

湖南仁里稀有金属矿床岩相学和矿物学特征及其地质意义

——以5号脉 ZK708 号钻孔为例*

周芳春¹, 李 鹏², 刘 翔³, 李 广¹, 黄志彪¹, 李建康², 成永生⁴, 苏俊男¹,
张立平¹, 陈 虎¹, 黄小强¹, 雒小荣¹, 桂 云¹, 文春华⁵

(1 湖南省核工业地质局 311 大队, 湖南长沙 410100; 2 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; 3 湖南省生态环境事务中心, 湖南长沙 410014; 4 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 5 湖南省地质调查院, 湖南长沙 410116)

摘 要 仁里矿床是中国近年新发现的超大型花岗伟晶岩型稀有金属矿床, 文章针对其稀有金属矿化富集规律、成岩成矿演化特征及找矿标志等问题, 以5号主矿脉钻孔 ZK708 全孔岩芯及岩体内、外伟晶岩为研究对象, 采用了电子探针、能谱仪分析和全岩地球化学分析等方法, 开展了伟晶岩岩相学、矿物学及地球化学等方面的研究工作。研究表明: ①仁里矿床伟晶岩岩性比较复杂, 不同岩性伟晶岩相互穿插, 为同期次不同阶段的结果, 经历了多阶段的岩浆-热液活动, 铌钽等稀有金属矿化与多阶段岩浆-热液活动密切相关, 铌钽等稀有金属矿物主要赋存于粗-中粒、粗粒白云母钠长石伟晶岩中, 随着伟晶岩粒度的增加, 铌钽等稀有金属矿化具有逐渐增加的趋势; ②仁里矿床伟晶岩为 LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩, 经历了不同阶段的岩浆-热液活动, 多阶段的热液活动(尤其是富 P、F 热液流体)为 Li、Nb、Ta 等稀有元素的进一步富集提供了热源和物质来源, 促使 Li、Nb、Ta 等稀有元素的进一步释出和富集; 不同世代矿物出现在伟晶岩熔体-溶液不同演化阶段。磷灰石和粒状、叶片状钠长石可做为本区铌钽等稀有金属矿产的重要找矿标志。

关键词 地球化学; 稀有金属; 花岗伟晶岩; 岩相学和矿物学特征; 成岩与成矿演化; 仁里矿床; 湖南
中图分类号: P618.6 **文献标志码**: A

Petrographic and mineralogical characteristics of Renli rare metal deposit in Hunan Province and their geological implications: A case study of drill hole ZK708 of the No. 5 vein

ZHOU FangChun¹, LI Peng², LIU Xiang³, LI Guang¹, HUANG ZhiBiao¹, LI JianKang², CHENG YongSheng⁴, SU JunNan¹, ZHANG LiPing¹, CHEN Hu¹, HUANG XiaoQiang¹, LUO XiaoRong¹, GUI Yun¹ and WEN ChunHua⁵
(1 No. 311 Geological Party of Hunan Nuclear Geological Bureau, Changsha 410100, Hunan, China; 2 MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3 Hunan Eco-environmental Affairs Center, Changsha 410014, Hunan, China; 4 School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 5 Hunan Institute of Geological Survey, Changsha 410116, Hunan, China)

* 本文得到湖南省重点领域研发计划项目(编号:2019SK2261)、湖南省自然资源厅省级财政出资地质勘查项目(编号:20120370、20140350、20150351、20170331、20200803)、湖南省自然资源厅项目(编号:2018-02)、国家重点研发计划课题(编号:2019YFC06050203、2019YFC06050202)、科技部项目(编号:2019YFC0605200)、国家自然科学基金面上项目(编号:41872096、42002109)和中国地质科学院项目(编号:IMRKK1927)联合资助

第一作者简介 周芳春,男,1967年生,高级工程师,主要从事稀有金属成矿规律研究和稀有金属勘查与评价工作。Email: 578486016@qq.com

收稿日期 2020-12-22;改回日期 2021-06-21。秦思婷编辑。

Abstract

The Renli deposit is a newly discovered superlarge granite pegmatite-type Nb-Ta deposit in Hunan Province. For the purpose of revealing its rare metal mineralization and enrichment regularity, diagenetic and metallogenic evolution characteristics as well as prospecting indicators, the authors chose the core samples from drill hole ZK708 of the No. 5 main orebody and the pegmatite inside and outside the rock mass as the research objects, and studied petrographic, mineralogical and geochemical characteristics of pegmatites by means of EPMA, EDS and whole rock geochemistry. Some conclusions have been reached: ① The lithology of the pegmatites in the Renli deposit is relatively complex, with different lithologic pegmatites penetrating each other. This phenomenon might have resulted from evolution of different stages of the same period. It has experienced multi-stage magmatic-hydrothermal activities. The mineralization of rare metals was closely related to multi-stage magmatic hydrothermal activities. Nb, Ta and other rare metal minerals mainly occur in coarse-medium grained and coarse-grained muscovite albite pegmatite. With the increase of the particle size of the pegmatite, the mineralization of rare metals such as Nb and Ta tends gradually to increase; ② The pegmatites in the Renli deposit are LCT (Li-Cs-Ta) pegmatites, which have undergone different stages of magmatic hydrothermal activities. The multi-stage hydrothermal activities (especially P and F-rich hydrothermal fluids) provided heat and material sources for the further enrichment of Li, Nb, Ta and other rare elements, and promoted further release and enrichment of rare elements such as Li, Nb, and Ta. Minerals of different generations occurred in different evolution stages of pegmatite melt-solution. The apatite and granular and foliated albite can be used as important prospecting indicators in search for rare metal minerals such as Nb, Ta in this area.

Key words: geochemistry, rare metal, granitic pegmatite, petrographic and mineralogical characteristics, diagenetic and metallogenic evolution, Renli deposit, Hunan

仁里矿床位于幕阜山岩体西南缘,为中国东部新发现的高品位、超大型钽铌矿床(王臻等,2019;杨晗等,2019;刘翔等,2018;2019;周芳春等,2019a;2019b;王登红,2019;石威科等,2020)。仁里矿床的发现,对提高中国钽矿资源,改善中国钽矿资源品质具有重大意义(李建康等,2019)。近年来,许多学者对幕阜山地区(尤其是仁里地区)花岗岩成因、稀有金属伟晶岩的成矿地质特征、找矿标志、赋矿特征、成矿规律、成矿模型、岩相学及地球化学、成岩成矿时代、矿物学特征、岩浆热液成矿环境和包裹体、成矿流体及温压条件、矿石可选性试验及矿产资源综合评价等进行了研究工作(湖南省地质矿产局,1988;刘娟群等,1999;石红才等,2013;湖北省地质调查院,2013;Wang et al., 2014a; Wang et al., 2014b; Ji et al., 2016; 文春华等, 2015; 2016;2017;2019;李昌元等,2019;李鹏,2017;李鹏等, 2017;2019;Li et al., 2019;2019b;黄志飏等,2018;王臻等,2019;杨晗等,2019;刘翔等,2018;2019;周芳春等,2019a;2019b;2020a;2020b;石威科等,2020;杨世珍等,2020)。研究表明,矿田内伟晶岩属极高分异、高硅、过铝质花岗质岩石,属S型花岗岩;含稀有金属伟

晶岩是过铝质、极高分异的岩浆结晶分异的产物,属典型的LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩。幕阜山岩体花岗岩成岩年龄为160~130 Ma,仁里矿区花岗岩年龄为146.2~139.3 Ma,其稀有金属伟晶岩成岩成矿年龄为133~125 Ma。仁里矿区区内花岗岩不是稀有金属伟晶岩的成矿母岩,其母岩可能是深部隐伏岩体。仁里矿床是同期次多阶段岩浆活动的结果,具有较高盐度的流体是钽铌矿化的成矿流体,热液流体盐度较高,富F、Cl热液流体有利于钽铌矿等元素的富集。仁里矿区稀有金属伟晶岩Nb、Ta、Be、Li元素较富集,为幕阜山地区稀有金属矿化浓集中心,稀有金属及非金属矿产资源丰富,具有较大的综合开发利用价值。前人的研究成果对幕阜山地区尤其是仁里矿床稀有金属矿勘查、综合开发利用及成矿理论研究有着重要的指导作用。随着仁里矿床的勘查工作投入和认识的不断加深,本文在系统总结前人研究成果的基础上,以5号矿脉ZK708钻孔岩芯及岩体(幕阜山岩体)内、外接触带典型矿脉(36号、5号矿脉)地表伟晶岩做为研究对象,通过显微鉴定、电子探针及主要微量元素地球化学分析等手段,进一步探讨仁里钽铌等稀有金属矿床稀有金

属富集规律、成岩与成矿演化关系和找矿标志,为幕阜山-连云山地区稀有金属矿勘查,及仁里矿床下一步详查、综合开发利用提供依据。

1 矿床地质

仁里矿床位于扬子陆块与华夏陆块过渡部位之江南隆起造山带的湖南段东部(图1a)的幕阜山岩体西南缘,受北西走向的九鸡头-苏姑尖压扭性断裂(F_{51})、北西走向的枫林-浆市压扭性断裂(F_{76})及燕山期幕阜山岩体和武陵期梅仙岩体和传梓源岩株控制(图1b)。区域构造演化经历了前加里东构造拼合→印支期俯冲汇聚→燕山早期汇聚走滑→燕山晚期离散走滑的构造发展过程(傅昭仁等,1999;李建威等,1999;周芳春等,2019a;2019b)。矿区出露的地层简单,主要为冷家溪群云母片岩和少量第四系(图2)。矿区构造发育,主要为北西向、北东向及近南北向压扭性断裂(图2)。矿区岩浆岩发育,北部为多期次燕山期复式花岗岩体,主要为中粗粒斑状黑云母二长花岗岩和粗中粒片麻状斑状黑云母二长花岗岩,南部为新元古代中细粒黑云母斜长花岗岩(图2)。区内主要的脉体为伟晶岩及少量石英脉(主要分布于矿区东部 F_{12} 压扭性断裂及其构造中)。

矿区伟晶岩发育,目前共发现伟晶岩脉140条(脉长 ≥ 100 m),其中,岩体内95条,岩体外片岩地区45条。岩体内接触带(花岗岩地区)主要为二云母伟晶岩(局部地段为白云母钠长石伟晶岩)和少量的黑云母伟晶岩,其围岩为粗中粗粒斑状黑云母二长花岗岩或粗中粒片麻状斑状黑云母二长花岗岩;岩脉呈脉状产出,NW向、NE向或近SN走向,倾向SE、W或E,倾角 $45^{\circ}\sim 80^{\circ}$;已发现钽铌矿脉7条(13、19、20、21、31、33、36号脉),矿脉长150~670 m,延伸小于250 m,脉厚1.73~6.72 m; Nb_2O_5 品位0.020%~0.055%, Ta_2O_5 品位0.007%~0.045%(周芳春等,2017)。岩体外接触带(片岩地区)主要为白云母钠长石伟晶岩和锂辉石白云母钠长石伟晶岩,其围岩为云母片岩和花岗岩;岩脉呈雁列式平行排列,似层状产出;NW走向,倾向SW,倾角 $25^{\circ}\sim 56^{\circ}$,脉长220~4040 m,沿倾向延伸大于746 m(如5号脉),脉厚3.0~156 m;已发现钽铌锂矿7条,矿脉长220~2040 m,厚0.80~10.10 m,矿体控制最大斜深746 m(5₂号矿体);矿体中, Li_2O 品位0.12%~3.423%(46、47号矿脉), Rb_2O 品位0.03%~0.17%, Nb_2O_5 品位0.004%~

0.591%, Ta_2O_5 品位0.007%~0.561%(周芳春等,2017)。造岩矿物主要有石英、钠长石、钾长石、斜长石、微斜长石、条纹长石和白云母;稀有金属矿物有钽铌矿、细晶石、钨钼矿、绿柱石、锂云母、锂辉石;副矿物有钽铌铁铀矿及沥青铀矿、钍石、铁铝-锰铝质石榴子石、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、独居石、辉钼矿、辉钨矿、电气石、角闪石、绢-水云母、萤石、磷灰石等。

区内伟晶岩具有较好的分带性和较完整的演化序列(刘翔等,2019;石威科等,2020),自北东至南西,由黑云母伟晶岩向二云母伟晶岩、白云母钠长石伟晶岩、锂辉石白云母钠长石伟晶岩演化,矿化序列由无矿化向Be、Be+Nb+Ta、Be+Nb+Ta+Li、Be+Nb+Ta+Li演化。仁里矿区圈定钽铌矿体17个(未估算锂矿资源储量),探获 Ta_2O_5 资源量10 791 t, Nb_2O_5 资源量14 057 t(周芳春等,2017),BeO资源量15 600 t(周芳春等,2020b), Ta_2O_5 平均品位0.036%, Nb_2O_5 平均品位0.047%(周芳春等,2017),BeO品位0.04%~0.148%(周芳春等,2020b)。

2 样品采集及测试

本次以5号主矿脉(Ta_2O_5 资源量占全区 Ta_2O_5 资源量的67%左右(周芳春等,2020b))7线ZK708号钻孔岩芯为重点研究对象,采集样品78件(片岩15件,伟晶岩63件,表1,图2);在岩体内36号脉、5号脉及47号脉各采集地表矿石样2件。笔者镜下观测了上述84件样,并对钽铌矿、绿柱石、锂辉石、磷灰石、石榴子石等进行了电子探针分析,采用仪器为JXA-8230电子探针和X-max能谱仪;测试方法参见相关资料(王臻等,2019;杨晗等,2019),并从中选取代表性的伟晶岩标本(60件)进行 Rb_2O 、 Nb_2O_5 、 Ta_2O_5 三项稀有金属元素分析,测试方法参见相关资料(周芳春等,2019b)。

钻孔岩芯样品的岩相分析、电子探针测试工作在中国地质科学院矿产资源研究所完成,岩芯样品化学分析样在核工业二三〇研究所测试中心完成,单矿物制靶工作由河北省廊坊市尚艺岩矿检测技术服务有限公司承担。

3 测试结果

3.1 岩相学特征

3.1.1 片岩岩相学特征

石英云母片岩:主要由石英(25%~55%)、黑云

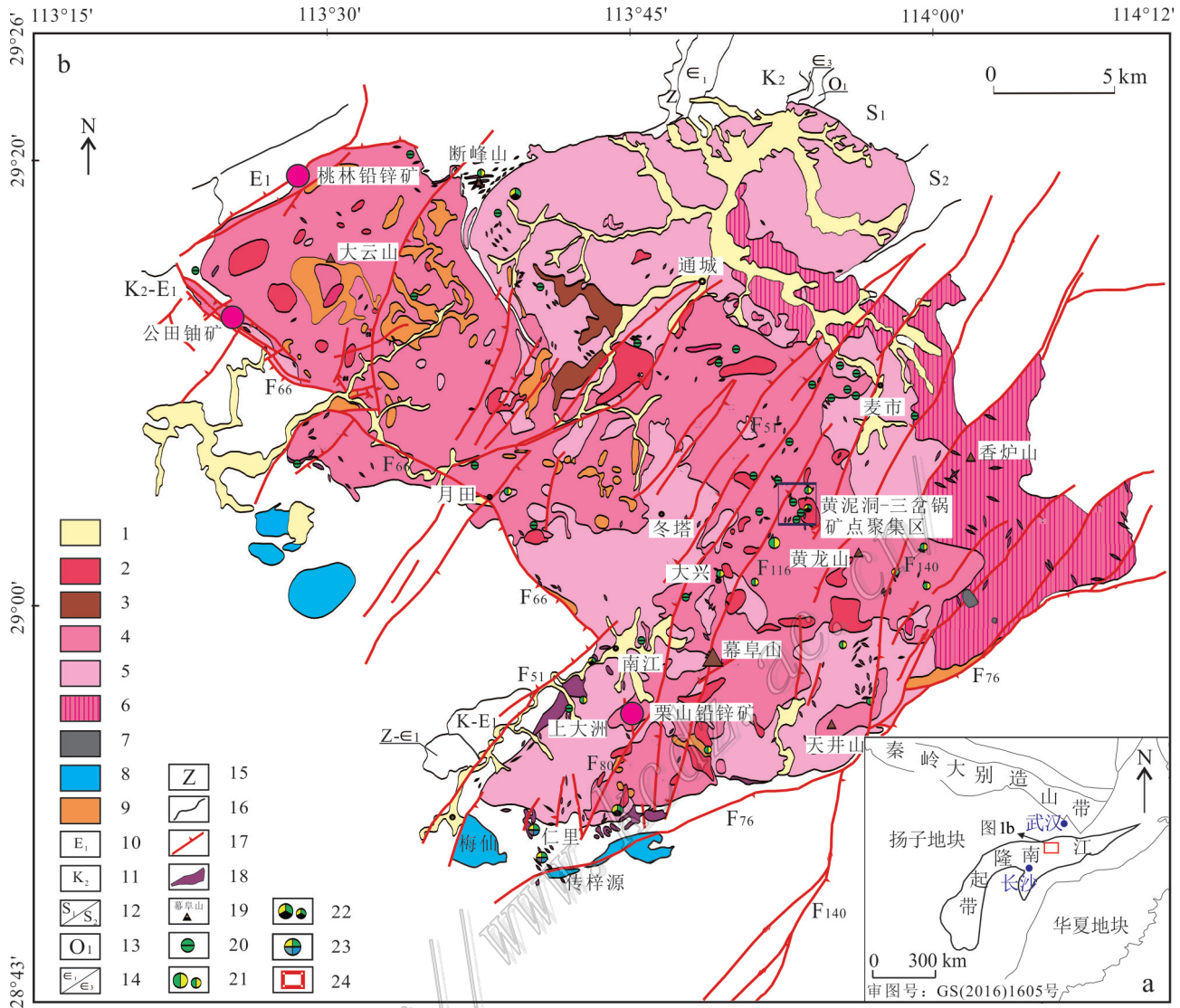


图1 幕阜山大地构造位置(a)及地质矿产简图(b)(周芳春等,2019b;刘翔等,2019)

1—第四系;2—燕山晚期第四次侵入体;3—燕山晚期第三次侵入体;4—燕山晚期第二次侵入体;5—燕山晚期第一次侵入体;6—燕山早期第二次侵入体;7—燕山早期第一次侵入体;8—新元古代侵入体;9—新元古代冷家溪群;10—古近系;11—白垩系上统;12—志留系下统/上统;13—奥陶系下统;14—寒武系下统/上统;15—震旦系;16—地层/陆块界线;17—断层;18—伟晶岩;19—地名及地理要素;20—铍矿点;21—铍钽矿床/矿点;22—铌钽铍锂矿床/矿点;23—铌钽铍锂矿床;24—研究区范围

Fig. 1 Simplified tectonic map (a) and geological and mineral resources map (b) of Mufushan area (after Zhou et al., 2019b; Liu et al., 2019)

1—Quaternary; 2—Stage VI Yanshanian intrusion; 3—Stage III Yanshanian intrusion; 4—Stage II Yanshanian intrusion; 5—Stage I Yanshanian intrusion; 6—Stage II Yanshanian intrusion; 7—Stage I Yanshanian intrusion; 8—Neoproterozoic intrusion; 9—Neoproterozoic Lengjiaxi Group; 10—Paleogene; 11—Upper Cretaceous; 12—Lower/upper Silurian; 13—Lower Ordovician; 14—Lower/upper Cambrian; 15—Sinian; 16—Stratigraphic/continental mass boundary; 17—Fault; 18—Pegmatite; 19—Place name and geographical elements; 20—Be ore spot; 21—Be+Nb+Ta deposit/ ore spot; 22—Nb+Ta+Be+Li deposit/ ore spot; 23—Nb+Ta+Be+Li+Cs deposit; 24—Study area

母(30%~45%)、白云母(0~12%)、石榴子石(2%~20%)组成,部分石英云母片岩含黑磷云母(YK76, 30%)、钠长石(YK113, 25%)和磷灰石(YK57, 8%)。变晶结构,块状构造。石英为无色透明,他形粒状,

粒度0.1~0.3 mm。黑云母呈叶片状,石榴子石零星散落于石英云母中,均被蚀变,且普遍破裂。

含石榴子石石英云母片岩(图3a、d):主要由石英(38%~40%)、黑云母(10%~48%)、石榴子石(5%~

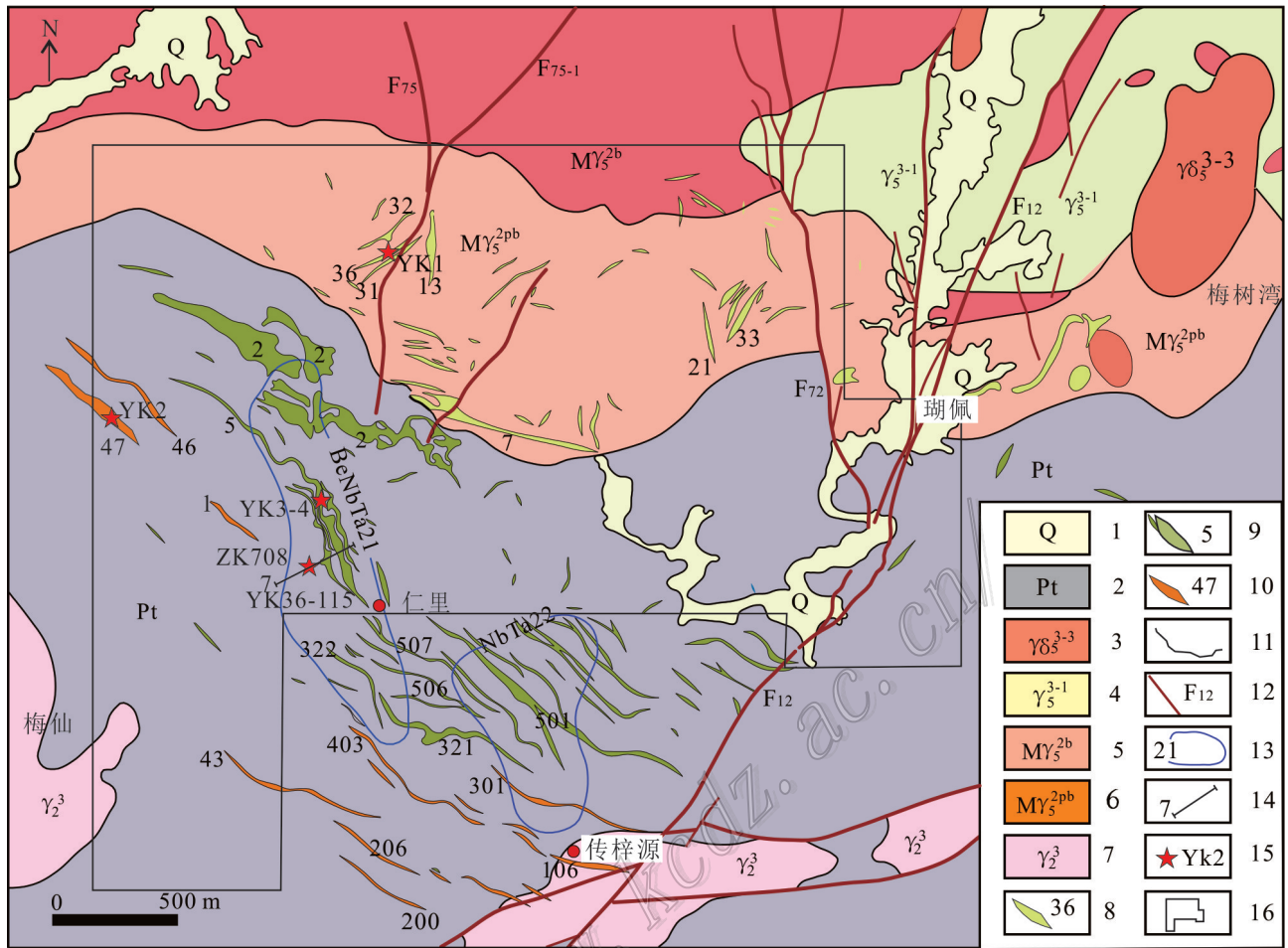


图 2 仁里矿区地质简图(据周芳春等, 2019b 修改)

1—第四系; 2—冷家溪群片岩; 3—细粒花岗岩闪长岩; 4—细粒二云母二长花岗岩; 5—中粒似斑状黑云母二长花岗岩; 6—粗中粒片麻状斑状黑云母二长花岗岩; 7—武陵期中细粒黑云母斜长花岗岩; 8—二云母伟晶岩脉及其编号; 9—白云母钠长石伟晶岩脉及其编号; 10—锂辉石白云母钠长石伟晶岩脉及其编号; 11—地质界线; 12—断裂及编号; 13—重矿物异常晕圈及编号; 14—勘查线及编号; 15—取样位置及编号; 16—勘查区范围

Fig. 2 Geological map of the Renli mining area (modified after Zhou et al., 2019b)

1—Quaternary; 2—Schist of Lengjiayi Group; 3—Fine-grained granodiorite; 4—Fine-grained two mica monzonitic granite; 5—Medium-grained two mica monzonitic granite; 6—Granulated coarse-grained porphyritic biotite monzogranite; 7—Wuling period mid-fine-grained biotite plagiogranite; 8—Mica pegmatite dike and its serial number; 9—Pegmatite vein of muscovite sodium feldspar and its serial number; 10—Pegmatite vein of lithium pyromuscovite sodium feldspar and its serial number; 11—Geological boundary; 12—Fault and its serial number; 13—Heavy mineral abnormal halo and its serial number; 14—Survey line and its serial number; 15—Sampling location and its serial number; 16—Exploration area

15%)、白云母(2%~40%, YK44 不含白云母)组成, 部分含少量钠长石(YK47, 2%)。变晶结构, 块状构造。石英无色透明, 他形粒状, 粒径 < 0.3 mm。白云母无色, 半自形-他形, 片状; 钠长石无色, 片状, 见钠长石双晶; 石榴子石粒状, 表面有破裂, 赋存在石英白云母中, 在石英, 白云母之后形成。

绿泥石化黑云母片岩: 由石英(约 20%)、钠长石

(约 10%)、黑云母(约 30%)、绿泥石(约 40%)组成。鳞片状粒状变晶结构, 块状构造。黑云母叶片状。钠长石无色, 半自形-他形, 板状, 具钠长石双晶; 石榴子石粒状, 赋存在石英中, 形成于石英之后; 云母赋存在钠长石上, 形成于钠长石之后。

3.1.2 伟晶岩岩相学特征

碱性长石伟晶岩(图 3h, k): 碱性长石伟晶岩由

石英(8%~28%)、正长石(YK39、YK89, 30%~52%)、条纹长石(52%~90%, YK39、YK89 不含条纹长石)、白云母(2%~27%)和钠长石(5%~18%, YK41、YK52 不含钠长石), 及少量的石榴子石和绢云母组成; 细粒、中粒、中粗粒结构和文象结构, 块状构造; 普遍黏土化和绢云母化。石英无色透明, 他形粒状。碱性长石以正长石和条纹长石为主。条纹长石无色, 半自形-他形, 板状, 粒径 ≥ 5.0 mm。白云母无色, 半自形-他形, 片状, 部分受应力作用发生扭曲。钠长石无色, 自形-半自形, 长条状板状, 有零星自形-半自形的长条状钠长石分布在条纹长石中, 长度 < 1.0 mm, 具钠长石简单双晶。绢云母集中分布在条纹长石中, 为钾长石蚀变产物。

中、细粒白云母钠长石伟晶岩(图3b、e): 该类伟晶岩中偶见铌钽矿物, 但难以形成工业矿体; 主要由石英(20%~60%)、钠长石(25%~60%)、白云母(10%~25%)、斜长石(0~10%)、微斜长石(0~15%)、条纹长石(0~20%)和石榴子石(0~20%)组成, 部分含钾长石(YK37, 10%)、黑磷云母(YK93、YK95、YK99-100、YK103、YK112, 5%~17%)、绢云母(YK54、YK59、YK99, 2%~50%)和黑云母(YK108, 8.00%); 中粒、细粒结构, 块状构造。石英无色透明, 他形粒状; 钠长石无色, 半自形-他形, 板状, 粒径 < 1.0 mm, 钠长石表面浑浊, 普遍轻微黏土化和绢云母化; 白云母无色, 半自形-他形, 细长片状, 部分受应力作用发生扭曲; 白云母穿切石英和钠长石, 形成于钠长石之后; 石榴子石呈六边形, 粒状, 具裂纹、孔洞, 内可包裹锆石; 微斜长石格子双晶, 石英穿切于微斜长石中; 微斜长石切割钠长石, 形成于钠长石之后; 斜长石无色, 半自形-他形, 板状, > 2.5 mm, 表面发生黏土化; 钾长石无色, 片状, 主要副矿物为磷灰石、锆石。

粗粒、粗中粒白云母钠长石伟晶岩(图3c、f、g、j): 区内钽、铌、铍、锂(主要为含锂云母)工业矿体主要赋存部位在粗-中粒及粗粒白云母钠长石伟晶岩中; 主要由石英(20%~40%)、钠长石(20%~65%)、白云母(5%~22%)组成, 部分含微斜长石、条纹长石、石榴子石、黑磷云母、黑云母和绢云母; 锂云母主要赋存于伟晶岩核部(如YK90)。石英无色透明, 他形粒状, 表面洁净, 局部分布有细小鳞片状白云母; 存在2期石英, 晚期石英脉穿插于早期石英中。钠长石无色, 半自形-他形, 片状。白云母无色, 包括2种赋存状态, 一种为半自形-他形, 片状, 部分受应力作

用发生扭曲; 另一种呈细小鳞片状聚集。黑磷云母半自形-他形, 长条状, 分布在石英钠长石或者白云母中, 晚于石英、钠长石形成。碱性长石主要以条纹长石为主, 亦有部分微斜长石, 普遍发生黏土化; 条纹长石中钾长石、钠长石同时形成, 钾长石为客晶, 钠长石为主晶, 同期次生成。微斜长石裂隙中充填有白云母, 白云母晚于微斜长石形成。石榴子石粒状, 赋存在石英、钠长石或白云母中, 具裂纹、孔洞, 内可包裹锆石, 晚于石英、钠长石形成。副矿物主要为磷灰石、锆石、晶质铀矿、独居石。

锂辉石白云母钠长石伟晶岩: 主要矿物成分为石英(约35%)、钠长石(约28%)、锂辉石(约20%~40%)、白云母(约10%)、钾长石(约5%)及少量的绢云母。锂辉石白云母钠长石伟晶岩主要分布于矿区西南区域(图2), 其岩性和矿化组合均具有较强的分带性, 岩脉的两侧多为白云母钠长石伟晶岩, 中间为锂辉石白云母钠长石伟晶岩(图4)。近地表锂辉石多蚀变为腐锂辉石, 保持了锂辉石的外形和结构, Li严重流失, 造成 Li_2O 含量较低。

含锂云母白云母钠长石伟晶岩: 一般赋存于白云母钠长石伟晶岩脉的核部, 有较强的锂铌钽矿化, 铌钽矿呈块状、颗粒状或针状赋存于长石和石英颗粒中, 锂电气石较发育, 局部可见铯榴石。其主要由白云母(约40%)、石英(约30%)、钠长石(蚀变约15%, 完好的约8%)、磷灰石(约5%)和细晶石(约2%)组成。细晶石粒径 $1\sim 5$ μm , 包裹于其他矿物中, 如白云母和石英。石英为他形, 不规则粒状。钠长石无色, 自形-半自形, 不规则粒状、板柱状, 表面稍脏。白云母自形-半自形, 片状, 或见有蚀变状, 内常包裹有石英、钠长石颗粒。

根据钻孔岩芯观测, 自地表至钻孔深部, 云母片岩颜色由浅变深, 变质程度逐渐加强(尤其是伟晶岩中俘虏体); 其主要矿物成分为石英、黑云母、白云母和石榴子石, 以及少量的绢云母和铁质矿物, 长石斑晶浅部少见, 深部明显增加。钻孔揭露伟晶岩段总长123.7 m。其中, 伟晶岩长112.8 m, 伟晶岩中的俘虏体(云母片岩)1.00~3.53 m(总长度10.93 m)。该伟晶岩属白云母钠长石伟晶岩, 呈灰白色-白色, 普遍黏土化、绢云母化; 主要矿物成分为石英、钠长石、白云母、锰铝榴石; 稀有金属矿物主要为铌钽矿、绿柱石、锂云母、黑磷云母; 副矿物主要为磷灰石; 局部含碱性长石(如条纹长石、正长石、微斜长石)和少量的黑云母。伟晶岩分带性较差。绿柱石在不同岩性

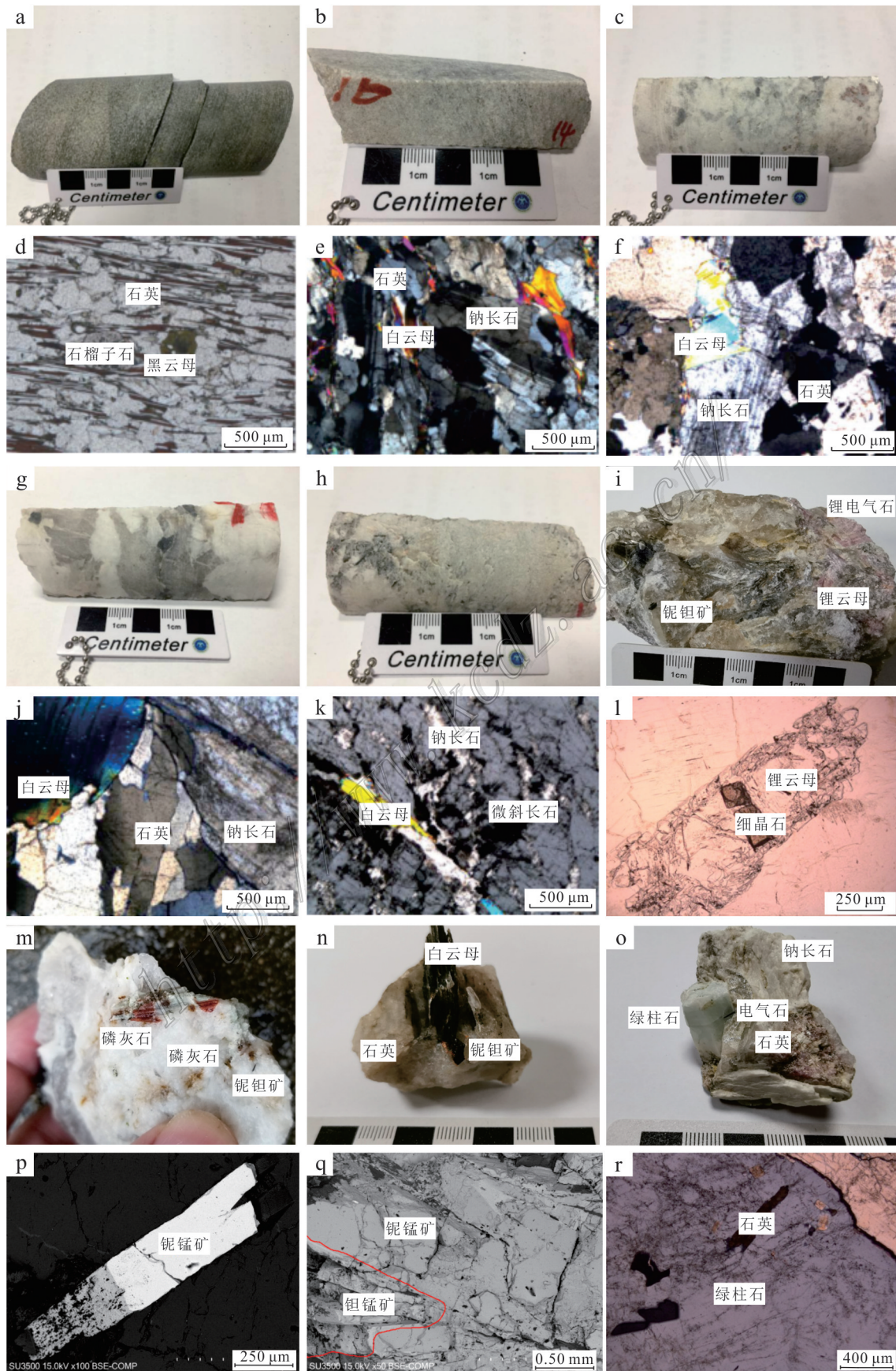


图3 仁里矿区标本岩石学特征

a. 石英云母片岩;b. 细粒白云母钠长石伟晶岩;c. 中粒白云母钠长石伟晶岩;d. 石英云母片岩镜下(单偏光);e. 细粒白云母钠长石伟晶岩镜下(正交);f. 中粒白云母钠长石伟晶岩镜下(正交);g. 粗粒白云母钠长石伟晶岩标本;h. 碱性长石伟晶岩标本;i. 含锂云母白云母钠长石伟晶岩标本;j. 粗粒白云母钠长石伟晶岩镜下(正交);k. 碱性长石伟晶岩镜下(正交);l. 含锂云母白云母钠长石伟晶岩背散射电子图像;m. 含磷灰石白云母钠长石伟晶岩标本;n. 含铌钽矿白云母钠长石伟晶岩标本;o. 绿柱石白云母钠长石伟晶岩标本;p. 含磷灰石白云母钠长石伟晶岩背散射电子图像;q. 含铌钽矿白云母钠长石伟晶岩背散射电子图像;r. 绿柱石白云母钠长石伟晶岩背散射电子图像

Fig. 3 Petrological characteristics of specimens in the Renli mining area

a. Quartz-mica schist; b. Fine-grained muscovite sodium feldspar pegmatite; c. Medium-grained muscovite sodium feldspar pegmatite; d. Quartz-mica schist(plainlight); e. Fine-grained muscovite sodium feldspar pegmatite (crossed nicols); f. Mesocrystalline muscovite sodium feldspar pegmatite (crossed nicols); g. Sample of coarse muscovite sodium feldspar pegmatite; h. Sample of alkaline feldspar pegmatite; i. Specimen of pegmatite containing lepidolite muscovite sodium feldspar; j. Coarse muscovite sodium feldspar pegmatite (crossed nicols); k. Alkaline feldspar pegmatite (CROSSED NICOLS); l. Backscattering electron image of lepidolite sodium albite bearing mica; m. Specimen of apatite-bearing muscovite sodium feldspar pegmatite; n. Specimen of sodium feldspar pegmatite containing Nb-Ta muscovite; o. Specimens of beryl muscovite sodium feldspar pegmatite; p. Backscattering electron image of apatite-bearing muscovite sodium feldspar pegmatite; q. Backscattering electron image of sodium feldspar pegmatite containing Nb-Ta muscovite; r. Backscattering electron image of beryl muscovite sodium feldspar pegmatite

中均有分布, 铌钽矿主要分布于粗中粒-粗粒白云母钠长石伟晶岩中, 锂云母赋存于伟晶岩的中部(即锂云母石英核部)。

3.2 稀有金属矿化特征

本次对 ZK708 号钻孔中 60 件样进行了 Rb、Nb、Ta 等稀有元素分析(表 1)。

围岩(云母片岩)样品中, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.017%~0.069%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.0020%~0.0034%, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.0002%~0.0008%; 碱性长石伟晶岩(碱性长石 \geq 钠长石)中, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.047%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.0022%, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.0008%; 细粒白云母钠长石伟晶岩中, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.031%~0.062%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.0018%~0.0026%, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.0001%~0.0012%; 中-细粒、中粒白云母钠长石伟晶岩中, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.026%~0.056%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.0019%~0.0032%, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.0005%~0.0070%(17 个分析样除 YK56 样品 $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.007% 外, 其余样品均小于 0.0013%); 粗-中粒、粗粒白云母钠长石伟晶岩中, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.031%~0.077%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.0030%~0.164%, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.0005%~0.127%; 本次未对采集的标本进行 BeO 分析。根据野外露头及岩芯观测, 含铍矿物(绿柱石和羟硅铍石)在不同粒度、不同岩性的伟晶岩均有分布; 含锂矿物(锂云母和锂电气石)主要存于白云母钠长石伟晶岩核部, 多与铌钽呈共伴生关系, 锂辉石则赋存于锂辉石白云母钠长石伟晶岩中(图 2, 46、47 号脉)。根据化学分析结果, 碱性长石伟晶岩及粒度较细的白云母钠长石伟晶岩铌钽矿化较差, 铌钽矿矿体($w(\text{Ta}_2\text{O}_5) \geq 0.007%$)均赋存于粗-中粒、粗粒白云母钠长石伟晶岩中, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 为 0.042%~0.077%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 为 0.028%~

0.164%, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 为 0.019%~0.127%(表 1)。

3.3 单矿物特征

铌钽矿(图 3n): 多赋存于粗粒、粗中粒白云母钠长石伟晶岩的石英、钠长石和云母中(图 3n), 铌钽矿周边往往蚀变成褐色。按 Fe、Mn 含量比可分为铌钽铁矿($\text{Fe} < \text{Mn}$)和铌钽锰矿($\text{Mn} > \text{Fe}$), 矿区主要类型为铌钽锰矿($\text{Mn} > \text{Fe}$), 粒径多在 0.1~3.0 mm 之间, 部分铌钽锰矿粒径可达 30~40 mm, 铌钽矿($\text{Nb} > \text{Ta}$)与钽锰矿($\text{Ta} > \text{Nb}$)共生(图 3q)。钽锰矿呈黑色, 反光镜下呈灰色调, 柱状、束状、粒状等晶形均可见, 嵌布在石英、长石颗粒和白云母中, 部分颗粒内部包裹细粒晶质铀矿。铌钽矿内反色呈褐红色, 反射色呈灰白色带褐色, 强非均质性。铌钽矿与钽锰矿为同族矿物, 仅 Nb、Ta 含量不同。本次样品中铌钽矿较少见, 多见钽锰矿。晶质铀矿晶形为不规则他形粒状, 粒径在 0.001~0.015 mm 之间, 稀疏嵌布于钽锰矿内部。本次将矿石标本中的钽铌矿挑出制靶, 电子探针分析结果(表 2)显示, 铌钽矿中, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5)$ 平均值 38.42%, $w(\text{Nb}_2\text{O}_5)$ 平均值 40.83%, $w(\text{MnO})$ 平均值 10.21%, $w(\text{FeO})$ 平均值 7.39%, $w(\text{TiO}_2)$ 平均值 2.40%, Mn/Fe 比值为 1.36, $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{Nb}_2\text{O}_5$ 比值为 0.96(≈ 1.0 , 定名为铌钽锰矿)。

绿柱石(图 3o): 区内主要含铍矿物为绿柱石和羟硅铍石, 在二云母伟晶岩、白云母伟晶岩及锂辉石白云母伟晶岩中广泛分布, 呈绿色、淡绿色或白色, 块状、晶体和颗粒状, 粒径多大于 2.0 mm, 晶形较好的绿柱石可达 110 mm \times 150 mm, 内常包裹石英颗粒(图 3r), 部分针状铌钽矿穿插于绿柱石中(图 3o), 与之呈伴生关系。羟硅铍石晶体呈细小板状或柱状, 无色或浅黄色。本次将矿石标本中的绿柱石和

表1 ZK708岩芯主要矿物含量及稀有元素分析结果
Table 1 Main mineral content and rare element analysis results of ZK708 core

样号	岩性定名	位置/m	矿物成分	蚀变特征	w(B)/%		
					Rb ₂ O	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅
YK36	石英云母片岩	11.70~11.85	石英48%+黑云母45%+白云母5%+石榴子石2%		0.047	0.0021	0.0002
YK37	中粒白云母钠长石伟晶岩	12.50~12.57	石英30%+钠长石40%+白云母20%+钾长石10%				
YK38	细粒白云母钠长石伟晶岩	12.89~12.96	石英35%+钠长石40%+白云母20%+石榴子石5%	黏土化, 绢云母化	0.031	0.0034	0.0008
YK39	细粒碱性长石伟晶岩	14.27~14.36	石英28%+正长石52%+钠长石5%+绢云母12%+白云母3%	黏土化, 绢云母化			
YK40	粗中粒白云母钠长石伟晶岩	14.37~14.47	石英40%+钠长石35%+白云母22%+石榴子石3%	黏土化	0.077	0.1310	0.1010
YK41	粗中粒碱性长石伟晶岩	14.52~14.60	条纹长石90%+石英8%+白云母2%	黏土化			
YK42	粗中粒白云母钠长石伟晶岩	15.44~15.50	石英35%+钠长石50%+黑云母5%+白云母10%	黏土化	0.046	0.0280	0.0190
YK43	中粒白云母钠长石伟晶岩	16.65~16.77	石英30%+钠长石40%+白云母17%+条纹长石8%+石榴子石3%	黏土化			
YK44	含石榴子石石英黑云母片岩	17.60~17.72	石英40%+黑云母45%+石榴子石15%		0.028	0.0022	0.0003
YK45	含石榴子石石英黑云母片岩	20.73~20.86	石英40%+黑云母42%+石榴子石15%+白云母2%		0.029	0.0025	0.0008
YK46	含石榴子石石英黑云母片岩	25.98~26.13	石英38%+黑云母48%+石榴子石12%+白云母5%		0.027	0.0022	0.0002
YK47	石榴子石石英黑云母片岩	26.79~26.85	石英40%+白云母40%+黑云母10%+石榴子石8%+钠长石2%		0.058	0.0034	0.0003
YK48	中粒白云母钠长石伟晶岩	29.30~29.40	石英20%+钠长石60%+白云母15%+石榴子石5%	黏土化, 绢云母化	0.054	0.0021	0.0002
YK49	细粒白云母钠长石伟晶岩	30.30~30.40	石英30%+钠长石40%+白云母20%+石榴子石10%	黏土化, 绢云母化	0.052	0.0026	0.0009
YK51	细粒白云母钠长石伟晶岩	32.63~32.70	石英38%+钠长石30%+白云母17%+石榴子石15%	黏土化	0.0062	0.0028	0.0007
YK52	中粒碱性长石伟晶岩	35.00~35.06	石英20%+条纹长石75%+绢云母5%	黏土化	0.047	0.0022	0.0008
YK53	中粒斜长石伟晶岩	36.37~36.42	石英35%+斜长石40%+白云母12%+黑磷云母8%	黏土化, 绢云母化	0.056	0.0019	0.0008
YK54	中粒钠长石伟晶岩	37.77~37.84	石英28%+钠长石25%+正长石25%+白云母13%+石榴子石7%+绢云母2%	黏土化	0.048	0.0026	0.0013
YK-55	中粒钠长石伟晶岩	42.15~42.25	石英35%+钠长石40%+白云母20%+石榴子石3%	黏土化	0.039	0.0029	0.0011
YK56	中粒白云母钠长石伟晶岩	42.70~42.80	石英48%+钠长石15%+白云母35%+石榴子石2%	黏土化	0.056	0.0022	0.0070
YK57	石英云母片岩	46.30~46.35	石英45%+黑云母30%+白云母15%+磷灰石8%+石榴子石2%		0.069	0.0020	0.0006
YK58	中粒斜长石伟晶岩	48.10~48.19	石英25%+斜长石35%+白云母20%+条纹长石10%+绢云母5%+石榴子石5%	黏土化, 绢云母化	0.046	0.0032	0.0006
YK59	细粒白云母钠长石伟晶岩	49.50~49.68	石英25%+钠长石25%+条纹长石20%+微斜长石10%+白云母20%+绢云母5%+石榴子石2%	黏土化	0.053	0.0029	0.0004
YK60	中粒白云母钠长石伟晶岩	51.42~51.49	石英25%+钠长石35%+斜长石7%+钾长石3%+白云母20%+石榴子石10%	黏土化, 绢云母化	0.049	0.0026	0.0070
YK61	石英云母片岩	56.46~56.56	石英40%+黑云母38%+石榴子石10%+铁质矿物5%+绢云母4%+白云母3%		0.047	0.0023	0.0005
YK62	细粒白云母钠长石伟晶岩	59.47~59.56	石英25%+钠长石26%+斜长石10%+白云母15%+石榴子石18%+微斜长石4%+条纹长石2%	黏土化	0.039	0.0028	0.0005
YK63	中粒斜长石伟晶岩	61.78~61.86	石英20%+钠长石17%+斜长石30%+条纹长石10%+白云母15%+石榴子石8%	黏土化, 绢云母化	0.038	0.0031	0.0006
YK64	细粒斜长石伟晶岩	62.50~62.58	石英30%+斜长石30%+钾长石10%+白云母25%+石榴子石5%	黏土化	0.050	0.0022	0.0003
YK65	石英云母片岩	63.60~63.72	石英55%+黑云母43%+石榴子石2%		0.035	0.0021	0.0004

续表 1-1
Continued Table 1-1

样号	岩性定名	位置/m	矿物成分	蚀变特征	w(B)/%		
					Rb ₂ O	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅
YK66	粗粒斜长石伟晶岩	65.94~66.05	石英30%+斜长石40%+白云母20%+石榴子石10%	黏土化,绢云母化	0.020	0.0031	0.0009
YK67	粗粒白云母钠长石伟晶岩	71.65~71.75	石英30%+钠长石30%+条纹长石20%+白云母12%+绢云母8%	黏土化	0.040	0.0031	0.0007
YK68	粗粒斜长石伟晶岩	72.95~73.04	石英30%+斜长石40%+条纹长石20%+微斜长石5%+白云母15%	黏土化,绢云母化	0.0039	0.0023	0.0005
YK69	细粒斜长石伟晶岩	75.75~75.83	石英25%+斜长石30%+条纹长石8%+石榴子石22%+白云母15%	黏土化	0.031	0.0025	0.0005
YK70	粗中粒白云母钠长石伟晶岩	78.55~78.63	石英25%+钠长石35%+条纹长石12%+微斜长石8%+白云母17%+石榴子石3%	黏土化	0.053	0.0510	0.0360
YK71	粗中粒碱性长石伟晶岩	80.15~80.22	石英20%+条纹长石52%+钠长石10%+绢云母8%+白云母10%	黏土化,绢云母化			
YK72	粗中粒钠长石二云母伟晶岩	81.15~81.24	石英30%+钠长石30%+条纹长石15%+黑云母10%+白云母8%+绢云母5%+石榴子石2%	黏土化	0.059	0.1310	0.1000
YK73	块状伟晶岩	81.95~82.02	石英78%+钠长石20%+白云母2%	黏土化	0.053	0.1640	0.1270
YK74	粗中粒白云母钠长石伟晶岩	84.50~84.57	石英30%+钠长石35%+钾长石8%+石榴子石12%+白云母15%	黏土化	0.042	0.0960	0.0660
YK75	石榴子石二云母石英片岩	86.25~86.38	石英40%+黑云母37%+白云母10%+铁质矿物8%+石榴子石5%		0.041	0.0021	0.0003
YK76	石英云母片岩	92.91~93.00	石英45%+黑磷云母30%+石榴子石20%+白云母5%		0.030	0.0023	0.0005
YK77	中粒白云母钠长石伟晶岩	101.67~101.79	石英60%+白云母25%+钠长石15%				
YK78	石英云母片岩	117.45~117.59	石英55%+黑云母43%+石榴子石2%		0.041	0.0021	0.0004
YK79	细粒斜长石伟晶岩	121.39~121.47	石英30%+斜长石30%+条纹长石15%+石榴子石5%+白云母20%	黏土化,绢云母化	0.056	0.0021	0.0004
YK80	粗粒白云母钠长石伟晶岩	123.35~123.45	石英40%+钠长石45%+白云母10%+绢云母5%	黏土化,绢云母化	0.047	0.0027	0.0007
YK81	中细粒白云母钠长石伟晶岩	124.04~124.11	石英25%+钠长石30%+条纹长石5%+石榴子石20%+白云母20%	黏土化,绢云母化	0.047	0.0027	0.0007
YK82	中细粒斜长石伟晶岩	130.03~130.10	石英25%+斜长石35%+条纹长石15%+黑云母15%+白云母10%	黏土化	0.026	0.0023	0.0008
YK83	粗中粒白云母钠长石伟晶岩	134.93~135.00	石英32%+钠长石40%+黑磷云母13%+白云母15%	黏土化,绢云母化	0.042	0.0650	0.0490
YK84	粗粒白云母钠长石伟晶岩	135.50~135.57	石英30%+钠长石65%+白云母5%	黏土化,绢云母化	0.035	0.1240	0.0860
YK85	粗粒碱性长石伟晶岩	135.76~135.84	石英25%+条纹长石48%+钠长石12%+白云母15%	黏土化			
YK86	绿泥石化黑云母片岩	139.55~139.68	石英20%+钠长石10%+黑云母30%+绿泥石40%		0.057	0.0030	0.0002
YK87	粗中粒白云母钠长石伟晶岩	144.63~144.72	石英25%+钠长石35%+条纹长石15%+石榴子石5%+白云母20%	黏土化,绢云母化	0.040	0.0030	0.0012
YK88	粗中粒碱性长石伟晶岩	149.50~149.58	石英20%+钠长石10%+条纹长石60%+石榴子石3%+白云母7%	黏土化,绢云母化			
YK89	粗中粒碱性长石伟晶岩	150.44~150.54	石英20%+正长石30%+钠长石18%+白云母27%+绢云母5%	黏土化,绢云母化			

续表 1-2
Continued Table 1-2

样号	岩性定名	位置/m	矿物成分	蚀变特征	w(B)/%		
					Rb ₂ O	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅
YK90	粗粒白云母钠长石伟晶岩	152.10~152.19	石英20%+钠长石47%+条纹长石8%+白云母15%+绢云母5%+锂云母3%	黏土化, 绢云母化	0.038	0.1070	0.0920
YK91	中细粒白云母钠长石伟晶岩	154.56~154.63	石英30%+钠长石35%+条纹长石10%+白云母25%	黏土化, 绢云母化	0.049	0.0026	0.0006
YK92	细粒白云母钠长石伟晶岩	157.70~157.77	石英25%+斜长石30%+微斜长石10%+石榴子石20%+白云母15%	黏土化, 绢云母化	0.044	0.0025	0.0005
YK93	中粒斜长石伟晶岩	160.25~160.32	石英28%+钠长石32%+条纹长石5%+微斜长石8%+白云母15%+黑磷云母12%	黏土化	0.041	0.0021	0.0007
YK94	细粒微斜长石伟晶岩	161.97~162.04	石英27%+微斜长石28%+钠长石15%+白云母25%+黑磷云母5%	黏土化	0.051	0.0018	0.0005
YK95	中粒钠长石伟晶岩	163.30~163.39	石英30%+钠长石35%+条纹长石5%+微斜长石3%+黑磷云母17%+白云母10%	黏土化	0.027	0.0020	0.0006
YK96	粗中粒碱性长石伟晶岩	167.57~167.66	石英20%+条纹长石70%+白云母4%+钠长石6%	黏土化			
YK97	粗粒白云母钠长石伟晶岩	172.10~172.18	石英30%+钠长石45%+白云母20%+黑磷云母5%	黏土化, 绢云母化			
YK98	粗中粒钾长石伟晶岩	174.55~174.63	石英20%+钾长石42%+钠长石15%+黑磷云母3%+白云母15%+石榴子石5%	黏土化			
YK99	中细粒钠长石伟晶岩	180.35~180.42	石英25%+钠长石30%+微斜长石15%+白云母17%+黑磷云母8%+绢云母5%	黏土化, 绢云母化			
YK100	中细粒白云母钠长石伟晶岩	187.36~187.44	石英25%+钠长石35%+条纹长石5%+微斜长石10%+白云母13%+黑磷云母12%	黏土化			
YK101	中细粒白云母钠长石伟晶岩	191.96~192.04	石英30%+钠长石35%+条纹长石8%+微斜长石12%+白云母15%	黏土化			
YK102	粗中粒白云母钠长石伟晶岩	196.22~196.30	石英25%+钠长石28%+条纹长石20%+微斜长石10%+白云母12%+石榴子石5%	黏土化			
YK103	中粒白云母钠长石伟晶岩	201.59~201.67	石英25%+钠长石30%+条纹长石8%+微斜长石15%+白云母17%+黑磷云母5%	黏土化, 绢云母化			
YK104	细粒白云母钠长石伟晶岩	203.55~203.64	石英30%+钠长石35%+条纹长石3%+微斜长石15%+白云母13%+石榴子石4%	黏土化	0.039	0.0031	0.0011
YK105	细粒白云母钠长石伟晶岩	209.13~209.21	石英25%+钠长石35%+条纹长石7%+微斜长石3%+白云母10%+石榴子石20%	黏土化, 绢云母化	0.050	0.0031	0.0012
YK106	粗粒碱性长石伟晶岩	209.80~209.88	石英25%+钠长石20%+正长石30%+石榴子石8%+白云母17%	黏土化			
YK107	粗粒钠长石伟晶岩	210.85~210.95	石英25%+钠长石20%+条纹长石28%+微斜长石15%+白云母12%	黏土化	0.060	0.1150	0.0930
YK108	细粒白云母钠长石伟晶岩	214.75~214.84	石英30%+钠长石30%+石榴子石3%+微斜长石13%+白云母16%+黑云母8%	黏土化	0.041	0.0032	0.001
YK109	中粒白云母钠长石伟晶岩	215.57~215.65	石英25%+钠长石30%+条纹长石10%+白云母15%+石榴子石20%	黏土化	0.031	0.0027	0.0007
YK110	中粒白云母钠长石伟晶岩	219.60~219.72	石英30%+钠长石40%+白云母17%+黑云母8%+石榴子石5%	黏土化, 绢云母化	0.035	0.0026	0.0005
YK111	粗粒白云母钠长石伟晶岩	223.84~223.93	石英35%+钠长石40%+白云母20%+条纹长石5%	黏土化	0.043	0.0020	0.0005
YK112	中粒白云母钠长石伟晶岩	226.74~226.82	石英27%+钠长石40%+微斜长石10%+白云母15%+黑磷云母8%	黏土化	0.032	0.0021	0.0009
YK113	石英云母片岩	230.66~230.81	石英25%+长石30%+黑云母45%		0.017	0.0024	0.0004
YK114	石英云母片岩	237.24~237.31	石英33%+黑云母37%+钠长石25%+石榴子石5%				
YK115	石英云母片岩	240.02~240.12	石英43%+黑云母35%+白云母12%+石榴子石10%				

注:矿物分析工作由中国地质科学院矿产资源研究所承担,稀有元素分析工作由核工业二二〇研究所承担。

表2 仁里矿床铌钽矿电子探针成分表

Table 2 Electron microprobe analyses of columbite-tantalite in the Renli deposit

序号	点号	w(B)/%													
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	TiO ₂	BaO	V ₂ O ₅	SO ₃	PbO	WO ₃	Rb ₂ O	Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	SnO ₂
1	Z2699-2	0.03	0.25	7.61	9.57	3.64	0	0	0.03	0.18	0.10	0.03	34.04	44.20	0.02
2	Z2699-1-1	0.01	0.25	7.34	9.60	2.83	0	0.07	0.06	0.11	0.05	0.01	32.40	46.32	0
3	Z2699-1-2	0.03	0.24	7.09	9.45	2.68	0	0.01	0.04	0.20	0.12	0.01	32.85	46.84	0.07
4	Z2699-1-3	0.01	0.17	7.43	10.78	1.94	0.04	0	0.02	0.12	0.18	0.02	45.23	33.73	0.01
5	Z2699-1-4	0.01	0.19	7.43	10.60	1.72	0.02	0	0.09	0.18	0.03	0.09	46.59	32.60	0.01
6	Z2699-1-5	0.02	0.20	7.36	10.83	1.90	0	0.17	0.01	0.15	0.06	0.05	45.13	34.58	0.01
7	Z2699-1-6	0.03	0.17	7.56	11.05	1.58	0.02	0.03	0.02	0.10	0.19	0	46.16	34.07	0.04
8	Z2699-1-7	0.01	0.17	7.14	10.46	1.75	0.20	0	0	0.16	0.29	0.03	46.00	33.62	0.01
9	Z2699-1-8	0	0.20	7.12	10.58	1.86	0.08	0.12	0.03	0.17	0.06	0.08	45.05	35.34	0
10	Z2699-1-9	0	0.19	7.07	10.65	1.73	0.26	0	0.05	0.25	0.24	0.03	45.46	34.26	0.01
11	Z2699-1-10	0	0.21	7.08	10.41	1.84	0.20	0	0.04	0.09	0.11	0	45.33	35.09	0.02
12	Z2699-1-11	0	0.16	7.61	11.05	1.35	0	0.05	0.13	0.26	0.11	0.08	47.54	32.10	0.02
13	Z2699-1-12	0	0.20	7.05	10.60	2.61	0	0	0.06	0.05	0	0.11	40.55	38.47	0.02
14	Z2699-01	0.03	0.23	7.65	9.52	3.51	0.16	0.02	0.03	0.17	0.07	0.09	33.45	44.33	0
15	Z2699-02	0.03	0.25	7.66	9.41	3.28	0.18	0.07	0.06	0.20	0.26	0.06	36.30	42.22	0
16	Z2699-03	0.03	0.21	7.80	9.90	2.86	0.10	0	0.06	0.08	0.07	0.05	37.31	41.39	0.06
17	Z2699-04	0.01	0.15	7.57	9.91	2.94	0	0	0.06	0.04	0.31	0.10	40.41	39.06	0.02
18	Z2699-05	0.02	0.24	7.45	9.43	3.11	0.02	0	0.02	0.07	0.17	0.17	35.21	43.38	0.03
	平均值	0.01	0.20	7.39	10.21	2.40	0.07	0.03	0.04	0.14	0.13	0.06	40.83	38.42	0.02

注:本表数据于中国地质科学院矿产资源研究所完成测试。

羟硅铍石单独挑出制靶,进行电子探针分析(表3),同时,对单矿物进行了化学分析(仅分析BeO)。绿柱石中, $w(\text{SiO}_2)$ 平均值66.8%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均值18.4%, $w(\text{FeO})$ 平均值0.73%, $w(\text{BeO})$ 为13.6%, $w(\text{BeO})$ 为化学分析结果)。羟硅铍石中, $w(\text{SiO}_2)$ 平均值50.2%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均值0.33%, $w(\text{FeO})$ 平均值0.04%, $w(\text{SrO})$ 平均值0.13%, $w(\text{BeO})$ 为42.3%, $w(\text{BeO})$ 为化学分析结果)。

锂辉石:锂辉石为白色至鸭蛋绿色,多呈薄板状和柱状晶形,定向排列,晶体长轴与脉体倾向近于垂直,呈70°~90°交角。薄片无色透明,纵切面(100)完全解理,横切面中2组完全解理成近90°交角,对称消光。少量锂辉石颗粒发生了绢云母化或绢云母化+硅化,部分锂辉石边缘常发育纤维状锂辉石集合体。本次将矿石标本中的锂辉石挑出制靶,经电子探针分析(表4),锂辉石中6个测点的 $w(\text{SiO}_2)$ 平均

表3 仁里矿床含铍矿物电子探针成分表

Table 3 Electron microprobe analyses of beryllium-bearing minerals in the Renli deposit

序号	点号	w(B)/%																	总和	
		F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SrO	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	FeO	MnO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Cs ₂ O	SO ₃	BaO	NiO		V ₂ O ₅
1	YK18-31-1	0	0.01	0	0.05	50.04	0.13	0.01	0	0	0.02	0	0	0.03	0	0	0.01	0	0	50.30
2	YK18-31-2	0	0	0	0	50.00	0.12	0	0.02	0	0.08	0	0	0	0.01	0	0	0	0	50.23
3	YK18-31-3	0.03	0.06	0	18.02	66.48	0.40	0	0.01	0.02	0.06	0	0	0.04	0.00	0.01	0	0	0	85.13
4	YK18-31-4	0	0	0.01	0.05	50.42	0.14	0	0.01	0.01	0.02	0	0	0.01	0.01	0.05	0	0.03	0	50.75
5	YK18-31-5	0	0.19	0.03	18.37	67.06	0.17	0	0.01	0	0.73	0.07	0.01	0	0.03	0.03	0.04	0	0	86.75
6	YK18-31-6	0	0.22	0.02	18.43	66.80	0.22	0.02	0.02	0.02	0.71	0	0	0.03	0.06	0	0.03	0	0.01	86.58
7	YK18-31-7	0.19	0.23	0.05	18.42	66.61	0.17	0.01	0.01	0	0.83	0.04	0	0	0.04	0	0	0.01	0	86.61
8	YK18-31-8	0.03	0.26	0.05	18.35	66.58	0.19	0.01	0.01	0	0.79	0	0.04	0.06	0.06	0.01	0	0.01	0.03	86.46
9	YK18-31-9	0.04	0.21	0.01	18.46	66.74	0.23	0	0.01	0	0.59	0	0	0.03	0	0	0	0.01	0.02	86.33

注:1-4号为羟硅铍石,5-9号为绿柱石;本表数据于中国地质科学院矿产资源研究所完成测试。

表4 仁里矿床锂辉石电子探针成分表

Table 4 Electron microprobe analyses of spodumene in the Renli deposit

序号	点号	w(B)/%															总和
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	TiO ₂	SiO ₂	CaO	FeO	Cs ₂ O	Ta ₂ O ₅	Nb ₂ O ₅	MnO	Li ₂ O	
1	Lpd-1	0.083	0	26.135	0	0.018	0.010	0.031	64.277	0.025	0.981				0.086	7.839	99.485
2	Lpd-2	0.071	0.006	26.188	0.001	0	0.033	0.051	64.721	0	0.775				0.080	7.922	99.848
3	Lpd-3	0.070	0	26.341	0.004	0	0.012	0	64.304	0.010	0.571				0.081	7.892	99.285
4	ZFC-1011-3	0.237	0.019	27.567	0.048	0.048	—	0	64.313	0.113	0.793	0	0	0.048	0.116	—	93.302
5	ZFC-1011-4	0.124	0	28.069	0.004	0.003	—	0.023	64.522	0.017	0.910	0	0	0	0.196	—	93.868
6	ZFC-1011-5	0.059	0	27.408	0.010	0.027	—	0.021	63.608	0.028	0.837	0	0	0	0.139	—	92.137
7	ZFC-1011-7	0.149	0.024	28.073	0.011	0	—	0.030	64.360	0.052	0.682	0	0	0	0.031	—	93.412
8	ZFC-1011-8	0.201	0.033	27.278	0.009	0	—	0.007	64.376	0.152	0.802	0.070	0	0	0.143	—	93.071

注:“—”为未测项; Li₂O含量根据化学计量法计算获得; 本表数据于中国地质科学院矿产资源研究所完成测试。

值64.31%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均值27.13%, $w(\text{FeO})$ 平均值0.794%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 平均值0.124%, $w(\text{MnO})$ 平均值0.109%, $w(\text{CaO})$ 平均值0.050%, 3个测点的 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 平均值7.844%。

锂云母(图3i、l):含锂云母主要为锂云母、铁锂云母、富锂多硅白云母、铯多硅锂云母和黑磷云母,其中,锂云母、铁锂云母、富锂多硅白云母和铯多硅锂云母主要赋存于白云母钠长石伟晶岩核部,呈紫色、粉色和无色,具有珍珠光泽,自形片状、鳞片状,嵌于石英、钠长石、白云母等矿物中,颗粒内部常包裹钮锰矿和细晶石。黑磷云母在细、中、粗粒伟晶岩中均有分布,最高含量可达12%。对锂云母、铁锂云母、富锂多硅白云母和铯多硅锂云母等6个样品进行电子探针分析(王臻等,2019),结果显示, $w(\text{SiO}_2)$ 平均值50.0%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均值25.2%, $w(\text{TFeO})$ 平均值5.01%, $w(\text{MnO})$ 平均值0.74%, $w(\text{MgO})$ 平均值0.50%, $w(\text{CaO})$ 平均值0.04%, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 平均值0.13%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 平均值7.44%, $w(\text{Rb}_2\text{O})$ 平均值0.29%, $w(\text{Cs}_2\text{O})$ 平均值3.25%, $w(\text{F})$ 平均值5.43%, $w(\text{Li}_2\text{O})$ 平均值3.54%。刘昌实(1984)对华南不同成因花岗岩黑云母类矿物化学成分对比研究发现,黑磷云母中的 $w(\text{Li}_2\text{O})$ 可达1.69%。

磷灰石(图3m、p):磷灰石呈浅绿色,棕红色或红褐色,长柱状、短柱状、板状或不规则粒状集合体,红棕色不规则状磷灰石在伟晶岩中较为常见(如36号脉),磷灰石氧化后呈褐色,保留磷灰石外形。显微镜下呈无色、浅绿色,与石榴子石连生嵌布在长石、石英的岩石基底中。在磷灰石周边明显富集针状、粒状铌钽矿,磷灰石里的铌钽矿呈片状、粒状和针状,磷灰石伴生。本次将矿石标本中的磷灰石挑

出制靶,经电子探针分析(表5),磷灰石中的 $w(\text{CaO})$ 平均值54.5%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 平均值40.6%, $w(\text{F})$ 平均值5.81%, $w(\text{O}=\text{F})$ 平均值-2.44%, $w(\text{MnO})$ 平均值1.25%, $w(\text{FeO})$ 平均值0.06%。

石榴子石:区内石榴石主要为锰铝榴石,钙铁榴石次之,广泛分布于细粒、中、粗粒伟晶岩中,为区内伟晶岩常见矿物之一。钙铁榴石呈黑色,钙铁含量较高,较完整的晶形多为菱形十二面体,四角三八面体及聚形。锰铝榴石Al、Mn含量高,呈紫、紫红色,风化后呈褐色或黑色,晶面可见生长纹。中细粒、细粒伟晶岩中锰铝榴石分布较均匀,多为菱形十二面体,呈紫色、紫红色,透明,粒径较小,多在0.20~2.00 mm。粗、中粒伟晶岩中的锰铝榴石粒径较粗,一般>2 mm,最大可达40 mm,呈紫色、紫红色,常见菱形十二面体,四角三八面体及聚形,部分与石英、长石、云母连生嵌布在岩石中,不规则聚形锰铝榴石周边及内部偶见短柱状铌钽矿。本次将矿石标本中的锰铝榴石挑出制靶,电子探针分析(表6)显示,石榴子石中 $w(\text{SiO}_2)$ 平均值37.2%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均值20.0%, $w(\text{MnO})$ 平均值22.8%, $w(\text{FeO})$ 平均值18.8%, $w(\text{CaO})$ 平均值1.08%, $w(\text{MgO})$ 平均值0.52%, $w(\text{SrO})$ 平均值0.09%, $w(\text{TiO}_2)$ 平均值0.07%。

电气石(图3o):晶形为柱状,束状等,一般为黑色,锂电石则呈红色(含锰)、绿色(含铬和钒)以及黄色、蓝色、白色等。薄片呈绿色-淡绿色,其内部可见细粒铌钽矿、铌钽矿及细晶石。黑电气石($\text{NaFe}_3\text{Al}_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}][\text{BO}_3]_3(\text{OH},\text{F})_4$)花岗岩和各种岩性伟晶岩中均有分布,是伟晶岩常见的矿物之一。在规模较大的伟晶岩或伟晶岩膨胀部位可见黑电气石脉,脉宽30~80 mm。锂电石($\text{Na}(\text{Li},\text{Al})_3\text{Al}_6$

表5 仁里矿床磷灰石电子探针成分表

Table 5 Electron microprobe analyses of apatite in the Renli deposit

序号	点号	w(B)/%																	总和
		F	O=F	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	TiO ₂	BaO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	Rb ₂ O	NiO	
1	YK18-8-11-Ap	5.47	-2.30	0.11	0.01	0	0	0.12	0.72	0.09	0	0	0	54.00	40.13	0.01	0	0.03	98.39
2	YK18-7-1-Ap	5.61	-2.35	0.17	0.01	0	0.06	0.22	0.90	0	0	0.01	0	55.00	39.69	0	0	0.01	99.32
3	YK18-7-12-Ap	5.25	-2.21	0.11	0.01	0.02	0.03	0.21	1.11	0.09	0	0.01	0	53.72	40.94	0	0	0	99.28
4	YK18-10-4-Ap	5.07	-2.13	0	0	0.04	0.13	0.06	0.07	0	0.25	0.05	0.23	55.41	40.90	0	0.06	0.02	100.15
5	YK18-10-5-Ap	6.19	-2.60	0	0	0.05	0.49	0.05	0.01	0	0	0.04	0.39	55.13	40.38	0.16	0	0	100.29
6	YK2018-5-15	5.54	-2.33	0	0	0.01	0.02	0.07	1.27	0	0	0.03	0.07	54.40	40.82	0	0.04	0	99.95
7	YK2018-5-16	6.07	-2.55	0	0	0.03	0.14	0.05	1.22	0.07	0.07	0	0.21	54.56	40.42	0.01	0	0.02	100.31

注:本表数据于中国地质科学院矿产资源研究所测试完成。

表6 仁里矿床石榴子石电子探针成分表

Table 6 Electron microprobe analyses of garnet in the Renli deposit

序号	点号	w(B)/%																	总和
		Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	FeO	MnO	TiO ₂	BaO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	Cs ₂ O	NiO	V ₂ O ₃	
1	YK18-8-7-grt	0.04	0.30	20.07	37.09	23.54	17.91	0.11	0.04	0	0.01	0.78	0.09	0	0	0.01	0	0	99.99
2	YK18-8-8-grt	0	0.30	20.05	37.09	24.14	17.79	0.14	0	0	0	0.68	0	0	0.01	0	0	0	100.23
3	YK18-9-1	0.01	0.33	20.09	37.03	24.73	17.19	0.09	0	0	0	0.61	0.05	0	0	0	0	0	100.14
4	YK18-30-8	0	0.68	20.41	37.66	18.62	21.95	0	0.01	0	0	1.27	0	0	0	0	0	0	100.64
5	YK18-30-9	0	0.57	20.02	37.02	19.56	22.86	0.13	0	0	0	1.10	0.06	0.02	0	0	0.01	0.01	101.48
6	YK18-30-10	0.01	0.50	20.00	37.22	18.56	23.13	0.16	0	0.01	0.02	1.04	0	0.01	0	0	0	0	100.76
7	YK18-30-11	0.01	0.44	19.77	37.21	18.66	23.11	0.05	0.07	0	0	0.96	0	0	0	0	0	0	100.36
8	YK18-30-12	0	0.40	20.03	37.07	18.52	23.08	0.02	0.04	0.01	0	1.02	0.01	0.01	0	0	0	0	100.29

注:本表数据于中国地质科学院矿产资源研究所测试完成。

[Si₆O₁₈] [BO₃]₃(OH,F)₄常见于规模较大的伟晶岩或伟晶岩膨胀部位的锂云母石英核部,其岩性粗粒或块状伟晶岩。

4 讨论

4.1 伟晶岩稀有金属矿化规律

仁里矿田自北东(内接触带)往南西(外接触带),伟晶岩具有从黑云母伟晶岩→二云母伟晶岩→白云母钠长石伟晶岩→锂辉石白云母钠长石伟晶岩演化的特点,稀有金属矿化由无矿化→Be→Be+Nb+Ta→Be+Nb+Ta+Li→Be+Nb+Ta+Li+Cs演化(刘翔等,2019;石威科等,2020),随着岩浆结晶分异程度

逐渐增加,稀有金属元素进一步富集。按粒度大小,可划分为细粒伟晶岩、中细粒伟晶岩、中粒伟晶岩、粗中粒伟晶岩、粗粒伟晶岩和块状伟晶岩;按云母类型及云母含量,矿区伟晶岩类型划分为黑云母伟晶岩、二云母伟晶岩、白云母钠长石伟晶岩和锂辉石白云母钠长石伟晶岩。矿区自北东往南西,伟晶岩总体上分带性明显,伟晶岩由黑云母伟晶岩(少量)→二云母伟晶岩→白云母钠长石伟晶岩→锂辉石白云母钠长石伟晶岩演化,矿化组合由无矿化→Be→Be+Nb+Ta→Be+Nb+Ta+Li→Be+Li演化。锂云母石英核位于白云母钠长石伟晶岩的中部(如YK90),其矿化组合为Nb+Ta+Li+Cs(如5号脉)。仁里矿区与邻近的传梓源矿区相似,锂辉石白云母钠长石伟晶

岩(图2,如47、206号脉)在横向和垂向上均具有良好的分带性(图4,石威科等,2020);横向上,岩脉两侧为白云母钠长石伟晶岩,以Nb+Ta+Be矿化为主,中部为锂辉石白云母钠长石伟晶岩(图4),以Li+Be矿化为主,Nb+Ta+Be矿化次之;垂向上,上部为Be+Nb+Ta+Li组合,Li品位一般较低,下部为Be+Li组合(图4),表现为富Li、Be,贫Nb、Ta,其演化顺序为Nb+Ta+Be+Li→Be+Li。仁里矿区(外接触带片岩地区)自北往南,具有铌钽矿化由强→弱,锂矿化由弱→强的发展趋势。

含锂云母(主要为铁锂云母、富锂多硅白云母及黑磷云母)分布于规模较大的白云母钠长石伟晶岩或其膨胀部位的核部(如5号脉)与铌钽铁矿呈伴生关系。铁锂云母为Li-Fe云母类矿物,Li-Fe云母类矿物演化序列一般为铁叶云母→黑磷云母→铁锂云母,富锂多硅白云母的出现与钽的富集有关(顾雄飞等,1973),伟晶岩中出现铁锂云母表明其熔体分异程度较高(李建康等,2017)。

仁里矿区含稀有金属伟晶岩为同期次多阶段伟晶岩熔液结晶、分异的产物(刘翔等,2018;2019;周芳春等,2019a;2019b;杨世珍等,2020),云母片岩地区的伟晶岩(如2、5号)至少可以分为4个阶段(杨世珍等,2020)。伟晶岩岩性较复杂,不同阶段、不同岩性和不同粒度的伟晶岩相互穿插(图5a、b、d)。铌钽铍锂等稀有金属矿化与第二阶段(缓倾角,倾向与岩脉倾向一致)和第三阶段(陡倾角)伟晶岩关系密切,其岩性为粗-中粒、粗粒白云母钠长石伟晶岩(杨世珍等,2020)。矿区铌钽等稀有金属矿化主要与粗-中粒、粗粒白云母钠长石伟晶岩关系密切,在勘查工作中,按伟晶岩的粒度及白云母含量划分伟晶带;伟晶岩从外到内,原则上可分为细粒白云母钠长石伟晶岩带(边缘带)、中粒白云母钠长石伟晶岩带(外侧带)、粗粒白云母钠长石伟晶岩带(中间带)、锂云母石英核或石英核(内核带)。从ZK708号钻孔伟晶岩和表1中可以看出,钻孔伟晶岩岩性分带性较差;从5号岩脉地表伟晶岩(图5)可以看出,伟晶岩岩性比

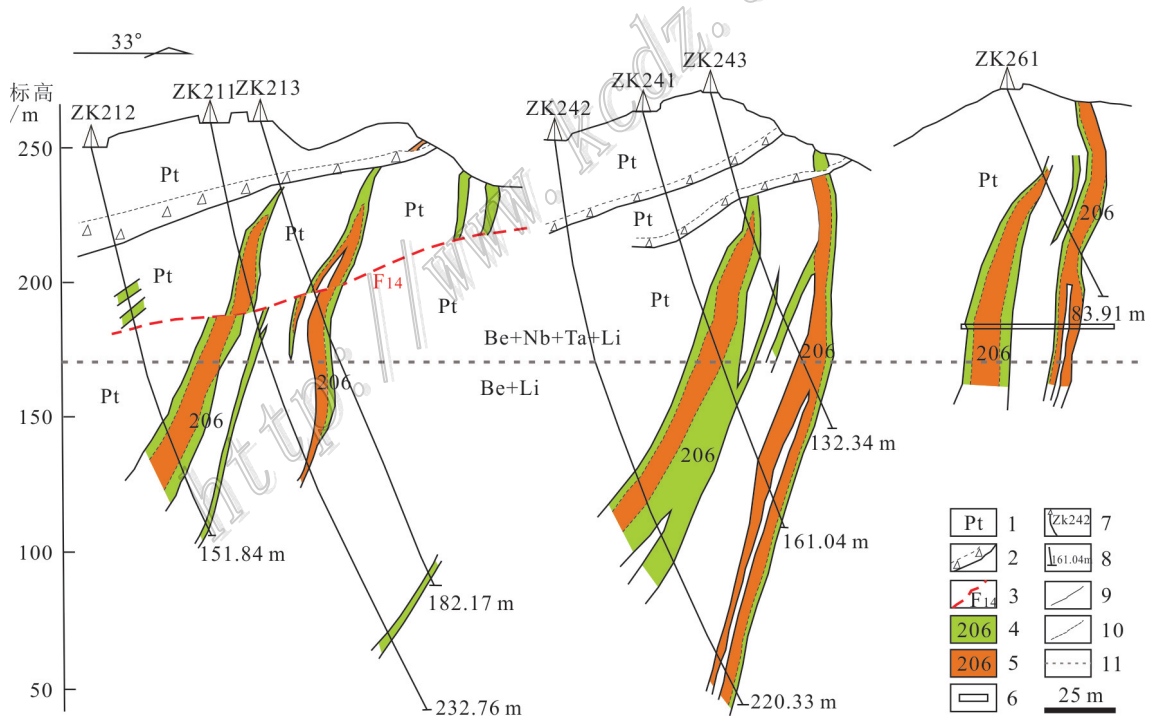


图4 传梓源矿床206号伟晶岩脉21、24、26号剖面简图(据石威科等,2020)

1—冷家溪群二云母石英片岩;2—具角砾的断层破碎带;3—推测构造及编号;4—白云母伟晶岩;5—锂辉石白云母伟晶岩;6—平硐;
7—钻孔及编号;8—钻孔孔深;9—岩性边界线;10—岩性边过渡边界线;11—矿化组合界线

Fig. 4 No. 21, No. 24 and No. 26 geological sections of No. 206 pegmatite veins in the Chuanziyuan deposit(after Shi et al., 2020)

1—Mica quartz schist of Lenjiaxi Group; 2—Fault fracture zone with breccia; 3—Inferred structure and its serial number; 4—Muscovite pegmatite; 5—Spodumene muscovite pegmatite; 6—Adit entry; 7—Drill hole and its serial number; 8—Depth of the hole; 9—Lithologic boundary; 10—Lithologic gradient boundary; 11—Mineralization assemblage and boundary

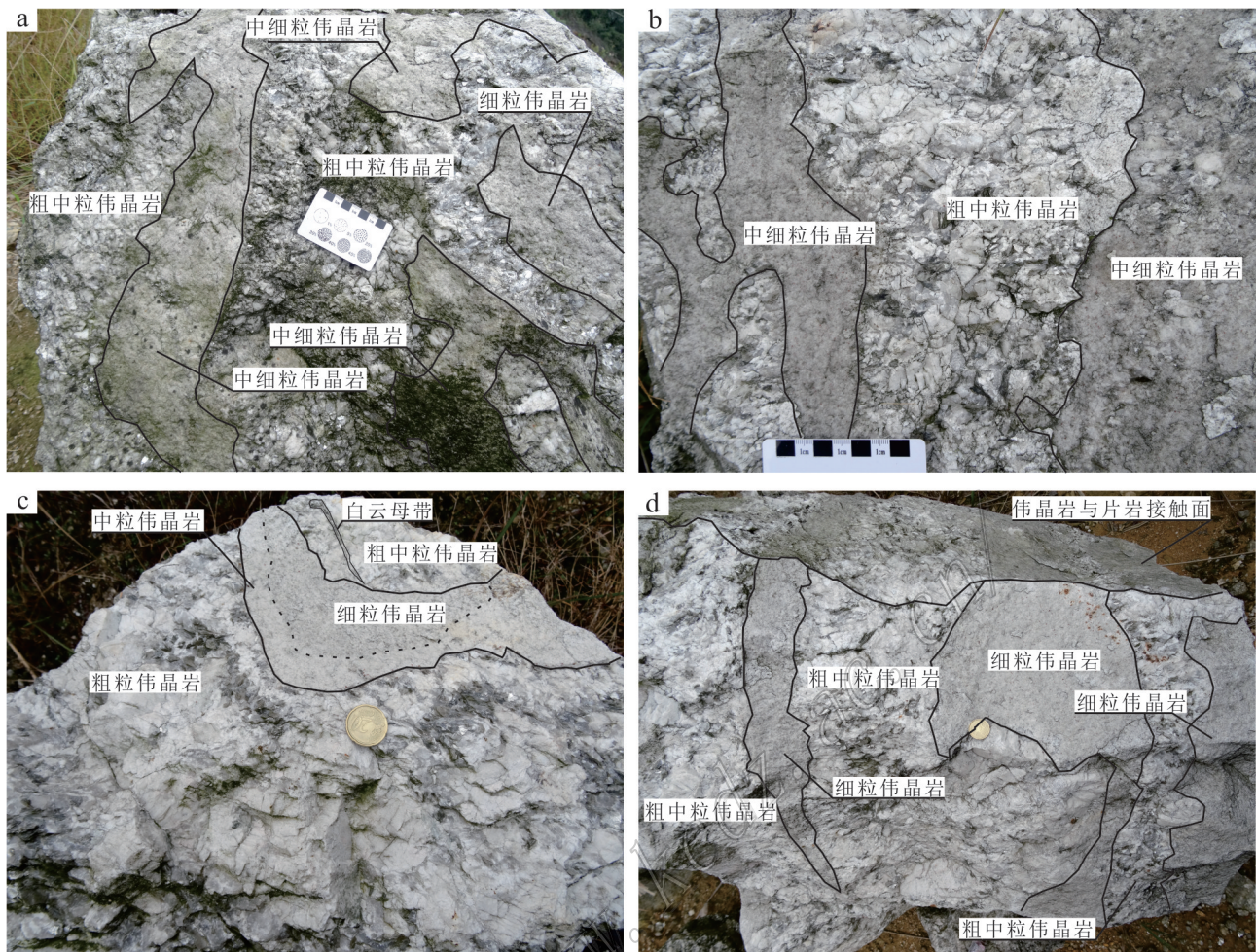


图5 仁里矿区伟晶岩标本

Fig. 5 Specimens of pegmatite in the Renli mining area

较复杂,不同岩性伟晶岩相互穿插,具有较差的分带性,但局部有一定的分带性(图5c);仁里矿床伟晶岩为同期次不同阶段的结果。根据对幕阜山岩体外接触带(湖南境内)伟晶岩野外露头观察和取样分析(内部资料),仁里矿区伟晶岩的分带性更为复杂,铌钽铍锂等稀有金属含矿性更好。仁里矿区经历了多阶段的岩浆-热液活动(周芳春等,2019b;李鹏等,2019;杨世珍等,2020),多阶段岩浆-热液活动导致了Nb、Ta、Li、Be等稀有金属元素的高度富集,形成了仁里高品位、超大型钽铌矿床。

仁里矿区钽铌矿矿体主要赋存于粗粒、粗-中粒白云母钠长石伟晶岩中(表1),钠长石含量较高(表1,除YK107和核部YK73中钠长石20%外,其余样品的钠长石含量30%~65%),说明钠长石与钽铌等稀有金属矿化关系密切。钽铌矿物往往呈针状、颗粒状在磷灰石内部及周边富集(图3m),磷灰石内部

的钽铌矿与之伴生;无论地表伟晶岩(如5号、36号脉),还是岩芯中伟晶岩的含磷灰石含量均较高,矿石中磷灰石的平均含量可达0.40%(周芳春等,2020b),说明了钽铌矿化与磷灰石化关系密切。自细粒伟晶岩、中-细粒伟晶岩、中粒伟晶岩、粗-中粒伟晶岩、粗粒伟晶岩到块状伟晶岩(包括内核),石榴子石粒度一般逐渐变粗,不规则状石榴子石多分布于粗、粗-中粒伟晶岩中(如5号、36号脉),说明岩浆结晶分异程度越高,其粒度有增大的趋势;含矿伟晶岩多含锰铝石榴石,部分不规则状锰铝石榴石周边及内部见针状和颗粒状钽铌矿,说明锰铝石榴石与钽铌矿矿化有一定的关系。目前,石榴子石与稀有金属矿化的关系的研究工作较少,研究工作有待进一步加强。

不同岩性的伟晶岩均含绿柱石和羟硅铍石,随着伟晶岩粒度增大,含铍矿物含量明显增加。碱性伟晶岩、细粒及中粒白云母钠长石伟晶岩中含矿性

差 ($w(\text{Nb}_2\text{O}_5) \leq 0.0032\%$, $w(\text{Ta}_2\text{O}_5) \leq 0.007\%$), 难以构成工业矿体。粗-中粒、粗粒白云母钠长石伟晶岩含矿性好, 是铌钽矿体 ($w(\text{Ta}_2\text{O}_5) \geq 0.007\%$) 的主要赋集部位(表 1)。伟晶岩内核主要为锂云母石英核和以块状石英为主的石英核, 锂云母石英核中常见绿柱石、铌钽矿、含锂云母、锂电气石和铯榴石, Be、Nb、Ta、Li 含量均较高, 易形成工业矿体 ($w(\text{Ta}_2\text{O}_5) \geq 0.012\%$)。完整的石英核一般含矿性较差, 比较破碎的石英核中的石英颗粒中或钠长石中往往包裹了块状铌钽矿或铌钽矿晶体, 铌钽含量往往达到峰值(如 ZK704 孔 H1305 号样)(周芳春等, 2017), Nb_2O_5 品位 0.591%, Ta_2O_5 品位 0.561%)。根据表 1 数据及周芳春等(2017), 铌钽矿矿化与白云母钠长石伟晶岩的粒度关系密切, 总体上随着粒度的增加, 铌钽矿化有逐渐增高的趋势(图 6a), 反映了岩浆结晶分异演化程度与稀有金属矿化关系密切, 其演化程度越高, 稀有金属矿化越好。从标高来看, 矿体往深部铌钽矿品位有呈波浪缓慢增长的趋势(周芳春等, 2019b)(图

6b), 说明了仁里矿区主矿体往深部延伸, 深部具有较大的找矿潜力。

综上所述, 区内伟晶岩岩性比较复杂, 不同岩性伟晶岩相互穿插, 为同期次不同阶段的结果, 经历了多阶段的岩浆-热液活动, 铌钽等稀有金属矿化与多阶段岩浆-热液活动密切相关。矿区自北东往南西, 伟晶岩岩性和矿化组合具有明显的分带性, 岩浆结晶分异程度逐渐增加, 有利于稀有金属矿富集, 矿化组合由无矿化 $\rightarrow \text{Be} \rightarrow \text{Be} + \text{Nb} + \text{Ta} \rightarrow \text{Be} + \text{Nb} + \text{Ta} + \text{Li} \rightarrow \text{Be} + \text{Li}$ 演化, 稀有金属矿化的演化系列较完整。铌钽矿矿化与白云母钠长石伟晶岩的粒度关系密切, 总体上, 随着白云母钠长石伟晶岩粒度的增加, 铌钽等稀有金属矿化有逐渐增高的趋势。铌钽矿矿化与磷灰石关系密切, 可做为矿区铌钽等稀有金属矿产找矿的重要标志之一; 石榴子石与铌钽矿化有一定的关系, 其研究工作有待进一步加强。从标高来看, 矿体往深部铌钽矿品位有呈波浪缓慢增长的趋势, 说明了仁里矿区主矿体往深部延伸, 深部具有较大的找矿潜力。

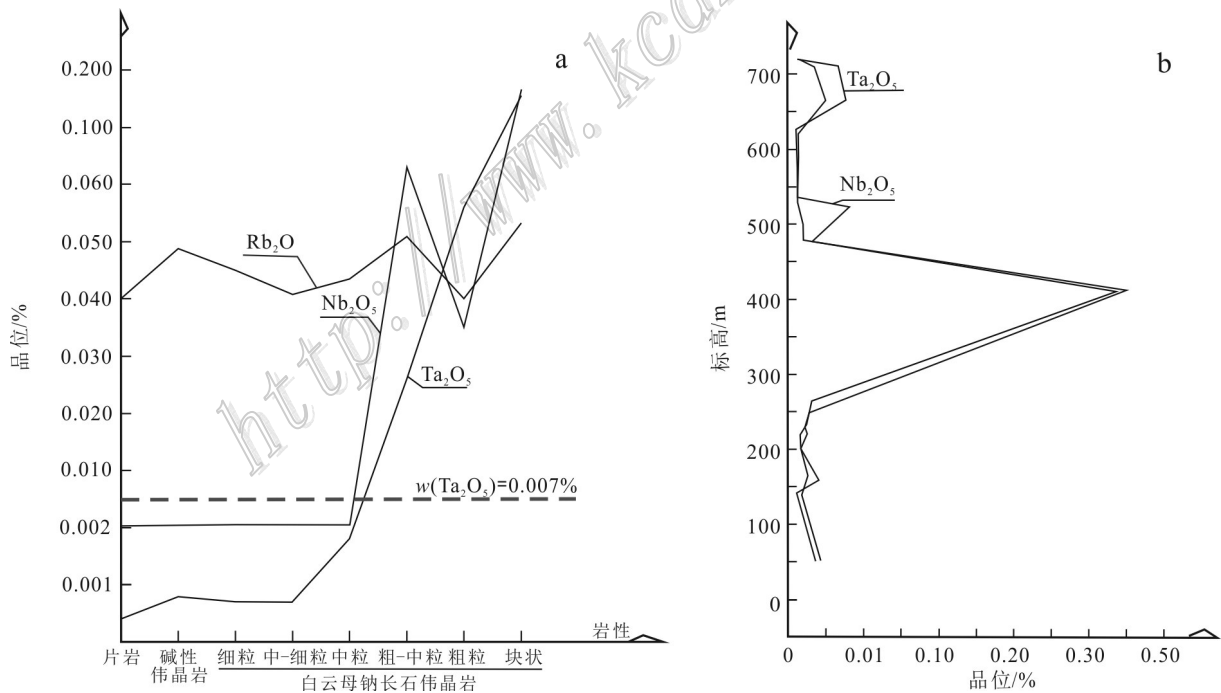


图 6 仁里矿区伟晶岩性、粒度变化趋势图和标高-Nb、Ta 品位变化趋势图

a. 仁里矿区 ZK708 钻孔岩性及粒度与 Nb、Ta 品位变化趋势图; b. 仁里矿区主矿体标高与 Nb、Ta 品位变化趋势图 (据周芳春等, 2019b)

Fig. 6 Variation trend chart of pegmatite lithology, granularity, elevation and Nb-Ta grade of in the Renli mining area
 a. Variation trend chart of pegmatite lithology; granularity and Nb-Ta grade of ZK708 borehole in the Renli mining area;
 b. Variation trend chart of elevation of main orebody and Nb, Ta grade in Renli mining area(after Zhou et al., 2019b)

4.2 成岩与成矿演化

中生代在中国东部发生了多期次强烈构造活动,伴随有广泛的岩浆活动和大规模成矿作用(毛景文等,1999;2000;华仁民等,1999)。大规模的花岗岩作用往往与俯冲的挤压背景或碰撞造山带的后造山伸展背景有关(吴福元等,2007;毛景文等,2011)。幕阜山燕山期岩体的主体呈岩基状产出,不同岩性的花岗岩呈渐变接触关系,接触带附近均有不同程度的混合岩化,具有改造花岗岩的宏观特征,属S型花岗岩(刘翔等,2019)。矿区内伟晶岩属极高分异、高硅、过铝质花岗质岩石,含稀有金属伟晶岩是过铝质、极高分异的岩浆结晶分异的产物(周芳春等,2019b;刘翔等,2019)。稀有金属伟晶岩岩浆由于水含量极高,经历了复杂的岩浆-热液分异演化(Li et al.,2019)。仁里稀有金属伟晶岩经历了从黑云母花岗岩到二云母花岗岩再到白云母花岗岩,再到稀有金属伟晶岩(Li,2007;Wang et al.,2014a;2014b;Li et al.,2019)的演化过程。经历了多阶段岩浆结晶、变质、再结晶的叠加成岩作用(Nemchin et al.,1997;Tomaschek et al.,2003;Rayner et al.,2005;Li et al.,2019)。

仁里铌钽锂矿床成因为岩浆结晶分异+热液改造型,晚期热液活动对稀有金属成矿具有叠加作用(周芳春等,2019b;2020a;杨晗等,2019;石威科等,2020),多阶段的热液流体有利于铌钽等稀有金属矿的富集(杨世珍等,2020)。区内伟晶岩由外向内云母矿物成分变化具有一定规律,具有白云母→锂云母的演化趋势(王臻等,2019)。锂云母与石英或交代成因的钠长石共生,含铯锂云母均出现于白云母边部,可与含铯锂白云母共生,且二者在成分上过渡,这些过渡类型云母既可能是伟晶质岩浆不平衡结晶的产物(Foord et al.,1995),也可能是热液交代的结果(刘昌实等,2005)。

Černý(1991)将伟晶岩划分为LCT(Li-Cs-Ta)型和NYF(Nb-Y-F)型。LCT型伟晶岩为花岗岩伟晶岩,与富硅、过铝的S型花岗岩关系较为密切(Li et al.,2007;王汾连等,2012),由S型花岗岩分异而来(Chappell,2001),而S型花岗岩起源于变质沉积岩的部分熔融(Miller,1985;Patinö et al.,1991;Sylvester,1998)。伟晶岩中矿物分带从边缘带向内,其晶体具有显著的差异、独特的岩石结构和矿物组合的空间分带(David,2018)。伟晶岩按其矿物成分可划分为简单伟晶岩和复杂伟晶岩,简单伟晶岩单纯由

长石、石英、云母组成,复杂伟晶岩含有Li、Be、Nb、Ta等稀有稀土元素(叶天竺等,2017),仁里矿区自北东往西南,可分为黑云母伟晶岩带(少量)、二云母伟晶岩带、白云母钠长石伟晶岩带和锂辉石白云母钠长石伟晶岩带;岩体内接触带主要为二云母伟晶岩,其局部地段为白云母钠长石伟晶岩,铌钽矿化主要赋存于在白云母钠长石伟晶岩中;含铍矿物主要为绿柱石,在二云母伟晶岩和白云母钠长石伟晶岩中均有分布。外接触带为白云母钠长石伟晶岩和锂辉石白云母钠长石伟晶岩,是矿区Li、Be、Nb、Ta等稀有元素主要富集区域;铌钽矿化主要赋存于粗中粒、粗粒白云母钠长石伟晶岩中,锂矿主要赋存于白云母钠长石伟晶岩的核部(锂云母石英核)和锂辉石白云母钠长石伟晶岩中,铯榴石主要赋存于锂云母石英核。按照Černý(1991)对伟晶岩的划分标准,仁里矿床伟晶岩为LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩;按照叶天竺等(2017)对伟晶岩的划分标准,仁里矿床伟晶岩为复杂伟晶岩。按主流划分标准(Černý,1991;Černý et al.,2005;London,2018;Thomas et al.,2012),笔者将仁里矿床划分为LCT(Li-Cs-Ta)伟晶岩。

不同世代矿物出现在伟晶岩熔体-溶液不同演化阶段,可作为寻找不同稀有稀土元素矿产的找矿标志(叶天竺等,2017)。岩相学研究表明,仁里矿床伟晶岩中石英、白云母、钠长石、石榴子石、铌钽矿及绿柱石均有不同的世代,如仁里矿床-传梓源矿床的钠长石既有粒状、叶片状,也有板状,绿柱石颜色既有浅绿色、深绿色,也有白色;钠长石、绿柱石均有不同的世代。根据周芳春等(2017)和湖北省第五地质队(1973),仁里矿区伟晶岩中钠长石主要为叶片状钠长石(见图2,5号主矿脉)和少量的粒状钠长石(见图2,1号主矿脉),铌钽锂铍矿主要与叶片状钠长石关系密切;仁里矿区南部(永享-传梓源矿区)伟晶岩主要为粒状钠长石(见图2,206号主矿脉)、叶片状钠长石(见图2,501号主矿脉)及少量的板状钠长石,粒状、叶片状钠长石中均有较好的铌钽锂矿化。因此,粒状、叶片状钠长石可做为本地区铌钽锂铍矿的找矿标志。

矿区伟晶岩中磷灰石沿裂隙充填于长石中,呈长柱状、短柱状、板状或不规则粒状集合体,其边缘出现大量红褐色微粒矿物。磷灰石赋存于钠长石中,其形成晚于钠长石;铌钽矿呈片状、粒状和针状穿插于磷灰石中,与磷灰石呈伴生关系;磷灰石附近往往富集针状、粒状铌钽矿。磷灰石可做为本地区

铌钽铍矿的找矿标志。

磷灰石在岩浆阶段多呈柱状长柱状集合体,气成热液中的磷灰石为短柱状或厚板状,而在低温热液中则为板状。随着温度降低,磷灰石的晶形总体显示出由长柱状—柱状—短柱状—板状转化(贾丽琼等,2011)。在热液阶段,长石晶体在Al-Si有序化过程中释放的结构P与流体介质所携带的Ca离子形成次生磷灰石。P的地球化学行为主要受流体/熔体以及晶体/熔体、晶体/流体相之间分配的制约(唐勇等,2008)。当富含 ΣCO_2 的高温热液和原富Ca+F+P的流体相混合,形成浸取能力较高的混合成矿流体(胡欢等,2013),岩浆结晶晚期,在富Li、Na、Cs、F、Cl的流体中,Nb、Ta、Li等元素以(LiNaCs) $[\text{Ta}(\text{Nb})\text{O}(\text{FCl})_4]$ 络合物形式迁移、富集(Li et al., 2019)。仁里矿区(如36号脉)中伟晶岩中磷灰石,多呈棕红色,长柱状、短柱状、板状或不规则粒状集合体,经历了岩浆结晶→热液活动的过程,磷灰石由长柱状—柱状—短柱状—板状—不规则状集合体的转化,热液作用导致磷灰石产生了蚀变,磷灰石边缘出现大量褐红色微粒矿物,并大量产生棕红色不规则状磷灰石集合体。磷灰石赋存于钠长石中,磷灰石形成晚于钠长石,可能与岩浆-热液晚期的热液活动有关。根据对矿石中磷灰石矿物含量分析,其磷灰石含量约0.43%(周芳春等,2020b),磷灰石的 $w(\text{F}) > 5.63\%$,说明矿区伟晶岩中磷灰石含量较高,磷灰石中F含量亦较高。岩浆晚期,富P、F热液流体有利于Nb、Ta、Li等稀有元素以络合物形式迁移、富集,导致矿体的进一步富集,形成了仁里高品位、超大型铌钽等稀有金属矿。

综上所述,区内伟晶岩为LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩,经历了不同阶段的岩浆-热液活动,多阶段的热液活动(尤其是富P、F热液流体)为Li、Nb、Ta等稀有元素的进一步富集提供了热源和物质来源,促使Li、Nb、Ta等稀有元素的进一步释出和富集;区内伟晶岩经历了不同阶段,不同世代矿物出现在伟晶岩熔体-溶液不同演化阶段,粒状、叶片状钠长石可做为本区铌钽等稀有金属矿产的重要找矿标志。

6 结 论

(1) 仁里矿床伟晶岩岩性比较复杂,不同岩性伟晶岩相互穿插,为同期次不同阶段的结果,经历了多阶段的岩浆-热液活动,铌钽等稀有金属矿化与多

阶段岩浆-热液活动密切相关。铌钽等稀有金属矿物主要赋存于粗-中粒、粗粒白云母钠长石伟晶岩中,随着伟晶岩粒度的增加,铌钽等稀有金属矿化具有逐渐增加的趋势。

(2) 仁里矿床伟晶岩为LCT(Li-Cs-Ta)型伟晶岩,经历了不同阶段的岩浆-热液活动,多阶段的热液活动(尤其是富P、F热液流体)为Li、Nb、Ta等稀有元素的进一步富集提供了热源和物质来源,促使Li、Nb、Ta等稀有元素的进一步释出和富集;不同世代矿物出现在伟晶岩熔体-溶液不同演化阶段。磷灰石和粒状、叶片状钠长石可做为本区铌钽等稀有金属矿产的重要找矿标志。

致 谢 中国地质科学院矿产资源研究所陈振宇研究员、王臻博士在矿物学方面和核工业二三〇研究所在实验室测试方面给予了大力支持,二位审稿专家和编辑提出了建设性意见,在此表示感谢!

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan. 1988. Regional geology of Hunan[M]. Beijing: Geological Publishing House. 417-437(in Chinese).
- Černý P. 1991. Rare-element granite pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits[J]. *Geoscience Canada*, 18 (2): 49-67.
- Černý P and Ercit T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited[J]. *Canadian Mineralogist*, 43: 2005-2026.
- Chappell B W and White A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489-499.
- David L. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. *Ore Geology Reviews*, DOI:10.1016/j.oregeorev.2018.04.020.
- Fifth Geological Brigade of Hubei Province. 1973. Preliminary exploration report of chuanziyuan Nb-Ta mine in Pingjiang County, Hunan Province[R]. Wuhan: Fifth Geological Brigade of Hubei Province(in Chinese).
- Foord E E, Černý P, Jackson L L, Sherman D M and Eby R K. 1995. Mineralogical and geochemical evolution of micas from miarolitic pegmatites of the anorogenic Pikes Peak batholith, Colorado[J]. *Mineralogy and Petrology*, 55(1-3): 1-26.
- Fu Z R, Li Z J and Zheng D Y. 1999. Structural pattern and tectonic evolution of NNE-trending strike-slip orogenic belt in the border region of Hunan and Jiangxi Provinces[J]. *Earth Science Frontiers*, 6(4): 263-273(in Chinese with English abstract).
- Gu X F and Xu Y N. 1973. The preliminary research on the lithium containing micas in some place in southern China[J]. *Geochemi-*

- ca, 2(1): 61-75(in Chinese with English abstract).
- Hu H, Wang R C, Chen W F, Chen P R, Ling H F and Liu G N. 2013. Timing of hydrothermal activity associated with the Douzhashan uranium-bearing granite and its significance for uranium mineralization in northeastern Guangxi, China[J]. Chinese Science Bulletin, 58(34): 4319-4328.
- Hua R M and Mao J W. 1999. A preliminary discussion on the mesozoic metallogenic explosion in East China[J]. Mineral Deposits, 18(4):300-308(in Chinese with English abstract).
- Huang Z B, Li P, Zhou F C, Liu X, Li J K, Xiao G Q, Zhang L P, Chen F and Wang X M. 2018. Geochemical characteristics and genesis of the neoproterozoic granites in Mufushan area[J]. Journal of Guilin University of Technology, 38(4): 614-624(in Chinese with English abstract).
- Hubei Geological Survey. 2013. 1:500 000 regional geological survey report of Tongcheng area[R]. Wuhan: Hubei Geological Survey. 1-288(in Chinese).
- Ji W B, Lin W, Michel F, Chen Y, Chu Y and Xue Z H. 2016. 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 Asian Earth Sciences, 141(2017): 174-193.
- Jia L Q, Dong G C, Wang L and Zhang Q Y. 2011. Research status of apatite genesis mineralogy[A]. Guangzhou, proceeding of the 13th annual meeting of the Chinese society for mineral and rock geochemistry[C]. (in Chinese).
- Li C Y, Xiang T, Yan Y Y and Wang C. 2019. Geogeochemical characteristics and ore genesis of the Chuanziyuan niobium(Nb)-tantalum (Ta)-lithium(Li) deposit in northeast Hunan[J]. Mineral Exploration, 10(12): 2953-2963(in Chinese with English abstract).
- Li J K, Wang C H, Feng W J, Wang D H and Zou T R. 2017. A pegmatite type zinnwaldite deposit has been found in northwest Yunnan[J]. Mineral Deposits, 36(6): 1453-1455(in Chinese with English abstract).
- Li J K, Liu C Y, Liu X, Li P, Huang Z B and Zhou F C. 2019. Tantalum and niobium mineralization from F- and Cl-rich fluid in the lepidolite-rich pegmatite from the Renli deposit in northern Hunan, China: Constraints of fluid inclusions and lepidolite crystallization experiments[J]. Ore Geology Reviews, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103187>.
- Li J K, Li P, Wang D H and Li X J. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity in China[J]. Chinese Science Bulletin, 64(15): 17-38(in Chinese).
- Li J W, Li X F, Li Z J and Fu Z R. 1999. Fluid inclusions study in the process of strike slip faulting-a case study in eastern Hunan Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 23(3): 240-247(in Chinese with English abstract).
- Li P. 2017. Magmatic activities and metallogenic regularity of rare metals of Mufushan area[R]. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences (Postdoctoral Report). 38-97(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).
- Li P, Liu X, Li J K, Huang Z B, Zhou F C and Zhang L P. 2019. Petrographic and geochemical characteristics of Renli-Chuanziyuan No.5 pegmatite, NE Hunan, and its metallogenic age[J]. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1274-1391(in Chinese with English abstract).
- Li P, Li J K, Liu X, Li C, Huang Z B and Zhou F C. 2019. 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, 1-21. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2019.103237>.
- Li Z L, Li W, Ji J F, Wang Y X and Shi G Y. 2007. Study on the origin and rock-forming simulation experiments of aquamarine-bearing pegmatites of Ailaoshan, Yunnan, China[J]. Acta Petrologica Sinica, 23(1): 39-52.
- Liu C S. 1984. Comparison of chemical composition of biotite minerals in granite of different origin in South China[J]. Journal of Guilin Institute of Metallurgy and Geology, 4: 1-14(in Chinese with English abstract).
- Liu C S, Chen X M, Wang R C, Zhang W L and Hu H. 2005. Isotopic dating and origin of complexly zoned micas for A-type Nankunshan aluminous granite[J]. Geological Review, 51(2): 193-201(in Chinese with English abstract).
- Liu H Q, Zhang L X, Jin W Q, et al., 1999. The Yanshanian granitoid-sin northeast Hunan[J]. Geology and Mineral Resources of South China, (4):1-9(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): 235-2431(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 Renli rare metal orefield in Hunan and its prospecting significance[J]. Mineral Deposits, 38(4): 771-791(in Chinese with English abstract).
- London D. 2018. Ore-forming processes within granitic pegmatites[J]. Ore Geology Reviews, 101: 349-383.
- Mao J W, Hua R M and Li X B. 1999. A preliminary study of large-scale metallogenesis and large clusters of mineral deposits[J]. Mineral Deposits, 18(4): 291-299(in Chinese with English abstract).
- Mao J W and Wang Z L. 2000. A preliminary study on time limits and geodynamic setting of large-scale metallogeny in East China[J]. Mineral Deposits, 19(4): 289-296(in Chinese with English abstract).
- Mao J W, Chen M H, Yuan S D and Guo C L. 2011. Geological charac-

- teristics of the Qinhang (or shihang) metallogenic belt in South China and spatial-temporal distribution regularity of mineral deposits[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(5): 636-658(in Chinese with English abstract).
- Miller C F. 1985. Are strongly peraluminous magmas derived from pelitic sedimentary sources[J]? *The Journal of Geology*, 93(6): 673-689.
- Nemchin A A and Pidgeon R T. 1997. Evolution of the darling range batholith, Yilgarn Craton, western Australia: A SHRIMP zircon study[J]. *Petrology*, 38: 625-649.
- Patinö Douce A E and Johnston A D. 1991. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: Implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2): 202-218.
- Rayner N, Stern R A and Carr S D. 2005. Grain-scale variations in trace element composition of fluid-altered zircon, Acasta gneiss complex, northwestern Canada[J]. *Contributions Mineralogy and Petrology*, 148: 721-734.
- Shi H C, Shi X B, Yang X Q and Jiang H Y. 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 W K, Zhou F C, Liu X, Li P, Huang Z B, Wen C H, Chen Q R, Su J N, Huang X Q, Zhang Z D, Zhang L P, Chen H, Liu J F and Hu X F. 2020. Geological characteristics and prospecting significance of spodumene-muscovite pegmatite in the Renli ore-field, Hunan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(3): 817-835(in Chinese with English abstract).
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1-4): 29-44.
- Tang Y, Zhang H, Liu C Q and Rao B. 2008. Geochemical behavior of phosphorus in the peraluminous magmatic-hydrothermal system[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(2): 127-134(in Chinese with English abstract).
- Thomas R and Davidson P. 2012. Water in granite and pegmatite-forming melts[J]. *Ore Geology Reviews*, 46: 32-46.
- Tomaschek F, Kennedy A K, Villa I M, Lagos M and Ballhaus C. 2003. Zircons from Syros, Cyclades, Greece-recrystallization and mobilization of zircon during highpressure metamorphism[J]. *Petrology*, 44: 1977-2002.
- Wang D H. 2019. Study on critical mineral resources: Significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1189-1209 (in Chinese with English abstract).
- Wang F L, Zhao T P and Chen W. 2012. Advances in study of Nb-Ta ore deposits in Panxi area and tentative discussion on genesis of these ore deposits[J]. *Mineral Deposits*, 31(2): 293-308(in Chinese with English abstract).
- Wang L X, Ma C Q, Zhang C, Zhang J Y and Marks M A W. 2014a. Genesis of leucogranite by prolonged fractional crystallization: A case study of the Mufushan complex, South China[J]. *Lithos*, 206-207(1): 147-163.
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W L, Zhao G C, Yu J H, Qiu J S, Zhang Y J and Xing G F. 2014b. Geochemical zonation across a neoproterozoic orogenic belt: Isotopic evidence from granitoids and metasedimentary rocks of the Jiangnan orogen, China[J]. *Precambrian Research*, 242: 154-171.
- Wang Z, Chen Z Y, Li J K, Li P, Xiong X, Yang H and Zhou F C. 2019. Indication of mica minerals for magmatic-hydrothermal evolution of Renli rare metal pegmatite deposit[J]. *Mineral Deposits*, 38(5): 1039-1052(in Chinese with English abstract).
- Wen C H, Luo X Y, Li S M and Li J K. 2015. Application of X-ray fluorescence spectrometry and inductively coupled plasma-mass spectrometry in geochemical study of rare metal deposits in Chuanziyuan area, Hunan Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 34(3): 359-365(in Chinese with English abstract).
- Wen C H, Chen J F, Luo X Y and Li S M. 2016. Geochemical features of the Chuanziyuan rare metal pegmatite on northeastern Hunan, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(1): 171-177(in Chinese with English abstract).
- Wen C H. 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).
- Wen C H, Luo X Y, Chen J F, Lin B H and Li S M. 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).
- Wu F Y, Li X H, Yang J H and Zheng Y F. 2007. Discussions on the petrogenesis of granites[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217-1238(in Chinese with English abstract).
- Yang H, Chen Z Y, Li J K, Li P, Xiong X, Wang Z and Zhou F C. 2019. Relationship between the mineralization and the evolution of mica and feldspar components of Renli-Chuanziyuan No. 5 pegmatite, northeast Hunan[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 851-866(in Chinese with English abstract).
- Yang S Z, Zhou F C, Li J B, Liu X, Li J K, Huang Z B, Su J N and Li P. 2020. Prospecting ideas and progress of Renli superlarge Ta-Nb deposit, Hunan Province[J]. *Geological Survey of China*, 7(4): 28-36(in Chinese with English abstract).
- Ye T Z, Wei C S, Wang Y Z, Zhu X Y, Pang Z S, et al. 2017. Theory and method of prospecting prediction in exploration area[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-594(in Chinese with English abstract).
- Zhou F C, Liu X, Huan Z B, Xiao G Q, Bao Y H, Chen H, Su J N, Wang X M, Lin Y, Huang X Q, Zou M Q, Li X M, Chen Q R, Zhang L P, Zhang Z D, Li Z H, Luo X R, Hu X F and Zhang S Z. 2017. Preliminary results report of Nb-Ta polymetallic ore survey in Renli mine, Pingjiang County, Hunan Province[R]. (in Chinese).

- Zhou F C, 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. 2019a. 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).
- Zhou F C, Li J K, Liu X, Li P, Huang Z B, Shi W K, Su J N, Chen H and Huang X Q. 2019b. Geochemical characteristics and genetic significance of orebodies in Renli Nb-Ta deposit, Hunan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1392-1404(in Chinese with English abstract).
- Zhou F C, Huang Z B, Liu X, Su J N, Huang X Q, Wang Z, Chen H, Zhang Z D, Luo X R, Li J B, Li Z H, Zhang L P, Zeng L and Li X M. 2020a. 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).
- Zhou F C, Su J N, Li J K, Liu X, Huang Z B, Li P, Huang X Q, Chen H, Hu X F and Zeng L. 2020b. Comprehensive utilization evaluation of rare metal resources such as Ta, Nb and Be in Renli deposit, Hunan Province[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 40(2): 112-118(in Chinese with English abstract).
- 傅昭仁, 李紫金, 郑大瑜. 1999. 湘赣边区NNE向走滑造山带构造发展样式[J]. *地学前缘*, 6(4): 263-273.
- 顾雄飞, 徐英年. 1973. 华南某地含锂的云母类矿物初步探讨[J]. *地球化学*, 2(1): 61-75.
- 胡欢, 王汝成, 陈卫锋, 陈培荣, 凌洪飞, 刘国宁. 2013. 桂东北豆乍山产钽花岗岩热液活动时限的确定与钽成矿意义[J]. *科学通报*, 58(36): 3849-3858.
- 湖北省地质调查院. 2013. 1:50万通城县区域地质调查报告[R]. 武汉: 湖北省地质调查院. 1-288.
- 湖北省第五地质大队. 1973. 湖南省平江县传梓源铌钽矿初勘报告[R]. 武汉: 湖北省第五地质大队.
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 417-437.
- 华仁民, 毛景文. 1999. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. *矿床地质*, 18(4): 300-308.
- 黄志彪, 李鹏, 周芳春, 刘翔, 李建康, 肖国强, 陈虎, 张立平, 汪宣民. 2018. 幕阜山地区新元古代花岗岩地球化学特征及成因探讨[J]. *桂林理工大学学报*, 38(4): 614-624.
- 贾丽琼, 董国臣, 王梁, 张廷彦. 2011. 磷灰石成因矿物学研究现状[A]. 中国矿物岩石地球化学学会第13届学术年会论文集[C].
- 李昌元, 向涛, 闫友谊, 汪程. 2019. 湘东北传梓源铌钽锂矿床地质地球化学特征及成因[J]. *矿产勘查*, 10(12): 2953-2963.
- 李建威, 李先福, 李紫金, 傅昭仁. 1999. 走滑变形过程中的流体包裹体研究-以湘东地区为例[J]. *大地构造与成矿学*, 23(3): 240-247.
- 李建康, 王成辉, 冯文杰, 王登红, 邹天人. 2017. 滇西北发现花岗岩伟晶岩型铁锂云母矿床[J]. *矿床地质*, 36(6): 1453-1455.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国铌钽矿成矿规律[J]. *科学通报*, 64(15): 17-38.
- 李鹏. 2017. 幕阜山地区岩浆活动及稀有金属成矿规律[R]. 北京: 中国地质科学院博士后(博士后报告). 38-97.
- 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, 黄志彪, 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.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 张文兰, 胡欢. 2005. 广东南昆山A型花岗岩定年和环带云母研究[J]. *地质评论*, 51(2): 193-201.
- 刘昌实. 1984. 华南不同成因花岗岩黑云母类矿物化学成分对比[J]. *桂林冶金地质学院学报*, 4: 1-14.
- 刘姝群, 张录秀, 金维群, 等. 1999. 湘东北燕山期花岗岩[J]. *华南地质与矿产*, (4): 1-9.
- 刘翔, 周芳春, 黄志彪, 李建康, 周厚详, 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. 湖南省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): 235-243.
- 刘翔, 周芳春, 李鹏, 李建康, 黄志彪, 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.
- 毛景文, 华仁民, 李晓波. 1999. 浅议大规模成矿作用与大型矿集区[J]. *矿床地质*, 18(4): 291-299.
- 毛景文, 王志良. 2000. 中国东部大规模成矿作用时限及其地球动力学背景的初步探讨[J]. *矿床地质*, 19(4): 289-296.
- 毛景文, 陈懋弘, 袁顺达, 郭春丽. 2011. 华南地区钦杭成矿带地质特征和矿床时空分布规律[J]. *地质学报*, 85(5): 636-658.
- 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, 黄志彪, 文春华, 陈旻然, 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.
- 唐勇, 张辉, 刘丛强, 饶冰. 2008. 过铝质岩浆-热液演化体系中磷的地球化学行为[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(2): 127-134.
- 王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向[J]. *地质学报*, 93(6): 1189-1209.
- 王汾连, 赵太平, 陈伟. 2012. 铌钽矿研究进展和攀西地区铌钽矿成因探讨[J]. *矿床地质*, 31(2): 293-308.
- 王臻, 陈振宇, 李建康, 李鹏, 熊欣, 杨哈, 周芳春. 2019. 云母矿物对仁里稀有金属伟晶岩矿床岩浆-热液演化过程的指示[J]. *矿床地质*, 38(5): 1039-1052.
- 文春华, 罗小亚, 李胜苗, 李建康. 2015. 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[J]. *岩矿测试*, 34(3): 359-365.
- 文春华, 陈剑锋, 罗小亚, 李胜苗. 2016. 湘东北传梓源稀有金属花岗岩伟晶岩地球化学特征[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 35(1): 171-177.

附中文参考文献

- 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.
- 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.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 郑永飞. 2007. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 23(6): 1217-1238.
- 杨哈, 陈振宇, 李建康, 李鹏, 熊欣, 王臻, 周芳春. 2019. 湘东北仁里-传梓源5号伟晶岩脉白云母和长石成分的演化与成矿作用的关系[J]. 矿床地质, 38(4): 851-866.
- 杨世珍, 周芳春, 李建斌, 刘翔, 李建康, 黄志飏, 苏俊男, 李鹏. 2020. 湖南仁里超大型钽铌矿床工作进展及找矿思路[J]. 中国地质调查, 7(4): 28-36.
- 叶天竺, 韦昌山, 王玉柱, 祝新友, 庞振山, 等. 2017. 勘查区找矿预测理论与方法[M]. 北京: 地质出版社. 1-594.
- 周芳春, 刘翔, 黄志飏, 肖国强, 谭黎明, 包云河, 陈虎, 苏俊男, 汪宣民, 林跃, 王箭, 黄小强, 邹猛秋, 李旭明, 陈阡然, 张立平, 张宗栋, 李振红, 雒小荣, 胡小芳, 张神洲. 2017. 湖南省平江县仁里矿区钽铌多金属矿普查阶段性成果报告[R]. 长沙: 湖南省核工业地质局三一一大队.
- 周芳春, 刘翔, 李建康, 黄志飏, 肖国强, 李鹏, 周厚祥, 石威科, 谭黎明, 苏俊男, 陈虎, 汪宣民. 2019a. 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.
- 周芳春, 李建康, 刘翔, 李鹏, 黄志飏, 石威科, 苏俊男, 陈虎, 黄小强. 2019b. 湖南仁里钽铌矿床矿体地球化学特征及其地质意义[J]. 地质学报, 93(6): 1392-1404.
- 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. 2020a. 湖南仁里钽铌矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(3): 476-485.
- 周芳春, 苏俊男, 李建康, 刘翔, 黄志飏, 李鹏, 黄小强, 陈虎, 胡小芳, 曾乐. 2020b. 湖南仁里钽铌钨稀有金属矿床综合利用评价[J]. 矿产保护与利用, 40(2): 112-118.