

# 川西甲基卡和可尔因矿田稀有金属成矿特征 差异性及其成因探讨

杨岳清<sup>1)</sup>, 刘善宝<sup>1)</sup>, 王登红<sup>1)</sup>, 代鸿章<sup>1)</sup>, 刘丽君<sup>2)</sup>, 李鑫<sup>1)</sup>

1)中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037;

2)四川省地质矿产勘查开发局地质矿产科学研究所, 四川成都 610063

**摘要:** 四川西部是我国松潘—甘孜造山带的主体, 区域内中—上三叠统分布极其广泛, 其中陆陆碰撞壳源改造型花岗岩类不均匀集中侵入于该套地层中, 并衍生出以锂为主的稀有金属花岗伟晶岩, 最有代表性的是甲基卡和可尔因花岗伟晶岩型稀有金属矿田, 目前在二者中均勘察出超大型锂矿床。矿化伟晶岩脉主要由富锂辉石的白云母-钠长石-钾长石型花岗伟晶岩脉构成, 它们分布在离母岩-二云母花岗岩外围热接触变质的蚀变中—上三叠统沉积岩系中, 和围岩侵入关系清楚, 并对围岩均有不同程度的接触交代蚀变作用。鉴于这些共同点, 长期以来, 人们对这两个矿田成矿作用的认识和找矿思路统一用甲基卡矿田成矿模式来看待。但随着研究工作的不断深入, 发现它们既有相似处, 但也存在较大的差异。比如: 两个矿田形成时的构造-岩浆环境、花岗伟晶岩产出的围岩岩性和蚀变作用、矿化伟晶岩脉的结构-构造、成矿矿物的多样性等方面各有其不同的特征, 本文在分别概述各自特征基础上, 对产生差异的原因做了初步分析, 为提升川西花岗伟晶岩成岩成矿理论和开辟新的找矿方向提供新依据。

**关键词:** 松潘—甘孜造山带; 甲基卡矿田; 可尔因矿田; 花岗伟晶岩; 稀有金属; 锂辉石

中图分类号: P618.6 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2023.021501

## Discussion on the Difference of Metallogenic Characteristics and Genesis of the Jiajika and Keeryin Rare Metals Ore Fields in Western Sichuan

YANG Yue-qing<sup>1)</sup>, LIU Shan-bao<sup>1)</sup>, WANG Deng-hong<sup>1)</sup>,  
DAI Hong-zhang<sup>1)</sup>, LIU Li-jun<sup>2)</sup>, LI Xin<sup>1)</sup>

1) MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) Institute of Geology and Mineral Resources, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu, Sichuan 610063

**Abstract:** The Songpan–Ganzi orogenic belt is mainly located in western Sichuan in China, and Middle–Upper Triassic strata are widely distributed in the region. Continental–continental collision crust–derived modified granitoids are unevenly concentrated in the strata, from which rare metal granitic pegmatites dominated by lithium are derived. The most representative are the Jiajika and Keeryin granitic pegmatite rare metal ore fields. At present, super–large lithium deposits have been explored in both of them. The mineralized pegmatite veins are mainly composed of spodumene–rich muscovite–albite–K–feldspar type granitic pegmatite veins, which are distributed in the Middle–Upper Triassic sedimentary rock series of thermal contact metamorphism in the periphery of the mother rock–two–mica granite. These veins are related to the intrusion of the surrounding rock

本文由国家重点研发计划“战略性矿产资源开发利用”专项“我国西部伟晶岩型锂等稀有金属成矿规律与勘查技术”项目(编号: 2021YFC2901900; 2021YFC2901905)和中国地质调查局地质调查项目“战略性矿产重点远景区矿产地质调查”(编号: DD20221684)、“松潘–甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”(编号: DD20190173)、“中国矿产地质志”等项目(编号: DD20221695; DD20190379)联合资助。

收稿日期: 2022-09-07; 改回日期: 2023-01-20; 网络首发日期: 2023-02-16。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 杨岳清, 男, 1941年生。研究员。主要研究方向为矿床地质。E-mail: 1347581781@qq.com。

and show different degrees of contact metasomatic alteration with the surrounding rock. In view of these common points, our understanding of the mineralization of these two ore fields and prospecting ideas have, for a long time, been unified with the metallogenic model of the Jiajika ore field. However, with advances in research, it has been found that they have both similarities and differences. For example, the structure-magma environment of the two ore fields, lithology and alteration of the surrounding rock produced by the granitic pegmatite, structure of the mineralized pegmatite vein, and diversity of ore-forming minerals have different characteristics. Based on a summary of their respective characteristics, this study describes a preliminary analysis of the causes of the differences, which provides a new basis for improving the diagenesis and mineralization theory of the granitic pegmatite in western Sichuan and opening new prospecting directions.

**Key words:** Songpan–Ganzi orogenic belt; Jiajika ore field; Keeryin ore field; granite pegmatite; rare metals; spodumene

自 20 世纪 60 年代,四川地质局的甘孜队和阿坝队先后发现了甲基卡、可尔因等稀有金属矿田后,历经半个多世纪的不断勘察,川西地区目前已成为我国最大的以锂为主体的稀有金属矿产基地,其潜在资源前景仍非常可观。目前在两个矿田中经勘查已确定的超大型锂矿床 3 个,大型矿床 4 个,中型矿床 4 个,随着锂等稀有金属在国民经济的特种钢、超硬质合金、电器工业、化学工业、原子能工业、火箭技术等诸多关键领域需求的迅速提升和应用范围的不断扩大,川西将成为我国非常重要的以锂为主的稀有金属产业基地。

经半个多世纪的勘察和研究,目前对甲基卡和可尔因两个矿田的范围、产出背景、成矿特征等基本有了较成熟的认识:①花岗伟晶岩是这两个矿田中锂等稀有金属的最主要载体(唐国凡和吴盛先,1984;岳相元等,2019;罗伟等,2021);②花岗伟晶岩是矿田中二云母二长花岗岩浆在侵入活动晚期冷凝结晶分异作用的产物,花岗伟晶岩脉基本围绕着二云母二长花岗岩在其外围的中—上三叠统沉积地层中分布(李永森和韩同林,1980;古城会,2014;鞠天应和周小波,2016;沙小保等,2017;马圣钞等,2019,2020);③花岗伟晶岩浆在侵入围岩冷凝结晶过程中,其岩浆成分、特别是稀有元素和挥发份也产生了一定的分异作用,从而产生了不同类型的花岗伟晶岩,稀有金属主要富集在远离二云母二长花岗岩的白云母-钠长石-锂辉石型花岗伟晶岩中(李建康等,2007;付小方等,2014,2015,2017,2021;赵玉祥等,2015;秦宇龙等,2015;梁斌等,2016;王登红等,2017a,b);④花岗伟晶岩和它们的成矿母岩是在三叠纪晚期松潘甘孜造山带形成过程中产生的,该区域在经历了大规模滑脱-逆冲收缩和成陆挤压作用后,热能的聚集使部分硅铝层地壳熔融并吸收了围岩中的稀有等成矿元素,形成了“S 型”花岗伟晶岩浆,以底辟方式向上侵入到三叠系背斜或穹窿中形成了二云母花岗岩和相应的含稀有金属花

岗伟晶岩(许志琴等,1992,2018,2019;侯立玮和付小方,2002;武文辉等,2017;彭杰和邹林,2021);⑤目前最有价值的成矿元素是锂,它们主要以锂辉石形式产出(李建康等,2007;刘丽君等,2015a,b;王登红等,2017a,b);⑥两个矿田中的花岗伟晶岩岩脉和有成因联系的花岗岩均主要形成于印支晚期(王登红等,2005;李建康等,2014;刘丽君等,2015a;岳相元等,2019)。

纵观国内外大多数花岗伟晶岩型锂矿床、特别是超大型锂矿床,它们区别于甲基卡和可尔因伟晶岩型锂矿田的主要成矿特征是:多数分布在太古代克拉通之中,或前寒武纪造山带,至少是古生代造山带,在中生代形成大规模的伟晶岩型稀有金属矿田是很少见的;矿化伟晶岩的围岩基本是高绿片岩相以上的区域变质岩系,含矿伟晶岩和有成因联系的母岩与其围岩在成岩时代上相差都比较大,几乎不低于 1 亿年,矿石类型较单一,花岗伟晶岩型锂矿石占据明显优势(Partington et al., 1995; Černý and Ercit, 2005; 王登红等, 2017a; Rasilanen et al., 2018; Dittrich et al., 2019; 李建康等, 2021; 陈衍景等, 2021)。而甲基卡和可尔因矿田中,成矿伟晶岩和有成因联系的花岗岩所侵入的围岩为中—上三叠统,且以后者为主,围岩的区域变质很弱,基本仅为低绿片岩相或微变质的区域变质岩系,但侵入关系清晰,对伟晶岩和有成因联系的花岗岩,不论何种方法测年,其年龄数据接近于围岩的成岩年龄,也即主要在印支晚期。在国内外少见,其数据均非常相近。在两个矿田中锂矿石不仅仅是花岗伟晶岩型,而且发育花岗岩型矿石,后者在一些矿床中所占的  $\text{Li}_2\text{O}$  储量甚至超过花岗伟晶岩型,这在国内外是非常罕见的(杨岳清等,2020)。因此,甲基卡和可尔因稀有金属伟晶岩矿田的形成机制已引起国内外相关学者的极大关注。另外,随着近几年工作的逐步深入,两个矿田在成岩和成矿特征等方面也还存在着诸多差异,即二者也并非是在完全相同的模式中发生的,

它们既有共同之处, 也还有因各自成岩成矿环境的独特性所产生的诸多差异。本文拟在分别较详论述两个矿田成岩成矿特征基础之上, 对二者之间的一些差异性也做一些简要的分析探讨, 望能有助丰富和提升川西地区稀有金属伟晶岩田成矿作用的认识, 也更期望在矿田及外围找矿获得飞跃性转机。

### 1 甲基卡和可尔因矿田区域环境特征

两矿田在川西大地构造中的位置见图 1, 川西是我国特提斯构造域的一部分, 并构成了松潘—甘孜造山带的主体。区域中三叠系分布极为广泛, 几乎占据了全区近 90%的面积, 其厚度近万米, 属被动大陆边缘沉积。三叠系从下到上的地层依次为: 菠茨沟组(P<sub>Tb</sub>), 由杂色板岩、粉砂岩、细砂岩或凝灰质砂岩互层; 扎尕山组(T<sub>2zg</sub>)为变质砂岩、板岩夹灰岩; 杂谷脑组(T<sub>3z</sub>), 以变质砂岩为主夹板岩; 侏倭组(T<sub>3zh</sub>), 由变质砂岩、粉砂岩、板岩组成韵律互层; 新都桥组(T<sub>3x</sub>)以板岩为主, 夹砂岩; 两河口组(T<sub>3lh</sub>)和雅江组(T<sub>3y</sub>)为变质砂岩和板岩互层。在东部边缘和东北部出露少量的震旦纪—古生界地层, 主要为一套稳定台型碎屑岩—碳酸盐岩沉积, 具有扬子型盖层特征。

区内侵入岩分布不是非常广泛, 主要是与稀有

金属成矿作用关系密切的中生代碰撞型花岗岩类, 它们较集中分布于甲基卡、可尔因、扎乌龙、九龙赫德等稀有金属矿化发育地区, 是典型的陆陆碰撞壳源改造 S 型花岗岩类, 侵入的围岩也主要为三叠系, 围岩普遍受到侵入岩浆的蚀变改造。不同地区, 花岗岩类的岩性和侵入期次有一定差别, 但与稀有金属伟晶岩成矿作用关系密切的基本是二云母二长花岗岩类。

区内西南部发育一条规模较大的北北西—北西向波状延伸的鲜水河断裂(图 1), 以它为界可将本区进一步分成两个构造单元, 北部为巴颜喀拉—松潘周缘前陆盆地, 南部为雅江残余盆地。前一盆地内大面积出露的是由十分单调的砂板岩组成的三叠系复理石沉积, 主要为一套稳定台型碎屑岩为主夹碳酸盐岩沉积, 具有扬子型盖层特征, 区内分布有比较多的中生代碰撞型花岗岩类, 可尔因花岗伟晶岩矿田产于其中(图 1)。南部的雅江残余盆地虽然也由巨厚的三叠系复理石沉积组成, 但显示有向上变浅—充填淤塞退积式浊积扇沉积的特征, 故推断是受不规则的被动大陆边缘控制而成的残余盆地, 中生代碰撞型侵入岩的分布相对较少, 甲基卡花岗伟晶岩矿田和石渠等成矿区分布其中(图 1)。

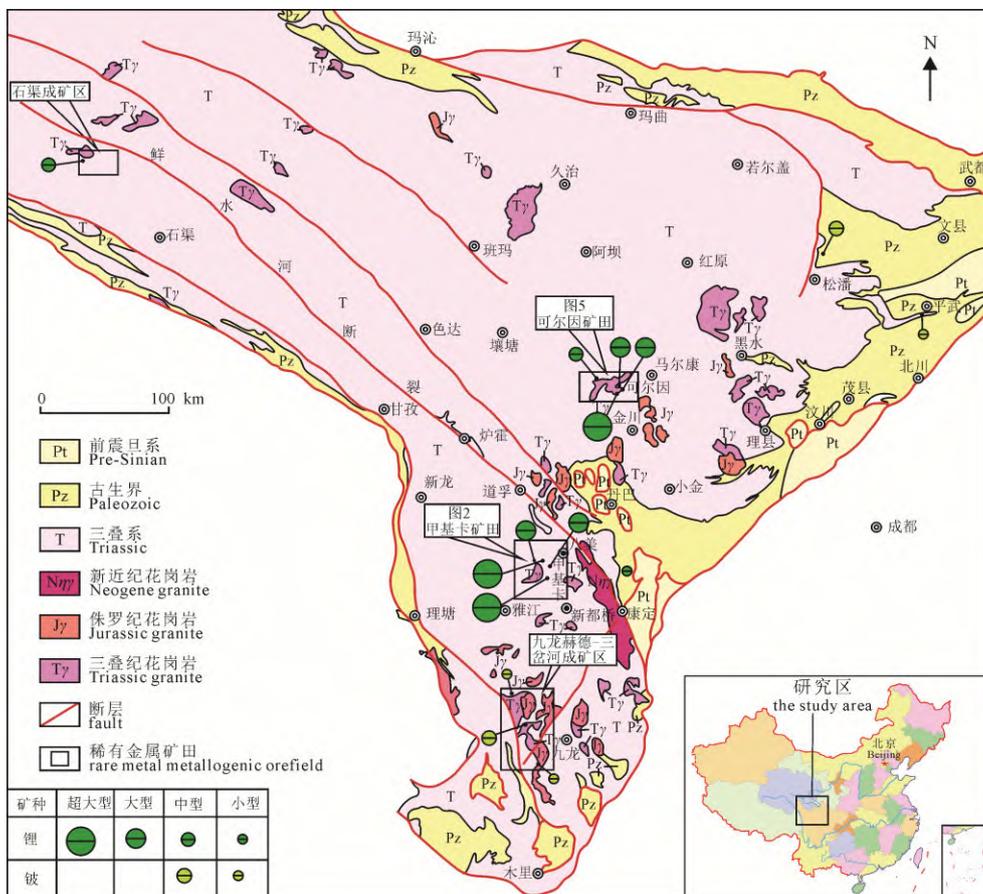


图 1 川西甲基卡—可尔因等稀有金属矿田产出地质环境图(据付小方等, 2021, 稍作修改)

Fig. 1 Geological environment map of Jiajika-Keeryin rare metal ore fields in Western Sichuan (modified after FU et al., 2021)

## 2 甲基卡矿田成岩-成矿特征

### 2.1 矿田地质环境

矿田中出露的地层为上三叠统侏倭组( $T_{3zh}$ )、新都桥组( $T_{3x}$ )和第四系地层, 后者的覆盖率超过矿田面积的一半以上, 上三叠统的分布较零散, 也不完整。区域整体缺失侏罗系及其后的地层。

侏倭组分布非常零散, 约占甲基卡矿田面积的10%左右, 上部岩性为浅灰-灰白色中厚-厚层状含泥粉砂岩, 夹薄层状泥质粉砂岩, 下部岩性为浅灰-灰白色中厚-厚层状钙质细砂岩, 顶部夹浅灰色薄层状泥质粉砂岩。

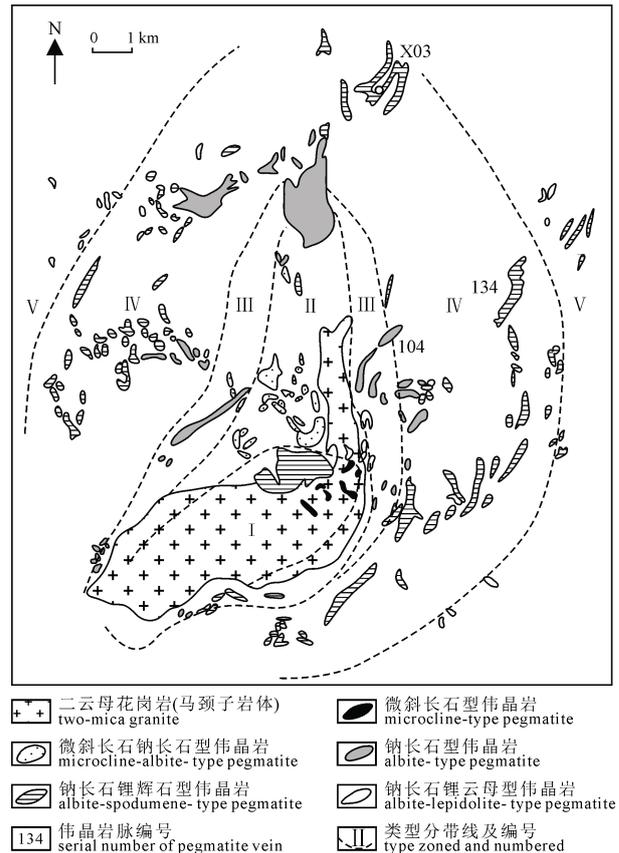
新都桥组是区内分布最广的地层, 约占甲基卡矿田面积的35%, 但由于很少有连续完整的剖面露头, 加之后期的蚀变改造十分强烈, 因此, 原始岩性段的详细划分较困难, 总体看, 上部为深灰色薄层状泥质粉砂岩夹少量灰白色薄层粉砂岩, 下部为深灰色薄层状泥质粉砂岩与深灰色粉砂质泥岩互层。

上三叠统沉积地层在晚期挤压抬升成岩和成陆过程中, 大面积的区域变质作用较弱, 基本是低绿片岩相的绢云母-绿泥石化组合, 但由于后期的区域构造-岩浆活动比较强烈, 使甲基卡地区的构造形态和上三叠统沉积岩系发生了一定的变化。

首先是地壳深部较古老的岩系在区域大规模挤压-伸展构造驱动下热熔形成了含有稀有元素的花岗质岩浆, 以底辟等方式向上侵入到地壳浅部的上三叠统地层中, 使矿田构成一个以二云母二长花岗岩(马颈子岩体)为核心的穹窿构造(侯立玮和付小方, 2002; 许志琴等, 2018, 2019), 岩体与沉积地层清晰的侵入关系显示出原始岩浆强力贯入的特征。

岩田中心的马颈子二云母二长花岗岩(图2), 也是矿田目前唯一出露的花岗岩株, 出露面积约 $5.3\text{ km}^2$ , 总体呈北东 $70^\circ\sim 80^\circ$ 方向延伸, 长3 km、宽1.2 km, 岩体东侧向正北方向伸出岩舌, 岩舌长3 km, 平均宽0.4 km。除边缘稍显示有片麻状构造外, 绝大多数部位具典型的细-中粒花岗结构, 其中, 微斜长石含量约在33%, 奥长石( $An_{12\%\sim 17\%}$ )30%, 石英30%, 白云母4%, 黑云母2%, 化学成分具高硅( $SiO_2\ 73.17\%\sim 74.53\%$ )、过铝( $Al_2O_3\ 14.61\%\sim 14.98\%$ )、富碱( $K_2O+Na_2O\geq 8\%$ )特征, 总体属偏碱的钙碱性花岗岩(李名则等, 2018)。矿田中的花岗伟晶岩等含矿脉体基本仅围绕着马颈子二云母二长花岗岩分布, 反映了该岩体和矿田中脉体成矿作用的密切关系。

矿田构造总体呈近南北向的椭圆状, 南北向长约18.5 km, 东西宽约13 km。穹窿顶部三叠系地层



I—微斜长石伟晶岩带; II—微斜长石钠长石带; III—钠长石带;  
IV—锂辉石带; V—白(锂)云母带。  
I—microcline-type pegmatite vein zone; II—microcline-albite-type  
pegmatite vein zone; III—albite-type pegmatite vein zone  
IV—spodumene-type pegmatite vein zone;  
V—muscovite (lepidolite)-type pegmatite vein zone.

图2 甲基卡矿田地质图(据付小方等, 2015, 稍有修改)  
Fig. 2 Geological map of the Jiajika ore field  
(modified from FU et al., 2015)

的片理较平缓, 倾角约 $7^\circ\sim 8^\circ$ , 倾伏方向背离穹窿中心, 穹窿顶部发育“A”型等斜平卧褶皱, 褶皱枢纽平行于滑脱方向。根据显微构造特征分析, 穹窿顶部主要发育对称型压力影。穹窿翼部的变质地层产状明显显示向外倾特征, 倾角在 $31^\circ\sim 60^\circ$ , 再向外, 穹窿构造对上三叠统地层产状的影响趋于减弱(武文辉等, 2017)。

上述构造-岩浆活动不仅使甲基卡地区形成了一个十分典型的穹窿构造, 同时岩浆侵入产生的巨大热能还对上三叠统围岩地层进行了广泛和强烈的热接触变质作用(李永森和韩同林, 1980), 使矿田范围内原来的新都桥组和侏倭组泥质-粉砂质浅变质岩系转变成了一套发育十字石、红柱石和黑云母等矿物的热接触变质片岩, 从马颈子岩体接触带向外, 依次可大致划分出十字石带(图3a), 红柱石-十字石带(图3b), 红柱石带和黑云母等动热变形变质带, 这套组合不仅在川西地区颇为典型, 即使在全国也较少见。

### 2.2 花岗伟晶岩及其相关脉体在矿田中的分布、演化及矿化特征

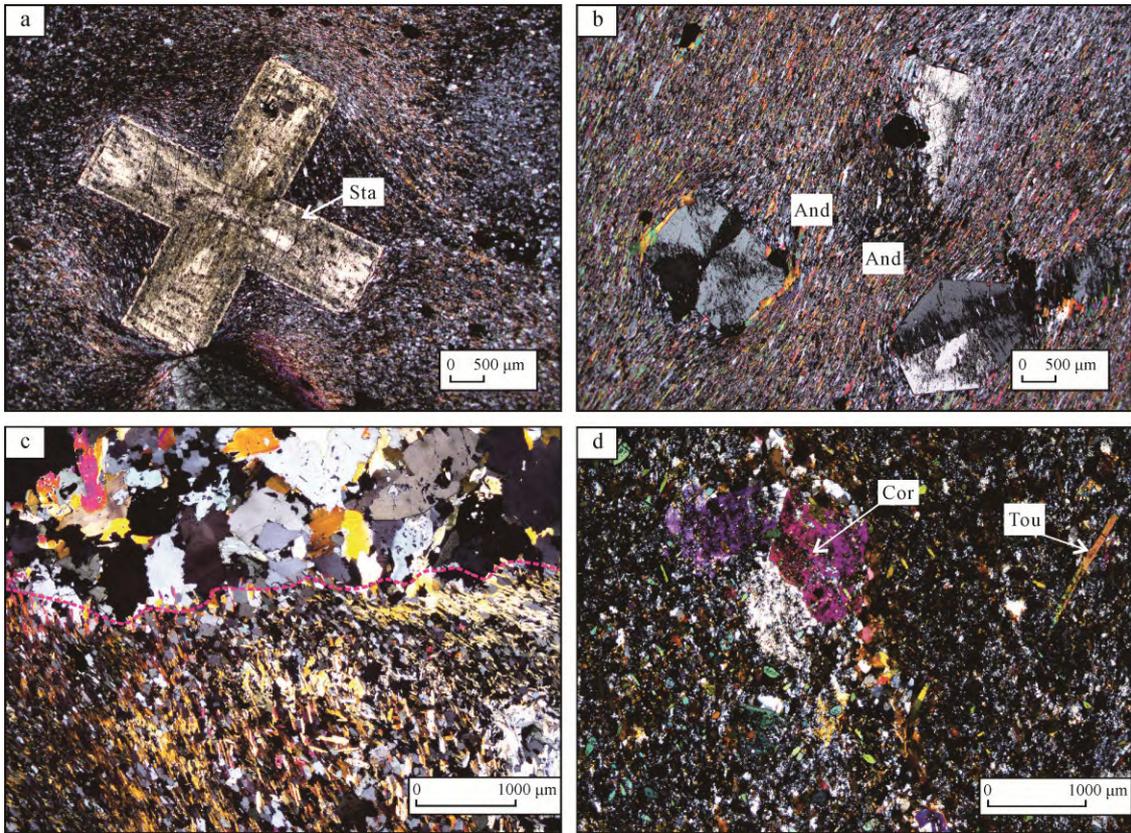
花岗伟晶岩等脉体是甲基卡矿田中最为重要的矿化地质体, 目前已发现有 500 余条, 已构成两个超大型矿床和一个中型矿床。该区的地质工作者基本认可赋矿脉体是马颈子原始二云母二长花岗岩浆侵入到地壳浅部, 在冷凝结晶晚期从其富挥发组分和稀有元素的残余岩浆中分离出来的熔体-溶液又侵入到外围构造裂隙中冷凝结晶形成的, 而且它们几乎仅分布在马颈子花岗岩体外围的热接触变质带中, 这些脉体在形成过程中, 原始熔体-溶液有较好的结晶分异作用, 从马颈子岩体接触带向外, 根据组成它们的化学和矿物成分的差异, 前人(唐国凡和吴盛先, 1984)分出了 5 种类型伟晶岩带(图 2): I-微斜长石伟晶岩带, II-微斜长石钠长石伟晶岩带, III-钠长石伟晶岩带, IV-锂辉石伟晶岩带, V-白(锂)云母伟晶岩带, 不同类型带产出在特定的热变质带中, I-II 类型伟晶岩主要发育在十字石带, III-IV 类型伟晶岩主要在红柱石-十字石带, V 类型伟晶岩主要发育在红柱石带和黑云母带。

尽管这些脉体的规模与马颈子岩体无法相比

拟, 其产出的构造裂隙空间也非常有限, 然而, 熔体-溶液中挥发组分的富集和冷凝结晶时环境的相对稳定性, 其晶出矿物粒度的粗大和形态的完整性却又是马颈子岩体远不能相比的。不同类型脉体在稀有金属的矿化程度上也有较大差异, 从 I 带→V 带, 伟晶岩中的 Li、Rb、Cs、Be、Nb+Ta 等稀有元素含量总体趋于增加, IV 类和 V 类型伟晶岩脉体是最主要的矿化体, 在该带中目前已发现有超大型新 3 号脉(0X3)、134 号脉等超大型锂矿床。但随着工作的不断深入, 也发现有一些特例, 例如, 发育锂辉石的鸭柯柯矿段就出现在靠近马颈子岩体接触带附近的 II-III 类伟晶岩带、也即十字石带中, 因此, 找矿工作的视野还需更广阔一些。

### 2.3 花岗伟晶岩等脉体的成岩过程和成矿作用特征

马颈子二云母二长花岗岩在冷凝结晶晚期所派生的花岗伟晶岩类脉体, 其长度一般在数百米, 少数也可达千米, 宽几米到几十米, 个别也在百米以上, 显然, 其规模和它的母体是无法相比的, 然而当它们侵入到十分有限的构造裂隙中后, 所产生的一些特殊地质作用却又是在二云母二长花岗岩中见不到的。



a—热接触细晶云母片岩中的十字石(Sta); b—热接触细晶云母片岩中的红柱石(And); c—下半部为富锂白云母-电气石-石英蚀变围岩, 上半部为伟晶岩边缘的云英岩; d—电气石(Tou)-堇青石(Cor)交代岩, 离接触带 7m。  
a—staurolite (Sta) in thermal contact fine-grained mica schist; b—andalusite (And) in thermal contact fine-grained mica schist; c—the lower half is lithium rich muscovite or tourmaline metasomatic rock formed in the surrounding rock near the vein, and the upper half is greisen; d—tourmaline (Tou)-cordierite (Cor) metasomatic rock, 7 m from the contact zone.

图 3 甲基卡矿田蚀变围岩和接触带(新 3 号脉矿床)

Fig. 3 Altered surrounding rock and contact zone in the Jiajika ore field (new No. 3 vein deposit)

(1)原始花岗伟晶熔体-热液侵入构造裂隙后,对早先形成的热接触变质围岩仍有较强的改造,在接触带的围岩中产生较广泛的黑磷云母化-锂白云母化和电气石化,并常构成电气石-富锂白云母-石英交代岩(图 3c 中的下半部),其中新生成的矿物数量有时可达 70%,远离接触带形成电气石-堇青石化的十字石-红柱石二云母片岩带(图 3d),蚀变带的宽度一般在数米,有时可达 20 m 以上。在产生新的蚀变围岩过程中,熔体-溶液中的稀有元素也被带到围岩,例如,新生成的电气石中, $\text{Li}_2\text{O}$  的平均含量在 0.2%,黑云母被改造成黑磷云母后, $\text{Li}_2\text{O}$  的含量可增长到 0.72%,甚至到 1%。 $\text{Rb}_2\text{O}$  在蚀变围岩云母中也有显著的增高。因此,蚀变围岩是非常良好的地球化学找矿标志。

(2)花岗伟晶熔体-溶液在构造裂隙中的结晶作用无疑首先是从边部开始,在甲基卡矿田中的花岗伟晶脉体、特别是成矿脉体的边部几乎都首先形成云英岩(图 3c 中的上半部),其厚度多数在 1 m 以内,其矿物组成主要为石英和含锂白云母,几乎见不到长石,也无锂辉石,有时含少量电气石、锡石,内侧常见绿柱石,是铍矿化良好的产生环境。

(3)云英岩形成后,熔体-溶液的冷凝固晶作用自然发生在内侧,在云英岩层的保护下,普遍发育形成伟晶状矿物,通常先形成的是伟晶状微斜长石,晶体形态也相对完好,稍后,石英以不同粒度的他形晶充填于微斜长石粒间,再后是形成伟晶结构的锂辉石。在甲基卡矿田的地表常可见到长数十厘米、最长可达 1 m 的板柱状锂辉石晶体。脉体中的锂辉石和边部的云英岩很少直接接触,其间普遍存在钾长石。在钾长石、锂辉石形成后,残余流体中的钠质、挥发组分进一步得到富集,开始形成较多的钠长石、白(锂)云母等矿物,它们普遍对早先形成的钾长石、锂辉石产生交代,所以锂辉石和钠长石、白云母在绝大多数情况下是伴生关系而不是共生关系,当然此时的环境如果还相对稳定时,钠长石和白云母的晶体发育程度也是较好的,但其粒度明显小于钾长石和锂辉石,目前甲基卡矿田中基本未见到石英核,表明伟晶作用并非十分完整。

然而,由于甲基卡矿田中伟晶岩等矿化脉体的规模和我国新疆 3 号脉及国外的澳大利亚格林布什、津巴布韦的卡玛提维、阿富汗的帕斯古斯塔等等锂辉石伟晶岩脉(王登红等, 2017a; 陈衍景等, 2021)是无法相比的,因此,在伟晶作用阶段发育的锂辉石等矿物晶体规模自然也小得多,钾长石和锂辉石等矿物晶体的大小一般不超过 1 m,而且多数在 20 mm 以下,在一些矿床和矿段中,它们的粒度

主体还普遍小于 5 mm,其产出的形态,即结构构造也多种多样,例如在超大型矿床——新 3 号矿脉中,还常见梳状结构(图 4a)(付小方等, 2021),锂辉石晶体垂直脉壁生长,期间充填有石英和钠长石,但更多发育的是矿物粒度更小的细晶花岗结构锂辉石矿石,不同结构矿物组合体之间,界限分明(图 4b),表明它们是在不同阶段形成的。付小方等(2021)还列举了不同结构的矿石成韵律层产出的实例。在此需要强调指出的是,前人把广泛分布、矿石中锂辉石等组成矿物小于 1 mm 的矿石称之为细晶岩型矿石,但实际上它与严格定义的细晶岩在矿物结构上完全不同,在这类岩(矿)石中,除石英外,锂辉石、钠长石和云母等矿物完全呈半自形晶-自形晶的花岗结构(杨岳清等, 2020),它们是具典型花岗岩结构的微-细晶矿石,它们有时对早先形成的梳状结构矿石交代和穿切(图 4c),这在甲基卡矿田的几个矿床中均普遍存在,在各矿床锂矿石储量占比中,富锂辉石的微-细晶花岗岩型矿石从 30%到 70%不等,在超大型新 3 号脉矿床中,微-细晶花岗岩型矿石的  $\text{Li}_2\text{O}$  储量已超过 70%,锂辉石是矿石中最重要的锂矿物,其数量一般在 15%~19%,矿石中  $\text{Li}_2\text{O}$  含量在 0.9%~1.2%。目前在国内外其他锂辉石型矿床中(王登红等, 2017a),还无既存在伟晶结构锂辉石型锂矿体,又有矿物粒度小于 1 mm 的花岗结构锂辉石型锂矿体的先例。它的发现,不仅丰富了锂辉石型矿床成矿作用的认识,也为甲基卡矿田外围和深部找矿指出了广阔的方向。

(4)在不同类型的锂矿体形成后,大规模的锂成矿作用基本结束,但含矿花岗质熔体-热液活动仍然在进行着,形成一些规模不等的细晶碱长花岗岩或同等化学成分的脉体,它们对早先形成的锂辉石等矿物产生不同程度的交代蚀变(图 4d),少量原生锂辉石被肢解,或者在锂辉石边部形成较典型的蠕虫结构,有时也形成少量毛发状的次生锂辉石。但其数量仍很少,基本不构成锂的矿石,有时也形成含少量磷锂铝石和锂的铁锰磷酸盐矿物的细晶碱长花岗岩,磷锂铝石普遍较自形(图 4e),它们对早期形成的伟晶岩或花岗质岩石有交代作用。不同期次的碱长花岗岩之间关系清晰(图 4f),反映了岩浆活动的频繁性,在它们之中,还普遍存在铌钽矿化,暗示了寻找花岗岩型铌钽矿床的潜力。

### 3 可尔因矿田成岩-成矿特征

可尔因矿田,经数十年的地质勘查工作,已探明李家沟为超大型锂伟晶岩型矿床,党坝为大型锂伟晶岩型矿床,此外,还有集沐、业隆、加达、观

音桥等中-小型锂矿床。

### 3.1 矿田地质环境

可尔因矿田出露地层相对甲基卡要复杂一些(图 5), 在三叠系中还有中三叠统杂谷脑组(T<sub>2z</sub>)。上三叠统可进一步分成侏倭组(T<sub>3zh</sub>)和新都桥组(T<sub>3x</sub>)。

杂谷脑组仅有上段(T<sub>2z</sub>): 在区内的沉积厚度较为稳定, 其岩性主要为细粒变质含钙长石石英砂岩、含岩屑长石石英细砂岩、杂砂岩、夹少量变质钙质粉砂岩、绢云板岩、砂质绢云板岩。韵律性不明显。

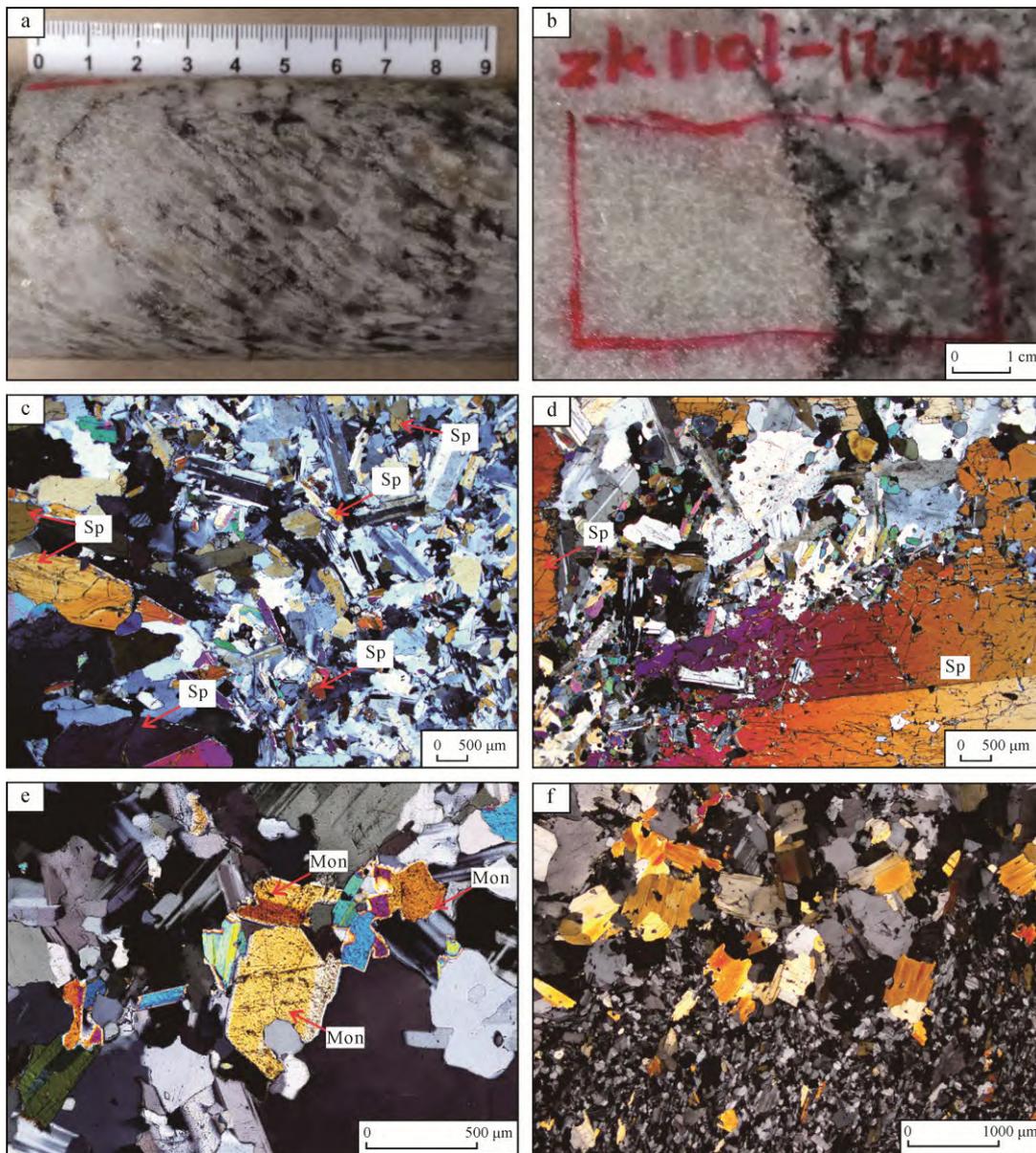
侏倭组(T<sub>3zh</sub>): 岩性主要为中厚层块状的变质

长石石英砂, 夹少量千枚状板岩, 含炭质千枚岩或板岩, 呈不等厚韵律互层产出。局部偶夹灰色薄层结晶灰岩。

新都桥组(T<sub>3x</sub>): 岩性主要为绢云板岩、粉砂质、炭质、钙质、含铁白云石绢云板岩, 夹少量中层变质长石石英砂岩、岩屑长石砂岩。

各组、段之间属整合过渡接触关系, 普遍显示有微弱的区域变质。

矿田的主要构造为可尔因复式背斜, 其核部地层为杂谷脑组上段, 两翼为侏倭组、新都桥组。北翼岩层产状为 5°∠50°, 南翼为 260°∠40°, 构成正常的对称背斜。其轴迹近东西延长, 并向西倾末,



a—梳状结构矿石; b—两期细晶结构花岗岩型矿石; c—微晶花岗岩型矿石穿切梳状结构矿石;  
 d—伟晶锂辉石(Sp)在晚期受到花岗结构岩石的强烈交代; e—晚期含磷锂铝石(Mon)的碱长花岗岩; f—晚期不同期次的碱长花岗岩。  
 a—comb structure ores; b—two-stage fine-grained granite type ores; c—fine grained granite type ore through cut comb structure ore;  
 d—pegmatite spodumene (Sp) was strongly metasomatized by granitic rocks in the late stage;  
 e—late alkali feldspar granite containing montebrasite (Mon); f—alkali feldspar granite of different stages.

图 4 甲基卡矿田不同类型矿石和岩石(新 3 号脉矿床)

Fig. 4 Different types of ores and rocks in the Jiajika ore field (new No. 3 vein deposit)

倾伏角  $50^{\circ} \sim 60^{\circ}$ ，并在多期次挤压抬升过程中形成了近东西走向、高角度挤压为主的小型断裂带。

伴随强烈和频繁的构造活动，矿田内的岩浆活动也明显比甲基卡发育的多，它们沿由中—上三叠统构成的复背斜轴部多期次侵入形成复式杂岩体(图 5)。呈不规则三叉状形态出露，显示其受 NE 向和 NW 向构造的联合控制，出露面积约为  $250 \text{ km}^2$ 。依据岩浆-热液体系演化和它们之间的相互关系，不同岩体形成的先后顺序是：石英闪长岩→黑云母花岗岩→黑云母正长花岗岩→二云母二长花岗岩→白云母碱长花岗岩。其中可尔因二云母二长花岗岩是该复式岩体的主体，出露面积达  $188 \text{ km}^2$ ，侵入接触面倾向围岩一方，倾角  $17^{\circ} \sim 59^{\circ}$ 。岩体边缘有时发育似伟晶岩。由于上述岩体的侵入，矿田中的中—上三叠统地层也受到改造，但和甲基卡矿田的三叠系相比，在其改造类型、程度上均有明显差异，近岩体接触带较广泛发育的是透辉石、电气石、黑磷云母等角岩，远离接触带透辉石、石榴石、角闪石等接触交代矿物从多到少分布在浅变质的长石-石英砂岩夹碳酸盐地层的浅变质岩系中(图 6a)，在上三叠统新都桥组绢云板岩、粉砂质、炭质板岩等岩系发育部位，有时也出现含十字石、红柱石等矿物的热接触变质带，但数量明显少于甲基卡矿田。

可尔因二云母二长花岗岩的矿物组成和化学成分与甲基卡马颈子二云母二长花岗岩体有一定的

相似性，但碱性程度稍低， $\text{SiO}_2$  含量不足 73%， $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O} \leq 8\%$ 。总体属于钙碱性过铝质花岗岩(郑毅和陈超, 2021)。

原始花岗伟晶熔体-热液侵入构造裂隙后，由于环境不太稳定，熔体-热液中的挥发组分并没有在与围岩的接触带附近聚集，特别是富锂伟晶岩矿脉的边部，基本上不存在云英岩带，绝大多数情况是白云母-钠长石-微斜长石伟晶岩或碱长花岗岩与蚀变围岩直接接触(图 6b)，最发育的围岩蚀变是电气石化和黑磷云母化角岩，典型的蚀变带一般不超过 5 m，再向外，蚀变作用明显减弱。另外，在其蚀变围岩中，Li、Rb、Cs 等稀有元素的异常分散晕也明显弱于甲基卡。

### 3.2 花岗伟晶岩及其相关脉体在矿田中的分布、演化及矿化特征

可尔因矿田中围绕二云母二长花岗岩分布的伟晶岩脉数量也达到数百条，除少量产出在二长花岗岩体的内接触带外，绝大多数产出在距二云母二长花岗岩接触带 500 ~ 3000 m 的三叠系弱蚀变地层内，反映了该岩体和花岗伟晶岩成岩、成矿作用的密切关系。围岩主要为侏倭组、杂谷脑组的弱变质长石石英砂岩，伟晶岩脉受北西向、东北向两组共轭节理控制，和围岩的侵入关系明显，脉体形态以脉状、树枝状、透镜状为主。长度几十米至几百米，极少数连续延长上千米，但脉体的宽度普遍小于

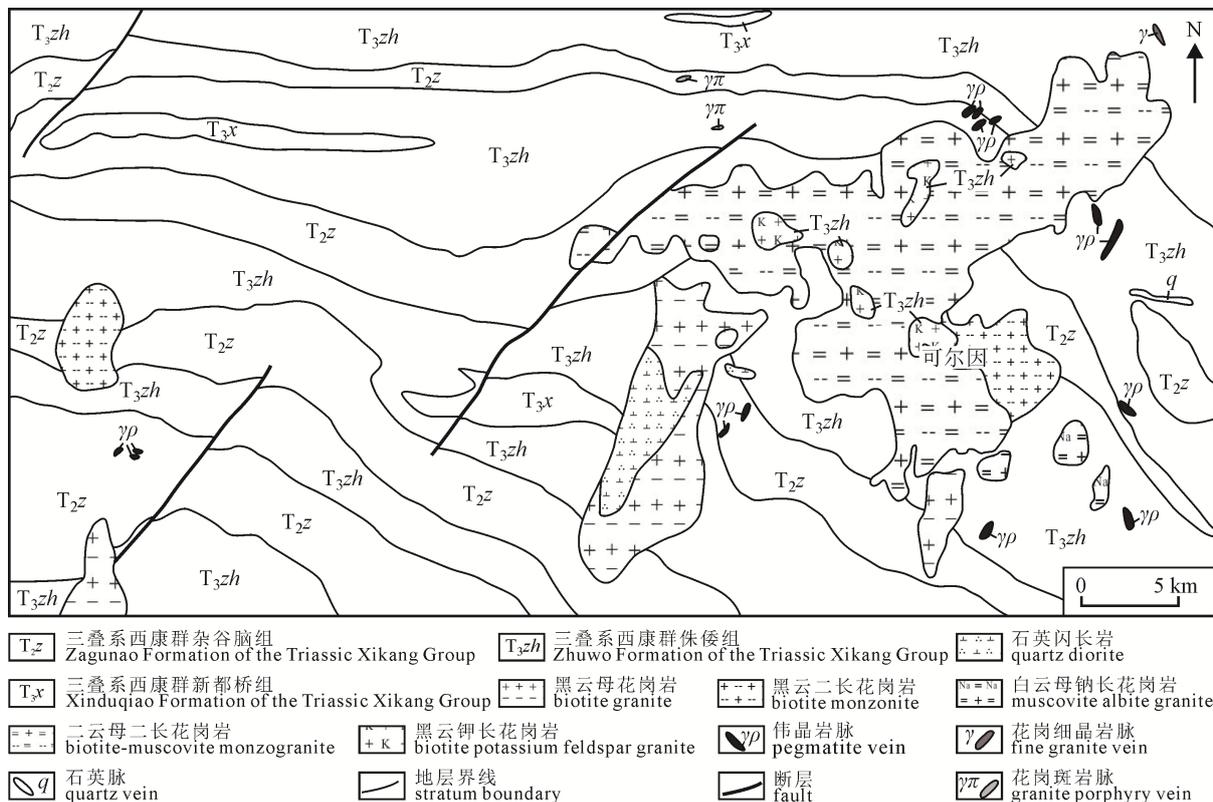


图 5 可尔因矿田地质略图(根据马圣钞等, 2019 适当做了修改)

Fig. 5 Geological sketch map of Keeryin ore field (modified from MA et al., 2019)

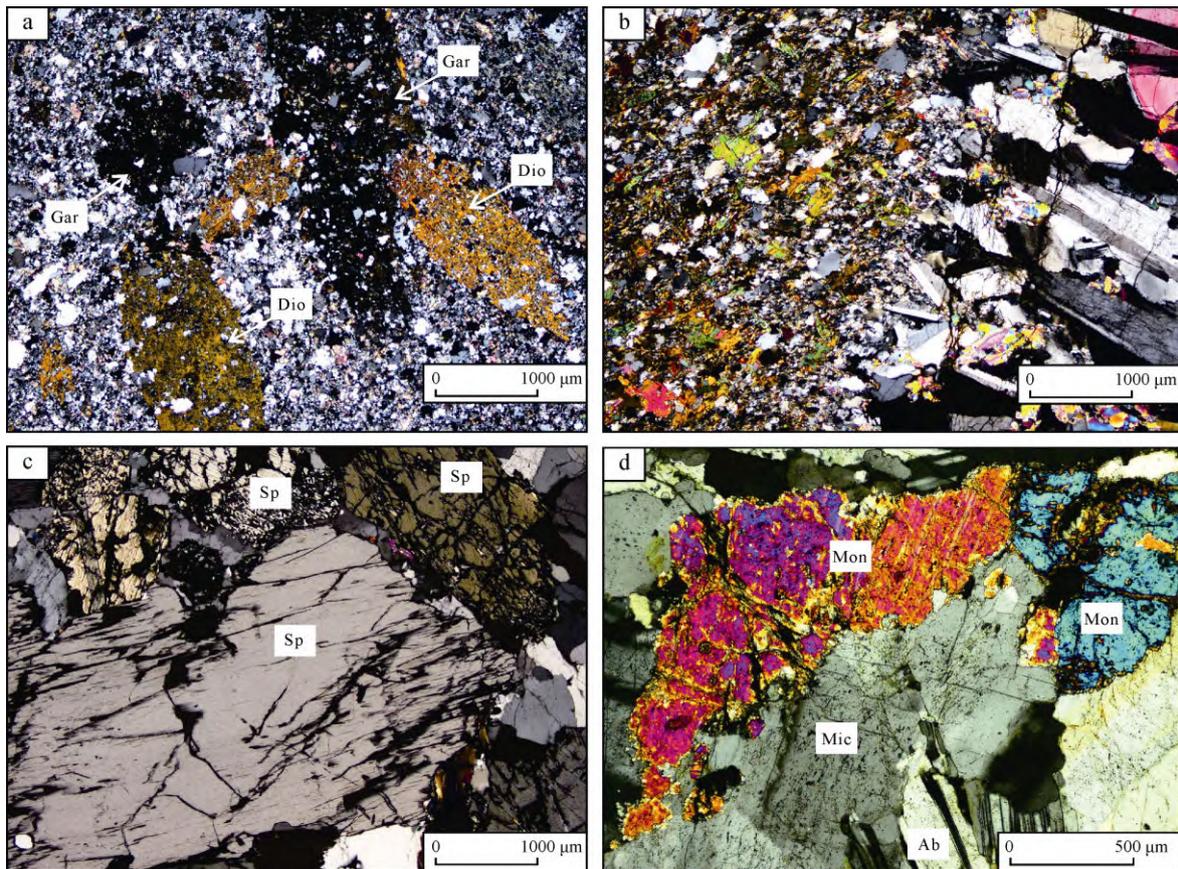
甲基卡矿田。这些伟晶岩脉从矿物组成也可以分成微斜长石型(I)、微斜长石-钠长石型(II)、钠长石型(III)、钠长石锂辉石型(IV)、锂云母钠长石型(V),但分布规律性不如甲基卡矿田清晰。另外,在可尔因矿田既不存在有规律性的接触热变质带,也没有显著的接触交代分带,伟晶岩脉主要分布在角闪石发育的接触交代带中,此外,矿化伟晶岩脉发育的围岩中,电气石化相对较发育。锂辉石等稀有金属成矿作用也主要产出在钠长石锂辉石型(IV)伟晶岩中(岳相元等, 2019)。

### 3.3 花岗伟晶岩等脉体的成岩过程和成矿作用特征

(1)在伟晶岩边部带,由于云英岩及微斜长石-白云母等组合的不发育,所以,也极少产生发育绿柱石的伟晶岩带,伟晶熔体-热液从边部向中心进一步冷凝固晶分异过程中,当锂的浓度达到一定程度、在微斜长石晶出之后,锂辉石等锂矿物开始结晶,因构造环境的多变,锂辉石的形态也多种多样,较早形成的锂辉石晶体普遍较大,基本在5 cm以上(图 6c),完好的晶体主要构成板柱状,但由于后期构造-热液的改造,发育良好的晶体极少见到。值得

注意的是,伴随锂辉石的晶出,在一些脉体中也出现伟晶状的磷锂铝石(图 6d),它们或围绕微斜长石分布,或者和锂辉石组成集合体,晶体的发育程度普遍低于锂辉石,这是可尔因矿田锂矿石的一个特点,在甲基卡伟晶岩田中目前还未发现和早期伟晶状锂辉石共生的磷锂铝石。

(2)在含锂辉石-磷锂铝石的伟晶岩形成后,可尔因矿田曾有过多次规模不等的构造热液活动,这使早期形成的锂辉石-磷锂铝石等矿物不仅发生了强烈的肢解和碎裂,而且也产生了较强的热液蚀变作用,因此在可尔因矿田的矿床中,发育良好的锂辉石等晶体较少见,较多见的是受晚期热液改造了的产物。图 7a 显示了早期伟晶结构的锂辉石边部出现由石英交代构成的蠕虫结构,紧接着在其外围又形成了毛发状的次生锂辉石带。图 7b 显示在锂白云母外围发育次生毛发状锂辉石,图 7c 显示次生毛发状锂辉石集合体沿其微斜长石和钠长石的接触带穿插分布。原生伟晶板柱状锂辉石和毛发状次生锂辉石经多次电子探针分析,二者的主要化学成分基本一致,那么,后者究竟是在什么样的地质环境中



a—石榴石(Gar)-透辉石(Dio)矽卡岩化的长石石英砂岩; b—蚀变围岩(左)和伟晶岩(右)直接接触; c—普遍蚀变的伟晶锂辉石(Sp); d—伟晶岩中磷锂铝石(Mon)和钾长石(Mic)共生,并被钠长石(Ab)交代,磷锂铝石受到较强的热液蚀变。  
a—garnet (Gar)-diopside (Dio) skarnized feldspathic-quartz sandstone; b—altered wall rock (left) and pegmatite (right) are in direct contact; c—generally altered pegmatite spodumene (Sp); d—montebasite (Mon) and K-feldspar (Mic) coexist in pegmatite and are metasomatized by albite (Ab), montebasite is generally subject to strong hydrothermal alteration.

图 6 蚀变围岩和伟晶岩型矿石

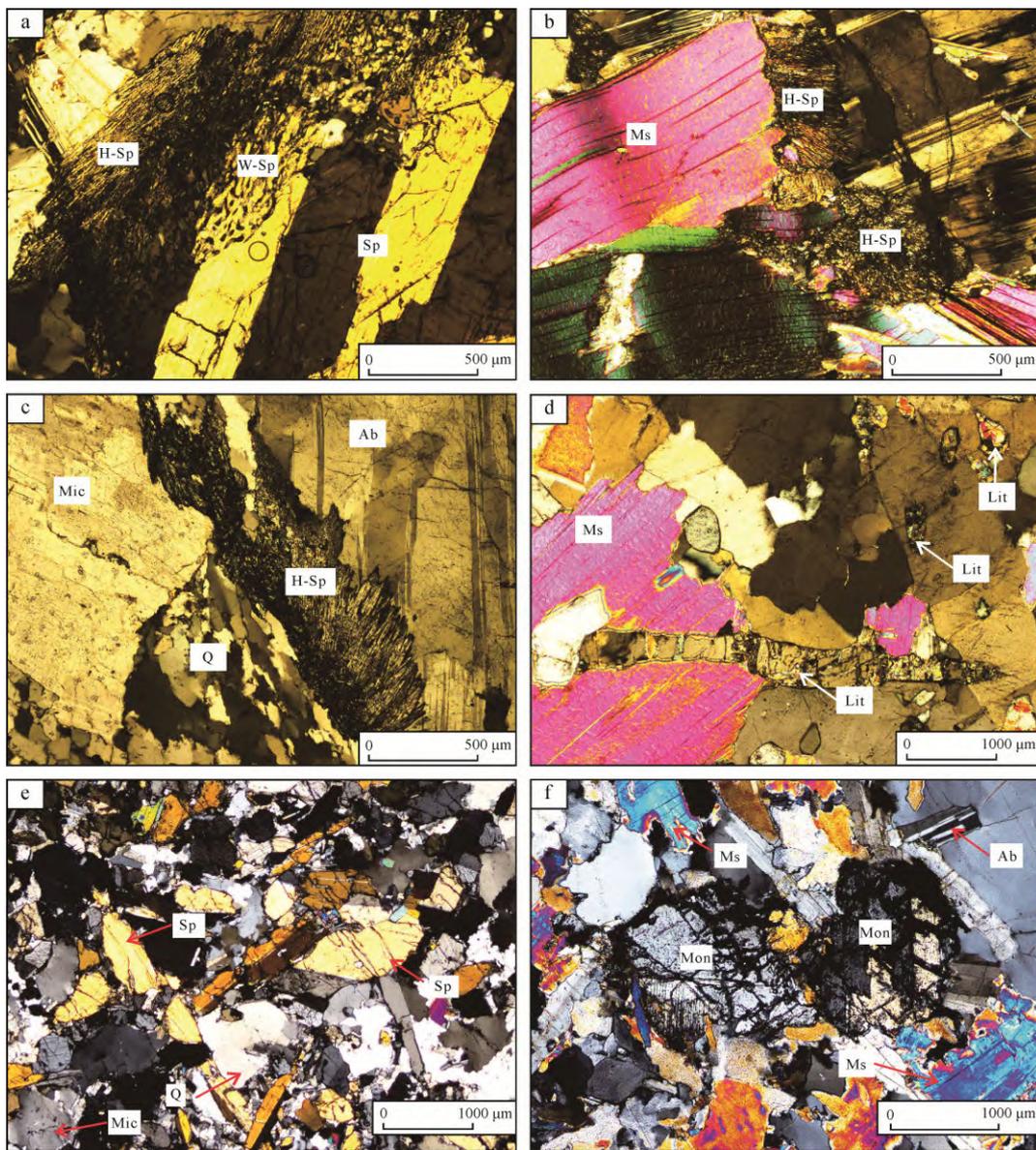
Fig. 6 Altered wall rock and pegmatite type ore

形成的? 板柱状早期锂辉石和毛发状晚期锂辉石在结构上二者是否有差别? 这些则是我们需进一步探索的问题。

另外, 在可尔因矿田, 锂的铁锰磷酸盐矿物也明显比甲基卡矿田发育, 它们以自形-半自形晶叠加在伟晶阶段形成的白云母、钠长石和微斜长石之上(图 7d), 其数量一般不超过脉体矿物总量的 2%, 在化学成分中, MnO 含量平均在 16.34%, FeO 含量平均在 27.9%, 显然主要是该类矿物的铁端员系列, 这与甲基卡矿田有较大差别。次生锂辉石和磷锂铁

矿的晶出代表了可尔因矿田早阶段成矿阶段告一段落。

(3) 在早阶段岩浆-热液的成岩成矿活动告一段落后, 花岗岩浆活动也并没有结束, 又一次岩浆-热液成岩成矿活动开始发育, 最有代表性的是含锂辉石的碱长花岗岩类产生(图 7e), 但其发育程度明显低于甲基卡, 而富磷锂铝石的花岗岩型矿石则多于甲基卡(图 7f), 目前在其中还未见共伴生的锂辉石, 磷锂铝石的蚀变作用普遍较发育, 它们多单独产出, 有一定规模, 应当说, 这是一个好的征兆。



a—伟晶锂辉石(Sp)边缘后生成的蠕虫锂辉石(W-Sp)和毛发状锂辉石(H-Sp); b—锂白云母(Ms)边缘后生成的毛发状锂辉石(H-Sp); c—沿微斜长石(Mic)-石英(Q)和钠长石(Ab)接触带分布的毛发状锂辉石(H-Sp); d—叠加在锂白云母(Ms)之上的磷锂铁矿(Lit); e—富锂辉石(Sp)的碱长花岗岩, 主体为石英(Q)、钠长石(Ab)和钾长石(Mic); f—细晶磷锂铝石(Mon)碱长花岗岩, 主体为石英(Q)、白云母(Ms)和钠长石(Ab)。

a—worm spodumene (W-Sp) and hairy spodumene (H-Sp) formed after the edge of pegmatite spodumene (Sp); b—hairy spodumene (H-Sp) formed after the edge of lithium muscovite (Ms); c—hairy spodumene (H-Sp) distributed along the contact zone of microcline (Mic) and albite (Ab); d—triphylite (Lit) superimposed on lithium muscovite (Ms); e—spodumene-rich (Sp) alkali feldspar granite, mainly quartz (Q), albite (Ab) and microcline (Mic); f—fine grained montebrasite (Mon) alkali feldspar granite, mainly quartz (Q), muscovite (Ms) and albite (Ab).

图 7 可尔因矿田中的非伟晶结构锂矿物

Fig. 7 Non pegmatite lithium minerals in the Keeryin ore field

不含锂辉石或磷锂铝石的碱长花岗质岩石在可尔因矿田也存在, 但构成典型花岗岩结构的岩石则相对较少, 其中的矿物成分变化很大, 它们多以脉状形式出现, 值得注意的是其中常出现锡石或铌钽铁矿, 锡石主要在云母发育的花岗质岩石中, 而铌钽铁矿主要在钠长石发育的岩石中。

## 4 甲基卡和可尔因矿田成岩成矿差异性探讨

表 1 是甲基卡和可尔因矿田成岩成矿主要差异性的总结和对比, 不难看出, 二者在诸多方面各有其特点。

### 4.1 成矿环境的差异性对比探讨

甲基卡和可尔因矿田共同发育在我国西部古特提斯松潘—甘孜造山带中(图 1), 该带是以扬子陆块西缘被动陆缘为基础、在古特提斯洋盆闭合的背景上三地体汇聚-碰撞而形成的印支造山带(许志琴等, 2018), 印支造山之后, 松潘甘孜总体处于平静和缓慢的隆升过程中, 构成了青藏高原的一部分, 其中沉积厚度巨大、分布最广泛的是三叠系西康群。但在后碰撞造山阶段, 不同部位发生的构造-岩浆活动仍有较大差异, 主要体现在偏南部位发育的北北西—北西走向的鲜水河走滑断裂剪切带两侧, 北部的巴颜喀拉—松潘周缘前陆盆地和南部雅江残余盆地中, 后期的构造-岩浆活动和地壳上升速率各有其特点, 从而也影响到两侧的可尔因和甲基卡矿田的成矿作用。

在北部的巴颜喀拉—松潘周缘前陆盆地中, 后期的构造-岩浆活动较频繁, 地壳的抬升和剥蚀作用也相对较强, 除第四系外, 不但侏罗—白垩纪及其后的沉积产物基本未保留, 并使巨厚的西康群也受到一定剥蚀, 中三叠统杂谷脑组在一些背斜等隆起部位均有较广泛的出露, 上三叠统的侏倭组分布广泛, 新都桥组也主要为砂质成分较高的下部层位, 伴随构造的频繁活动, 同源、但成分却有差异的岩浆沿构造带多期次上侵, 形成了如同在可尔因矿田中多种花岗岩共同产出的杂岩体。

而南部的雅江残余盆地由于受印度-亚洲碰撞以及青藏高原物质向南东逃逸的影响, 在中新世产生大规模向南滑移, 形成一个狭长的构造带。由于受两侧次级走滑剪切断裂的夹持, 后期的抬升剥蚀相对薄弱, 中三叠统杂谷脑组几乎未出露, 分布广泛的是上三叠统中以粉砂质泥岩发育为特征的新都桥组。后期的构造-岩浆活动也相对较弱, 在甲基卡矿田中出露的侵入岩基本仅为马颈子二云母二长花岗岩。

由于以上成岩环境的差异性, 南北两个矿田中受构造-岩浆活动影响所产生的成矿作用也有所不同, 在甲基卡矿田, 由于新都桥组泥砂质岩层的广泛存在及稳定的构造环境, 当二云母二长花岗岩原始岩浆沿穹窿核部侵入后, 在封闭性良好的新都桥组中从近到远形成了有规律的热接触变质带, 为之后含矿花岗伟晶岩及其他脉岩的产出和保存提供了非常好的封闭地质环境, 并使花岗伟晶熔体-溶液在缓慢的结晶过程中, 分异形成了不同类型的伟晶岩脉体。在可尔因矿田, 由于发育的西康群主要为含钙质及硅质成分较高的杂谷脑组和侏倭组, 加之构造环境的不稳定性, 当二云母二长花岗岩等原始岩浆侵入后, 岩浆的热能扩散相对较强, 并和富钙的砂质岩石产生广泛的接触交代作用, 从而未能形成范围宽广和较稳定的热接触变质带, 含矿花岗伟晶岩等脉体在围岩中的分布规律性远不如甲基卡矿田清晰, 而且, 含矿伟晶岩等脉体形成后, 在后期构造-岩浆活动的影响下, 脉体的完整性不仅受到较大影响, 矿体中的热液蚀变、交代作用也广泛发育。

### 4.2 成矿特征差异性对比探讨

在甲基卡矿田, 从二云母二长花岗岩原始含矿岩浆派生的花岗质熔体-溶液, 基本只侵入到封闭性良好的热接触变质带中的构造裂隙中, 其中的挥发组分也较为富集, 在蚀变围岩中, 新产生的电气石、含锂白云母构成了蚀变围岩的主体, 并在外侧产生了富堇青石的蚀变带。在伟晶岩边缘普遍发育云英岩带, 并在富挥发云英岩的封闭环境影响下, 其内侧形成了晶体较大和自形的钾长石、钠长石、含锂白云母等矿物, 也为伟晶锂辉石的发育创造了条件, 即使在小裂隙中, 花岗质熔体-溶液也能在相对稳定的环境中垂直脉壁形成梳状结构的细晶锂辉石。在较晚期的含矿构造-热液活动中, 虽然对早先形成的伟晶钾长石、钠长石、含锂云母及锂辉石也有一定的蚀变改造, 但普遍较弱, 次生锂辉石等矿物很不发育, 流体多单独形成不同组合的花岗质脉体。特别值得一提的是, 在晚期另外一次含矿热液活动中, 由于温度的降低, 含矿熔体-流体在相对稳定的环境中, 快速发育形成了微晶-细晶结构的富锂辉石碱长花岗岩, 构成甲基卡矿田特有的花岗岩型锂矿石, 这在国内外非常罕见, 尽管它们对早先形成的伟晶岩型锂矿石有交代作用, 但不明显。在更晚期的花岗质熔体-流体活动中发育了不含矿的碱长花岗岩, 甲基卡矿田的成岩和成矿作用基本到此结束。

在可尔因矿田, 由于构造-岩浆活动的频繁性, 全矿区稳定的热接触变质带并不广泛发育, 因而,

伟晶岩脉产出的构造环境也较复杂,有些矿床的围岩为接触交代作用发育的浅变质长石砂岩,如加达矿床,有些是十字石、红柱石、黑云母有一定程度发育的热接触变质带,如党坝、李家沟矿床,紧邻伟晶岩的围岩多以角岩发育为特征,伟晶岩的边缘基本不存在挥发组分发育的云英岩,这表明伟晶熔体-溶液进入围岩的构造裂隙是在相对开放的环境中产生的。矿化伟晶岩的矿物成分也较甲基卡矿田复杂,特别是和锂辉石伴生的还有伟晶磷锂铝石,较晚期还有较多磷铁锂矿-磷锰锂矿等矿物产生,此外,在后期还形成少量的富磷锂铝石微晶-细晶碱长花岗岩型锂矿石,虽然它们并未构成有工业价值的锂矿体,但表明含矿热液中的锂离子具有多中心富集特征。矿化伟晶岩形成后,由于新的构造-岩浆活动,普遍

受到肢解,所以伟晶岩的完整性要比甲基卡矿田差,表明晚期的含矿热液多是在一个相对开放的环境中活动的,物理-化学条件的较大差异,造成矿体内的热液交代蚀变作用非常发育,次生锂辉石的大量存在构成可尔因矿田中成矿作用的一大特色,毛发状次生锂辉石,不仅从周边交代原生锂辉石,而且单独以不规则脉体沿钾长石、钠长石、含锂白云母的接触带分布,次生锂辉石的数量几乎达到锂辉石矿物总量的 1/5,这也是在国内外其他伟晶岩矿床中少见的。微晶-细晶结构的富锂辉石花岗岩虽然也有出现,但较甲基卡矿田要少的多。另外,在成矿作用晚期不含矿的碱长花岗岩也不多见,表明可尔因矿田与成矿有关的岩浆-热液活动周期短于甲基卡,这也和矿田成矿作用环境的相对开放性有关。

表 1 甲基卡和可尔因稀有金属花岗伟晶岩矿田成矿环境和成矿特征差异性比较

Table 1 Comparison of differences in metallogenic environment and characteristics between Jiajika and Keeryin rare metals ore fields

矿田	甲基卡	可尔因
花岗伟晶岩脉侵入的地层	主要为上三叠统新都桥组,其次为侏倭组,前者上部为深灰色薄层状泥质粉砂岩夹少量灰白色薄层粉砂岩,下部为深灰色薄层状泥质粉砂岩与深灰色粉砂质泥岩互层。侏倭组主要岩性为中厚-厚层状含泥粉砂岩	以中三叠统杂谷脑组和上三叠统侏倭组为主。杂谷脑组主要为细粒变质含钙长石石英砂岩,韵律不明显。侏倭组主要为中厚层块状的变质长石石英砂岩,夹少量千枚岩或板岩。新都桥组岩性主要为绢云板岩
主要构造形态	受岩浆底辟侵入构造控制,以马颈子岩体为中心形成向四周缓倾斜的典型穹窿构造形态,整体呈南北向展布。岩体边界与围岩呈小角度斜交	主要为可尔因复式背斜,核部地层主体为杂谷脑组上段,两翼为侏倭组、新都桥组。北翼岩层产状为 $5^{\circ}\angle 50^{\circ}$ ,南翼为 $260^{\circ}\angle 40^{\circ}$ ,构成正常的对称背斜,其轴迹近东西延长
矿田侵入岩发育特征	印支晚期马颈子二云母二长花岗岩是矿田唯一出露的花岗岩株,位于穹窿核部,总体呈北东向延伸,从发育平行接触带的面积流动组构表明,花岗岩浆具强贯入特征。绝大多数部位具典型的细-中粒花岗结构,是分异形成花岗伟晶岩的母岩	矿田内印支晚期岩浆侵入活动非常发育,形成复式杂岩体。侵入先后顺序是:石英闪长岩→黑云母花岗岩→黑云母正长花岗岩→二云母二长花岗岩→白云母碱长花岗岩。其中可尔因二云母二长花岗岩是该复式岩体的主体,是分异形成花岗伟晶岩的母岩
伟晶岩脉赋存围岩的蚀变作用	围岩的区域变质作用微弱,由二云母二长花岗岩侵入形成的热接触变质作用广泛发育,从岩体接触带向外,依次可大致划分出十字石带,红柱石-十字石带,红柱石带和黑云母等动热变形变质带。伟晶岩基本仅产出在热接触变质带内	区域变质作用微弱,岩体侵入产生的热接触变质作用不是广泛发育。近岩体接触带较广泛发育的是透辉石、电气石、黑磷云母等角岩,远离接触带主要是透辉石、石榴石、角闪石等矿物发育的接触交代变质作用,在上三叠统新都桥组发育部位,有时也出现含十字石、红柱石等矿物的热接触变质带
伟晶岩脉和围岩接触交代作用和围岩的典型结构带	和伟晶岩直接接触的围岩中常构成电气石-富锂白云母-石英交代岩,远离接触带( $\sim 10\text{ m}$ )形成电气石-堇青石化的十字石-红柱石二云母片岩。紧邻围岩的伟晶岩普遍发育云英岩	最发育的围岩蚀变是电气石化和黑磷云母化,再向外,蚀变作用明显减弱。伟晶岩边部基本不存在云英岩,富钾长石和钠长石的伟晶岩和围岩直接接触
伟晶岩脉后期构造发育特征	伟晶岩脉形成后,晚期构造活动弱,早期形成的伟晶结构保存较好	伟晶岩脉形成后,晚期构造活动较强,早期形成的伟晶结构普遍被破坏
矿体和矿石的典型结构	花岗伟晶岩型和微晶碱长花岗岩型在甲基卡锂矿石储量中后者占优。但在不同矿床中存在差异	花岗伟晶岩型锂矿石储量总体高于碱长微晶花岗岩型锂矿石
主要锂矿物特征	在矿床中锂辉石是最主要的矿石矿物,并以原生锂辉石发育为特征,在微晶碱长花岗岩型矿石中存在少量磷锂铝石和磷铁锂矿	锂辉石也是主要的矿石矿物,但其中有近 1/4 是毛发状次生锂辉石,锂的磷酸盐矿物数量明显多于甲基卡矿田,特别是磷锂铝石在伟晶岩型和微晶碱长花岗岩型矿体中均普遍存在
矿化脉体形成后期的主要花岗作用产物	不同期次的微晶-细晶碱长花岗岩和花岗质脉体,偶尔形成含磷锂铝石的微晶碱长花岗岩,少量形成花岗质脉体	典型的微-细晶碱长花岗岩少见,不同成分的花岗质脉体则普遍较发育,特别是含锡石的云英岩脉、富云母的碱长花岗岩脉则明显多于甲基卡

## 5 结论

(1)甲基卡和可尔因矿田共同产于我国古特提斯甘孜—阿坝造山带中,较晚形成的鲜水河走滑断裂带,使南北两侧的西康群构造盆地分为两部分,不同部位的构造-岩浆活动也影响到了其中稀有金属的成矿作用,北部的巴颜喀拉—松潘周缘前陆盆地以构造-岩浆活动频繁、地壳的抬升剥蚀较快为特征,在一定程度上造成可尔因矿田的成矿作用主要是在一个相对开放的体系中进行的,矿体中构造发育,热液活动频繁,蚀变交代作用强烈是可尔因矿田较突出的特点,也反映出成矿作用是在一个相对较短的过程中进行的。发育在南部雅江残余盆地中的甲基卡矿田,由于区域构造-岩浆活动相对较弱,地壳上升剥蚀也弱于可尔因矿田,其成矿作用主要是在一个相对封闭的体系中进行的,矿体中矿物的冷液结晶作用发育,热液活动是在一个较封闭的环境中进行的,物理-化学条件变化较小,蚀变交代作用并不很发育,岩浆的冷液结晶分异作用是它的重要成矿特征。

(2)甲基卡矿田中花岗伟晶岩型和花岗岩型锂矿体均很发育是非常重要的一个成矿特点,由于矿体围岩的剥蚀相对较浅,不仅伟晶岩型锂矿体保存较好,特别是深部的微晶-细晶富锂辉石碱长花岗岩型矿体(矿石)其前景可能更广阔,因此,向深部找矿是甲基卡矿田今后重要的发展方向。

(3)在可尔因矿田,目前在地表或近地表发现的矿床(矿体)越来越多,而且锂矿石类型也趋于多样性,但总体以伟晶岩型锂矿体发育为特征,且品位普遍较富,向外围找矿应是今后关注的方向,另外矿床中锡、钨含量也相对较高,相应矿物也较多存在,也是值得重视的资源。

## Acknowledgements:

This study was supported by National Key Research & Development Program of China (Nos. 2021YFC2901900 and 2021YFC2901905), and China Geological Survey (Nos. DD20221684, DD20190173, DD20221695 and DD20190379).

## 参考文献:

陈衍景, 薛莅治, 王孝磊, 赵中宝, 韩金生, 周可法. 2021. 世界伟晶岩型锂矿床地质研究进展[J]. 地质学报, 95(10): 2971-2995.

付小方, 侯立玮, 王登红, 袁瀚平, 梁斌, 郝雪峰, 潘蒙. 2014. 四川甘孜甲基卡锂辉石矿床矿产调查评价成果[J]. 中国地质调查, 1(3): 37-43.

付小方, 袁瀚平, 王登红, 侯立玮, 潘蒙, 郝雪峰, 梁斌, 唐屹. 2015. 四川甲基卡矿田新三号稀有金属矿脉的成矿特征与

勘查模型[J]. 矿床地质, 34(6): 1172-1186.

付小方, 侯立玮, 梁斌, 黄韬, 郝雪峰. 2017. 甲基卡式花岗伟晶岩型锂矿床: 成矿模式与三维勘查找矿模型[M]. 北京: 科学出版社: 1-227.

付小方, 梁斌, 邹付戈, 郝雪峰, 侯立玮. 2021. 川西甲基卡锂等稀有多金属矿田成矿地质特征与成因分析[J]. 地质学报, 95(10): 3054-3068.

古城会. 2014. 四川省可尔因伟晶岩田东南密集区锂辉石矿床成矿规律[J]. 地质找矿论丛, 29(1): 59-65.

侯立玮, 付小方. 2002. 松潘-甘孜造山带东缘穹窿状变质地质体[M]. 成都: 四川大学出版社: 1-159.

鞠天应, 周晓波. 2016. 四川甲基卡稀有金属花岗伟晶岩矿床成因[J]. 四川地质学报, 36(1): 42-46.

梁斌, 付小方, 唐屹, 潘蒙, 袁瀚平, 郝雪峰. 2016. 川西甲基卡稀有金属矿区花岗岩岩石地球化学特征[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 42-49.

刘丽君, 付小方, 王登红, 郝雪峰, 袁瀚平, 潘蒙. 2015a. 甲基卡式稀有金属矿床的地质特征与成矿规律[J]. 矿床地质, 34(6): 1187-1198.

刘丽君, 王登红, 杨岳清, 付小方, 郝雪峰, 潘蒙, 唐屹, 陈振宇. 2015b. 四川甲基卡新三号稀有金属矿脉成矿特征的初步研究[J]. 桂林理工大学学报, 36(1): 50-59.

李永森, 韩同林. 1980. 川西某地花岗伟晶岩接触变质特征及其找矿意义的初步研究[J]. 地质论评, 26(2): 121-128.

李名则, 秦宇龙, 李峥, 徐云峰, 武文辉, 刘伟, 叶亚康, 周雄. 2018. 川西甲基卡二云母花岗岩与伟晶岩脉地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 37(3): 366-378.

李建康, 王登红, 张德会, 付小方. 2007. 川西伟晶岩型矿床的形成机制及大陆动力学背景[M]. 北京: 原子能出版社: 1-187.

李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 88(12): 2269-2283.

李建康, 李鹏, 严清高, 刘强, 熊欣. 2021. 中国花岗伟晶岩的研究历程及发展态势[J]. 地质学报, 95(10): 2996-3016.

罗伟, 杨波, 古城会, 李剑, 庞良武. 2021. 川西金川县李家沟超大型锂辉石矿床的地质特征及找矿标志[J]. 四川有色金属, (2): 16-19.

马圣钞, 王登红, 刘善宝, 孙艳, 郭唯明, 代鸿章, 刘丽君, 李超. 2019. 川西可尔因锂矿田云母矿物化学及稀有金属成矿和找矿指示[J]. 矿床地质, 38(4): 877-897.

马圣钞, 王登红, 刘善宝, 王成辉, 代鸿章, 饶魁元, 丁晓平, 朱海洋, 邓子清, 郭玮鹏. 2020. 综合勘查方法在硬岩型锂矿找矿中的应用——以马尔康稀有金属矿田加达锂矿为例[J]. 地质学报, 94(8): 2341-2353.

彭杰, 邹林. 2021. 四川可尔因地区锂矿床构造环境及外围找矿前景分析[J]. 世界有色金属, (4): 50-51.

秦宇龙, 郝雪峰, 徐云峰, 王显峰. 2015. 四川甲基卡地区花岗岩型稀有金属矿找矿规律及标志[J]. 中国地质调查, 2(7): 35-39.

沙小保, 李佑国, 金廷福. 2017. 川西甲基卡锂辉石矿床控矿条件及成因分析[J]. 云南地质, 36(4): 389-393.

唐国凡, 吴盛先. 1984. 四川省康定县甲基卡花岗伟晶岩锂矿床地质研究报告[R]. 西昌: 四川地矿局攀西地质大队: 1-24.

武文辉, 詹涵钰, 秦宇龙, 李峥, 徐云峰, 申伟. 2017. 川西地区

- 甲基卡穹隆的构造变形特征[J]. 沉积与特提斯地质, 37(4): 84-90.
- 王登红, 李建康, 付小方. 2005. 四川甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的成矿时代及其意义[J]. 地球化学, 34(6): 541-547.
- 王登红, 刘丽君, 代鸿章, 刘善宝, 侯江龙, 吴西顺. 2017a. 试论国内外大型超大型锂辉石矿床的特殊性与找矿方向[J]. 地球科学, 42(12): 2243-2257.
- 王登红, 刘丽君, 侯江龙, 代鸿章, 于扬, 代晶晶, 田世洪. 2017b. 初论甲基卡式稀有金属矿床“五层楼+地下室”勘查模型[J]. 地学前缘, 24(5): 1-7.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀, 付小方, 黄明华. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程[M]. 北京: 地质出版社.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 付小方. 2018. 试论中国大陆“硬岩型”大型锂矿带的构造背景[J]. 地质学报, 92(6): 1091-1106.
- 许志琴, 付小方, 赵中宝, 李广伟, 郑艺龙, 马泽良. 2019. 片麻岩穹隆与伟晶岩型锂矿的成矿规律探讨[J]. 地球科学, 44(5): 1452-1463.
- 杨岳清, 王登红, 刘善宝, 刘丽君, 王成辉, 郭唯明. 2020. 四川甲基卡两类锂辉石矿体共存机制及其找矿意义[J]. 地质学报, 91(1): 287-302.
- 岳相元, 张贻, 周雄, 龚大兴, 谭洪旗, 周玉, 朱志敏. 2019. 川西可尔因矿集区稀有金属矿床成矿规律与找矿方向[J]. 矿床地质, 38(4): 867-876.
- 郑毅, 陈超. 2021. 马尔康市木尔宗锂矿可尔因岩体岩石化学特征研究[J]. 四川地质学报, 41(3): 482-486.
- 赵玉祥, 赵光明, 曾毅夫. 2015. 川西甲基卡式锂矿地质特征及成矿模式——以甲基卡锂矿床为例[J]. 四川地质学报, 35(3): 391-395.
- References:**
- CHEN Yan-jing, XUE Li-zhi, WANG Xiao-lei, ZHAO Zhong-bao, HAN Jin-sheng, ZHOU Ke-fa. 2021. Progress in geological study of pegmatite-type lithium deposits in the world[J]. Acta Geologica Sinica, 95(10): 2971-2955(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.
- DITTRICH T, SEIFERT T, SCHULZ B, HAGEMANN S, GERDES A, PFÄNDER J A. 2019. Archean rare-metal pegmatites in Zimbabwe and western Australia :Geology and metallogeny of pollucite mineralizations[M]. Switzerland: Springer International Publishing: 1-125.
- FU Xiao-fang, HOU Li-wei, WANG Deng-hong, YUAN Lin-ping, LIANG Bin, HAO Xue-feng, PAN Meng. 2014. Achievements in the investigation and evaluation of spodumene resources at Jiajika in Sichuan[J]. Geological Survey in China, 1(3): 37-43(in Chinese with English abstract).
- FU Xiao-fang, YUAN Lin-ping, WANG Deng-hong, HOU Li-wei, PAN Meng, HAO Xue-feng, LIANG Bin, TANG Yi. 2015. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika orfield, Sichuan[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1172-1186(in Chinese with English abstract).
- FU Xiao-fang, HOU Li-wei, LIANG Bin, HUANG Tao, HAO Xue-feng. 2017. The metallogenic model and three-dimensional exploration and prospecting model of Jiajika granite pegmatite lithium deposit[M]. Beijing: Science Press: 1-227(in Chinese).
- FU Xiao-fang, LIANG Bin, ZOU Fu-ge, HAO Xue-feng, HOU Li-wei. 2021. Discussion on metallogenic geological characteristics and genesis of rare polymetallic ore fields in western Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 95(10): 3054-3068(in Chinese with English abstract).
- GU Cheng-hui. 2014. Metallogenic regularity of spodumene deposits in the closely spaced pegmatite area in the southeastern Keeryin pegmatite field, Sichuan province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 29(1): 59-65(in Chinese with English abstract).
- HOU Li-wei, FU Xiao-fang. 2002. Dome metamorphic geological body in the east of Songpan-Ganzi orogenic belt[M]. Chengdu: Sichuan University Press: 1-159(in Chinese).
- JU Tian-ying, ZHOU Xiao-bo. 2016. Ore genesis of the Jiajika rare-metal granitic pegmatite deposit in West Sichuan[J]. Acta Geologica Sichuan, 36(1): 42-46(in Chinese with English abstract).
- LI Yong-sen, HAN Tong-lin. 1980. Preliminary study on the contact metamorphic characteristics of granitic pegmatite and its ore-prospecting significance in a certain area in western Sichuan[J]. Geological Review, 26(2): 121-128(in Chinese).
- LIANG Bin, FU Xiao-fang, TANG Yi, PAN Meng, YUAN Lin-ping, HAO Xue-feng. 2016. Granite geochemical characteristics in Jiajika rare metal deposit, western Sichuan[J]. Journal of Guilin University of Technology, 36(1): 42-49(in Chinese with English abstract).
- LIU Li-jun, FU Xiao-fang, WANG Deng-hong, HAO Xue-feng, YUAN Lin-ping, PAN Meng. 2015a. Geological characteristics and metallogeny of Jiajika-style rare metal deposits[J]. Mineral Deposits, 34(6): 1187-1198(in Chinese with English abstract).
- LIU Li-jun, WANG Deng-hong, YANG Yue-qing, FU Xiao-fang, HAO Xue-feng, PAN Meng, TANG Yi, CHEN Zhen-yu. 2015b. Metallogenic characteristics of X03 rare metal vein in Jiajika of Sichuan[J]. Journal of Guilin University of Technology, 36(1): 50-59(in Chinese with English abstract).
- LI Ming-ze, QIN Yu-long, LI Zheng, XU Yun-feng, WU Wen-hui, LIU Wei, YE Ya-kang, ZHOU Xiong. 2018. Geochemical characteristics of two-mica granite and granite pegmatite in Jiajika area, western Sichuan, and their geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 37(3): 366-378(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-kang, WANG Deng-hong, ZHANG De-hui, FU Xiao-fang. 2007. Mineralization mechanism and continental geodynamic of pegmatite type deposits in western Sichuan, China[M]. Beijing: Atomic Energy Press: 1-187(in Chinese).
- LI Jian-kang, LIU Xi-Fang, WANG Deng-hong. 2014. The metallogenic regularity of lithium deposit in China[J]. Acta Geologica Sinica, 88(12): 2269-2283(in Chinese with English abstract).

- abstract).
- LI Jian-kang, LI Peng, YAN Qing-gao, LIU Qiang, XIONG Xin. 2021. History of granitic pegmatite research in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(10): 2996-3016(in Chinese with English abstract).
- LUO Wei, YANG Bo, GU Cheng-hui, LI Jian, PANG Liang-wu. 2021. The geological characteristics and ore indicators of Li-jiaogou super-large spodumene deposit in Jinchuan County, western Sichuan[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (2): 16-19(in Chinese with English abstract).
- MA Sheng-chao, WANG Deng-hong, LIU Shan-bao, SUN Yan, GUO Wei-ming, DAI Hong-zhang, LIU Li-jun, LI Chao. 2019. Mineral chemistry of micas from Ke'eryin pegmatite lithium orefield in western Sichuan and its indication for rare metal mineralization and prospecting[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 877-897(in Chinese with English abstract).
- MA Sheng-chao, WANG Deng-hong, LIU Shan-bao, WANG Cheng-hui, DAI Hong-zhang, RAO Kui-yuan, DING Xiao-ping, ZHU Hai-yang, DENG Zi-qing, GUO Wei-peng. 2020. The application of comprehensive prospecting methods on the hard rock type lithium deposit—a case study of the Jiada lithium mine in the Maerkang rare metals orefield[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2341-2353(in Chinese with English abstract).
- PARTINGTON G A, MCNAUGHTON N J, WILLIAMS I S. 1995. A review of the geology, mineralization, and geochronology of the Greenbushes pegmatite, Western Australia[J]. *Economic Geology*, 90(3): 616-635.
- PENG Jie, ZOU Lin. 2021. Prospecting prospects in the periphery of Ke'eryin Area, Sichuan[J]. *World Nonferrous Metals*, (4): 50-51(in Chinese).
- RASILANEN K, PASI E, TAPIO H, NILO K, JANNE K, TUOMO T. 2018. Quantitative assessment of undiscovered resources in lithium-caesium-tantalum pegmatite hosted deposits in Finland[M]. Finland: Geological Survey of Finland: 406.
- QIN Yu-long, HAO Xue-feng, XU Yun-feng, WANG Xian-feng. 2015. Metallogenic regularity and prospecting criteria of granite type rare metal deposits in Jiajika area, Sichuan Province[J]. *Geological Survey of China*, 2(7): 35-39(in Chinese with English abstract).
- SHA Xiao-bao, LI You-guo, JIN Ting-fu. 2017. The ore control conditions and genesis analysis of Jiajika triphane deposit in W Sichuan[J]. *Yunnan Geology*, 36(4): 389-393(in Chinese with English abstract).
- TANG Guo-fan, WU Sheng-xian. 1984. Geological research report on the Jiajika granitic-pegmatite type lithium deposits in Kangding County, Sichuan Province[R]. Xichang: Panxi Geological Brigade of Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources: 1-24(in Chinese).
- WANG Deng-hong, LI Jian-kang, FU Xiao-fang. 2005.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance[J]. *Geochimica*, 34(6): 541-547(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, LIU Li-jun, DAI Hong-zhang, LIU Shan-bao, HOU Jiang-long, WU Xi-shun. 2017a. Discussion on particularity and prospecting direction of large and super-large spodumene deposits[J]. *Earth Science*, 42(12): 2243-2257(in Chinese with English abstract).
- WANG Deng-hong, LIU Li-jun, HOU Jiang-long, DAI Hong-zhang, YU Yang, DAI Jing-jing, TIAN Shi-hong. 2017b. A preliminary review of the application of "Five levels+Basement" model for Jiajika-style rare metal deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(5): 1-7(in Chinese with English abstract).
- WU Wen-hui, ZHAN Han-yu, QIN Yu-long, LI Zheng, XU Yun-feng, SHEN Wei. 2017. Structural deformation of the Jiajika dome in western Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(4): 84-90(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, HOU Li-wei, WANG Zong-xiu. 1992. Orogenic process of the Songpan-Ganze Orogenic Belt of China[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- XU Zhi-qin, FU Xiao-fang, ZHAO Zhong-bao, LI Guang-wei, ZHENG Yi-long, MA Ze-liang. 2019. Discussion on relationships of gneiss dome and metallogenic regularity of pegmatite-type lithium deposits[J]. *Earth Science*, 44(5): 1452-1463(in Chinese with English abstract).
- XU Zhi-qin, WANG Ru-cheng, ZHAO Zhong-bao, FU Xiao-fang. 2018. On the structural backgrounds of the large-scale "Hard-rock Type" lithium ore belts in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091-1106(in Chinese with English abstract).
- YANG Yue-qing, WANG Deng-hong, LIU Shan-bao, LIU Li-jun, WANG Cheng-hui, GUO Wei-ming. 2020. The co-occurrence mechanism of two types of spodumene ore bodies and their prospecting significance in Jiajikan, Sichuan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(1): 287-302(in Chinese with English abstract).
- YUE Xiang-yuan, ZHANG Yi, ZHOU Xiong, GONG Da-xing, TAN Hong-qi, ZHOU Yu, ZHU Zhi-min. 2019. Metallogenic regularity and prospecting direction of rare metal deposits in Keeryin ore concentration area, western Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 38(4): 867-876(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yu-xiang, ZHAO Guang-ming, ZENG Yi-fu. 2015. Geological features and genetic model for the granitic pegmatite type (Jiajika type) Li deposits in west Sichuan—by the example of the Jiajika Li deposit[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 35(3): 391-395(in Chinese with English abstract).
- ZHENG Yi, CHEN Chao. 2021. Petrochemistry of the Ke'eryin intrusive in the Muerong Li deposit, Barkam, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 41(3): 482-486(in Chinese with English abstract).