



# 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义\*

郝雪峰<sup>1</sup>, 付小方<sup>1</sup>, 梁斌<sup>2</sup>, 袁蔺平<sup>1</sup>, 潘蒙<sup>1</sup>, 唐屹<sup>2</sup>

(1 四川省地质调查院, 四川成都 610081; 2 西南科技大学, 四川绵阳 621010)

**摘要** 锂被称为 21 世纪的能源金属, 近年来在国内外受到了普遍重视。四川甲基卡矿田是中国乃至世界上锂矿资源最集中的地区之一, 近年来又发现了新三号矿脉。文章对矿田内唯一出露的马颈子花岗岩岩体中的锆石及岩体周围新三号花岗伟晶岩型锂矿脉中的锆石和铌钽矿物进行了 LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年, 分别获得  $(223 \pm 1)$  Ma、 $(216 \pm 2)$  Ma 和  $(214 \pm 2)$  Ma 的数据, 表明成岩成矿作用发生于印支晚期, 伟晶岩型稀有金属矿床的形成与马颈子岩体属于同期, 因而含矿围岩原定为上三叠统新都桥组不合适, 定为侏倭组更合理。

**关键词** 地球化学; LA-ICP-MS U-Pb 同位素定年; 稀有金属; 印支运动; 伟晶岩型矿床; 甲基卡

中图分类号: P618.71

文献标志码: A

## Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance

HAO XueFeng<sup>1</sup>, FU XiaoFang<sup>1</sup>, LIANG Bin<sup>2</sup>, YUAN LinPing<sup>1</sup>, PAN Meng<sup>1</sup> and TANG Yi<sup>2</sup>

(1 Geological Survey Institute of Sichuan Province, Chengdu 610081, Sichuan, China; 2 Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China)

### Abstract

Lithium is known as the 21st Century energy metal and hence attracts great interest in recent years. With the recent discovery of X03 mega pegmatite Li mineral vein, the Jiajika orefield becomes one of the richest areas of Li resources in China and even in the world. In this study, the authors collected several zircon samples from the Majinzi granite and some niobium-tantalum mineral samples around the X03 vein in the Jiajika orefield, and conducted LA-ICP-MS U-Pb isotope dating of all these mineral samples. Three formation ages of  $(223 \pm 1)$  Ma,  $(216 \pm 2)$  Ma and  $(214 \pm 2)$  Ma were obtained. The results indicate that the pegmatite rare metal deposit has the same age with the granite, and the ore-forming and rock-forming process occurred in the Late Indosinian epoch. Therefore, the wall rocks of the pegmatite should be Zhuwo Formation rather than Xindujiao Formation.

**Key words:** geochemistry, LA-ICP-MS U-Pb isotope dating, rare metal, Indosinian Movement, pegmatite deposit, Jiajika

川西甲基卡是中国目前最大的锂辉石矿床; 四川三稀资源综合研究与重点评价”项目组于 2012~2014 年在甲基卡矿田外围取得地质找矿的重大突

破, 探获一规模巨大的新三号矿脉, 新增氧化锂资源量 64.31 万吨, 使得甲基卡矿田氧化锂的资源总量达到 188.77 万吨, 超过澳大利亚的格林布什矿床,

\* 本文得到中国地质调查局“四川三稀资源综合研究与重点评价(编号: 12120112208014)”和“稀有稀土稀散矿产调查”项目的资助  
第一作者简介: 郝雪峰, 男, 1979 年生, 高级工程师, 从事矿产地质调查工作。Email: 87483931@qq.com  
收稿日期: 2015-08-07; 改回日期: 2015-10-26。秦思婷编辑。

成为世界第一大锂矿床,这一发现具有重大的战略意义。

目前,对甲基卡稀有金属矿床进行的多是资源勘查工作,且主要完成于20世纪七八十年代,受交通条件、分析检测水平的限制和探采矿权范围设置的局限,总体科研程度不高,且缺乏系统性,远远落后于阿尔泰等类型稀有金属矿床的研究,这与它世界第一大锂矿的地位也不相称。因此,对于川西甲基卡伟晶岩型稀有金属矿床的研究亟待加强,对甲基卡花岗岩和新三号脉进行了精确的同位素定年。

## 1 矿床地质概况

### 1.1 区域地质背景

甲基卡花岗伟晶岩型稀有金属矿床地处青藏高原东部,海拔4300~4700 m,属构造剥蚀丘状高原。行政区划上处于四川省甘孜州康定、雅江、道孚三县交界部位。大地构造背景位于松潘-甘孜造山带,雅江逆冲-滑脱叠置岩片(见本期付小方等,2015之图1)之构造-岩浆穹状变质体群内,穹隆中心有花岗岩出露,轴部及两翼的张剪裂隙控制着伟晶岩脉的产出,具有有利的稀有金属成矿背景。

### 1.2 地层

矿床位于巴颜喀拉地层区玛多-马尔康地层分区雅江小区,发育一套上三叠统砂泥质复理石沉积建造,出露主要为西康群中-上三叠统侏倭组、新都桥组及第四系,岩性为灰色至深灰色十字石红柱石二云母片岩、二云母石英片岩等中浅变质岩,原岩为灰色-深灰色含碳质粉砂泥质岩、泥质粉砂岩夹薄层粉砂岩、条带状细砂岩。二云母花岗岩体是甲基卡矿区中唯一的岩体,侵位于上三叠统之中,花岗伟晶岩脉环绕岩体成群、成组分布(见付小方等,2015之图2)。

甲基卡矿床目前发现的花岗伟晶岩脉上千条,具有一定规模(长×宽大于20 m<sup>2</sup>)的伟晶岩脉498条,其中,工业矿体和矿化伟晶岩114条。根据伟晶岩的特征造岩矿物,矿区的伟晶岩可分为微斜长石型(I)、微斜长石-钠长石型(II)、钠长石型(III)、钠长石-锂辉石型(IV)和钠长石-锂(白)云母型(V)。

### 1.3 构造及变质作用

雅江构造-岩浆穹状变质体群,以甲基卡、容须卡、长征(仲尼)、瓦多、木绒等地为中心,分布有5个大小不等、地表出露呈浑圆状和椭圆形的穹状岩浆-

构造变质体。穹隆四周劈理倾角一般在27~45°,从伟晶岩的占脉构造分析,与成穹期的各类节理裂隙系控制了伟晶岩的产出,伟晶岩主要产于穹隆顶部和周缘上三叠统西康群石榴子石-红柱石-十字石动热变质地层中。甲基卡花岗伟晶岩型稀有金属矿床位于甲基卡穹隆体东北缘,发育有相对紧闭的小型复式背斜和向斜构造,以及剪性、张性裂隙和成矿后期的平移性断裂。经花岗岩浆底辟穹隆过程的动热变质作用,原岩层理基本被S1改造置换,向100~154°方向缓倾,倾角一般在20~45°左右。次级小褶皱为层间顺层掩卧褶皱,褶皱形态为尖棱褶皱,转折端部位岩层厚度加大,枢纽缓倾或近水平。其形成与甲基卡二云母花岗岩侵位的热隆伸展有关。矿区成穹前和成穹期的张性、剪性裂隙,对矿化伟晶岩的产出具有显著的控制作用。控脉裂隙以北东向和北北东向的缓倾剪裂隙为主,具体的控脉形式为:二云母花岗岩体内冷收缩、横裂隙,控制I类型伟晶岩的产出,岩体外接触带缓倾的剥离裂隙控制着II、III类型伟晶岩脉的分布,远离接触带的张剪缓倾裂隙控制IV、V类型伟晶岩脉的产出,是重要的锂、铌、钽矿脉的控矿构造。

### 1.4 花岗岩体及花岗伟晶岩型稀有金属矿体

本次采集样品2件,分别取自马颈子花岗岩体和在新三号花岗伟晶岩型稀有金属矿脉。马颈子岩体侵位于甲基卡背斜轴部南段近倾没端的上三叠统之中,在平面上呈镰刀状,岩体的主体呈北东70~80°方向延伸,长3.5 km,宽1.5 km;北部岩枝呈南北向,长2.5 km,宽0.3 km,形如舌状,出露面积约5.3 km<sup>2</sup>。岩体剥蚀浅,仅出露边缘相,均为细粒结构。主要矿物成分:钠更长石31%,微斜长石14.8%,石英44.5%,黑云母1.3%,白云母7.4%,副矿物有电气石、磷灰石、锂辉石、石榴子石、锆石、榍石、金红石、透辉石、绿帘石、角闪石、黄铁矿、磁铁矿、钛铁矿、辉钼矿等,总含量约1%。浅色矿物含量高,暗色矿物含量低,稀有元素、高挥发分副矿物发育。岩体Si含量高,Ca、Mg、Fe含量低,属铝过饱和系列,并富含稀有元素、挥发组分。岩体中普遍含Li、Be、Nb、Ga、Sr、Ba、Zr、Pb、Cu、Bi等微量元素,其中<sup>7</sup>Li(Li)可高达0.06%~0.15%。

新三号矿脉位于马颈子岩体以北,属钠长石-锂辉石型(IV)花岗伟晶岩,产于甲基卡穹隆北东缘上三叠统动热变质的十字石二云母片岩中,受成穹后期张性裂隙控制,由多期次脉动充填交代形成,矿脉显示呈

分枝复合特点,走向近南北,西倾,倾角 $25\sim 35^\circ$ ,矿脉宽 $50\sim 114\text{ m}$ ,平均厚 $66.4\text{ m}$ ,南北长 $1050\text{ m}$ ,受工作程度限制,矿脉向南、向北的延伸目前尚未控制,推断可能继续延伸。矿石矿物以锂辉石为主,少量为锂云母、锂绿泥石、铌钽铁矿、绿柱石及锡石。矿石呈微晶毛发状、细晶粒状、巨晶柱状以及梳状结构,交代结构发育。构造为条带状、团块状及浸染状构造。

## 2 样品测年方法和结果

### 2.1 样品

PD023-b2 样品采自甲基卡矿区马颈子二云母花岗岩体,样品质量约 $20\text{ kg}$ ,取样坐标:东经 $101^\circ 15'49''$ ,北纬 $30^\circ 16'50''$ ,海拔 $4520\text{ m}$ ;甲X03-重砂1个样品取自新三号矿脉的钻探岩芯,样品质量 $5\text{ kg}$ 。

### 2.2 测年方法

将采集的原岩样品破碎成粉末,再经过淘洗和磁选,得到含锆石的重砂样品,在双目镜下挑选出晶形完好、具有代表性的锆石颗粒,将其粘贴在环氧树脂表面,制备成测定年龄用的样品靶。然后对锆石进行抛光,使锆石内核充分暴露,进行透射光和反射光显微照相,并选择合适的样品进行阴极发光研究。利用阴极发光(CL)扫描电镜图像,研究单颗粒锆石形态、结构特征、检查锆石的内部结构,从而帮助选定最佳分析部位和进行数据解释。最后,将样品靶用超声波在去离子水中清洗、镀金,并用激光剥蚀等离子体质谱法(LA-ICP-MS)进行单颗粒锆石微区U-Pb年龄测定。

LA-ICP-MS单颗粒锆石微区U-Pb年龄测定在南京大学生态地质学国家重点实验室完成,检测仪器为Agilent 7500a型ICP-MS电感耦合等离子体质谱仪。样品分析时,激光束斑直径为 $32\ \mu\text{m}$ 。实验中采用He作为剥蚀物质的载气。样品测定时,外标采用澳大利亚锆石标样GEMOC/GS-1( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(608.5\pm 1.5)\text{ Ma}$ )内标采用澳大利亚锆石标样MudTank( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(732\pm 5)\text{ Ma}$ )。样品同位素比值及元素含量计算采用Glitter(Ver4.0)软件,并使用嵌入式Excel的ComPbCorr<sup>#</sup>3-15G程序进行普通铅矫正,年龄协和图用Isoplot(Ver2.49)绘制。

另外,本次研究还将甲基卡矿区新三号矿脉锂辉石花岗岩伟晶岩样品送中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室,进行了铌钽氧

化物中U-Pb的年龄测定。实验参数如下:①仪器名称:JXA-8100(JEOL)电子探针,测试条件:加速电压为 $15\text{ kV}$ ,分析电流为 $20\text{ nA}$ ,束斑直径为 $0\sim 1\ \mu\text{m}$ ,标样溯源为Sc金属( $\text{ScK}\alpha$ ), $\text{MnTiO}_3$ ( $\text{TiK}\alpha$ ), $\text{SnO}_2$ ( $\text{SnL}\alpha$ ), $\text{CaWO}_4$ ( $\text{WL}\alpha$ ),Nb金属( $\text{NbL}\alpha$ ),Ta金属( $\text{TaL}\alpha$ ),铁橄榄石( $\text{Mn,FeK}\alpha$ )标样均为美国国家标准局。②仪器名称:Agilent 7500a型ICP-MS电感耦合等离子体质谱仪,测试条件:激光束斑直径为 $44\ \mu\text{m}$ ,激光能量为 $12\text{ J}/\text{cm}^3$ ,剥蚀频率为 $3\text{ Hz}$ ,剥蚀时间为 $50\text{ s}$ ;标样溯源:U-Pb定年利用来自马达加斯加的Coltan139( $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄为 $(505.4\pm 1)\text{ Ma}$ )作为外标(Che et al., 2015)。

### 2.3 测年结果

#### 2.3.1 二云母花岗岩锆石测年结果

甲基卡矿区马颈子二云母花岗岩(PD023-b2)锆石阴极发光图像(图1)显示,锆石晶体多为无色透明,自形程度较高,呈柱状晶体,多数锆石晶体大小在 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ ,长宽比一般在 $2:1\sim 3:1$ 。在阴极发光图像上多数锆石具有明显的核幔结构和清楚的震荡韵律环带,显示出岩浆结晶锆石特征。核部CL强度较弱,外围CL强度较高,反映了U、Th含量的变化。

样品(PD023-b2)LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素分析结果(表1)显示,锆石 $w(^{232}\text{Th})$ 为 $19.40\times 10^{-6}\sim 303.92\times 10^{-6}$ , $w(^{238}\text{U})$ 为 $397.86\times 10^{-6}\sim 2453.98\times 10^{-6}$ ,Th/U比值为 $0.01\sim 0.54$ ,平均值 $0.31$ 。样品中,除测定点PD023-b1-11、PD023-b1-21的Th/U比值为 $0.01$ 外,其余点的Th/U比值均大于 $0.1$ ,Th/U比值较高表明岩浆成因的锆石占主导地位。

甲基卡矿区马颈子二云母花岗岩体(PD023-b2)所测试的24个分析点中(图2),有7个点投点分散,其余17个点投点较为集中,后者 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $(223\pm 1)\text{ Ma}$ ( $n=17$ ,MSWD=1.02),为岩体中锆石的结晶年龄。由表1可以看出,有4颗锆石(测定点号PD023-12、PD023-16、PD023-20、PD023-24)的年龄值相对于其他锆石年龄值明显偏大,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 $(310\pm 4)\text{ Ma}$ (12号)、 $(304\pm 4)\text{ Ma}$ (16号)、 $(302\pm 4)\text{ Ma}$ (20号)、 $(303\pm 4)\text{ Ma}$ (24号)。在阴极发光图像(图1)中,这4颗锆石的分析点都位于核幔分界处,核部比幔部亮度大,且核部分带较弱,笔者认为其核部为继承性岩浆锆石,因此,这4颗锆石年龄大于 $300\text{ Ma}$ 可能是受到后

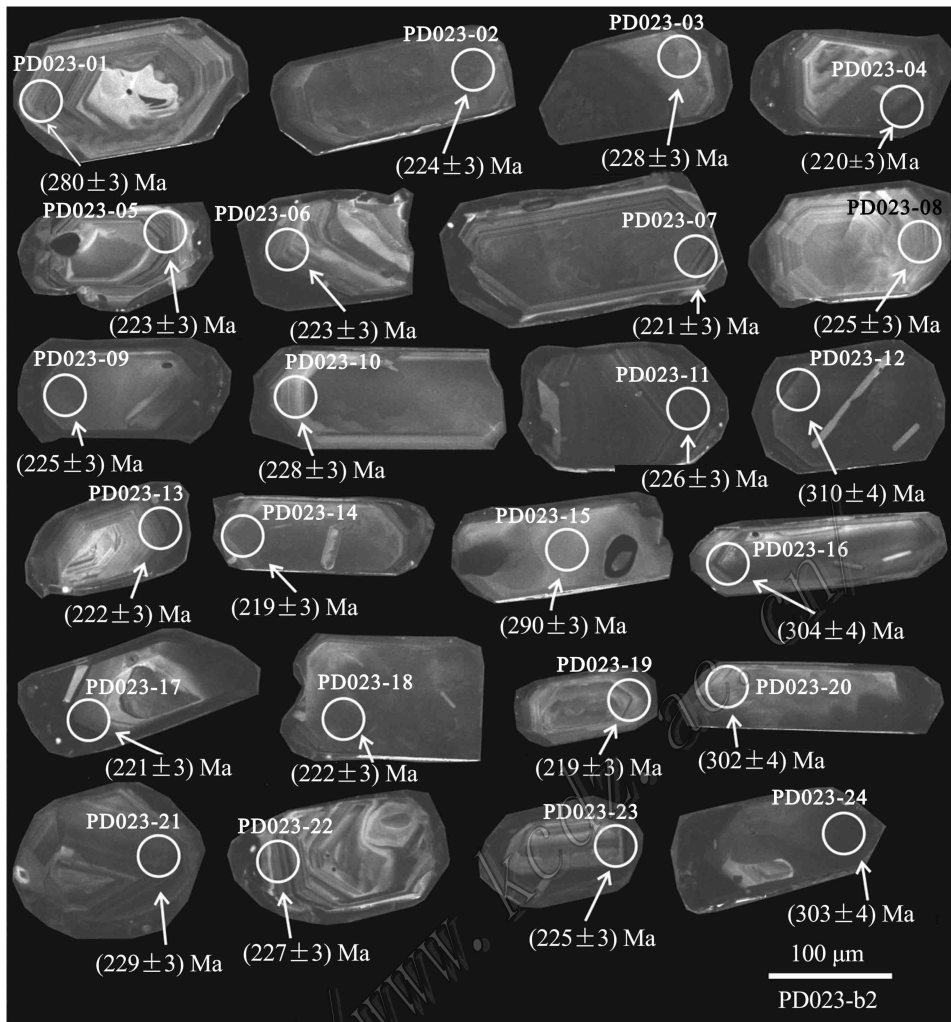


图 1 甲基卡矿区马颈子二云母花岗岩体(样品 PD023-b2)锆石 CL 图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 测年结果

Fig. 1 Zircon CL images and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  dating results of the PD023-b2 sample from the Majinzi granite in Jiajika

期老锆石的混染,导致它们的年龄值明显偏大,亦可能为捕获锆石年龄。

### 2.3.2 锂辉石花岗伟晶岩中锆石测年结果

甲基卡矿区新三号矿脉(甲 X03-重砂 1)中锆石阴极发光图像(图 3)显示,锆石晶体多为无色透明,自形程度一般,多数呈不规则状,少数呈柱状或粒状晶体,大多数锆石晶体粒度在  $100\sim 200\ \mu\text{m}$ ,长宽比一般介于  $1:1\sim 1:2$ 。在阴极发光图像(图 3)中,多数锆石具有明显的核幔结构和清楚的震荡韵律环带,也显示出岩浆结晶锆石的特征。核部 CL 强度较弱,外围 CL 强度较高,反映了 U、Th 含量的变化。

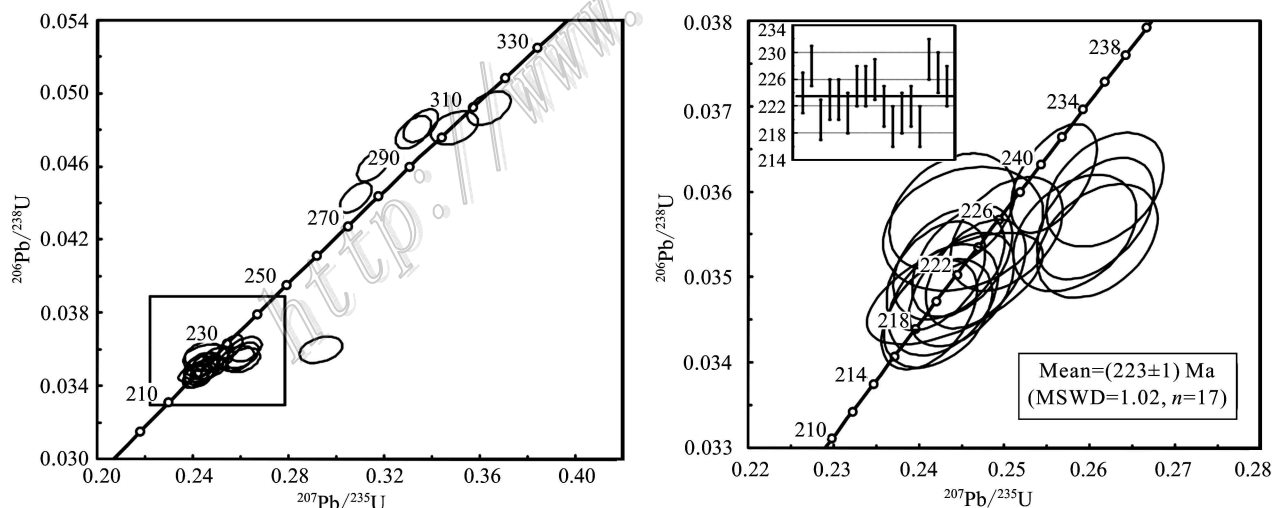
样品(甲 X03-重砂 1)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果及年龄计算结果(表 2)显示,锆石  $\omega(^{232}\text{Th})$  为  $43.59\times 10^{-6}\sim 314.13\times 10^{-6}$ ,  $\omega(^{238}\text{U})$  为  $96.72\times 10^{-6}\sim 429.19\times 10^{-6}$ , Th/U 比值为  $0.45\sim$

$0.76$ , 平均值  $0.60$ 。样品中所有点的 Th/U 比值均大于  $0.1$ ,较高的 Th/U 比值表明岩浆成因的锆石占主导地位。另外,从 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(表 2)可以看出,10、11 号分析点相对于其他 18 个分析点,其年龄值相差较大,具有明显的离散性。在阴极发光图(图 3)中,10 号分析点锆石呈港湾状,不具有特征的岩浆振荡环带,局部已变质重结晶呈白色,变质重结晶锆石区域的 CL 强度明显增强,内部呈弱分带或冷杉叶状分带,具典型的变质锆石内部结构,推测该 10 号分析点锆石可能捕获于围岩,为变质锆石,其年龄不能代表岩浆结晶年龄。而 11 号分析点锆石年龄大于  $1000\ \text{Ma}$ ,明显偏离谐和线,且在阴极发光图(图 3)中明显位于锆石核部,CL 强度较弱,分带较弱,推测其应为继承性岩浆锆石,且后期可能受到了变质作用或热事件的影响,其年龄也不能代表岩浆结晶年龄。

表1 甲基卡矿区马颈子二云母花岗岩体锆石 U-Pb 同位素分析数据及年龄计算结果

Table 1 Zircon U-Pb isotopic analysis and age calculation results of the Majinzi granite in Jiajika

序号	测定点号	$\tau_{\omega}(^{232}\text{Tl})/\tau_{\omega}(^{238}\text{U})/$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	年龄/Ma			
		$10^{-6}$	$10^{-6}$								$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
1	PD023-01	201.52	642.95	0.31	0.05038	0.00063	0.30791	0.00431	0.04433	0.00054	273	3	280	3
2	PD023-02	124.19	453.62	0.27	0.05341	0.00093	0.26086	0.00465	0.03543	0.00044	235	4	224	3
3	PD023-03	174.90	466.55	0.37	0.05269	0.00089	0.26172	0.00454	0.03603	0.00044	236	4	228	3
4	PD023-04	125.28	453.40	0.28	0.05069	0.00085	0.24280	0.00421	0.03474	0.00043	221	3	220	3
5	PD023-05	145.55	468.52	0.31	0.05022	0.00086	0.24343	0.00430	0.03516	0.00043	221	4	223	3
6	PD023-06	122.69	462.22	0.27	0.05051	0.00074	0.24501	0.00386	0.03519	0.00043	223	3	223	3
7	PD023-07	120.41	397.86	0.30	0.05097	0.00080	0.24495	0.00406	0.03486	0.00044	222	3	221	3
8	PD023-08	121.28	516.48	0.23	0.05111	0.00085	0.25020	0.00433	0.03551	0.00044	227	4	225	3
9	PD023-09	170.74	497.06	0.34	0.05273	0.00095	0.25820	0.00475	0.03552	0.00045	233	4	225	3
10	PD023-10	156.61	477.41	0.33	0.05913	0.00119	0.29338	0.00595	0.03599	0.00047	261	5	228	3
11	PD023-11	19.40	1985.35	0.01	0.05298	0.00085	0.26060	0.00452	0.03569	0.00047	235	4	226	3
12	PD023-12	241.62	444.72	0.54	0.05358	0.00084	0.36361	0.00601	0.04922	0.00061	315	4	310	4
13	PD023-13	120.26	450.36	0.27	0.05012	0.00075	0.24193	0.00381	0.03502	0.00042	220	3	222	3
14	PD023-14	153.58	516.96	0.30	0.05080	0.00085	0.24218	0.00417	0.03458	0.00042	220	3	219	3
15	PD023-15	209.75	525.98	0.40	0.04962	0.00063	0.31519	0.00444	0.04607	0.00056	278	3	290	3
16	PD023-16	187.57	483.04	0.39	0.05038	0.00065	0.33515	0.00476	0.04826	0.00059	293	4	304	4
17	PD023-17	144.94	497.49	0.29	0.05078	0.00154	0.24415	0.00679	0.03487	0.00043	222	6	221	3
18	PD023-18	169.86	486.63	0.35	0.05104	0.00076	0.24658	0.00386	0.03504	0.00042	224	3	222	3
19	PD023-19	129.09	490.39	0.26	0.05060	0.00073	0.24114	0.00370	0.03456	0.00042	219	3	219	3
20	PD023-20	175.21	472.00	0.37	0.05028	0.00067	0.33203	0.00486	0.04790	0.00059	291	4	302	4
21	PD023-21	33.81	2453.98	0.01	0.05130	0.00061	0.25571	0.00333	0.03616	0.00042	231	3	229	3
22	PD023-22	145.95	511.49	0.29	0.04944	0.00097	0.24380	0.00484	0.03577	0.00045	222	4	227	3
23	PD023-23	145.26	427.74	0.34	0.05000	0.00128	0.24512	0.00619	0.03557	0.00048	223	5	225	3
24	PD023-24	303.92	602.78	0.50	0.05263	0.00097	0.34922	0.00655	0.04814	0.00060	304	5	303	4

图2 甲基卡马颈子花岗岩(样品 PD023-b2)锆石 U-Pb 谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄分布图Fig. 2 U-Pb harmonic map and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted average age of the PD023-b2 sample from the Majinzi granite in Jiajika

甲基卡矿区新三号矿脉锂辉石花岗伟晶岩(甲X03-重砂1)所测试的20个分析点中,其中2个点投点分散,其余18个点的投点较为集中(图4)。这些投点较为集中的点均投于谐和线上或者谐和线附近, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为 $(216 \pm 2)$  Ma ( $n =$

18, MSWD=1.4),为矿脉中锆石的结晶年龄。

### 2.3.3 锂辉石花岗伟晶岩铌钽氧化物测年结果

为进一步验证成矿时代,本次也尝试对甲基卡新三号矿脉锂辉石花岗伟晶岩中的铌钽氧化物(X03-NT)利用LA-ICP-MSU-Pb同位素分析技术,测

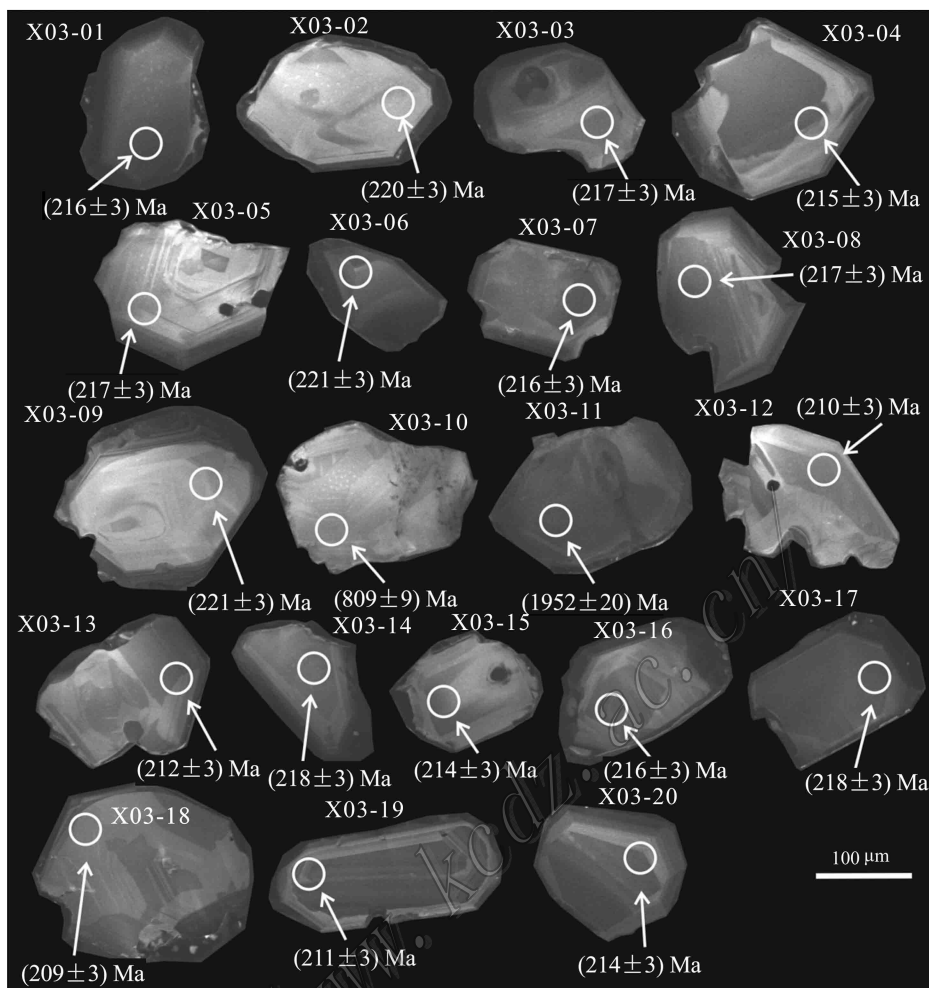


图3 甲基卡矿区新三号矿脉锂辉石花岗伟晶岩(甲 X03-重砂1)锆石 CL 图像及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  测年结果

Fig. 3 Zircon CL image and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  dating results of the X03 spodumene-pegmatite vein (X03-Placer1) in Jiajika

定了同位素年龄,结果见表3。样品测试的20个分析点均投于谐和线上或者其附近(图5), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为 $(214 \pm 2)$  Ma ( $n = 20$ , MSWD = 0.99)。

## 3 讨论

### 3.1 甲基卡矿区现有测年成果及对比分析

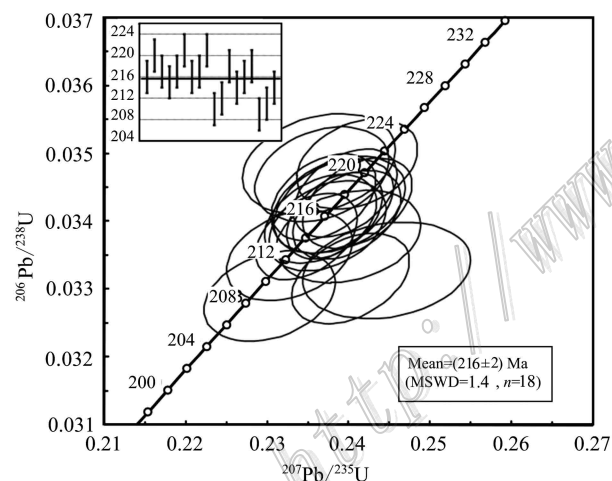
甲基卡矿区的年龄测试工作始于唐国凡等(1984),用全岩-矿物 Rb-Sr 等时年龄法测得二云母花岗岩的年龄为 $(214.65 \pm 1.6)$  Ma;花岗伟晶岩的年龄为 $(189.49 \pm 3.14)$  Ma。根据1:20万康定幅区调报告,甲基卡花岗岩的 K-Ar 法年龄为190~210 Ma,花岗伟晶岩的年龄183~188 Ma。德国格丁大

学 Harms(1992)通过对区域上三叠统西康群低绿片岩相变质岩伊利石结晶度指数和 K-Ar 同位素定年,其变质年龄为173~152 Ma。许志琴等(1992)在与甲基卡相邻的长征穹窿体的核部见矽线石二云母片岩,对其中交代矽线石所形成的白云母采用 $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ 法定年,获得年龄值为 $(163 \pm 3.7)$  Ma。王登红等(2005)采用 Ar-Ar 法测得134和104号含矿花岗伟晶岩的年龄为 $(195.7 \pm 0.1)$  Ma 和 $(198.9 \pm 0.4)$  Ma,等时线年龄为 $(195.4 \pm 2.2)$  Ma 和 $(199.4 \pm 2.3)$  Ma。本次研究于2015年采用 LA-ICP-MS 法测年,获得二云母花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(223 \pm 1)$  Ma;含矿花岗伟晶岩的锆石 U-Pb 年龄为 $(216 \pm 2)$  Ma;含矿花岗伟晶岩中铌钽氧化物的 U-Pb 年龄为 $(214 \pm 2)$  Ma。

表2 甲基卡矿区新三号矿脉锂辉石花岗伟晶岩中锆石 U-Pb 同位素测定结果

Table 2 Zircon U-Pb isotopic analyses of of the X03 spodumene-pegmatite vein from Jiajika

序号	测定点号	$\frac{\epsilon(^{232}\text{Th})}{\epsilon(^{238}\text{U})}$		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	年龄/Ma			
		$10^{-6}$	$10^{-6}$								$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
1	X03-01	207.11	363.57	0.57	0.05068	0.00079	0.23821	0.00390	0.03409	0.00042	217	3	216	3
2	X03-02	77.96	158.78	0.49	0.04947	0.00113	0.23667	0.00543	0.03470	0.00046	216	4	220	3
3	X03-03	167.83	292.32	0.57	0.05055	0.00111	0.23871	0.00538	0.03425	0.00047	217	4	217	3
4	X03-04	183.38	297.10	0.62	0.05072	0.00099	0.23736	0.00475	0.03394	0.00044	216	4	215	3
5	X03-05	159.65	286.00	0.56	0.05100	0.00090	0.24099	0.00443	0.03427	0.00044	219	4	217	3
6	X03-06	285.29	408.41	0.70	0.05015	0.00101	0.24099	0.00489	0.03485	0.00044	219	4	221	3
7	X03-07	235.28	349.37	0.67	0.05100	0.00090	0.23973	0.00439	0.03410	0.00043	218	4	216	3
8	X03-08	248.66	402.65	0.62	0.05046	0.00099	0.23810	0.00483	0.03423	0.00046	217	4	217	3
9	X03-09	65.61	132.03	0.50	0.04918	0.00128	0.23629	0.00619	0.03485	0.00049	215	5	221	3
10	X03-10	43.59	96.72	0.45	0.06643	0.00104	1.22475	0.02011	0.13372	0.00167	812	9	809	9
11	X03-11	52.30	105.48	0.50	0.11361	0.00134	5.54051	0.07348	0.35375	0.00428	1907	11	1952	20
12	X03-12	314.13	429.19	0.73	0.05253	0.00100	0.24018	0.00475	0.03316	0.00044	219	4	210	3
13	X03-13	116.75	190.52	0.61	0.05038	0.00109	0.23271	0.00509	0.03350	0.00044	212	4	212	3
14	X03-14	134.94	253.78	0.53	0.05048	0.00084	0.23952	0.00419	0.03442	0.00043	218	3	218	3
15	X03-15	288.08	380.56	0.76	0.05042	0.00085	0.23480	0.00411	0.03378	0.00042	214	3	214	3
16	X03-16	273.62	358.39	0.76	0.05040	0.00094	0.23652	0.00453	0.03404	0.00043	216	4	216	3
17	X03-17	166.90	291.97	0.57	0.05001	0.00086	0.23688	0.00422	0.03436	0.00042	216	3	218	3
18	X03-18	136.66	272.32	0.50	0.05078	0.00117	0.23026	0.00533	0.03290	0.00044	210	4	209	3
19	X03-19	121.29	198.05	0.61	0.05331	0.00152	0.24461	0.00682	0.03328	0.00047	222	6	211	3
20	X03-20	117.30	202.78	0.58	0.05153	0.00127	0.23993	0.00585	0.03378	0.00045	218	5	214	3

图4 甲基卡新三号矿脉锂辉石花岗伟晶岩中锆石 (甲 X03-重砂 1) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄Fig. 4  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  weighted average age distribution of spodumene pegmatite (X03-Placer1) from Jiajika X03

综上所述, K-Ar 法和 Ar-Ar 法测定的年龄相较于锆石 U-Pb 法测定的年龄普遍偏年轻, 一种可能是由于云母蚀变等易导致封闭体系被破坏, 易导致年龄偏年轻; 另一种可能是锆石和铌钽矿均为岩浆成因, 测试的是岩浆开始结晶的年龄, K-Ar、Ar-Ar 法测定的可能代表岩浆结晶结束的年龄或后期多期次热事件的年龄(李建康等, 2006a; 2006b)。目前, 锆石定年方法比较成熟, 从本次取得的锆石 CL 图像来看,

没有 Th、U 含量高而导致的锆石晶格破坏, 所以本次测定的锆石年龄, 尤其是二云母中的锆石年龄可信度高。本次研究还用铌钽氧化物 U-Pb 法对新三号矿脉含矿花岗伟晶岩的年龄进行了验证, 取得的数据与锆石 U-Pb 法非常接近。

### 3.2 成岩成矿时代与地层时代

上述测定结果表明, 甲基卡矿区花岗岩与新三号矿脉之间的时间差仅为 7~9 Ma, 总体上均形成于印支晚期, 与最新国际年代地层表中的上三叠统中期(诺利阶, 227~208.5 Ma)对应(全国地层委员会, 2002)。这一测年结果也为本区的三叠纪地层的时间界定提供了新依据。

前人对甲基卡矿区的地质时代存在不同看法(李永森等, 1980), 有的将被花岗岩和伟晶岩侵入的围岩划定为上三叠统新都桥组, 其形成时间与花岗岩体侵入的时间相同甚至更晚, 显然不符合逻辑。加之甲基卡矿区出露的围岩普遍含砂质较重, 在岩性组合上更趋同于上三叠统侏倭组(位于新都桥组之下)。因此, 笔者认为将甲基卡矿区新三号矿脉的围岩划定为侏倭组更为合理。

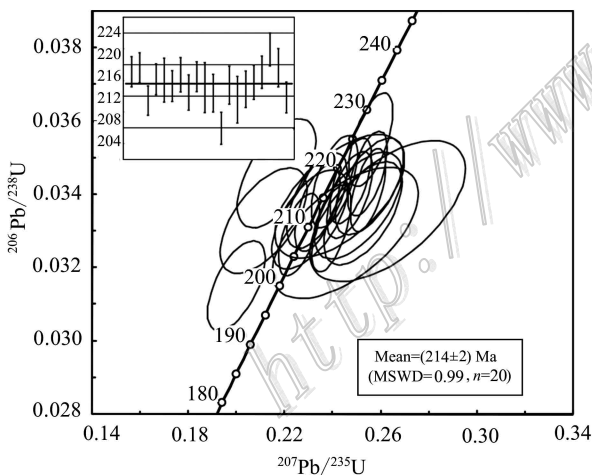
## 4 构造意义和成矿规律

本次同位素年代学的研究表明, 甲基卡的花岗岩体侵位于三叠纪后期。伴随松潘-甘孜陆内

表3 甲基卡矿区新三号矿脉锂辉石花岗伟晶岩铌钽氧化物 U-Pb 同位素测定结果

Table 3  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  isotopic age of Nb-Ta oxide from the X03 spodumene-pegmatite vein in the Jiajika orefield

序号	测定点号	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	年龄/Ma			
								$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
1	X-01	0.05222	0.00128	0.24738	0.00569	0.03437	0.00077	224	5	218	5
2	X-02	0.05337	0.00119	0.25436	0.00537	0.03457	0.00076	230	4	219	5
3	X-03	0.04980	0.00131	0.22592	0.00560	0.03291	0.00074	207	5	209	5
4	X-04	0.05271	0.00142	0.24693	0.00627	0.03399	0.00078	224	5	216	5
5	X-05	0.05188	0.00400	0.24280	0.01779	0.03395	0.00111	221	15	215	7
6	X-06	0.05035	0.00141	0.23346	0.00617	0.03364	0.00078	213	5	213	5
7	X-07	0.05409	0.00212	0.25511	0.00936	0.03422	0.00087	231	8	217	5
8	X-08	0.05015	0.00239	0.23028	0.01036	0.03332	0.00089	210	9	211	6
9	X-09	0.05415	0.00107	0.25464	0.00483	0.03412	0.00075	230	4	216	5
10	X-10	0.05680	0.00491	0.26270	0.02134	0.03355	0.00127	237	17	213	8
11	X-11	0.04603	0.00272	0.21116	0.01190	0.03329	0.00095	195	10	211	6
12	X-12	0.04601	0.00191	0.19979	0.00789	0.03151	0.00081	185	7	200	5
13	X-13	0.05393	0.00276	0.25039	0.01202	0.03370	0.00096	227	10	214	6
14	X-14	0.05399	0.00466	0.24513	0.02008	0.03295	0.00118	223	16	209	7
15	X-15	0.05473	0.00248	0.25250	0.01071	0.03349	0.00093	229	9	212	6
16	X-16	0.05005	0.00186	0.23334	0.00822	0.03384	0.00086	213	7	215	5
17	X-17	0.05083	0.00142	0.24058	0.00635	0.03435	0.00083	219	5	218	5
18	X-18	0.05229	0.00130	0.25569	0.00606	0.03550	0.00084	231	5	225	5
19	X-19	0.04548	0.00238	0.21657	0.01077	0.03458	0.00098	199	9	219	6
20	X-20	0.05256	0.00122	0.23933	0.00533	0.03307	0.00078	218	4	210	5

图5 甲基卡矿区新三号矿脉锂辉石花岗伟晶岩铌钽氧化物 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄分布图Fig. 5 Weighted average  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of Nb-Ta oxide from the X03 spodumene-pegmatite vein in Jiajika

造山, 甲基卡地区晚三叠世巨厚复理石遭受南北向和东西双向挤压收缩, 经历了多期变形-变质作用, 发育与碰撞造山早期深层次滑脱-推覆有关低压热流变质作用; 深熔壳源岩浆底辟侵位→热隆伸展→同构造的动热变质和后期酸性岩枝和花岗伟晶岩侵位→局部热接触变质和气热蚀变作用。从甲基卡岩

浆穹隆体核部至四周, 变质相由角闪岩相、高绿片岩相至低绿片岩相, 变质程度由核部向四周由深逐渐变浅, 显示出同心圆状的动热伸展扩散效应, 并在早期形成的北西向背斜的基础之上, 后期叠加南北向褶皱构造。双向挤压致使陆壳重熔型花岗岩浆底辟侵位, 岩脉热流体绕花岗岩体呈近似环带状分布。这为花岗伟晶岩型稀有矿产的成矿提供了物质来源以及控矿和容矿构造。

综前所述, 川西甲基卡新三号花岗伟晶岩型稀有金属矿床形成于印支运动的末期和燕山运动之前(223~214 Ma)的相对宁静期。测年结果表明, 甲基卡的含矿伟晶岩同样形成于三叠纪后期, 其与花岗岩体的侵位相差仅为7~9 Ma, 这一阶段属于印支运动末期相对平静的连续演化阶段, 松潘-甘孜陆内造山运动已趋停止, 区域上的地层经过剧烈的造山运动, 普遍经历多期变形-变质作用, 已趋于稳定。而锂等稀有金属具有较强的活动性, 很难在动荡的构造活动期间聚集成矿, 三叠纪后期这一相对稳定和封闭的穹隆构造环境恰恰提供了有利于稀有金属富集成矿的条件, 这正是甲基卡矿区新三号矿脉达到超大型规模的根本原因所在! 之后, 印支造山运动结束, 燕山-喜马拉雅造山运动开始, 甲基卡地区进入稳定抬升的陆内构造环境, 并随着长期的抬升,



马颈子花岗岩体和新三号矿脉逐渐剥蚀出露或接近地表。

这与世界上其他一些重要的伟晶岩矿床的成矿规律是一致的。如北美苏必利尔伟晶岩省经历了5个演化阶段,其中火山弧的发育及大陆增生发生于2775~2725 Ma,而稀有金属的富集则发生在2685 Ma的鬼湖岩基侵位之后(Breaks et al., 1992),加拿大Nova Scotia的伟晶岩形成于造山之后(Murphy et al., 1998),阿尔泰的伟晶岩矿床可以在造山过程的不同阶段出现,但稀有金属的大规模聚集则主要出现在非造山过程的某一相对稳定的大陆演化阶段(王登红等, 1998, 2002);在中国阿尔泰造山带周边地区的蒙古、俄罗斯等地所发现的大型、超大型伟晶岩型稀有金属矿床,有许多形成于后造山或造山后的大陆演化过程中(Kovalenko et al., 1995);在南美最大的巴西东部伟晶岩省,虽然于元古代就开始形成伟晶岩,但稀有金属的聚集主要发生在加里东期(Morteani et al., 2000);意大利西北部含Nb-Ta的晶洞伟晶岩也形成于海西期造山运动后期及期后阶段(Aurischio et al., 2001);西欧海西造山带的葡萄牙北部同构造期伟晶岩含Sn,而构造期后的伟晶岩(299 Ma)则出现重要的Sn-W-Au矿化。因此,伟晶岩的形成和矿化是有规律的,伟晶岩型稀有金属矿床一般形成于造山运动之后的相对宁静的时期,对造山带的演化过程有重要的示踪意义(王登红等, 2004)。稀有金属元素较为活跃,难以在造山运动强烈的阶段聚集成矿,只有在造山运动之后的相对平静的连续演化阶段才会大规模聚集。综上所述,世界上最大的花岗伟晶岩型锂矿——甲基卡矿床形成于晚三叠世(223~214 Ma),是印支运动末期趋于稳定阶段的产物。

志 谢 南京大学王汝成教授和车旭东博士协助完成了同位素年代学方面的测试工作,在此深表感谢。

## References

Aurischio C, Vito C D, Ferrini V and Orlandi P. 2001. Nb-Ta oxide minerals from miarolitic pegmatites of the Baveno pink granite, NW Italy[J]. *Mineral. Mag.*, 65(4): 509-522.

Breaks F W and Moore j M. 1992. The ghost lake batholith, superior Province of northwestern ontario: A fertile, S-type, peraluminous

granite-rare-element pegmatite system[J]. *Can Mineral*, 30: 835-875.

- Che X D, Wu F Y and Wang R C. 2015. In situ U-Pb isotopic dating of columbite-tantalite by LA-ICP-MS[J]. *Ore Geology Reviews*, 65: 979-989.
- Fu X F, Wang D H, Yuan L P, Hou L W, Pan M, Hao X F, Liang B and Tang Y. 2015. Mineralization characteristics and prospecting model of the newly discovered X03 rare metal vein in the Jiajika ore-field, Sichuan[J]. *Mineral Deposits*, 34(6): 1172-1186.
- Harms T A, Jayko A S and Blake M C. 1992. Kinematic evidence for extensional unroofing of the Franciscan Complex along the coast range fault, North Diablo range, California[J]. *Tectonics*, 10(2): 228-241.
- Kovalenko V I and Yarmolyuk V V. 1995. Endogenous rare metal ore formations and rare metal metallogeny of Mongolia[J]. *Econ. Geol.*, 90(3): 520-529.
- Li J K, Wang D H and Fu X F. 2006a.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of the Keeryin pegmatite type rare metal deposit, western Sichuan, and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 843-848(Chinese with English abstract).
- Li J K, Wang D H and Fu X F. 2006b. Metallogenic epoch and tectonic implications of Danba pegmatite typemuscovite deposit in Sichuan Province, China[J]. *Mineral Deposits*, 25(1): 95-100(Chinese with English abstract).
- Li Y S and Han T L. 1980. The contact metamorphism of granite pegmatite in western Sichuan and its prospecting significance[J]. *Geological Review*, 26(2): 121-128(Chinese with English abstract).
- Morteani G, Preinfalk C and Horn A H. 2000. Classification and mineralization potential of the pegmatites of the eastern Brazilian pegmatite Province[J]. *Miner Deposita*, 35(7): 638-655.
- Murphy J B, Anderson A J and Archibad D A. 1998. Post-orogenic alkali feldspar granite and associated pegmatites in west Avalonia: The petrology of the neoproterozoic georgeville pluton, antigonish highlands, Nova Scotia[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 35(2): 110-120.
- Stratigraphic Committee of China. 2002. A guide to regional stratigraphic time scales of China[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-72(in Chinese).
- Tang G F and Wu S X. 1984. The research report of the granitic pegmatite Li deposit in Jiajika, Sichuan, China[R].
- Wang D H, Li H Y and Zou T R. 1998. Type and orogenic process of rare element deposit in Alta[J]. *Mineral Deposits*, 14(Suppl.):

25-28( in Chinese ).

Wang D H , Chen Y C , Xu Z G , Li T D and Fu X J . 2002. Minerogenic-series and minerogenic rule of Altai metallogenetic province[ M ]. Beijing : Atomic Energy Press. 1-49( in Chinese ).

Wang D H , Zou T R , Xu Z G , Yu J J and Fu X F . 2004. Advance in the study of using pegmatite deposits as the tracer of orogenic process[ J ]. Advances in Earth Science , 19( 4 ) : 614-620( in Chinese with English abstract ).

Wang D H , Li J K , and Fu X F . 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 ).

Xu Z Q , Hou L W , Wang X Z , Fu X F and Huang M H . 1992. Orogenic process of Songpan Ganzi orogenic belt of China[ M ]. Beijing : Geological Publishing House. 1-189( in Chinese ).

#### 附中文参考文献

付小方 , 王登红 , 袁简平 , 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找矿模型[ J ]. 矿床地质 , 34( 6 ) : 1172-1186.

李建康 , 王登红 , 付小方 . 2006a. 川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代及其构造意义[ J ]. 地质学报 , 80( 6 ) : 843-848.

李建康 , 王登红 , 付小方 . 2006b. 四川丹巴伟晶岩型白云母矿床的成矿时代及构造意义[ J ]. 矿床地质 , 25( 1 ) : 95-100.

李永森 , 韩同林 . 1980. 川西某地花岗岩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.

全国地层委员会 . 2002. 中国区域年代地层( 地质年代 ) 表说明书[ M ]. 北京 : 地质出版社. 1-72.

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 ].

王登红 , 李红阳 , 邹天人 . 1998. 阿尔泰稀有金属矿床的类型与造山过程[ J ]. 矿床地质 , 17( 增刊 ) : 25-28.

王登红 , 陈毓川 , 徐志刚 , 李天德 , 傅旭杰 . 2002. 阿尔泰成矿省的成矿系列及成矿规律[ M ]. 北京 : 原子能出版社. 1-493.

王登红 , 邹天人 , 徐志刚 , 余金杰 , 付小方 . 2004. 伟晶岩矿床示踪造山过程的研究进展[ J ]. 地球科学进展 , 19( 4 ) : 614-620.

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见[ J ]. 地球化学 , 34( 6 ) : 541-547.

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. 1-189.

<http://www.kcgs.com.cn/>