.2±3.3) Ma (140.7±1.5) Ma	辉钼矿 Re-Os 钽铁矿 U-Pb	Wen et al., 2021
二云母二长花岗岩	连云山	(147.5±1.6) Ma $\epsilon_{Hf}(t) = -14.1 \sim -8.0, t_{DM2} = 1.68 \sim 1.73$ Ga	锆石 U-Pb 锆石 Hf 同位素	

3 花岗岩与伟晶岩的关系

位于幕阜山北缘的断峰山矿区以及南缘的仁里矿区在矿区地质特征上具有相似性, 其出露的地层均为青白口系冷家溪群, 矿区大面积出露的花岗岩在岩性上也一致, 即为黑云母二长花岗岩与二云母二长花岗岩(图 1b), 前人的锆石 U-Pb 定年结果显示, 两个矿区的花岗岩侵入时间在误差范围内相同

(154~138 Ma)。尽管以往在断峰山矿区关于岩体内部的伟晶岩未有研究和报导, 事实上, 笔者的野外调查工作显示, 其黑云母二长花岗岩内部的伟晶岩与仁里矿区的伟晶岩特征相似, 基本为微斜长石(二云母)伟晶岩(陈剑锋等, 2022), 通常不具矿化或见有 Be 矿化, 仅个别含钠长石的伟晶岩脉中见有针状铌钽矿。

在伟晶岩与花岗岩之间的关系方面, 长期以来,

伟晶岩常被认为是花岗质岩浆(母岩)分异演化晚期岩浆固结的产物(Černý and Ercit, 2005; Černý et al., 2012; Roda-Robles et al., 2018; Fei et al., 2020), 仁里与断峰山地区几种类型的伟晶岩均位于幕阜山岩体内部或接触带附近, 其成岩成矿年龄几近一致(140~130 Ma, 表 2), 稍晚于矿区各类型花岗岩形成年龄(154~138 Ma, 表 2), 全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素一致(表 2)也指示花岗岩与伟晶岩有着相同的源区, 因此, 伟晶岩与花岗岩在时间、空间以及物源上均暗示两者密切的成因联系。

本次以研究程度更高的仁里矿区为例, 仁里矿区的伟晶岩类型有微斜长石伟晶岩、二长(微斜长石-钠长石)伟晶岩和钠长石(-锂辉石)伟晶岩, 矿区出露的花岗岩类型除黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩外, 另存在有少量白云母二长花岗岩呈小岩株或岩脉侵入于黑云母二长花岗岩中(Xiong et al., 2020)。前人对仁里矿区有关花岗岩与伟晶岩的成因关系已展开过颇多讨论, 如李昌元(2016)指出仁里矿区伟晶岩的母岩为在空间关系上与之最为密切的黑云母二长花岗岩, 陈剑锋等(2022)对矿区 7 号伟晶岩脉的进行了年代学及同位素等的研究, 指出岩体内不含矿的微斜长石(二云母)型伟晶岩脉的母岩为黑云母二长花岗岩; 李鹏等(2019)和 Li et al. (2020)通过分析仁里矿区的稀有金属伟晶岩与矿区广泛出露的二云母二长花岗岩或黑云母二长花岗岩在地球化学特征上存在有断崖式突变, 曾认为这两类花岗岩并非伟晶岩的母岩, 而在他通过系统研究矿区各类型花岗岩与伟晶岩中白云母的地球化学特征后, 修正了之前的观点而改认为二云母二长花岗岩为伟晶岩的母岩(Li et al., 2021); Xiong et al. (2020)和穆尚涛等(2021)矿物与岩体的地球化学组成等角度成因关系进行了研究, 指出矿区高分异的白云母花岗岩更可能是稀有金属伟晶岩的母岩。

经典的 LCT 型伟晶岩的模型(Černý, 1991; Shearer et al., 1992)指出, 花岗岩岩浆房从深部至浅部运移过程中, 在经历了由黑云母二长花岗岩到二云母二长花岗岩至白云母二长花岗岩的分异演化后, 在顶部由白云母二长花岗岩分异出一系列不同矿化组合的伟晶岩, 因此, 相对前两者, 分异程度更高的白云母二长花岗岩通常更多地被认为是伟晶岩的母岩。而笔者认为在幕阜山地区并非如此, 其原因有: (1)幕阜山岩体内及边缘分布有大量的伟晶岩脉, 而白云母二长花岗岩在该区出露面积甚少, 只偶见其呈小岩株或岩脉形式产于黑云母二长花岗岩中, 小规模产出的岩体不太可能为巨量的伟晶岩脉提供物源; (2)黑云母二长花岗岩中产出大量的微斜长石(二云母)型伟晶岩, 大部分肉眼未能分辨出钠长石

产出, 而二云母二长花岗岩与白云母二长花岗岩中的 Na_2O 平均含量均达 5% 以上(刘翔等, 2019; Xiong et al., 2020), 特别是白云母二长花岗岩中缺乏该类型伟晶岩中作为主矿物之一存在的黑云母; (3) Li et al. (2021)所列区内各花岗岩序列以及各类型伟晶岩中白云母的地球化学特征可以看出, 微斜长石型伟晶岩较区内二云母二长花岗岩中白云母的 K/Rb 值高而 Rb/Cs 等含量低, 表明微斜长石型伟晶岩分异程度不及二云母二长花岗岩, 而分异程度更高白云母花岗岩不可能是微斜长石型伟晶岩(分异程度低)的母岩; (4)依据经典模型, 分异程度最高的白云母花岗岩应位于花岗岩基的顶部, 幕阜山地区的平均剥蚀深度为 4.8 km(石红才等, 2013), 已揭露至早期另两种类型黑/二云母二长花岗岩的部位, 因此深部存在白云母二长花岗岩的可能性可以排除; (5)从图 1b 可看出, 幕阜山岩体内的含 Be、Nb-Ta 矿伟晶岩基本位于二云母花岗岩内部或周围, 而黑云母花岗岩中(特别是中心部位)的含矿伟晶岩极少, 如果伟晶岩均由深部晚期次的白云母花岗岩演化而来, 那么仅只作为围岩存在的这两类花岗岩内部的伟晶岩在成矿作用不会存在大的差异, 因此, 深部存在晚期次的白云母花岗岩的母岩的假设也不具说服力。

London 的模拟实验(London, 2014, 2018; London et al., 2020)研究结果表明伟晶岩形成的关键主要取决于岩浆液相线的过冷程度, 因此, 岩浆的分异程度并非伟晶岩形成的必要条件, 这意味着即使分异程度不高的花岗岩也可成为伟晶岩的母岩。综合前人所研究得出的观点, 笔者认为矿区的(二云母)微斜长石型伟晶岩的母岩即为其围岩黑云母二长花岗岩(陈剑锋等, 2022); 而矿区铌钽矿的主要赋存岩石类型微斜长石-钠长石型伟晶岩的母岩为二云母二长花岗岩(Li et al., 2021), 微斜长石-钠长石型伟晶岩从母体二云母花岗岩中分离, 经历进一步的分异作用可形成钠长石(锂辉石)伟晶岩。这既可以合理解释矿区花岗岩以及伟晶岩演化序列, 也揭示了构成幕阜山岩体主要岩性的黑云母二长花岗岩和二云母二长花岗岩中伟晶岩的成矿差异性。

4 成岩成矿模型

受古太平洋板块远程俯冲效应的影响, 俯冲板片回撤导致了幕阜山一带发生伸展作用, 玄武质岩浆底侵, 直接导致断峰山地区南部中-基性闪长岩的形成(154 Ma, Wang et al., 2014; 中国地质调查局武汉地质调查中心, 2018), 并表现为区域中-基性岩浆具有长期持续活动的特点, 如在仁里矿区地表 7 号伟晶岩脉(137 Ma; 陈剑锋等, 2022)及 2 号伟晶岩

脉(深部钻孔)内部均见有闪长岩脉的穿插(图 3h, i, j), 对比两地的闪长岩中的主量元素组成(Wang et al., 2014; 陈剑锋等, 2022)可发现, 仁里地区除 Na_2O 和 Al_2O_3 偏低而 K_2O 偏高外, 其它几近相同, 暗示两个矿区的闪长岩具有同源的特征。底侵的岩浆也致使中下地壳物质发生部分熔融从而形成了巨量的酸性岩浆, 中基性岩浆的长期持续活动(154~137 Ma)为酸性岩浆的充分结晶分异提供了热源, 从而形成了幕阜山黑云母二长花岗岩(154~140 Ma)、二云母二长花岗岩(146~138 Ma)和白云母二长花岗岩(141 Ma)序列(图 4)。

黑云母二长花岗岩在持续的热源下, 分异形成了(二云母)微斜长石型伟晶岩, 由于分异程度较低和挥发分含量不足, 微斜长石型伟晶岩选择近距离侵位于母岩体冷凝收缩时产生的裂隙空间(与围岩花岗岩界线截然), 或因缺少裂隙空间而原地就位(呈渐变), 基本未从母体逃逸。只有二云母花岗岩, 经长期的结晶分异(146~138 Ma), 形成了大量的富 Nb-Ta 和 Li 伟晶岩岩浆, 这些富含稀有金属的伟晶岩浆一部分也侵位于杂乱无章的围岩裂隙空间内, 另一部分经历了更为充分的结晶分异作用后, 稀有金属与挥发分得到进一步的富集, 逃逸母体, 穿过早期因与地层接触而最先固结的黑云母二长花岗岩(图 3j, k)的裂隙进入冷家溪片岩的裂隙空间内形成富含 Nb、Ta 的二长伟晶岩, 伟晶岩浆在片岩中运移的过程中, 向上进一步分异, 形成富含 Li 的白云母钠长石伟晶岩。至于分异程度更高的白云母花岗岩, 因其在矿区占比过少, 难以评价其在伟晶岩成岩成矿方面所做出的贡献。

幕阜山北部的断峰山矿区与南部的仁里—传梓源矿区存在有成矿作用的明显差异性, 表现为(1)仁里矿床的铌钽矿(超大型)在规模上要超过断峰山, 以及(2)断峰山在 Li 矿的成矿作用方面只表现有少量脉体中含有锂云母, 而南部的黄柏山—传梓源一带则有规模可观的锂辉石产出。幕阜山岩体周围的片岩产状基本上受控于岩体的侵入形态, 那么地表片岩的产状反过来也可反映深部岩体的侵入形态, 断峰山地区片岩产状陡(大于 75° , 图 3l), 据此可推测该区岩浆上侵时呈陡倾状, 而仁里—黄柏山地区片岩的产状($20^\circ\sim 40^\circ$)所反映的是该区岩体与地层接触界线较缓(图 3a)。一方面, 缓倾的地层暗示其深部所覆盖有大面积的隐伏花岗岩, 可为后期伟晶岩的成岩成矿作用提供更多物源; 另一方面, 含矿伟晶岩在垂直空间上的表现为上锂下铌钽(LCT 经典模型以及黄柏山钻孔所揭示), 而幕阜山地区富含稀有金属的伟晶岩浆在地层中往上迁移的通道受

控于片岩的产状, 产状陡的在垂向上无疑迁移更远, 因此, 即便在断峰山地区先期存在有富含锂辉石的伟晶岩, 在该区风化剥蚀作用严重的前提下(平均剥蚀深度为 4.8 km, 石红才等, 2013)被耗尽, 而在幕阜山南缘的黄柏山—传梓源一带的含锂伟晶岩能得以保存下来。

5 湘东北地区锂矿成矿潜力分析

5.1 锂矿空间变化规律

幕阜山南缘的伟晶岩具有在空间上的明显岩性分带特征, 表现为从北往南由幕阜山岩体到片岩地区依次划分为微斜长石伟晶岩、斜长石-钠长石伟晶岩、钠长石伟晶岩(文春华, 2017; Li et al., 2020), 在矿化组合上表现为从不含矿(或见 Be 矿化)—Be-Nb-Ta—Li-Nb-Ta 的过渡演化特征(文春华等, 2019; 文春华和邵拥军, 2019)。本次开展了岩体内微斜长石伟晶岩(贺家山地区)、斜长石-钠长石伟晶岩(仁里地区)、钠长石伟晶岩(传梓源地区、黄柏山地区和窄板洞地区)(图 2)岩石地球化学研究, 样品结果(表 3)分析发现伟晶岩岩性分带与 Na_2O 和 K_2O 元素含量规律性变化相关, 从幕阜山岩体中贺家山微斜长石伟晶岩、仁里斜长石-钠长石伟晶岩到传梓源-窄板洞钠长石(锂辉石)伟晶岩, Na_2O 含量出现升高变化而 K_2O 呈降低变化的反消长关系(图 5a), Li 含量随 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值变小而呈升高变化规律。同样, 微量元素 K/Rb 比值规律性变化也反映了从贺家山到传梓源随 K/Rb 比值降低呈现出 Li 的明显富集变化规律(图 5b)。

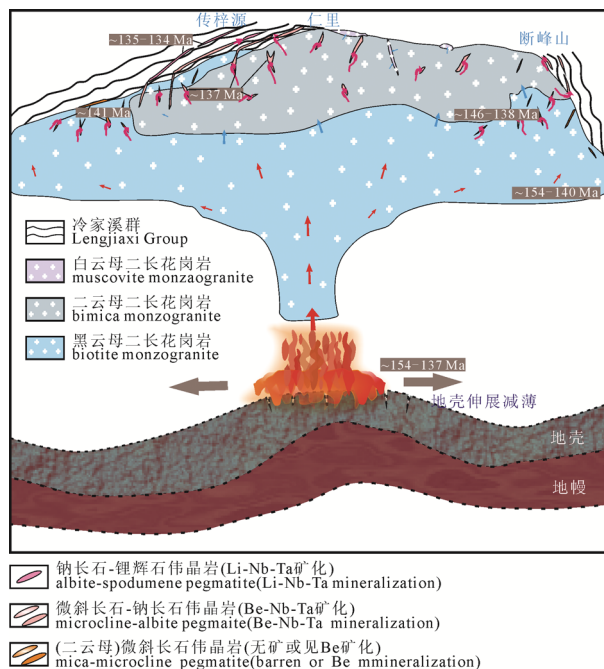


图 4 幕阜山地区伟晶岩型稀有金属矿成岩成矿模式图
Fig. 4 The diagenesis and mineralization model for rare metal pegmatites in the Mufushan batholith

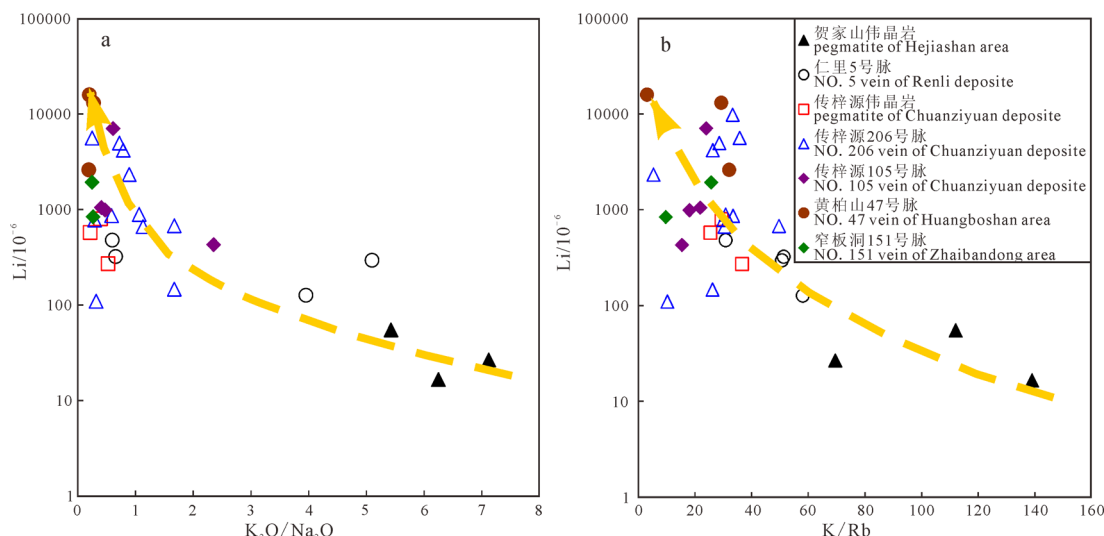


图5 幕阜山南缘地区伟晶岩 K_2O/Na_2O vs Li 和 K/Rb vs Li 图

Fig. 5 Pegmatite K_2O/Na_2O vs. Li and K/Rb vs Li diagram in the south margin of Mufushan batholith

研究区黄柏山与传梓源几个钻孔所揭露的伟晶岩在垂向上也具有深部 Nb-Ta 矿化而浅部为 Li 矿化的特征(图 2b, c), 如地表及浅部伟晶岩脉($\gamma p46$ 、 $\gamma p47$)以锂矿化为主, 中部伟晶岩脉($\gamma p5$)以钽铌矿化为主, 深部伟晶岩脉以($\gamma p2$)铍-钽铌矿化为主。而仁里矿区伟晶岩和断峰山地区类似, 现存的为从母岩花岗岩中的相对近距离分异出来伟晶岩富含 Nb-Ta 矿, 而向上迁移更远的含 Li 部分已被风化剥蚀, 这也可解释距离岩体更近的黄柏山地区的伟晶岩脉中的含锂部分(地表部分剥蚀)在深部延伸不及距岩体稍远的传梓源地区, 以及该区 47 号脉在南东段(距离岩体远)的锂矿化相对较好。

锂矿的空间规律性变化特征对区域上锂矿找矿方向、深部资源预测有较好的指示作用, 表现为空间上锂矿找矿远景区位于距离岩体较远地段, 垂向上锂矿化往往位于伟晶岩脉顶部位置。

5.2 锂矿成矿潜力预测

现有的勘查工作显示, 位于幕阜山地区的南、北缘的仁里和断峰山矿区其 Nb-Ta 矿规模达分别达到超大型和大型, 显示出该区巨大的稀有金属成矿潜力。颇为遗憾的是, 受制于当前勘查工作程度, 目前尚缺乏关于幕阜山南缘伟晶岩型锂矿床成矿潜力的评价。

从成矿模式和成矿规律分析认为远离幕阜山岩体的黄柏山—传梓源地区和梭墩—窄板洞地区是锂成矿重要的远景区(图 2a), Li 地球化学剖面分析从幕阜山→仁里→传梓源地区 Li 含量明显增高, Li 矿化增强(图 1c)。幕阜山—梅仙岩体物探剖面显示幕阜山岩体深部倾向西南, 与梅仙岩体在深部表现为断层接触关系(曹创华等, 2021)。揭示了仁里—传梓源地区深部断层既能为稀有金属迁移成矿提供物

质通道, 又能为稀有金属伟晶岩在空间分异演化提供贯通性空间。从而显示仁里—传梓源地区钽铌、锂成矿具有重大的潜力。

黄柏山—传梓源锂矿远景区中(图 2a)位于西北角 $\gamma p47$ 号含锂伟晶岩脉地表出露长约 1700 m, 与位于南东角地表出露长约 2300 m 的 $\gamma p206$ 号含锂伟晶岩脉呈现断续相连特征。造成两条伟晶岩脉之间断续分布可能受中间大范围的区域因地形陡峭及植被十分发育的环境因素影响, 如在中间横穿一条南北向与两端高程相差达 300~700 m 的山脉, 制约了伟晶岩在地表出露而呈隐伏状。 $\gamma p47$ 号脉和 $\gamma p206$ 号脉均产于片岩中呈北西走向的伟晶岩有着相似的产状, 土壤化探异常显示 $\gamma p47$ 号脉往东南延伸见明显 Li 异常(图 2a), X 荧光分析认为 $\gamma p47$ 号伟晶岩脉往南东延伸特征与含锂伟晶岩脉的走向套合较好(图 2d)(吕维, 2020), 暗示了该区的含锂伟晶岩脉可能相连, 或有更多的含锂伟晶岩脉呈隐伏状待系统的找矿勘查工作去查验。同时在距岩体更远的窄板洞—梭墩地区地表也有含锂伟晶岩的出现, 尽管这可能在存在有作为母岩的深部岩体局部隆起, 但总体上也暗示了从传梓源到窄板洞地区可能蕴藏有大量含锂伟晶岩。

湘东北传梓源矿床为典型的 LCT 伟晶岩型锂-钽铌矿床, 矿床主要预测要素见表 4。依据幕阜山地区锂矿伟晶岩脉的分布情况, 结合成矿地质条件分析以及黄柏山—传梓源和窄板洞—梭墩锂矿预测工作区的实际地质情况, 选择黄柏山、朱子洞、永亨、窄板洞作为最小预测区(图 2a)开展锂矿资源潜力分析。

根据全国矿产资源潜力评价办公室发布的《预测资源量估算要求(2010 年补充)》, 幕阜山地区锂

表 3 幕阜山地区伟晶岩主量元素、微量元素表
Table 3 Major and trace element compositions of the pegmatites in the Mufushan area

地区	岩石名称	样品编号	Na ₂ O/%	K ₂ O/%	Li/×10 ⁻⁶	Rb/×10 ⁻⁶	K/×10 ⁻⁶	K/Rb	K ₂ O/Na ₂ O	资料来源
贺家山	微斜长石伟晶岩	HJS-03	1.70	10.62	16.67	633.90	88 123.40	139.02	6.25	文春华等, 2017
	微斜长石伟晶岩	HJS-07	0.96	5.21	55.05	385.80	43 231.91	112.06	5.43	
	微斜长石伟晶岩	HJS-09	0.68	4.84	26.74	577.50	40 161.70	69.54	7.12	
仁里 5 号脉	斜长石伟晶岩	RL5-1	2.44	9.64	127.00	1 379.00	79 991.49	58.01	3.95	李鹏等, 2019
	斜长石伟晶岩	RL5-2	2.30	11.72	295.00	1 918.00	97 251.06	50.70	5.10	
	斜长石伟晶岩	RL5-3	3.20	1.91	480.00	514.00	15 848.94	30.83	0.60	
	斜长石伟晶岩	RL5-4	5.38	3.52	323.00	569.00	29 208.51	51.33	0.65	
传梓源	钠长石-锂辉石伟晶岩	CZY-6-4	6.50	1.40	576.00	457.00	11 617.02	25.42	0.22	文春华等, 2016
	钠长石-锂辉石伟晶岩	CZY-6-5	5.77	3.03	272.00	686.00	25 142.55	36.65	0.53	
	钠长石-锂辉石伟晶岩	CZY-5-4	5.14	2.03	800.00	573.00	16 844.68	29.40	0.39	
传梓源 206 号脉	锂辉石伟晶岩	H01	2.35	3.93	678.00	656.00	32 610.64	49.71	1.67	张立平等, 2021
	锂辉石伟晶岩	H03	5.10	1.50	778.00	415.00	12 446.81	29.99	0.29	
	锂辉石伟晶岩	H04	3.43	2.01	864.00	498.00	16 678.72	33.49	0.59	
	锂辉石伟晶岩	H05	4.03	4.29	890.00	1 153.00	35 597.87	30.87	1.06	
	钠长石-锂辉石伟晶岩	H07	4.79	1.53	110.00	1 237.00	12 695.74	10.26	0.32	
	钠长石-锂辉石伟晶岩	H08	3.64	1.09	147.00	345.00	9 044.68	26.22	0.30	
	锂辉石伟晶岩	II1	1.49	1.33	2 330.00	2 060.00	11 036.17	5.36	0.89	
	锂辉石伟晶岩	II2	5.33	1.33	5 610.00	308.00	11 036.17	35.83	0.25	
传梓源 206 号脉	锂辉石伟晶岩	II3	4.93	5.58	664.00	1 520.00	46 302.13	30.46	1.13	石威科等, 2020
	锂辉石伟晶岩	II4	3.77	2.72	4 970.00	788.00	22 570.21	28.64	0.72	
	锂辉石伟晶岩	II5	3.16	1.23	9 820.00	306.00	10 206.38	33.35	0.39	
	锂辉石伟晶岩	II6	4.22	3.33	4 180.00	1 050.00	27 631.91	26.32	0.79	
	锂辉石伟晶岩	QY01	5.26	2.15	1 050.00	815.00	17 840.43	21.89	0.41	
	锂辉石伟晶岩	QY02	3.00	7.06	429.00	3 790.00	58 582.98	15.46	2.35	
传梓源 105 号脉	锂辉石伟晶岩	QY03	6.77	3.21	989.00	1 470.00	26 636.17	18.12	0.47	张立平等, 2021
	锂辉石伟晶岩	QY04	4.12	2.52	7 060.00	872.00	20 910.64	23.98	0.61	
	锂辉石伟晶岩	II9	0.95	0.19	15 900.00	505.00	1 576.60	3.12	0.20	
	锂辉石伟晶岩	II10	5.65	1.07	2 610.00	277.00	8 878.72	32.05	0.19	
黄柏山 47 号脉	锂辉石伟晶岩	II11	2.82	0.77	13 100.00	218.00	6 389.36	29.31	0.27	石威科等, 2020
窄板洞 151 号脉	钠长石-锂辉石伟晶岩	II7	4.03	1.00	1 930.00	322.00	8 297.87	25.77	0.25	石威科等, 2020
	钠长石-锂辉石伟晶岩	II8	3.76	1.00	839.00	850.00	8 297.87	9.76	0.27	

6 结论

(1)黄柏山、传梓源和窄板洞地区是幕阜山稀有金属矿集区富锂伟晶岩主要分布地段,野外地质调查、土壤地球化学和X荧光分析认为黄柏山地区富锂伟晶岩与传梓源地区富锂伟晶岩在走向上具断续相连特征,表明从黄柏山至传梓源地区存在较大规模富锂伟晶岩脉带。

(2)湘东北地区铌钽矿伟晶岩和锂矿伟晶岩成岩、成矿年龄几近一致(140~130 Ma),稍晚于区内二云母二长花岗岩形成年龄(143~138 Ma),且同位素研究结果也指示花岗岩与伟晶岩有着相同的物质源区,反映出二云母二长花岗岩为富含稀有金属(Li、Nb、Ta)伟晶岩的母岩,建立了稀有金属伟晶岩成矿模型。

(3)深部隐伏岩体的侵入形态是导致幕阜山地区伟晶岩稀有金属矿差异性成矿的主要原因,不同岩性伟晶岩中稀有金属矿化由岩体往地层分布具不含矿(或见Be矿化)—Be-Nb-Ta—Li-Nb-Ta的过渡演化特征。锂矿在空间上规律变化表现为距离岩体较远地段分布,垂向上锂矿化往往位于伟晶岩脉顶部位置。

(4)依据稀有金属伟晶岩型成矿模型及区域成矿规律认识,以“传梓源式”伟晶岩型锂矿作为预测要素,初步估算了幕阜山稀有金属矿集区锂矿资源潜力为10.19万吨,首次报导了湘东北地区具备寻找大型锂矿产地的潜力。

Acknowledgements:

This study was supported by Research and Development Plan in Key Areas of Hunan Province (No. 2019SK2261), National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0601402), Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education, Central South University (No. 2021YSJS04), Provincial Natural Science Foundation of Hunan (No. 2021JJ30387), Geological Bureau of Hunan Province (No. HNGSTP202105), and Special Science Popularization Topics in Hunan Province (No. 2020ZK4082).

参考文献:

曹创华,程云涛,邹光均,黄建中,刘俊峰,文春华,孟德保,柳建新,楼法生,邓居智. 2021. 湘东北幕阜山-梅仙深部电性结构及其对稀有金属成矿的控制作用[J]. 中国有色金属学报, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20211022.1533.004.html>.

陈剑锋,文春华,黄建中,张锦熙,汪程,唐勇,吕正航,周芳春,陈虎,曹创华,陈宇鹏. 2022. 幕阜山南缘仁里稀有金

属矿区7号伟晶岩脉、辉石闪长岩脉特征及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2021.05.018>.

高林志,陈峻,丁孝忠,刘耀荣,张传恒,张恒,刘燕学,庞维华,张玉海. 2011. 湘东北岳阳地区冷家溪群和板溪群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U—Pb 年龄——对武陵运动的制约[J]. 地质通报, 30(7): 1001-1008.

湖北省第五地质队. 1971. 湖南平江传梓源铌钽矿区初勘报告[R]. 黄石: 湖北省第五地质队: 1-54.

湖南省地质局. 1977. 1:20 万平江幅区域地质调查报告(稀有矿产)[R]. 长沙: 湖南省地质局: 1-89.

湖南省地质调查院. 2009. 1:25 万岳阳幅区域地质调查报告[R]. 长沙: 湖南省地质调查院: 1-71.

黄小强,李鹏,张立平,刘翔,黄志飏,柳清琦,李建康,周芳春,苏俊男,曾乐,万海辉,陈虎. 2021. 湖南仁里稀有金属矿田 36 号伟晶岩地球化学特征、成矿时代及其意义[J]. 矿床地质, 40(6): 1248-1266.

李昌元. 2016. 湖南省平江县传梓源 Nb-Ta-Li 矿床成因研究[D]. 广州: 中南大学: 1-77.

李乐广,王连训,田洋,马昌前,周芳春. 2019. 华南幕阜山花岗岩伟晶岩的矿物化学特征及指示意义[J]. 地球科学, 44(7): 2532-2550.

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.

李鹏,刘翔,李建康,黄志飏,周芳春,张立平. 2019. 湘东北仁里-传梓源矿床 5 号伟晶岩岩相学、地球化学特征及成矿时代[J]. 地质学报, 93(6): 1374-1391.

李胜苗,肖克炎,罗小亚,安江华. 2013. 基于 GIS 的综合信息成矿预测与评价——以湘东南枞树板式铅锌多金属矿为例[J]. 地质学刊, 37(3): 471-477.

刘翔,周芳春,李鹏,李建康,黄志飏,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.

吕维. 2020. 伟晶岩稀有金属矿的 X 荧光特征及意义[D]. 成都: 成都理工大学: 1-73.

毛景文,袁顺达,谢桂青,宋世伟,周琦,高永宝,刘翔,付小方,曹晶,曾载淋,李通国,樊锡银. 2019. 21 世纪以来中国关键金属矿产找矿勘查与研究新进展[J]. 矿床地质, 38(5): 935-969.

穆尚涛,邵拥军,宋泽友,周厚祥,刘清泉,熊伊曲. 2021. 湖南仁里—传梓源伟晶岩型稀有金属矿床云母地球化学特征及其指示意义[J]. 中南大学学报(自然科学版), 52(9): 2973-2989.

石红才,施小斌,杨小秋,蒋海燕. 2013. 江南隆起带幕阜山岩体新生代剥蚀冷却的低温热年代学证据[J]. 地球物理学报, 56(6): 1945-1957.

石威科,周芳春,刘翔,李鹏,黄志飏,文春华,陈阡然,苏俊男,黄小强,张宗栋,张立平,陈虎,刘俊峰,胡小芳. 2020. 湖南仁里矿田锂辉石白云母伟晶岩地质特征及其找矿意义[J]. 地质学报, 94(3): 817-835.

王登红,刘丽君,刘新星,赵芝,何哈哈. 2016. 我国能源金属

- 矿产的主要类型及发展趋势探讨[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 21-28.
- 魏均启, 朱丹, 王芳, 李健, 鲁力, 潘诗洋. 2021. 湖北断峰山铌钽矿矿物学特征和铌钽赋存状态[J]. 矿物学报, 41(3): 319-326.
- 文春华, 陈剑锋, 罗小亚, 李胜苗. 2016. 湘东北梓源稀有金属花岗伟晶岩地球化学特征[J]. 矿物岩石地球化学通报, 35(1): 171-177.
- 文春华, 陈剑锋, 罗小亚, 林碧海. 2018. 湖南重点矿集区稀有金属调查评价成果报告[R]. 长沙: 湖南省地质调查院: 1-136.
- 文春华, 罗小亚, 陈剑锋, 林碧海, 李胜苗. 2019. 湘东北幕阜山地区燕山期岩浆演化与稀有金属成矿的关系[J]. 中国地质调查, 6(6): 19-28.
- 文春华, 邵拥军. 2019. 湘东北地区稀有金属矿床成矿作用研究[M]. 长沙: 中南大学出版社: 1-178.
- 文春华. 2017. 幕阜山南缘地区伟晶岩矿物学、地球化学特征及含矿性分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 36(1): 67-74.
- 杨雪, 张玉芝, 崔翔, 虞鹏鹏, 徐文景. 2020. 湘东北新元古代冷家溪群沉积岩的地球化学特征和碎屑锆石 U-Pb 年代学[J]. 地球科学, 45(9): 3461-3474.
- 张辉, 吕正航, 唐勇. 2019. 新疆阿尔泰造山带中伟晶岩型稀有金属矿床成矿规律、找矿模型及其找矿方向[J]. 矿床地质, 38(4): 792-814.
- 张立平, 苏俊男, 黄小强. 2021. 幕阜山岩体锂矿成矿规律与成矿预测结题报告[R]. 长沙: 湖南省核工业地质局 311 大队: 1-58.
- 中国地质调查局武汉地质调查中心. 2018. 1:5 万区域地质调查报告(郭镇市幅、白羊田镇幅、北港镇幅)[R]. 武汉: 中国地质调查局武汉地质调查中心: 1-277.
- 周芳春, 黄志飏, 刘翔, 苏俊男, 黄小强, 王臻, 陈虎, 张宗栋, 雒小荣, 李建斌, 李振红, 张立平, 曾乐, 李旭明. 2020. 湖南仁里铌钽矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 构造地质与成矿学, 44(3): 476-485.
- 祝明明, 邹建林, 王闯, 冯超, 付宏林, 赵鹏, 陈阳, 徐海军. 2021. 幕阜山地区断峰山铌钽矿的矿物学、年代学和赋存状态[J]. 地质科技通报, 40(6): 55-69.
- References:**
- CAO Chuang-hua, CHENG Yun-tao, ZOU Guang-jun, HUANG Jian-zhong, LIU Jun-feng, WEN Chun-hua, MENG De-bao, LIU Jian-xin, LOU Fa-sheng, DENG Ju-zhi. 2021. Deep electrical structure and its control on rare metal mineralization of Mufu Mountain-Meixian in northeastern of Hunan Province, China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20211022.1533.004.html>(in Chinese with English abstract).
- ČERNÝ P, ERCIT T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. The Canadian Mineralogist, 43(6): 2005-2026.
- ČERNÝ P, LONDON D, NOVÁK M. 2012. Granitic pegmatites as reflections of their sources[J]. Elements, 8(4): 289-294.
- ČERNÝ P. 1991. Fertile granites of Precambrian rare-element pegmatite fields: is geochemistry controlled by tectonic setting or source lithologies?[J]. Precambrian Research, 51(1-4): 429-468.
- CHEN Jian-feng, WEN Chun-hua, HUANG Jian-zhong, ZHANG Jin-xu, WANG Cheng, TANG Yong, LÜ Zheng-hang, ZHOU Fang-chun, CHEN Hu, CAO Chuang-hua, CHEN Yu-peng. 2022. Characteristics of No.7 pegmatite and pyroxene diorite in Renli rare metal deposit, south margin of Mufushan batholiths and its geological implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, <https://doi.org/10.16539/j.ddgzyckx.2021.05.018>(in Chinese with English abstract).
- FEI Guang-chun, MENUGE J F, LI Yun-qiang, YANG Ji-yi, DENG Yun, CHEN Chang-sheng, YANG Yu-fan, YANG Zheng, QIN Li-ye, ZHENG Luo, TANG Wen-chun. 2020. Petrogenesis of the Lijiagou spodumene pegmatites in Songpan-Garze Fold Belt, West Sichuan, China: Evidence from geochemistry, zircon, cassiterite and coltan U-Pb geochronology and Hf isotopic compositions[J]. Lithos, 364-365: 105555.
- GAO Lin-zhi, CHEN Jun, DING Xiao-zhong, LIU Yao-rong, ZHANG Chuan-heng, ZHANG Heng, LIU Yan-xue, PANG Wei-hua, ZHANG Yu-hai. 2011. Zircon SHRIMP U—Pb dating of the tuff bed of Lengjiayi and Banxi groups, north-eastern Hunan: constraints on the Wuling Movement[J]. Geological Bulletin of China, 30(7): 1001-1008(in Chinese with English abstract).
- HUANG Xiao-qiang, LI Peng, ZHANG Li-ping, LIU Xiang, HUANG Zhi-biao, LIU Qing-qi, LI Jian-kang, ZHOU Fang-chun, SU Jun-nan, ZENG Le, WAN Hai-hui, CHEN Hu. 2021. Geochemical characteristics and metallogenic age of No.36 pegmatite in Renli rare metal ore field, Hunan Province, and their significance[J]. Mineral Deposits, 40(6): 1248-1266(in Chinese with English abstract).
- Hunan Geological Bureau. 1977. 1:200,000-square-meter Regional Geological Survey Report (Rare Minerals)[R]. Changsha: Hunan Geological Bureau: 1-89(in Chinese).
- Hunan Institute of Geological Survey. 2009. 1 : 250 000 yueyang regional geological survey report[R]. Changsha: Hunan Institute of Geological Survey: 1-71(in Chinese).
- JI Wen-bin, FAURE M, LIN Wei, CHEN Yan, CHU Yang, XUE Zhen-hua. 2018. Multiple emplacement and exhumation history of the Late Mesozoic Dayunshan-Mufushan batholith in Southeast China and its tectonic significance: 1. Structural analysis and geochronological constraints[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123(1): 689-710.
- JI Wen-bin, LIN Wei, FAURE M, CHEN Yan, CHU Yang, XUE Zhen-hua. 2017. Origin of the Late Jurassic to Early Cretaceous Peraluminous granitoids in the northeastern Hunan Province (middle Yangtze region), South China: Geodynamic Implications for the Paleo Pacific subduction[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 141: 174-193.

- LI Chang-yuan. 2016. The Genesis of Chuanziyuan Niobium-Tantalum-Lithium Rare Metal Deposit in Pingjiang Hunan[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University: 1-77(in Chinese).
- LI Le-guang, WANG Lian-xun, TIAN Yang, MA Chang-qian, ZHOU Fang-chun. 2019. Petrogenesis and rare metal mineralization of the Mufushan granitic pegmatite, South China: Insights from in situ mineral analysis[J]. *Earth Science*, 44(7): 2532-2550(in Chinese with English abstract).
- LI Peng, LI Jian-kang, CHEN Zhen-yu, LIU Xiang, HHUANG Zhi-biao, ZHOU Fang-chun. 2021. Compositional evolution of the muscovite of Renli pegmatite-type rare-metal deposit, northeast Hunan, China: Implications for its petrogenesis and mineralization potential[J]. *Ore Geology Reviews*, 138: 104380.
- LI Peng, LI Jian-kang, LIU Xiang, LI Chao, HUANG Zhi-biao, ZHOU Fang-chun. 2020. Geochronology and source of the rare-metal pegmatite in the Mufushan area of the Jiangnan orogenic belt: A case study of the giant Renli Nb-Ta deposit in Hunan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 116: 103237.
- LI Peng, LI Jian-kang, PEI Rong-fu, LENG Shuang-liang, ZHANG Xu, ZHOU Fang-chun, LI Sheng-miao. 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).
- LI Peng, LIU Xiang, LI Jian-kang, HUANG Zhi-biao, ZHOU Fang-chun, ZHANG Li-ping. 2019. Petrographic and geochemical characteristics of Renli-Chuanziyuan NO. 5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenic age[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1374-1391(in Chinese with English abstract).
- LI Sheng-miao, XIAO Ke-yan, LUO Xiao-ya, AN Jiang-hua. 2013. Comprehensive information metallogenic prognosis and evaluation based on GIS: a case study of lead-zinc polymetallic deposit in southeast Hunan[J]. *Journal of Geology*, 37(3): 471-477(in Chinese with English abstract).
- LIU Xiang, ZHOU Fang-chun, LI Peng, LI Jian-kang, HUANG Zhi-biao, SHI Wei-ke, HUANG Xiao-qiang, ZHANG Li-ping, SU Jun-nan. 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).
- LONDON D, HUNT L E, SCHWING C R, GUTTERY B M. 2020. Feldspar thermometry in pegmatites: truth and consequences[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 175: 8.
- LONDON D. 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites[J]. *Lithos*, 184-187: 74-104.
- LONDON D. 2018. Pegmatites. The Canadian Mineralogist[M]. Special Publication 10. Quebec, Mineralogical Association of Canada: 1-15.
- LÜ Wei. 2020. X-ray fluorescence characteristics and significance of pegmatite rare metal ore[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology: 1-73(in Chinese with English abstract).
- MAO Jing-wen, YUAN Shun-da, XIE Gui-qing, SONG Shi-wei, ZHOU Qi, GAO Yong-bao, LIU Xiang, FU Xiao-fang, CAO Jing, ZENG Zai-lin, LI Tong-guo, FAN Xi-yin. 2019. New advances on metallogenic studies and exploration on critical minerals of China in 21st century[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 935-969(in Chinese with English abstract).
- MU Shang-tao, SHAO Yong-jun, SONG Ze-you, ZHOU Hou-xiang, LIU Qing-quan, XIONG Yi-qu. 2021. Geochemical characteristics and indication of mica in Renli—Chuanziyuan pegmatite type rare metal deposit in Hunan Province[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 52(9): 2973-2989(in Chinese with English abstract).
- RODA-ROBLES E, VILLASECA C, PESQUERA A, GIL-CRESPO P P, VIEIRA R, LIMA A, GRATE-OLAVE I. 2018. Petrogenetic relationships between Variscan granitoids and Li-(F-P)-rich aplite-pegmatites in the Central Iberian Zone: Geological and geochemical constraints and implications for other regions from the European Variscides[J]. *Ore Geology Reviews*, 95: 408-430.
- SHEARER C K, PAPIKE J J, JOLLIFF B L. 1992. Petrogenetic links among granites and pegmatites in the Harney Peak rare-element granite-pegmatite system, Black Hills, South Dakota[J]. *Canadian Mineralogist*, 30: 785-809.
- SHI Hong-cai, SHI Xiao-bin, YANG Xiao-qiu, JIANG Hai-yan. 2013. The exhumation process of Mufushan granite in Jiangnan uplift since Cenozoic: Evidence from low-temperature thermochronology[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 56(6): 1945-1957(in Chinese with English abstract).
- SHI Wei-ke, ZHOU Fang-chun, LIU Xiang, LI Peng, HUNAG Zhi-biao, WEN Chun-hua, CHEN Qian-ran, SU Jun-nan, HUANG Xiao-qiang, ZHANG Zong-dong, ZHANG Li-ping, CHEN Hu, LIU Jun-feng, HU Xiao-fang. 2020. Geological characteristics and the prospecting significance of the spodumene-muscovite pegmatite in the Renli ore-field, Hunan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 817-835(in Chinese with English abstract).
- The Fifth Geological Team of Hubei Province. 1971. Preliminary survey report of Chuan-Ziyuan Niobium-tantalum deposit, Pingjiang, Hunan province[R]. Huangshi: The Fifth Geological Team of Hubei Province: 1-54(in Chinese).
- WANG Deng-hong, LIU Li-jun, LIU Xin-xing, ZHAO Zhi, HE Han-han. 2016. Main types and research trends of energy metallic resources in China[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 36(1): 21-28(in Chinese with English abstract).
- WANG Lian-xun, MA Chang-qian, ZHANG Chao, ZHANG Jin-yang, MARKS M A W. 2014. Genesis of leucogranite by prolonged fractional crystallization: A case study of the Mufushan complex, South China[J]. *Lithos*, 206-207: 147-163.

- WEI Jun-qi, ZHU Dan, WANG Fang, LI Jian, LU Li, PAN Shi-yang. 2021. Mineralogical characteristics and occurrence state of niobium-tantalum in Duanfengshan niobium-tantalum Deposit, Hubei[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 41(3): 319-326(in Chinese with English abstract).
- WEN Chun-hua, CHEN Jian-feng, LUO Xiao-ya, LI Sheng-miao. 2016. Geochemical features of the Chuanziyuan rare metal pegmatite in northeastern Hunan, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(1): 171-177(in Chinese with English abstract).
- WEN Chun-hua, CHEN Jiang-feng, LUO Xiao-ya, LIN Bi-hai. 2018. Investigation and evaluation results of rare metals in Hunan key ore concentration area[R]. Changsha: Hunan Institute of Geological Survey: 1-136(in Chinese).
- WEN Chun-hua, LUO Xiao-ya, CHEN Jian-feng, LIN Bi-hai, LI Sheng-miao. 2019. Relationship between Yanshanian magmatic activity and rare metal mineralization in Mufushan area of Northeast Hunan[J]. *Geological Survey of China*, 6(6): 19-28(in Chinese with English abstract).
- WEN Chun-hua, SHAO Yong-jun, XIONG Yi-qu, LI Jian-kang, JIANG Shao-yong. 2021. Ore genesis of the Baishawo Be-Li-Nb-Ta deposit in the northeast Hunan Province, south China: Evidence from geological, geochemical, and U-Pb and Re-Os geochronologic data[J]. *Ore Geology Reviews*, 129: 103895.
- WEN Chun-hua, SHAO Yong-jun. 2019. Study on mineralization of rare metal deposits in northeast Hunan Province[M]. Changsha: Central South University Press: 1-178(in Chinese).
- WEN Chun-hua. 2017. Mineralogical-geochemical characteristics and ore potentiality studies of pegmatite in southern margin of the Mufushan area, Hunan province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(1): 67-74(in Chinese with English abstract).
- Wuhan Geological Survey Center of China Geological Survey. 2018. 1:50,000 Regional geological survey Report (Guozhen, Baiyangtian and Beigang Geological Map)[R]. Wuhan: Wuhan Geological Survey Center of China Geological Survey: 1-277(in Chinese).
- XIONG Yi-qu, JIANG Shao-yong, WEN Chun-hua, YU Hao-yu. 2020. Granite-pegmatite connection and mineralization age of the giant Renli Ta-Nb deposit in South China: Constraints from U-Th-Pb geochronology of coltan, monazite, and zircon[J]. *Lithos*, 358-359: 105422.
- YANG Xue, ZHANG Yu-zhi, CUI Xiang, YU Peng-peng, XU Wen-jing. 2020. Geochemistry and detrital zircon U-Pb ages of sedimentary rocks from Neoproterozoic Lengjiaxi Group in NE Hunan Province[J]. *Earth Science*, 45(9): 3461-3474(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Hui, LÜ Zheng-hang, TANG Yong. 2019. Metallogeny and prospecting model as well as prospecting direction of pegmatite-type rare metal ore deposits in Altay orogenic belt, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 792-814(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Fang-chun, HUANG Zhi-biao, LIU Xiang, SU Jun-nan, HUANG Xiao-qiang, WANG Zhen, CHEN Hu, ZHANG Zong-dong, LUO Xiao-rong, LI Jian-bin, LI Zhen-hong, ZHANG Li-ping, ZENG Le, LI Xu-ming. 2020. Re-Os dating of molybdenite from the Renli Nb-Ta deposit, Hunan Province, and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(3): 476-485(in Chinese with English abstract).
- ZHU Ming-ming, ZOU Jian-lin, WANG Chuang, FENG Chao, FU Hong-lin, ZHAO Peng, CHEN Yang, XU Hai-jun. 2021. Mineralogy, geochronology and occurrence state of the Duanfengshan Nb-Ta deposit in Mufushan area[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(6): 55-69(in Chinese with English abstract).