

四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定:来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据

费光春¹⁾, 杨峥¹⁾, 杨继忆¹⁾, 罗伟²⁾, 邓运¹⁾, 赖宇涛¹⁾,
陶鑫鑫¹⁾, 郑砾³⁾, 唐文春⁴⁾, 李剑⁴⁾

1) 自然资源部构造成矿成藏重点实验室, 成都理工大学地球科学学院, 成都, 610059;

2) 绵阳师范学院城乡规划与建设学院, 四川绵阳, 621000; 3) 四川能投锂业有限公司, 成都, 610023;

4) 四川省地质矿产勘查开发局化探队, 四川德阳, 618000

内容提要:四川党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床位于四川西部可尔因矿田东南部, 松潘甘孜造山带中部, 是近年新发现的以锂为主, 共伴生铌、钽、铍、铷、锡的超大型矿床。本文在花岗伟晶岩地质特征研究的基础上, 对花岗伟晶岩中的锡石矿物开展电子探针成分分析以及 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年工作。电子探针波谱定量分析结果显示, 党坝矿床的锡石都是与稀有金属伟晶岩有关的锡石, 并非来自热液作用的锡石。U-Pb 定年结果显示, 锂辉石钠长石伟晶岩脉(DB2)和含锂云母锂辉石钠长石伟晶岩脉(DB1)两件样品的²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb-²³⁸U/²⁰⁷Pb 谐和年龄分别为 208.1±1.9Ma($n=31$, MSWD=2.5)和 199.3±1.6Ma($n=11$, MSWD=0.68), 可以代表花岗伟晶岩脉的形成时代, 并且表明党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床形成于晚三叠世, 与印支晚期的岩浆热液活动密切相关。松潘甘孜造山带稀有金属矿床成矿年代学对比显示, 党坝、李家沟、雪宝顶和甲基卡等矿床具有相似的成矿类型和成矿年龄, 形成于造山后构造背景。松潘甘孜造山带印支晚期和燕山早期存在大规模的锂铌钽铍锡稀有多金属成矿事件。

关键词:锡石 U-Pb 定年; 花岗伟晶岩; 稀有金属; 党坝; 可尔因矿田

锂(铍铌钽锡)等稀有金属是具有重要战略价值的新兴能源金属和关键战略金属, 在高新技术、航空、冶金和新能源汽车等领域有重要战略价值(Li Jiankang et al., 2014, 2019; Wang Denghong, 2019)。四川松潘-甘孜锂矿带(又称雅江-马尔康大型锂矿带)是一个 Li-Cs-Ta-Rb-W-Sn-Be 稀有金属成矿带, 位于四川西部的阿坝州和甘孜州, 是我国重要的花岗伟晶岩型稀有金属成矿带(Xu Zhiqin et al., 2018)。随着近年来勘查工作的进一步深入, 该成矿带内发现了甲基卡和可尔因两个超大型花岗伟晶岩型稀有金属矿田(图 1a)。党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床(以下简称党坝矿床)位于四川省阿

坝州马尔康县党坝乡, 可尔因矿田东南部, 李家沟花岗伟晶岩型稀有金属矿床(以下简称李家沟矿床)的北东侧(图 1a), 2004~2008 年由四川省地质矿产勘查开发局攀西地质大队开展普查和初步详查工作。2011~2012 年由四川省地质矿产勘查开发局化探队开展储量核实以及补充详查工作, 2014 年继续开展详查工作, 在 2015 年提交锂资源量 66.08 万吨(Li₂O 平均 1.34%), 铌 4436 t、钽 2184 t、铍 20789 t、锡 228960 t(铷为分散元素, 未进行资源量估算), 超过李家沟矿床的锂资源量(51.2 万吨), 是亚洲第二大花岗伟晶岩型稀有金属矿床, 已经达到超大型规模, 预测资源量可望达到 100 万吨(Gu Chenghui

注:本文为国家自然科学基金(编号 41702074)、四川省科技厅应用基础研究项目(编号 2019YJ0285)、四川省教育厅自然科学重点项目(编号 17ZA0039)和成都理工大学中青年教学骨干教师(编号 JXGG201701)资助的成果。

收稿日期:2019-08-15; 改回日期:2019-12-09; 网络发表日期:2020-02-05; 责任编辑:范宏瑞; 责任编辑:周健。

作者简介:费光春, 男, 1982 年生。副教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 研究方向:地球化学及矿床学。Email: feiguangchun07@cdut.cn。

引用本文:费光春, 杨峥, 杨继忆, 罗伟, 邓运, 赖宇涛, 陶鑫鑫, 郑砾, 唐文春, 李剑. 2020. 四川马尔康党坝花岗伟晶岩型稀有金属矿床成矿时代的限定:来自 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年的证据. 地质学报, 94(3): 836~849, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020137.
Fei Guangchun, Yang Zheng, Yang Jiyi, Luo Wei, Deng Yun, Lai Yutao, Tao Xinxin, Zheng Luo, Tang Wenchun, Li Jian. 2020. New precise timing constraint for the Dangba granitic pegmatite type rare-metal deposit, Markam, Sichuan Province, evidence from cassiterite LA-MC-ICP-MS U-Pb dating. Acta Geologica Sinica, 94(3): 836~849.

et al., 2014; Fei Guangchun et al., 2018a; Wang Ziping et al., 2018)。前人对可尔因矿田的花岗伟晶岩以及李家沟矿床主要开展了花岗岩和花岗伟晶岩锆石 U-Pb、全岩 Rb-Sr、伟晶岩地质特征及分类、成矿流体来源以及成矿规律的研究工作(Liao Yuan'an et al., 1992; Li Jiankang et al., 2006; Gu Chenghui et al., 2014; Fei Guangchun et al., 2014, 2015, 2018a, 2018b; Deng Yun et al., 2018)。对于党坝矿床(Li-Be-Nb-Ta-Sn)而言,由于主矿体(Ⅷ号花岗伟晶岩脉)2011年才开展补充详查工作,综合研究工作比较滞后,目前仅仅开展了矿床地质特征以及成矿规律与找矿方向的研究(Pang Bo et al., 2015; Wang Ziping et al., 2018)。成矿年代学研究方面,前人仅对党坝矿床规模较小的Ⅱ号花岗伟晶岩型锂矿脉开展了白云母⁴⁰Ar-³⁹Ar定年(Li Jiankang et al., 2006),直接成矿年龄研究工作尚未开展,制约了对党坝矿床的成矿过程以及成因机制的认识。

锡石属于四方晶系金红石族矿物,结构性质比较稳定,且 U-Pb 体系的封闭温度高,不易受到后期热液作用的影响,是理想的 U-Pb 定年矿物。锡石是伟晶岩中的常见矿物,并且与钠长石、石英、铌钽铁矿以及其他稀有金属矿物共生。伟晶岩的结晶速度很快,同一期伟晶岩中锡石和其他稀有金属矿物是同时形成的,因此可以作为含锡稀有金属伟晶岩的直接定年矿物,并且可以厘定花岗伟晶岩型稀有金属矿床的形成时代(Yang Yueqing et al., 2003; Cui Yurong et al., 2017; Zhang Rongqing et al., 2017)。本文在前人研究的基础上,对党坝矿床规模最大的Ⅷ号花岗伟晶岩脉开展锡石电子探针波谱成分分析以及 LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年研究,厘定成矿时代,并开展松潘甘孜造山带花岗伟晶岩型稀有金属矿床锡石成分特征以及年代学对比研究,为党坝矿床成因研究以及进一步找矿勘查提供理论依据。

1 地质背景

可尔因稀有金属矿田位于青藏高原东缘的松潘-甘孜造山带中部,四川盆地的西部。松潘-甘孜造山带是三叠纪晚期古特提斯洋闭合、华北板块和羌塘-昌都板块与扬子板块的相互俯冲、陆内碰撞作用下,形成的一个约 220000km²的三角形地带(图 1a)(Xu Zhiqin et al., 1992, 2018)。可尔因稀有金属矿田的形成经历了古特提斯和新特提斯两个造山

阶段,发育了巨厚的西康群复理石沉积,构造形迹复杂。区域出露的地层主要是西康群(图 1b),包括三叠系上统杂谷脑组(T₃z)、侏倭组(T₃zw)、新都桥组(T₃x)(Li Jiankang et al., 2006)。由于印支期以来的抬升并且遭受风化剥蚀,区域上缺失侏罗系、白垩系和第三系的地层。三叠系内部各地层单元依次呈整合接触关系,与第四系呈不整合接触。其岩性主要由一系列灰黑色长英质砂岩、粉砂岩、绢云母板岩、泥质板岩及灰岩等组成。由于受到印支末期的褶皱造山运动的影响,该区域内分布着大量表现为褶皱的北西西向构造、北西向构造、东西向构造等;燕山期水平挤压应力场的作用使得区域内北东向断裂构造发育(Xu Zhiqin et al., 1992)。其中对区域控矿有意义的主要褶皱构造有可尔因-日隆关复式背斜和俄斯特背斜;主要断裂为北东向的逆冲断层。

区域上出露的岩浆岩主要为太阳河岩体和可尔因岩体(图 1b)。太阳河岩体主要包括石英闪长岩和黑云母二长花岗岩两种类型,局部含少量含石榴子石黑云母花岗岩。石英闪长岩分布于热达门附近,呈倒三角形态;黑云母二长花岗岩位于业隆沟西侧,以岩株的形式产出,形态不规则,侵入以及吞蚀热达门石英闪长岩。可尔因岩体包括斑状黑云母钾长花岗岩、二云母花岗岩、黑云母二长花岗岩和白云母(钠长)花岗岩。二云母花岗岩面积最大,形态上呈三叉状岩基,沿可尔因背斜核部侵入,面积达 188 km²(Liao Yuan'an et al., 1992)。白云母(钠长)花岗岩出露面积较小,零星分布于可尔因岩体东南部的根则附近,位于李家沟和党坝两个矿床中间(图 2)。花岗伟晶岩分布特征方面,主要以二云母花岗岩为中心,边缘带为花岗细晶岩,细晶岩与微斜长石(钠长石)伟晶岩呈渐变过渡或者穿插(图 3a)。花岗伟晶岩脉在距可尔因岩体 0~5000m 范围的地层中成群成带分布。根据不同分带伟晶岩的矿物组成,水平方向依次出露(Ⅰ)微斜长石伟晶岩带(0~800m)、(Ⅱ)微斜长石钠长石伟晶岩带(800~1500m)、(Ⅲ)钠长石伟晶岩带(1500~2300m)、(Ⅳ)钠长石锂辉石伟晶岩带(2300~5000m)、(Ⅴ)锂云母伟晶岩脉(>5000m)(Gu Chenghui et al., 2014)(图 1b)。在垂向上,伟晶岩类型由切割最深地段由下至上具有不完整的Ⅰ→Ⅱ→Ⅲ→Ⅳ→石英脉的垂向变化特征。一条花岗伟晶岩脉也可能包含两种到三种伟晶岩类型。例如在白云母(钠长)花岗岩附近出露微斜长石伟晶岩、微斜长石钠长石伟晶

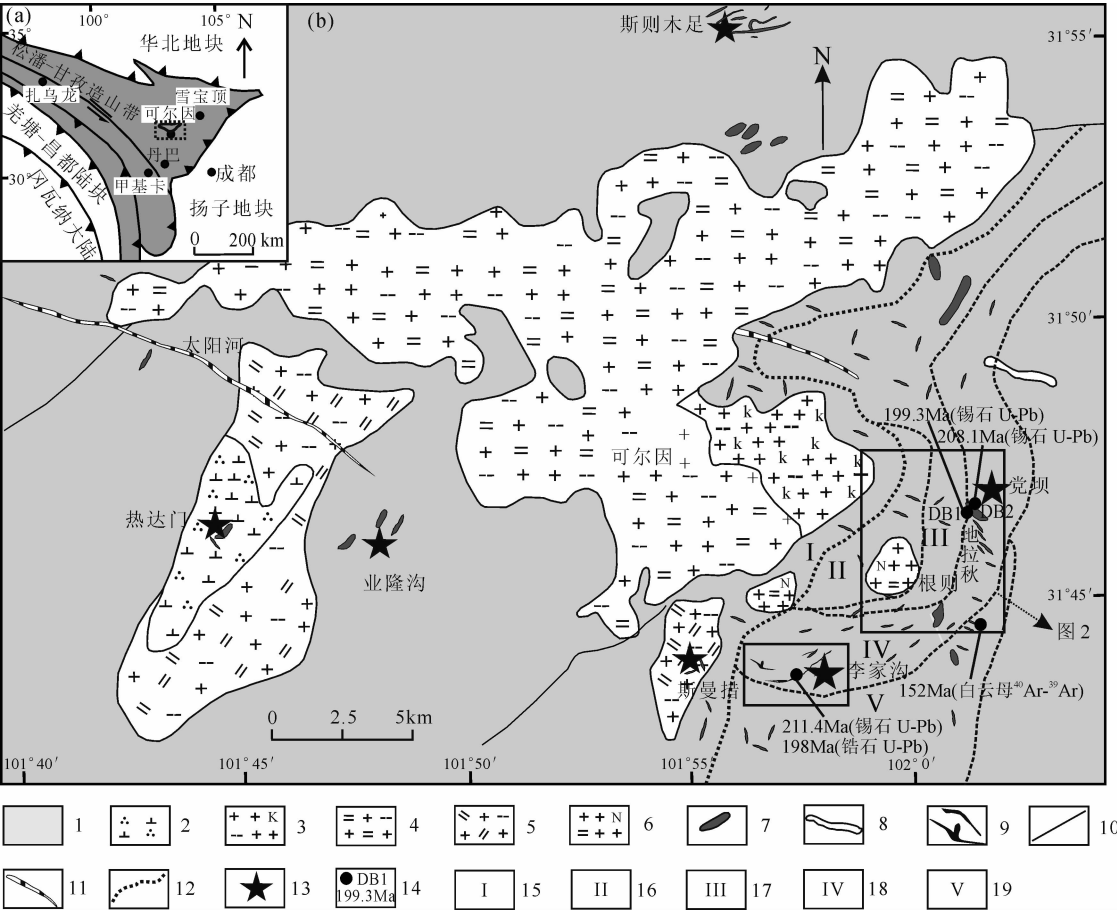


图 1 松潘-甘孜造山带大地构造位置图(a)及可尔因矿田地质简图(b)
(据 Li Jiankang et al., 2006; Deng Yun et al., 2018 修编)

Fig. 1 Geographic tectonic position of the Songpan-Ganzê orogenic belt (a) and simplified geological map of the Ke'erlyin orefield (b) (modified from Li Jiankang et al., 2006; Deng Yun et al., 2018)

1—三叠纪西康群; 2—石英闪长岩; 3—黑云母钾长花岗岩; 4—二云母花岗岩; 5—黑云母二长花岗岩; 6—白云母钠长花岗岩; 7—花岗伟晶岩; 8—石英脉; 9—伟晶岩矿体; 10—断层; 11—背斜轴部; 12—类型分带线; 13—伟晶岩矿床; 14—采样编号及年龄; 15—微斜长石伟晶岩带; 16—微斜长石钠长石伟晶岩带; 17—钠长石伟晶岩带; 18—钠长石锂辉石伟晶岩带; 19—锂云母伟晶岩带

1—Triassic Xikang Group; 2—quartz diorite; 3—biotite moyite; 4—two-mica granite; 5—biotite monzogranite; 6—muscovite albite granite; 7—pegmatite; 8—quartz vein; 9—pegmatite orebody; 10—fault; 11—anticline; 12—zoning line; 13—pegmatite deposit; 14—sample number and ages; 15—microcline pegmatite zone; 16—microcline albite pegmatite zone; 17—albite pegmatite zone; 18—albite spodumene pegmatite zone; 19—lepidolite pegmatite zone

岩以及钠长石伟晶岩。伟晶岩脉主要顺地层产出, 呈(似)层状和透镜状, 少量不规则状(图 3b, c); 偶见部分伟晶岩脉切层产出, 形态以透镜状为主(图 3d)。其次是沿着褶皱转折端或背斜的两翼产出, 以似层状和透镜状为主, 少量不规则状。随着近年来地质找矿勘查工作进一步深入, 围绕可尔因岩体发现了多个大中型稀有金属矿床, 包括李家沟、党坝、业隆沟、斯曼措、斯则木足、热达门等(图 1b)。

2 矿床地质特征

党坝矿区出露的地层包括三叠系中统杂谷脑组(T_3z)、三叠系上统侏倭组(T_3zw)以及第四系(Q)

(图 2a)。杂谷脑组地层的岩性主要为深灰色以及灰色中层到厚层状黑云母石英角岩, 夹长英角岩以及浅灰色薄层状千枚板岩(Pang Bo et al., 2015)。侏倭组地层的岩性主要为(深)灰色中层到厚层黑云母长英角岩、透辉长英角岩、石英角岩、角闪角岩以及灰色角岩化绢云母板岩与碳质绢云母板岩互层。其原岩是一套滨海-浅海相沉积岩, 包括碳泥质岩、长石石英细砂岩、粉砂岩以及杂砂岩, 显示明显的韵律式互层的特征。根据矿物组合以及岩性特征, 可以将侏倭组地层划分为四段($T_3zw^1-T_3zw^4$)。侏倭组一段(T_3zw^1)岩性主要为灰色—深灰色厚层到块状(黑云)长英角岩与灰色中层状角岩化绢云母板

岩互层。侏倭组二段($T_3z\omega^2$)主要岩性为灰色—深灰色中厚层状黑云长英角岩、黑云石英角岩、灰黑色中厚层状碳质黑云石英角岩与灰色中层状角岩化绢云板岩互层。底部以黑云长英角岩与阳起长英角岩接触界线为一段与二段的分界线。侏倭组三段($T_3z\omega^3$)岩性为灰色、深灰色中厚层状角闪石英角岩、透辉长英角岩与灰色中层绢云板岩互层,偶见灰色中层状黑云长英角岩的夹层,底部为透辉长英角岩,以绢云母板岩为分段界线。侏倭组第四段($T_3z\omega^4$)主要岩性为灰色—深灰色中厚层状黑云长英角岩、黑云石英角岩,与灰色绢云板岩互层产出;底部为黑云石英角岩,以绢云母板岩为分段界线。第四系(Q)为残坡积物,少量浮土以及碎石层,主要

分布在沟谷坡地的低洼处(图 2a)。

党坝矿床整体位于地拉秋复式倒转向斜的北西翼,出露的褶皱有高尔达向斜和高尔达沟背斜(Wang Ziping et al., 2018)。矿区北部出露 F_1 断层(图 2a),呈 NE-SW 走向,倾向南东,倾角 89° 。该断层为成矿后断层,错断了矿体(VIII、IX、X 和 XI 号)。 F_1 断层面地表出露长度约 1200m,错动平距达到 26m,断层性质为压扭性断层,在地表可见破碎带(宽约 1m),断层两侧岩石比较破碎。矿区节理较为发育,成矿前后均有发育,主要为北西-南东向,次为北东-南西向以及近东西向。花岗伟晶岩脉沿北西-南东向贯入形成花岗伟晶岩型稀有金属矿体。矿区仅有花岗伟晶岩脉(图 2a)。含矿花岗伟晶岩脉的产状

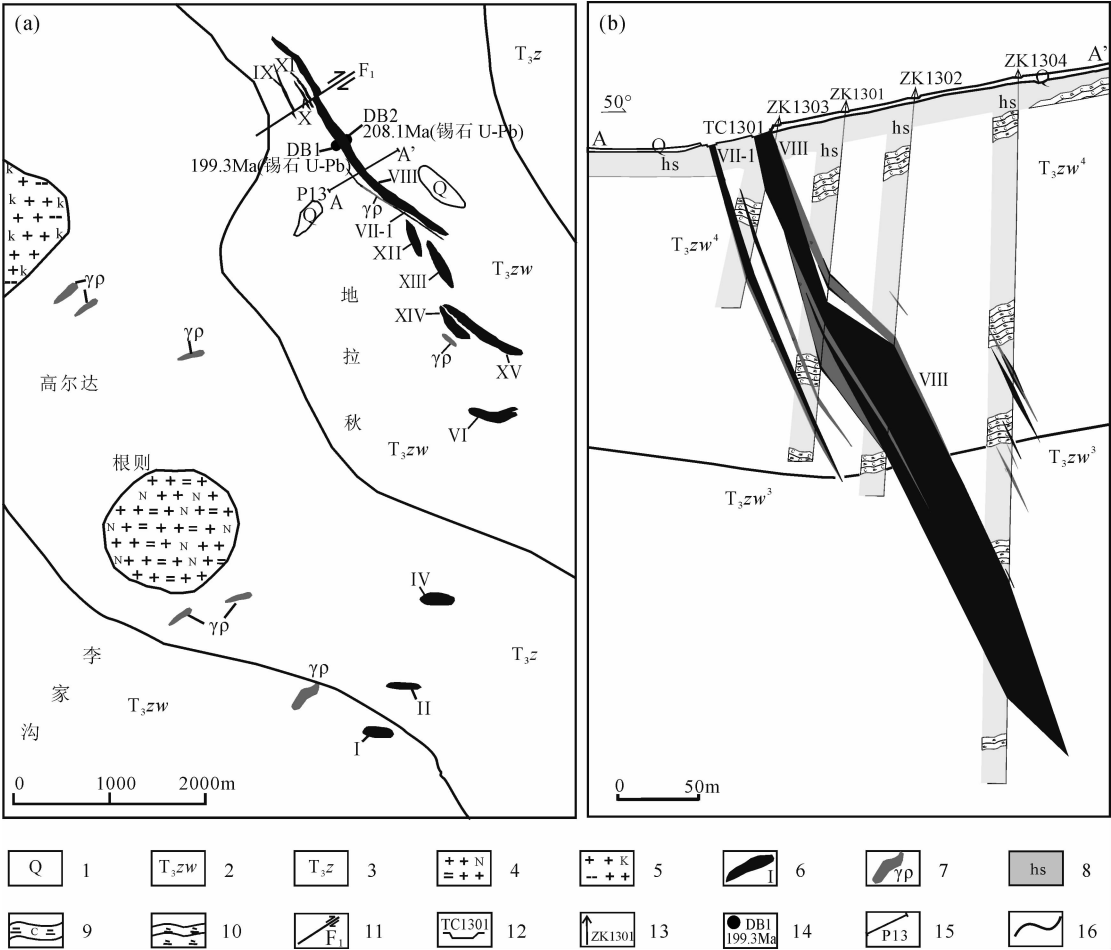


图 2 党坝矿区地质图(a)和 13 号勘探线剖面图(b)(据 Wang Ziping et al., 2018 修编)

Fig. 2 Geological map of the Dangba deposit (a) and the section of line 13 (b) (modified from Wang Ziping et al., 2018)

1—第四系; 2—三叠系上统侏倭组; 3—三叠系上统杂谷脑组; 4—白云母钠长花岗岩; 5—黑云母钾长花岗岩; 6—矿体及编号; 7—伟晶岩脉; 8—黑云母长英角岩; 9—碳质绢云母板岩; 10—绢云板岩; 11—断层及编号; 12—探槽及编号; 13—钻孔及编号; 14—采样编号及年龄; 15—勘探线剖面及编号; 16—地质界线

1—Quaternary; 2—Upper Triassic Zhuwo Formation; 3—Upper Triassic Zagunao Formation; 4—muscovite albite granite; 5—biotite moyite; 6—orebody and number; 7—pegmatite; 8—biotite felsic hornfel; 9—carbonaceous sericite slate; 10—sericite slate; 11—fault and number; 12—trench and number; 13—drill hole and number; 14—sample number and age; 15—exploration section and number; 16—geology boundary

主要受产出部位节理裂隙的控制。除Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ和Ⅵ号脉体产于近东西向节理裂隙外,其余脉体均产于倾向北西-南东向的节理裂隙中,倾角一般 $45^{\circ}\sim 85^{\circ}$,脉体间相互平行产出,特别是在Ⅷ号脉体附近(图2a)。不含矿花岗伟晶岩脉主要受北东-南西向节理控制,少数受北西-南东向节理控制。

在矿区范围内总共发现52条花岗伟晶岩脉。不含矿的花岗伟晶岩脉15条(10条出露,5条隐伏),脉体规模较小,呈单脉产出,长一般20~40m,最长120m,厚一般为0.7~1.5m,最厚2.5m。具有锂矿化的脉体37条,前人圈定具有工业价值矿体15条(图2a),地表出露12条,隐伏3条。矿化花岗伟晶岩类型主要是锂辉石钠长石伟晶岩,少量锂云母钠长石伟晶岩。锂辉石钠长石伟晶岩基本上全脉锂矿化,矿体形态以脉状为主,透镜状次之(图2b)。矿体产状和花岗伟晶岩脉产状近于一致,分支复合现象不显著。矿体规模大,一般长160~800m,最长2832m;一般厚2~30m,最厚63.5m。一般延深很大,常达150m以上,深部矿体厚度往往和脉体厚度近于一致。锂云母花岗伟晶岩主要产在岩脉顶(边)部,呈透镜状,规模小,一般长20~40m,厚2~4m。矿化有一定部位,延深仅15~20m,且厚度迅速变小;锂云母花岗伟晶岩与锂辉石花岗伟晶岩之间没有明显的分界线,呈渐变关系。根据地表观察及工程揭露,矿体沿走向尖灭方式包括二种形式:一是矿体厚度沿走向逐渐减小或分岔,这是党坝矿体的主要尖灭方式;二是工业锂矿物(锂辉石为主)沿走向逐渐减少直至没有,即因锂辉石减少而尖灭。

党坝矿床完成勘探工作的有6条稀有金属脉体(Ⅵ,Ⅶ,Ⅷ,Ⅸ,X和Ⅺ)。位于矿区北部的Ⅷ号花岗伟晶岩脉规模最大,总体走向 $136^{\circ}\sim 338^{\circ}$,总体倾向 46° ,地表出露长度2832m,地表出露高程3757m(最北西端)至4159m(矿体中部),相对高差402m,形态为大脉状,地表未出现分支复合。矿体厚度介于1.7~57.8m之间,平均厚度为27.6m。品位一般1.00%~1.52%,最高3.31%,平均达到1.34%,品位变化系数为36.94%。Ⅷ号花岗伟晶岩脉由两期岩浆作用叠加而成,晚期的伟晶岩脉切割了早期的伟晶岩脉(Wang Ziping et al., 2018)。早期形成的花岗伟晶岩脉位于Ⅷ号矿体上部,包括钠长石伟晶岩、锂辉石钠长石伟晶岩等类型。晚期形成的花岗伟晶岩脉包括含锂云母锂辉石钠长石伟晶岩和锂辉石钠长石伟晶岩两种岩石类型,两种含矿花岗伟晶

岩脉被黑云母长英角岩隔断(Wang Ziping et al., 2018)。据野外观察,靠近海拔高(3900m)的地段,花岗伟晶岩以钠长石伟晶岩和钠长石锂辉石伟晶岩为主,靠近海拔低(3800m以下)的地段,伟晶岩脉有钠长石锂辉石伟晶岩和含锂云母钠长石锂辉石伟晶岩两种岩石类型。

党坝矿床矿石主要为块状构造,次为条带状和斑杂状构造。块状构造中,锂辉石主要呈规定向平行排列的特点,垂直脉壁并且分布相对均匀;绿柱石则主要以块状或者不规则状集合体的形式分布在致密块状石英的周围。粗晶、中晶以及细晶锂辉石平行于长条形的微斜长石或者板状钠长石,或与粒状石英相间排列,形成条带状构造矿石。矿石结构包括伟晶结构、粗晶结构、中晶结构、细晶结构、交代文象结构以及压碎结构等。矿石矿物包括锂辉石(图3e, f)和锂云母(图3g~j, l),少量绿柱石、铌钽铁矿(图3l)、锡石(图3g, h, k)以及含铷天河石。脉石矿物主要有微斜长石、钠长石(图3g~i, k)、石英(图3g~i, k)、白云母(图3f, h, k)、黑云母、电气石(图3f)和石榴子石等。副矿物或后期热液交代的矿物主要有黑钨矿、磁铁矿、榍石、透锂长石、霞石(图3j)、绢云母、黄玉等。

3 样品采集和分析方法

本次锡石定年研究的样品采集自党坝矿床的露天采场(海拔3900m)。其中钠长石锂辉石伟晶岩(DB2)采集自Ⅷ号花岗伟晶岩脉的中部,含锂云母钠长石锂辉石伟晶岩(DB1)采集自Ⅷ号花岗伟晶岩脉的边部。钠长石锂辉石伟晶岩呈乳白色,块状构造,花岗伟晶结构。主要由锂辉石(10 vol%~15 vol%)、石英(25 vol%~35 vol%)、钠长石(40 vol%~45 vol%)、白云母(3 vol%~5 vol%)与铁锰质暗色矿物(2 vol%~5 vol%)组成。其中大多数锂辉石晶体长2~5cm,宽0.5~2cm。含锂云母钠长石锂辉石伟晶岩呈灰白色,块状构造,花岗伟晶结构。主要由锂辉石(10 vol%~12 vol%)、锂云母(3 vol%~5 vol%)。石英(30 vol%~35 vol%)、钠长石(35 vol%~40 vol%)、铁锰质暗色矿物(5 vol%~10 vol%)与白云母(2 vol%~3 vol%)组成。大多数锂辉石晶体长2~3cm,宽0.2~1cm。镜下观察显示,锡石呈深红褐色或者深褐色,具有多色性,自形至半自形粒状结构,多裂理。锡石周围常见铌钽铁矿、锂云母、白云母、钠长石和石英等矿物(图3g~l)。

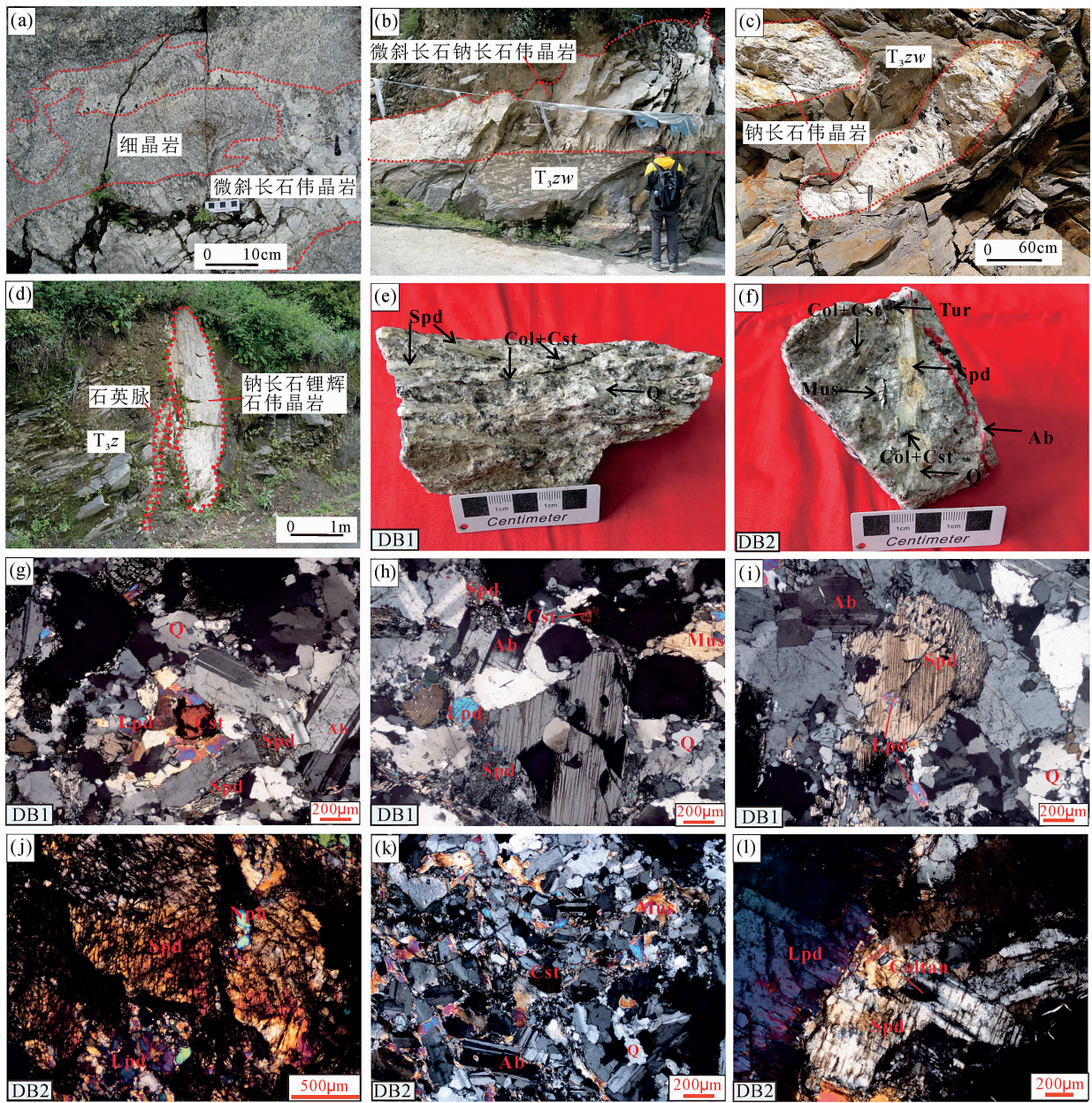


图 3 党坝花岗伟晶岩野外照片及镜下照片

Fig. 3 Field photos, hand specimens and polarizing microscope images of Dangba granitic pegmatites

(a)—微斜长石伟晶岩穿插在细晶岩中;(b)—侏倭组(T_3z)顺层产出的透镜状微斜长石钠长石伟晶岩;(c)—侏倭组(T_3z)顺层产出的透镜状钠长石伟晶岩;(d)—杂谷脑组(T_3z)中切层产出的钠长石锂辉石伟晶岩;(e)—锂辉石伟晶岩中的细晶锂辉石(Spd), 铌钽铁矿和锡石氧化物(Col+Cst)和石英(Q);(f)—钠长石锂辉石伟晶岩(中晶)锂辉石, 电气石, 钠长石, 石英, 铌钽铁矿和锡石氧化物, 白云母;(g~i)—DB1 显微镜下照片(锂辉石, 锡石, 锂云母, 钠长石, 石英, 白云母);(j~l)—DB2 显微镜下照片(锂辉石, 锡石, 铌钽铁矿, 锂云母, 石英, 钠长石, 白云母, 霞石); Cst—锡石; Col—铌钽铁矿; Spd—锂辉石; Lpd—锂云母; Q—石英; Ab—钠长石; Mus—白云母; Tur—电气石; Nph—霞石

(a)—Fine-grained aplite and associated microcline pegmatite; (b)—microcline albite pegmatite penetrated into the Zhuwo Formation; (c)—albite pegmatite pegmatite penetrated into the Zhuwo Formation; (d)—albite spodumene pegmatite penetrated into the Zagunao Formation; (e)—sample of spodumene pegmatite, with fine-grained spodumene, coltan, cassiterite, and quartz; (f)—sample of albite spodumene pegmatite, with medium-grained spodumene, tourmaline, albite, quartz, coltan, cassiterite and muscovite; (g~i)—photomicrographs of spodumene, cassiterite, lepidolite, albite, quartz and muscovite in spodumene pegmatite (DB1); (j~l)—photomicrographs of spodumene, cassiterite, coltan, lepidolite, quartz, albite, muscovite and nepheline in spodumene pegmatite (DB2); Cst—cassiterite; Col—coltan; Spd—spodumene; Lpd—lepidolite; Q—quartz; Ab—albite; Mus—muscovite; Tur—tourmaline; Nph—nepheline

锡石单矿物分选、制靶和背散射图像在河北省廊坊市诚信地质服务公司完成。选取新鲜样品进行机械破碎,经磁选、重选和在双目镜下挑选得到透明度和晶形较好的锡石。将挑选的锡石样品用双面胶粘在载玻片上,放上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中,待树脂充分固化后将样品座从载玻片上剥离,对其进行抛光制靶。最后根据锡石背散射(图 4a,c)、反射光和透射光图像,选取合适的锡石测点位置,以避开裂隙和包裹体,从而减少普通铅的影响。锡石电子探针成分分析在成都理工大学电子探针实验室完成。仪器型号为日本岛津 EPMA-1720,测试条件为加速电压=15kV,速流强度=10nA,束斑直径为 5 μ m;测试方法为波普定量分析,数据修正方式为 ZAF3。电子探针的选点在开展了锡石 U-Pb 定年点位的附近,并且避开暗色的包体,点位图见图 4a,c。锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素测年在中国地质调查局天津地质研究所分析,分析仪器为 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪以及 193nm 激光取样系统(LA-ICP-MS)。波长为 193nm,脉冲宽度为 5ns,在 LA-MC-ICP-MS 分析过程中,采用 ID-TIMS

U-Pb 年龄的锡石(AY-4, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄=158.2 $\pm$ 0.4Ma)作为测量外标,校正仪器分析过程及激光剥蚀过程中的 U-Pb 分馏(Yuan Shunda et al., 2011)。采用 Isoplot 软件完成锡石 $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ - $^{238}\text{U}/^{207}\text{Pb}$ 谐和年龄计算及谐和图的绘制(Ludwig, 2003)。

4 分析结果

4.1 锡石电子探针成分分析

从锡石的背散射图像(图 4a, c)可以看出,锡石呈灰白色,以独立矿物的形式赋存于花岗伟晶岩中,自形或者半自形结构。锡石颗粒长约 100~300 μ m 不等,宽约 100~200 μ m 不等,锡石成分均一,无明显环带发育。部分锡石中含有一定量的黑色锆钽矿物的包体。锡石电子探针波谱定量分析结果见表 1。含锂云母钠长石锂辉石伟晶岩(DB1)中 9 颗锡石的 SnO₂ 含量较高(>96.71%, 平均值 98.33%);少量的 Nb₂O₅ (0.06%~1.79%, 平均值 0.98%)、Ta₂O₅ (0.28%~1.68%, 平均值 0.64%)、FeO (0.07%~0.71%, 平均值 0.45%)、MnO(0.00%~0.12%, 平均值 0.03%)。钠长石锂辉石伟晶岩(DB2)

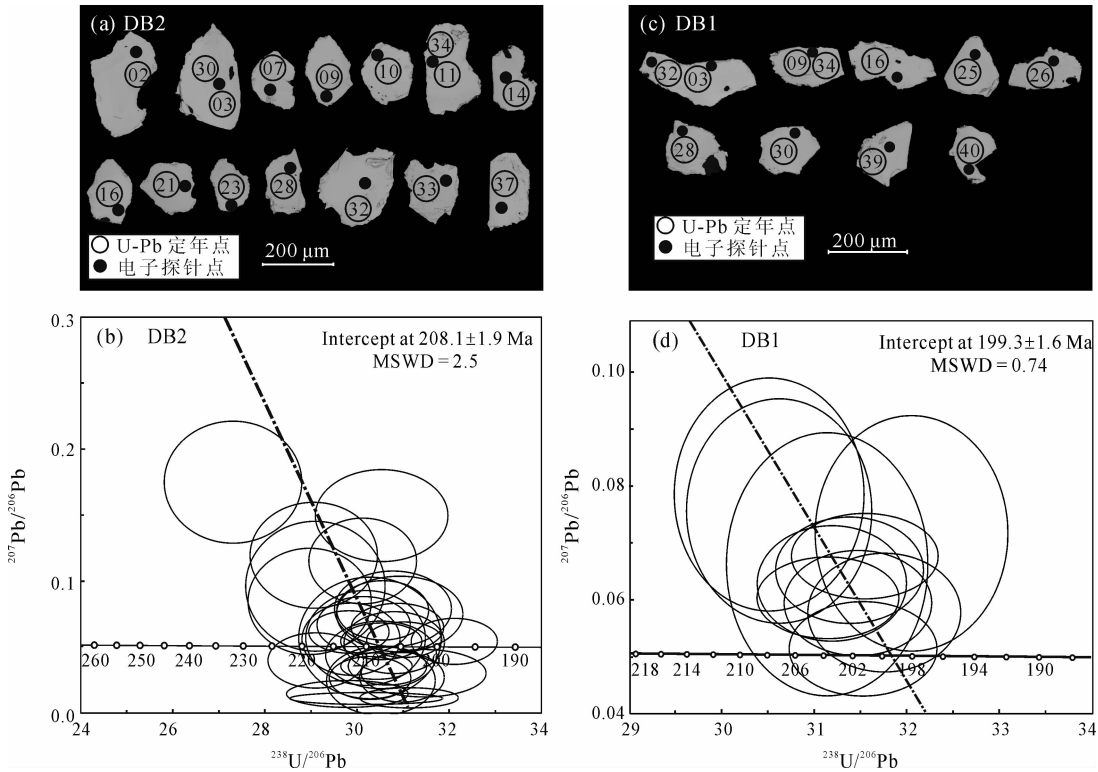


图 4 党坝矿床锡石背散射图像(a,c)和锡石 U-Pb 谐和年龄图(b,d)
Fig. 4 Back-scattered electron (BSE) images (a, c) and U-Pb Tera-Wasserburg concordia plots (b, d) of cassiterite from the Dangba deposit

表 1 党坝锂辉石伟晶岩中的锡石电子探针成分(配位数 4)
Table 1 Major element chemical composition of the cassiterite from the Dangba spodumene pegmatites
analyzed by EMPA (structural formula based on 4 oxygens)

样号	DB1-3	DB1-9	DB1-16	DB1-25	DB1-26	DB1-28	DB1-30	DB1-32	DB1-39	DB1-40	DB2-2	DB2-3
TiO ₂	0.02	0.06	0.03	—	0.10	0.02	0.03	0.05	0.05	—	—	0.06
MnO	0.02	0.03	0.05	—	—	—	—	0.01	0.04	0.12	—	0.02
Ta ₂ O ₅	0.29	0.32	1.04	0.65	0.28	0.71	0.51	0.62	0.64	1.68	0.57	0.67
FeO	0.45	0.38	0.71	0.23	0.71	0.07	0.44	0.54	0.50	0.55	0.33	0.66
ZrO ₂	0.03	0.05	0.08	0.04	0.10	—	—	0.10	0.06	—	0.10	0.12
Sc ₂ O ₃	—	—	0.02	0.02	0.05	0.02	—	—	—	—	—	0.04
SnO ₂	98.43	99.16	96.71	99.46	98.16	100.25	98.55	97.84	97.32	96.72	98.33	97.03
Nb ₂ O ₅	0.73	0.86	1.79	0.43	0.93	0.06	0.87	1.30	1.40	1.64	0.92	1.08
WO ₃	0.14	0.22	0.18	0.06	0.14	—	0.02	—	0.20	—	0.15	0.09
MgO	0.09	0.08	0.07	0.06	0.05	0.08	0.07	0.08	0.10	0.10	0.04	0.07
Al ₂ O ₃	0.24	0.13	0.06	0.02	0.38	0.01	0.12	0.18	0.10	0.05	0.06	0.29
Cr ₂ O ₃	—	0.01	—	0.03	—	—	—	0.01	0.03	0.04	0.02	0.03
Total	100.21	101.15	100.68	100.94	100.51	101.2	100.49	100.54	100.31	100.88	100.45	99.83
Ti	0.001	0.002	0.001	—	0.004	0.001	0.001	0.002	0.002	—	—	0.002
Mn	0.001	0.001	0.002	—	—	—	—	0.001	0.002	0.005	—	0.001
Ta	0.004	0.004	0.014	0.009	0.004	0.010	0.007	0.008	0.009	0.023	0.008	0.009
Fe	0.019	0.016	0.029	0.009	0.029	0.003	0.018	0.022	0.021	0.023	0.014	0.027
Zr	0.001	0.001	0.002	0.001	0.002	—	—	0.002	0.001	—	0.002	0.003
Sc	—	—	0.001	0.001	0.002	0.001	—	—	—	—	—	0.002
Sn	1.961	1.946	1.904	1.972	1.926	1.981	1.948	1.926	1.922	1.905	1.948	1.921
Nb	0.016	0.019	0.040	0.010	0.021	0.001	0.019	0.029	0.031	0.037	0.021	0.024
W	0.002	0.003	0.002	0.001	0.002	—	—	—	0.003	—	0.002	0.001
Mg	0.007	0.006	0.005	0.004	0.003	0.006	0.005	0.006	0.007	0.007	0.003	0.005
Al	0.014	0.008	0.003	0.001	0.022	—	0.007	0.010	0.006	0.003	0.003	0.017
Cr	—	—	—	0.001	—	—	—	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001
Total	2.011	1.998	2.001	2.007	1.993	2.001	2.000	1.996	1.998	1.999	1.997	1.996
Nb+Ta	0.020	0.023	0.054	0.018	0.024	0.011	0.026	0.037	0.040	0.059	0.028	0.033
Mn+Fe	0.020	0.017	0.031	0.009	0.029	0.003	0.018	0.023	0.022	0.027	0.014	0.028
样号	DB2-7	DB2-9	DB2-10	DB2-11	DB2-14	DB2-16	DB2-21	DB2-23	DB2-28	DB2-32	DB2-33	DB2-37
TiO ₂	0.05	0.11	0.01	0.08	0.03	0.01	—	—	—	—	0.06	0.02
MnO	0.05	—	0.10	0.04	—	—	0.06	0.05	0.02	—	0.01	—
Ta ₂ O ₅	1.37	0.22	3.70	0.24	0.29	0.37	0.16	0.36	0.83	0.06	0.49	0.39
FeO	0.93	0.64	0.63	0.40	0.25	0.17	0.13	0.07	0.21	—	0.44	0.31
ZrO ₂	0.19	0.09	0.12	0.10	0.09	—	0.04	0.08	0.10	0.04	—	0.12
Sc ₂ O ₃	0.03	—	—	0.06	—	—	—	—	0.01	0.04	0.03	0.01
SnO ₂	95.75	98.39	95.37	99.13	98.92	99.51	99.37	100.05	99.15	100.00	99.20	99.35
Nb ₂ O ₅	2.24	0.67	0.91	1.03	0.91	0.24	0.58	0.30	0.17	0.22	0.48	0.78
WO ₃	0.16	0.25	0.11	0.10	0.29	—	0.03	—	—	0.29	—	0.10
MgO	0.06	0.08	0.09	0.07	0.07	0.10	0.06	0.10	0.11	0.11	0.04	0.05
Al ₂ O ₃	0.06	0.37	0.04	0.13	—	0.08	0.01	0.03	0.03	0.03	0.24	0.01
Cr ₂ O ₃	—	—	—	0.03	—	—	0.03	0.03	0.01	0.05	—	0.01
Total	100.83	100.45	101.04	101.24	100.83	100.39	100.43	101.00	100.60	100.76	100.74	101.12
Ti	0.002	0.004	—	0.003	0.001	—	—	—	—	—	0.002	0.001
Mn	0.002	—	0.004	0.002	—	—	0.003	0.002	0.001	—	—	—
Ta	0.018	0.003	0.050	0.003	0.004	0.005	0.002	0.005	0.011	0.001	0.007	0.005
Fe	0.038	0.027	0.026	0.016	0.010	0.007	0.006	0.003	0.009	—	0.018	0.013
Zr	0.004	0.002	0.003	0.002	0.002	—	0.001	0.002	0.002	0.001	0.000	0.003
Sc	0.001	—	—	0.003	—	—	—	—	—	0.002	0.001	—
Sn	1.883	1.936	1.886	1.940	1.953	1.976	1.972	1.975	1.968	1.978	1.954	1.957
Nb	0.050	0.015	0.020	0.023	0.020	0.005	0.013	0.007	0.004	0.005	0.011	0.017
W	0.002	0.003	0.001	0.001	0.004	—	—	—	—	0.004	—	0.001
Mg	0.004	0.006	0.007	0.005	0.005	0.007	0.005	0.007	0.008	0.008	0.003	0.003
Al	0.003	0.022	0.002	0.007	—	0.005	0.001	0.002	0.002	0.002	0.014	0.001
Cr	—	—	—	0.001	—	—	0.001	0.001	—	0.002	—	—
Total	2.006	1.996	1.999	1.999	2.000	2.001	2.001	2.001	2.004	1.999	1.996	2.001
Nb+Ta	0.068	0.018	0.070	0.026	0.024	0.010	0.015	0.011	0.015	0.006	0.017	0.023
Mn+Fe	0.040	0.027	0.031	0.018	0.010	0.007	0.008	0.005	0.010	—	0.018	0.013

注:—代表低于检测下限。

中 14 颗锡石的 SnO₂ 含量较高(>95.37%, 平均值 98.44%); 少量的 Nb₂O₅ (0.17%~2.24%, 平均值 0.77%)、Ta₂O₅ (0.06%~3.70%, 平均值 0.69%)、FeO (0.00%~0.93%, 平均值 0.39%)、MnO (0.00%~0.10%, 平均值 0.02%)。

Fe、Mn 常与 Nb、Ta 一起进入锡石晶格, 所以在锡石中可见成对出现的 Nb-Ta、Fe-Mn (Yang Yueqing et al., 2006)。花岗岩及稀有金属伟晶岩中锡石中的 Nb、Ta 元素含量以及 Ta/(Nb+Ta) 值会逐渐升高, Fe 和 Mn 的含量较低; 热液成因的锡石都比较贫 Nb、Ta, 且 Nb₂O₅ 和 Ta₂O₅ 含量普遍低于 1%, 而 Fe 和 Mn 的含量增高 (Chen Jun et al., 1999)。党坝矿床锡石的 Nb₂O₅ 和 Ta₂O₅ 含量 (表 1) 较高 (平均值 1.67%, DB1; 1.44%, DB2), 而 FeO 和 MnO 含量较低 (平均值 0.48%, DB1; 0.39%, DB2), 显示花岗岩或稀有金属伟晶岩成因锡石特征。在锡石成因判别图解 (Fe+Mn)-(Nb+Ta) 中, 除个别点以外, 主要点呈线性排列 (2:1), 且均落入伟晶岩成因锡石范围 (图 5), 与李家沟的锡石的化学组成相似, 锡石中可能有 (Fe, Mn)(Nb, Ta)₂O₆ 成分, 方程式可能为 3Sn⁴⁺ = (Fe, Mn)²⁺ + 2(Ta, Nb)⁵⁺ (Černý et al., 1989), 不同于新疆大红柳滩矿床的 1:1 线性排列。党坝矿床的锡石产于伟晶岩中, 与钠长石、石英、锂辉石以及铌钽铁矿等矿物共生 (图 3g, h, k), 党坝伟晶岩中锡也达到了工业品位。以上分析表明党坝矿床中的锡石都属于稀有金属伟晶岩成因, 不属于浅成热液矿床成因的锡石 (Nb 和 Ta 含量低, Fe 和 Mn 含量相对高)。因此锡石 U-Pb 定年可以代表党坝矿床的直接年龄。

4.2 锡石 U-Pb 定年

党坝矿床Ⅷ号花岗伟晶岩脉两件样品 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果见表 2。钠长石锂辉石伟晶岩 (DB2) 的锡石 ²³⁸U/²⁰⁶Pb 的比值变化范围为 29.7~31.68, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 比值范围为 0.01~0.18, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb-²³⁸U/²⁰⁶Pb 谐和年龄为 208.1±1.9Ma (n=31, MSWD=2.5)。含锂云母钠长石锂辉石样品 (DB1) 的锡石 ²³⁸U/²⁰⁶Pb 的比值变化范围为 30.51~32.05, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 比值范围为 0.05~0.08, ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb-²³⁸U/²⁰⁶Pb 谐和年龄为 199.3±1.6Ma (n=14, MSWD=0.68)。本次分析的锡石样品中 U 含量较低, 累积的放射性成因 ²⁰⁷Pb 相对较低, 采用 Tera-Wasserburg 图解处理 (图 4b, d) 进行校正, 得到的谐和年龄更加准确 (Cui Yurong et

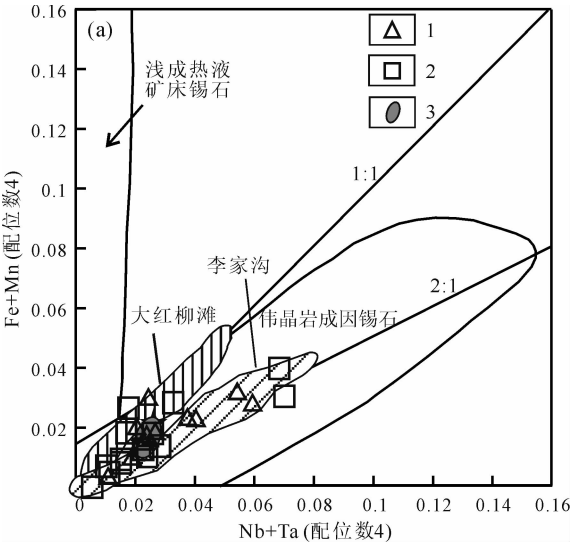


图 5 锡石成因判别图 (底图据 Tindle and Breaks, 1998; 大红柳滩数据来自 Yan Qinhe et al., 2018; 李家沟数据来自 Xu Jiabin et al., 2019; 甲基卡 308 脉来自 Dai Hongzhang et al., 2018)

Fig. 5 Genesis covariation of Fe + Mn vs Nb + Ta (based on 4 oxygens) in cassiterite (after Tindle and Breaks, 1998, Dahongliutan datas from Yan Qinhe et al., 2018; Lijiagou datas from Xu Jiabin et al., 2019; Jiajika No. 308 vein from Dai Hongzhang et al., 2018)

- 1—含锂云母钠长石锂辉石伟晶岩 (DB1);
- 2—钠长石锂辉石伟晶岩; 3—甲基卡 308 号脉
- 1—Lepidolite-bearing albite spodumene pegmatite (DB1);
- 2—albite spodumene pegmatit; 3—Jiajika No. 308 vein

al., 2017), 因此谐和年龄 208.1Ma 和 199.6Ma 可以代表锡石结晶年龄, 即党坝Ⅷ号花岗伟晶岩脉的形成的年龄。

5 讨论

5.1 党坝以及松潘甘孜造山带稀有金属花岗伟晶岩成矿时代

可尔因矿田内花岗伟晶岩成群成带分布, 稀有金属花岗伟晶岩的形成可能与可尔因岩体具有时空关系和成因关系 (Li Jiankang et al., 2006; Fei Guangchun et al., 2018a; Deng Yun et al., 2018)。前人对可尔因二云母花岗岩开展了全岩 Rb-Sr、锆石 U-Pb 定年研究; 对花岗伟晶岩开展了锆石 U-Pb、⁴⁰Ar-³⁹Ar 和 K-Ar 定年研究 (表 3)。花岗岩和花岗伟晶岩的年龄跨度很大, 不同测年方法的年龄差距也较大。⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄往往反映的是热液蚀变的年龄, 热液作用会导致一定程度的 Ar 丢失; 加之 Ar 同位素体系的封闭温度只有 300℃, 稀

表 2 党坝矿床伟晶岩锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 同位素测年结果

Table 2 LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of cassiterite for pegmatite from the Dangba deposit

点号	²³⁸ U/ ²⁰⁶ Pb	Error (2%)	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	Error (2%)
DB1				
DB1. 3	31. 14	2. 85	0. 07	28. 50
DB1. 9	31. 53	2. 07	0. 05	13. 18
DB1. 16	32. 05	2. 65	0. 07	23. 58
DB1. 25	31. 15	2. 01	0. 06	9. 71
DB1. 26	31. 76	2. 13	0. 06	14. 75
DB1. 28	31. 55	2. 05	0. 07	9. 06
DB1. 30	31. 19	2. 11	0. 06	13. 18
DB1. 32	31. 47	2. 07	0. 06	12. 71
DB1. 34	31. 38	2. 08	0. 07	11. 71
DB1. 39	30. 62	2. 67	0. 08	21. 30
DB1. 40	30. 52	2. 74	0. 08	21. 30
DB2				
DB2. 2	31. 13	2. 18	0. 05	19. 57
DB2. 3	30. 63	2. 04	0. 05	17. 88
DB2. 5	30. 78	1. 69	0. 08	14. 76
DB2. 6	31. 56	2. 40	0. 01	29. 54
DB2. 7	31. 00	1. 96	0. 04	12. 82
DB2. 8	30. 42	1. 04	0. 04	11. 50
DB2. 9	31. 57	1. 98	0. 05	11. 18
DB2. 10	29. 70	3. 68	0. 03	28. 26
DB2. 11	31. 68	2. 13	0. 06	14. 99
DB2. 12	30. 81	1. 45	0. 05	17. 96
DB2. 13	30. 18	1. 76	0. 06	25. 76
DB2. 14	30. 79	1. 96	0. 06	9. 88
DB2. 15	29. 82	1. 19	0. 06	10. 70
DB2. 16	30. 88	1. 94	0. 05	9. 85
DB2. 17	30. 53	1. 93	0. 15	9. 51
DB2. 18	30. 97	1. 21	0. 03	28. 32
DB2. 19	31. 02	1. 08	0. 06	9. 89
DB2. 20	30. 12	1. 59	0. 12	11. 51
DB2. 21	30. 70	3. 91	0. 07	27. 97
DB2. 23	30. 43	2. 01	0. 05	15. 06
DB2. 24	30. 92	1. 81	0. 08	15. 60
DB2. 25	29. 06	1. 94	0. 12	13. 71
DB2. 26	30. 28	1. 20	0. 03	25. 00
DB2. 28	30. 70	2. 71	0. 01	27. 36
DB2. 30	30. 77	2. 11	0. 04	20. 92
DB2. 32	31. 39	3. 99	0. 05	31. 55
DB2. 33	31. 26	2. 34	0. 04	28. 77
DB2. 34	31. 24	2. 20	0. 05	17. 35
DB2. 35	27. 31	2. 23	0. 18	10. 79
DB2. 37	31. 20	2. 06	0. 05	13. 27
DB2. 39	30. 56	1. 33	0. 08	11. 80

有金属花岗伟晶岩的云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄可作为热液活动年龄,不宜作为直接的花岗伟晶岩成矿年龄(Wang Qian et al. , 2019)。随着激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)分析测试技术的进步,稀有金属花岗伟晶岩中的锡石 U-

Pb 定年取得了成功(Cui Yurong et al. , 2017),锡石是锡多金属矿床和伟晶岩稀有金属矿床直接定年的理想矿物(Zhang Rongqing et al. , 2017; Yan Qinghe et al. , 2018)。本文开展锡石 U-Pb 定年研究,获得谐和年龄为 208. 1±1. 9Ma 以及 199. 3±1. 6Ma,说明党坝花岗伟晶岩形成于印支晚期以及燕山早期。

党坝矿床中锡石的电子探针成分分析以及成因类型判别(图 5)中,锡石全部落入伟晶岩成因锡石矿床范围内。镜下观察显示,锡石与锂辉石、铌钽铁矿、锂云母、钠长石、石英等矿物共生(图 3g, h, k)。党坝矿床两种含锂伟晶岩(DB1 和 DB2)的锡石中均含一定量的 Nb 和 Ta,且 Nb 的含量高于 Ta(表 1),锡石也是 Nb 和 Ta 的载体矿物。李家沟矿床的锡石中也具有相似的化学成分组成。甲基卡 308 号钠长石锂辉石伟晶岩中的锡石也是 Nb 和 Ta 的载体矿物,其中 Ta 的含量略高于 Nb(Dai Hongzhang et al. , 2018)。西昆仑-喀喇昆仑成矿带的大红柳滩稀有金属矿床中的锡石 Nb 和 Ta 的含量与甲基卡 308 号钠长石锂辉石伟晶岩相似,Nb>Ta,锡石也是 Nb 和 Ta 的载体矿物(Yan Qinghe et al. , 2017)。根据富含稀有金属花岗岩(母岩)与花岗伟晶岩之间的连续结晶分异模型,从早期到晚期,稀有金属结晶顺序为 Be→Be-Nb-Ta→Li-Be-Nb-Ta→Li-Cs-Be-Nb-Ta-Sn (Shearer et al. , 1992),锡矿化形成于稀有金属花岗伟晶岩的中晚期。因此,党坝花岗伟晶岩锡石的谐和年龄(208~199Ma)可以作为党坝矿床的成矿年龄。此外,该年龄也与李家沟含锂辉石伟晶岩中的锆石 U-Pb 年龄(198±3. 4Ma,Fei et al. , 2018b)以及锡石 U-Pb 年龄(211. 4±3. 3Ma,表 3)基本一致,也说明可尔因矿田东南部李家沟和党坝两个超大型稀有金属矿床成矿事件主要发生在印支晚期和燕山早期。

位于青藏高原东缘的松潘甘孜稀有金属成矿带,是中国新疆阿尔泰、西昆仑-喀喇昆仑稀有金属成矿带外的重要的花岗伟晶岩稀有金属成矿带(Xu Zhiqin et al. , 2018)。由于大规模的早期岩浆侵入,产生了大量的花岗伟晶岩,并形成大中型甚至超大型花岗伟晶岩型稀有金属矿床(图 1a),如平武雪宝顶 Sn-W-Be 矿床、石渠扎乌龙 Li-Be-Nb-Ta 矿床、康定-雅江-道孚县交接处的甲基卡 Li-Be-Nb-Ta-Sn 矿床、金川李家沟 Li-Be-Nb-Ta-Sn 矿床和马尔康党坝 Li-Be-Nb-Ta-Sn 矿床。以上矿床主要形成于 215~195Ma 之间(表 3),即稀有金属成矿事

件发生在印支晚期和燕山早期,稀有金属矿床具有相似的成矿时代和成矿类型(花岗伟晶岩型),成母岩均具有过铝质 S 型花岗岩特征,可能受控于连续的构造岩浆演化过程,具有集中成矿的特点。松潘甘孜造山带存在大规模的印支晚期和燕山早期稀有金属成矿事件,形成于同一成矿系统。

表 3 松潘甘孜造山带稀有金属矿床成矿年代学
Table 3 Isotope ages for rare metal deposits in the Songpan-Garze fold belt (SGFB)

矿床	测试对象	测试方法	同位素年龄(Ma)	资料来源
李家沟	钠长石锂辉石伟晶岩	锡石 LA-MC-ICP-MS	211.4±3.3	Xu Jiabin et al. , 2020
	钠长石锂辉石伟晶岩	锆石 LA-ICP-MS	198±3.4	Fei Guangchun et al. , 2018b
党坝	钠长石锂辉石伟晶岩	锡石 LA-MC-ICP-MS	208.1±1.9	本文
	钠长石锂辉石伟晶岩	锡石 LA-MC-ICP-MS	199.3±1.6	本文
可尔因	二云母花岗岩	锆石 LA-ICP-MS	202	Liao Yuan'an et al. , 1992
	二云母花岗岩	全岩 Rb-Sr	206	
	二云母花岗岩	全岩 K-Ar	116~117	
	根则伟晶岩	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	176.25±0.14	Li Jiankang et al. ,2006
	根则南西含锂辉石伟晶岩	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	152.34±0.6	Li Jiankang et al. ,2006
甲基卡	134 锂辉石伟晶岩脉	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	195.67±0.14	Wang Denghong et al. ,2005
	104 钠长石伟晶岩脉	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	198.88±0.3	
	二云母花岗岩	全岩 Rb-Sr	214.65±1.6	Tang and Wu,1984
	308 伟晶岩脉	锡石 LA-MC-ICP-MS	210.9±4.6	Dai Hongzhang et al. , 2018
	二云母花岗岩	锆石 LA-ICP-MS	223±0.3	Hao Xuefeng et al. ,2015
	X03 伟晶岩脉	锆石 LA-ICP-MS	216±2	
	X03 伟晶岩脉	铌钽铁矿 LA-ICP-MS	214±2	
雪宝顶	蒲口岭花岗岩	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	200.6±0.2	Liu Yan et al. , 2010
	盘口花岗岩	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	193.7±1.1	
	白云母伟晶岩	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	189.9±1.8	Li Jiankang et al. ,2007
	白云母伟晶岩	白云母 ⁴⁰ Ar/ ³⁹ Ar	194.50±1.02	Zhang. et al. , 2014
		锡石 LA-MC-ICP-MS	193.6 ± 6	
扎乌龙	白云母花岗岩	锆石 LA-ICP-MS	212	Li Xinjie et al. , 2018
	14 号伟晶岩	铌钽铁矿 LA-ICP-MS	205 ± 2	Li Peng et al. , 2019

5.2 构造背景与成矿规律

松潘甘孜造山带内大规模的花岗质岩浆侵位活动与俯冲挤压或者是碰撞造山伸展活动有关(Xu Zhiqin et al. , 2018)。中亚,北美洲,南美洲,欧洲,非洲以及我国境内主要的大型超大型花岗伟晶岩型稀有金属矿床(如新疆阿尔泰、大红柳滩以及四川松潘-甘孜的雪宝顶、甲基卡、李家沟、党坝和扎乌龙)的形成也与造山过程有关。其中 LCT 型(Li-Cs-Ta-Rb-Be-Sn)稀有金属花岗伟晶岩主要形成于造山后期,与 S 型花岗岩有关;而 NYF 型(Nb-Y-F-Ti-HREE-Sc-Zr)稀有金属花岗伟晶岩则主要形成于后造山期或者非造山期,与 A 型花岗岩有关(Černý P et al. , 2005)。富含多种稀有金属元素,规模大且分带较好的伟晶岩型稀有金属矿床代表了造山后的产物(Wang Denghong et al. , 2005)。可尔因岩体具有过铝质 S 型花岗岩特征,李家沟含锂辉石伟晶岩的过铝质指数高(A/CNK = 1.15 ~ 2.55),属于 LCT 型的稀有金属富锂亚类(Fei Guangchun et al. , 2015),说明李家沟矿床形成于造山后期。同时,甲基卡矿区的马颈子二长花岗岩,

无矿细晶岩和花岗伟晶岩也具有 S 型花岗岩特征,花岗伟晶岩属于 LCT 型稀有金属类型,形成于造山后期(Dai Hongzhang et al. , 2018)。雪宝顶矿床的盘口花岗岩也具有过铝质花岗岩特征,且挥发分组分高,具有富 Sn 矿化花岗岩的特征,分异程度高,属于岩浆演化到晚期的产物(Liu Yan, 2010)。扎乌龙矿床的白云母花岗岩也属于过铝质 S 型花岗岩,花岗伟晶岩属于 LCT 型,形成于印支晚期(Li Xingjie et al. , 2018; Li Peng et al. , 2019)。在印支期,华北板块,羌塘-昌都板块和扬子板块相互碰撞,基底和盖层(三叠纪沉积地层)发生了韧性滑脱剪切带,并伴随大规模的褶皱和逆冲造成地壳的缩短和加厚(Xu Zhiqin et al. , 2018)。积累的热量导致三叠纪地层重熔而形成富含挥发性组分和稀有金属的岩浆,最终结晶分异形成稀有金属伟晶岩矿床(Li Peng et al. , 2019; Wang Denghong et al. , 2019)。因此,松潘甘孜造山带的李家沟、党坝、甲基卡、扎乌龙和雪宝顶等花岗伟晶岩型稀有金属矿床都是古特提斯洋圈闭以后,华北板块,羌塘-昌都板块和扬子板块相互碰撞造山后的产物。

6 结论

(1) 岩相学以及电子探针成分分析表明党坝矿床的锡石以独立矿物形式存在于花岗伟晶岩中, 主要化学成分为 SnO_2 , 并且含 Nb_2O_5 和 Ta_2O_5 。锡石也是铌钽的载体矿物, 成因上属于与稀有金属伟晶岩有关的锡石, 锡石 U-Pb 定年结果可以代表党坝稀有金属花岗伟晶岩脉的年龄。

(2) 锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果显示, 党坝稀有金属花岗伟晶岩形成于印支晚期, 北西-南东向节理控制了矿体的形成。雪宝顶、李家沟、党坝和甲基卡等稀有金属矿床成矿年代学研究表明, 松潘-甘孜造山带在印支晚期和燕山早期存在大规模的稀有金属成矿事件。

(3) 雪宝顶、李家沟、党坝和甲基卡稀有金属矿床的形成与造山过程有关, 是华北板块、羌塘-昌都板块和扬子板块相互碰撞挤压后地层重熔形成含稀有金属岩浆, 并最终结晶分异形成稀有金属矿床。

致谢: 锡石 U-Pb 测年过程中得到了周红英和崔玉荣老师的指导。野外调查过程中得到了杨波和肖永红工程师的帮助, 匿名审稿人对本文提出了宝贵的修改意见, 在此一并表示感谢。

注 释

① 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. 西昌: 四川省地质矿产局攀西地质大队。

References

- Černý P, Ercit T S. 1989. Mineralogy of niobium and tantalum: crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications. In: Möller P, Černý F, Saupé F, eds. Lanthanides, Tantalum and Niobium. Berlin: Springer, 27~79.
- Černý P, Ercit T S. 2005. The classification of granitic pegmatites revisited. *Canadian Mineralogist*, 43: 2005~2026.
- Chen Jun, Wang Rucheng, Zhou Jianping. 1999. The Geochemistry of Tin. Nanjing: Nanjing University Press.
- Cui Yurong, Tu Jiarun, Chen Feng, Hao Shuang, Ye Lijuan, Zhou Hongying, Li Huimin. 2017. The research advances in LA-(MC)-ICP-MS dating of cassiterite. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1386~1399 (in Chinese with English abstract).
- Dai Hongzhang, Wang Denghong, Liu Lijun, Yu Yang, Dai Jingjing, Fu Xiaofang. 2018. Geochronology, geochemistry and their geological significances of No. 308 pegmatite vein in the Jiajika deposit, western Sichuan, China. *Earth Science*, 43(10): 3664~3681 (in Chinese with English abstract).
- Deng Yun, Fei Guangchun, Li Jian, Tang Wenchun, Zhong Wei, Yang Guibing. 2018. Study on C-H-O isotopes and geochronology of the Lijiagou pegmatite spodumene deposit in Sichuan Province. *Mineral Petrology*, 38(3): 40~47 (in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Tang Wenchun, Zhong Wei, Yang Guibing, Gu Chenghui. 2014. Classification analysis of ore-bearing pegmatite in Ke'erlyin orefield, west Sichuan. *Mineral Deposit*, 33(Supp): 187~188 (in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Fang Bin. 2015. The characteristics of the ore fabric of Lijiagou deposit in Ke'erlyin orefield, west Sichuan. *Acta Mineralogica Sinica*, 96(Supp): 1000 (in Chinese with English abstract).
- Fei Guangchun, Li Baohua, Yang Jiyi, Chen Xu, Luo Wei, Li Youguo, Tang Wenchun, Gu Chenhui, Zhong Wei, Yang Guibin. 2018a. Geology, fluid inclusion characteristics and H-O-C isotopes of large Lijiagou pegmatite spodumene deposit in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibet: Implications for ore genesis. *Resource Geology*, 68(1): 37~54.
- Fei Guangchun, Tian jinjin, Yang Jiyi, Gao Jianuo, Tang Wenchun, Li Jian, Gu Chenghui. 2018b. New zircon U-Pb age of the super-large Lijiagou spodumene deposit in Songpan Garze fold belt, eastern Tibet: implications for early Jurassic rare-metal polymetallic event. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(3): 1274~1275.
- Hao Xuefeng, Fu Xiaofang, Liang Bin, Yuan Linping, Pan Meng, Tang Yi. 2015. Formation ages of granite and X03 pegmatite vein in Jiajika, western Sichuan, and their geological significance. *Mineral Deposit*, 34(6): 1199~1208 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Wang Denghong, Fu Xiaofang. 2006. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages of Ke'erlyin pegmatite type rare metal deposit, West Sichuan, and its tectonic significances. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 843~848 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Liu Shanbao, Wang Denghong, Fu Xiaofang. 2007. Metallogenic epoch of Xuebaoding W-Sn-Be deposit in northwest Sichuan and its tectonic tracing significance. *Mineral Deposit*, 26(5): 557~562 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Liu Xifang, Wang Denghong. 2014. The metallogenic regularity of lithium deposit in China. *Acta Geologica Sinica*, 88(12): 2269~2283 (in Chinese with English abstract).
- Li Jiankang, Li Peng, Wang Denghong, Li Xingjie. 2019. A review of niobium and tantalum metallogenic regularity. *Chinese Science Bulletin*, 64(15): 1545~1566 (in Chinese with English abstract).
- Li Peng, Li Jiankang, Chou, Iming, Wang Denghong, Xiong Xin. 2019. Mineralization epochs of granitic rare-metal pegmatite deposits in the Songpan-Ganze orogenic belt and their implications for orogeny. *Minerals*, 9(5): 280~304.
- Li Xinjie, Li Jiankang, Liu Yongchao, Xiong Changli. 2018. Geochemical features of muscovite granite in the Zhawulong granitic pegmatite type rare metal deposit, western Sichuan. *Geological Review*, 64(4): 1005~1016 (in Chinese with English abstract).
- Liao Yuan'an, Yao Xueliang. 1992. Evolution feature and mineralogical relations peraluminous granites from Jinchuan, western Sichuan. *Mineral Petrology*, 12(1): 12~22 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yan. 2010. Mineralogical characteristics and genesis mechanism of Xuebaoding W-Sn-Be deposit, NW Sichuan Province. Ph.D thesis of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/Ex, Version 3: a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Geochronology Center Berkeley, Berkeley, California, 1~70.
- Pang Bo, Gu Chenghui, Li Liangbo, Luo Wei, Li Jian. 2015. Geological characteristics and genesis of the spodumene deposit in Dangba, Markam, Sichuan. *Sichuan Nonferrous Metals*, 4: 31~34 (in Chinese with English abstract).
- Shearer C K, Papike J J, Jolliff B L. 1992. Petrogenetic links among granites and pegmatites in the Harney Peak rare-element granite-pegmatite system, Black Hills, South Dakota. *Canadian Mineralogist*, 30: 785~809.
- Tindle A G, Breaks F W. 1998. Oxide minerals of the separation rapids rare element granitic pegmatite group, northwestern Ontario. *Canadian Mineralogist*, 36(2): 609~635.
- Wang Denghong. 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. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1189~1209 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Li Jiankang, Fu Xiaofang. 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating for the Jiajika pegmatite-type rare metal deposit in western Sichuan and its significance. *Geochimica*, 34(6): 541~547 (in Chinese with English abstract).
- Wang Qian, Hou Kejun, Zou Tianren. 2019. Isotopic dating method suitable for rare-metal deposits and its application. *Acta Geologica Sinica*, 93(6): 1523~1532.
- Wang Ziping, Liu Shanbao, Ma Shengchao, Liu Lijun, Dai Hongzhang, Guo Weiming, Chen Beizhan. 2018. Metallogenic regularity, deep and periphery prospecting of Dangba superlarge spodumene deposit in Aba, Sichuan Province. *Earth Science*, 43(6): 2029~2041 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jiabin, Fei Guangchun, Qin Liye, Yang Jiyi, Zheng Luo, Tang Wenchun. 2020. LA-MC-ICP-MS U-Pb dating of cassiterite from the Lijiagou pegmatite-type rare-metal deposit in the Ke'eryin orefield, Sichuan Province and its geological implication. *Geology and Exploration*, 56(2): 346~358.
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zhongxiu. 1992. The Orogenic Processes of the Songpan-Garzê Orogen. Beijing: Geological Publishing House, 1~193 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhao Zhongbao, Fu Xiaofang. 2018. On the structure backgrounds of the large-scale "Hard-rock" type lithium ore belts in China. *Acta Geologica Sinica*, 92(6): 1091~1106 (in Chinese with English abstract).
- Yan Qinghe, Qiu Zengwang, Wang He, Wang Min, Wei Xiaopeng, Li Pei, Zhang Rongqing, Li Congying, Liu Jianping. 2018. Age of the Dahongliutan rare metal pegmatite deposit, West Kunlun, Xinjiang (NW China): Constraints from LA-ICP-MS U-Pb dating of columbite-(Fe) and cassiterite. *Ore Geology Review*, 100: 561~573.
- Yang Yueqing, Wang Wenying, Chen Chenghu, Zhu Jinhuang. 2006. Mineralogical study of cassiterite in Nanping granite pegmatite, Fujian Province. *Fujian Geology*, 25(2): 75~81 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Shunda, Peng Jiantang, Hao Shuang, Li Huimin, Geng Jianzhen, Zhang Dongliang. 2011. In-situ LA-MCICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: new constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 235~242.
- Zhang Dongliang, Peng Jiantang, Coulson I M, Hou Linhui, Li Shijie. 2014. Cassiterite U-Pb and muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age constraints on the timing of mineralization in the Xuebaoding Sn-W-Be deposit, western China. *Ore Geology Review*, 62: 315~322.
- Zhang Rongqing, Lu Jianjun, Lehmann B, Li Congying, Li Guanglai, Zhang Lipeng, Guo Jia, Sun Weidong. 2017. Combined zircon and cassiterite U-Pb dating of the Piaotang granite-related tungsten-tin deposit, southern Jiangxi tungsten district, China. *Ore Geology Reviews*, 82: 268~284.
- 崔玉荣, 涂家润, 陈枫, 郝爽, 叶丽娟, 周红英, 李惠民. 2017. LA-MC-ICP-MS 锡石 U-Pb 定年研究进展. *地质学报*, 91(6): 1386~1399.
- 代鸿章, 王登红, 刘丽君, 于扬, 代晶晶, 付小方. 2018. 川西甲基卡 308 号伟晶岩脉年代学和地球化学特征及其地质意义. *地球科学*, 43(10): 3664~3681.
- 邓运, 费光春, 李剑, 唐文春, 钟伟, 杨贵兵. 2018. 四川李家沟伟晶岩型锂辉石矿床碳氢氧同位素及成矿时代研究. *矿物岩石*, 38(3): 40~47.
- 费光春, 袁天晶, 唐文春, 钟伟, 杨贵兵, 古城会. 2014. 川西可尔因伟晶岩型稀有金属矿床含矿伟晶岩分类浅析. *矿床地质*, 33(增刊): 187~188.
- 费光春, 方兵. 2015. 川西可尔因矿田李家沟锂辉石矿床矿石组构特征. *矿物学报*, 96(增刊): 1000.
- 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. *地质找矿论丛*, 29(1): 59~65.
- 郝雪峰, 付小方, 梁斌, 袁蔺平, 潘蒙, 唐屹. 2015. 川西甲基卡花岗岩和新三号矿脉的形成时代及意义. *矿床地质*, 34(6): 1199~1208.
- 李建康, 王登红, 付小方. 2006. 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. *地质学报*, 80(6): 843~848.
- 李建康, 刘善宝, 王登红, 付小方. 2007. 川西北雪宝顶锡钨铍矿床的成矿年代及其构造示踪意义. *矿床地质*, 26(5): 557~562.
- 李建康, 刘喜方, 王登红. 2014. 中国锂矿成矿规律概要. *地质学报*, 88(12): 2269~2283.
- 李建康, 李鹏, 王登红, 李兴杰. 2019. 中国钽铌矿成矿规律. *科学通报*, 64(15): 1545~1566.
- 李兴杰, 李建康, 刘永超, 熊昌利. 2018. 川西扎乌龙花岗岩伟晶岩型稀有金属矿床白云母花岗岩岩石地球化学特征. *地质论评*, 64(4): 1005~1016.
- 廖远安, 姚学良. 1992. 金川-过铝多阶段花岗岩体演化特征及其与成矿关系. *矿物岩石*, 12(1): 12~22.
- 刘琰. 2010. 川西雪宝顶 W-Sn-Be 矿床矿物学特征和形成机制. 北京: 中国地质大学(北京) 博士论文.
- 庞博, 古城会, 李良波, 罗伟, 李剑. 2015. 四川马尔康党坝锂辉石矿床地质特征及成因研究. *四川有色金属*, 4: 31~34.
- 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. *地质学报*, 93(6): 1189~1209.
- 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. *地球化学*, 34(6): 541~547.
- 王倩, 侯可军, 邹天人. 2019. 适合于稀有金属矿床的同位素定年方法及其应用. *地质学报*, 93(6): 1523~1532.
- 王子平, 刘善宝, 马圣钊, 刘丽君, 代鸿章, 郭唯明, 陈备战. 2018. 四川阿坝州党坝超大型锂辉石矿床成矿规律及深部和外围找矿方向. *地球科学*, 43(6): 2029~2041.
- 许家斌, 费光春, 覃立业, 杨继忆, 郑略, 唐文春. 2020. 四川可尔因矿田李家沟伟晶岩型稀有金属矿床锡石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义. *地质与勘探*, 56(2): 346~358.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 1992. 中国松潘-甘孜造山带的造山过程. 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. *地质学报*, 92(6): 1091~1106.
- 杨岳清, 王文瑛, 陈成湖, 朱锦煌. 2006. 福建南平花岗岩伟晶岩中锡石的矿物学研究. *福建地质*, 25(2): 75~81.

参 考 文 献

陈骏, 王汝成, 周建平. 1999. 锡的地球化学. 南京: 南京大学出版社.

New precise timing constraint for the Dangba granitic pegmatite type rare-metal deposit, Markam, Sichuan Province, evidence from cassiterite
LA-MC-ICP-MS U-Pb dating

FEI Guangchun^{*1)}, YANG Zheng¹⁾, YANG Jiyi¹⁾, LUO Wei²⁾, DENG Yun¹⁾,
LAI Yutao¹⁾, TAO Xinxin¹⁾, ZHENG Luo³⁾, TANG Wenchun⁴⁾, LI Jian⁴⁾

1) Key Laboratory of Tectonic Controls on Mineralization and Hydrocarbon Accumulation, Ministry of Natural Resources, College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;

2) School of Urban and Rural Planning and Construction, Mianyang Teachers' College, Mianyang, Sichuan, 621000;

3) Sichuan Energy Investment Lithium Technology Co., Ltd, Chengdu, 610023;

4) Geochemistry Exploration Team of the Sichuan Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Deyang, Sichuan, 618000

** Corresponding author: feiguangchun07@cdut.cn*

Abstract

The Dangba rare metal deposit in the southeast of the Ke'eryin orefield, West Sichuan, is a newly discovered pegmatite-type lithium deposit associated with niobium, tantalum, beryllium, rubidium and tin within the central Songpan-Garze fold belt (SGFB). Based on the geological characteristics of granitic pegmatite in the Dangba deposit, major chemical compositions and laser ablation multicollector inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-MC-ICP-MS) dating of cassiterite were undertaken. Electron-microprobe analyser (EMPA) EMPA analyses indicate that the cassiterite from the Dangba deposit are related to the rare metal deposit, and not to the hydrothermal deposit, and therefore represent the age of the rare metal deposit. Cassiterites from the albite spodumene pegmatite (DB2) and lepidolite-bearing albite spodumene pegmatite (DB1) yielded ²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb-²³⁸U/²⁰⁷Pb Tera-Wasserburg lower intercept age of 208.1±1.9 Ma (*n*=31,MSWD=2.5) and 199.3±1.6 Ma (*n*=11,MSWD=0.68) respectively, and thus represent the emplacement age of the granitic pegmatite dikes. The results indicate that the Dangba deposit was formed in the late Triassic and is closely related to the magmatic hydrothermal activity in the late stage of Indosinian period. The regional metallogenic ages comparison shows that the Dangba, Lijiagou, the Xuebaoding and the Jiajika deposits are characterized by close mineralization ages, similar mineralization types, and formed in an post-orogenic tectonic setting. The large-scale Li-Be-Nb-Ta-Sn raremetal polymetallic events occurred in the Late Indosinian and Early Yanshanian in SGFB.

Key words: cassiterite U-Pb dating; granitic pegmatite; rare metal; Dangba; Ke'eryin orefield