川西马尔康片麻岩穹隆与伟晶岩型锂矿的构造成因

郑艺龙1),许志琴2),高文琦3),郑碧海2),高建国4),闫浩瑜2)

1)中国地质科学院地质研究所,北京,100037;2)南京大学地球科学与工程学院,江苏南京,210023;
3)四川能投锂业有限公司,四川成都,610023;4)成都理工大学地球科学学院,四川成都,610059

内容提要:片麻岩穹隆是造山折返过程形成的重要构造样式。马尔康锂矿床位于松潘-甘孜造山带腹地的马尔康片麻岩穹隆中,其核部为太阳河花岗闪长岩和可尔因花岗岩、幔部由经过变质作用的晚三叠世深海—半深海复理石和浊积岩组成,大量含锂伟晶岩脉侵位于红柱石-十字石变质带中。通过野外地质调查和构造分析,在马尔康片麻岩穹隆中识别出三期构造变形叠加于造山早期大规模收缩变形之上:第一期变形(D1)为南向的大型高温拆离剪切带(马尔康拆离断层,MRKD);第二期变形(D2)为马尔康"穹隆构造";第三期变形(D3)为后期叠加的新生代近东西向逆冲断层。新的锆石 U-Pb 年代学数据表明太阳河和可尔因岩体的结晶年龄分别为 226~212 Ma 与224~218 Ma,马尔康拆离断层中平行剪切面理的同构造变形伟晶岩脉形成于约 212~207 Ma,而未变形含锂伟晶岩脉则形成于 200~190 Ma 之间。研究表明,马尔康片麻岩穹隆在造山早期伴随 220~212 Ma 的花岗岩侵位,形成中低压巴罗式变质作用;在挤压向伸展转换过程(212~207 Ma)中,形成向南剪切的拆离断层以及变质核杂岩构造,致使花岗岩浆底辟上涌和片麻岩穹隆的形成;200~190 Ma 以来,马尔康片麻岩穹隆的继续上隆,大量网状伟晶岩(包括含锂伟晶岩)侵位在幔部变质沉积岩中,岩体顶部聚集流体经结晶分异作用和高温萃取作用形成锂矿床。本文指出,马尔康片麻岩穹隆由于新生代逆冲作用,使北侧的可尔因和太阳河岩体抬升,南侧厚层晚三叠世幔部变质带埋深,为伟晶岩型锂矿床的保存创造了有利条件。

关键词:松潘-甘孜;片麻岩穹隆;伟晶岩型锂矿;构造成因

锂(铍、铌、钽、铯、铷等)资源被誉为"白色石油",其开发应用贯穿于节能环保、新一代信息技术、航空航天、国防军工等新兴产业,具有重要的经济和战略意义(Zheng Mianping, 2007; Peng Aiping, 2012; Zhai Mingguo et al., 2019; Sovacool et al., 2020)。

松潘-甘孜(T_3 - J_2)造山带的锂矿床资源丰富, 以甲基卡、马尔康和白龙山大型一超大型锂矿床为 代表,是我国重要的伟晶岩型稀有金属成矿地区 (Wang Denghong et al., 2013;Fu Xiaofang et al., 2014, 2021;Wang He et al., 2017;Xu Zhiqin et al.,2018, 2020a, 2020b)。

本文在详细野外地质调查和室内多学科分析基础上,基于对马尔康地区构造变形和构造期次的划

分,确定了马尔康地区的主体构造由核部花岗岩和 幔部三叠纪深海沉积变质岩组成的片麻岩穹隆;大 量伟晶岩脉产出在片麻岩穹隆形成的过程中,结合 地质年代学和地球化学数据分析,探究马尔康片麻 岩穹隆的构造成因,以及穹隆演化与含锂辉石伟晶 岩之间的联系,进而揭示该地区锂矿床的构造成因, 为新能源锂矿战略提供科学依据。

1 地质背景

1.1 松潘-甘孜造山带

位于青藏高原北部的近 E—W 向的松潘-甘孜 造山带,全长约 2800 km,为一条形成于晚三叠世— 中侏罗世的巨型造山带。其北侧以东昆仑-阿尼玛 卿古特提斯缝合带与西昆仑及东昆仑-柴达木-祁连

引用本文:郑艺龙,许志琴,高文琦,郑碧海,高建国,闫浩瑜. 2021. 川西马尔康片麻岩穹隆与伟晶岩型锂矿的构造成因. 地质学报, 95 (10): 3069~3084, doi: 10.19762/j.cnki. dizhixuebao. 2021082.
Zheng Yilong, Xu Zhiqin, Gao Wenqi, Zheng Bihai, Gao Jianguo, Yan Haoyu. 2021. Tectonic genesis of the Markam gneiss dome and pegmatitic lithium deposits in western Sichuan Province. Acta Geologica Sinica, 95(10): 3069~3084.

注:本文为中国科学院学部学科发展战略研究项目(编号 XK2018DXA01)、南京大学卓越研究计划"川西伟晶岩型锂矿科学钻探"项目、国家自然科学基金特提斯动力学研究计划项目(编号 020613001175)以及中国地质调查局项目(编号 DD20190060)联合资助的成果。 收稿日期:2021-08-20;改回日期:2021-08-31;网络发表日期:2021-09-30;责任编辑:蔡志慧。

作者简介:郑艺龙,男,博士,构造地质学专业。E-mail:cugbzyl@163.com。通讯作者:许志琴,女,南京大学教授,中国科学院院士,构造 地质学专业,长期从事大陆动力学研究工作。E-mail: xzq@nju.edu.cn。

地体毗邻,南侧以金沙江古特提斯缝合带与羌塘地体相隔,东侧以龙门山逆冲断裂与扬子板块对接(Xu Zhiqin et al., 1992, 2020a, 2020b)。NE—SW 向阿尔金走滑断裂将其分为东、西两部分:东段为呈特殊倒三角形几何学特征的"东松潘甘孜造山带(含巴颜喀拉地体)",西段为呈条带状的"西松潘-甘孜造山带(含 Karakul-Mazar 地体)"。近年来,随着位于造山带东段的四川甲基卡和马尔康及位于西段的新疆白龙山地区锂矿勘探不断取得重大突破,松潘-甘孜造山带成为我国大陆最大的伟晶岩型锂 矿带的集结地(Xu Zhiqin et al., 2015)。

在中一晚三叠世,古特提斯洋盆沿着双向俯冲 体系而闭合(即昆仑-阿尼玛卿洋盆向北俯冲以及金 沙江洋盆向南俯冲),羌塘地体、扬子板块和华北板 块(劳亚板块)陆块三向汇聚和碰撞形成巨大的增生 造山楔(Xu Zhiqin et al., 1992; Roger et al., 2010; De Sigoyer et al., 2014)。在松潘甘孜的三 叠纪一侏罗纪造山作用期间,基底和盖层之间产生 了南向的大型韧性滑脱剪切带,伴随大规模褶皱、逆 冲所造成的地壳缩短和加厚(Xu Zhiqin et al., 1992; Roger et al., 2004),并导致造山花岗岩(220 \sim 200 Ma)(Roger et al., 2004, Zhang Hongfei et al., 2006) 和后造山花岗岩(200~150 Ma) 的侵位 (Roger et al., 2004)。花岗岩的同位素成分(Nd、 Sr、Pb)显示岩浆源主要来自伴有不同程度沉积物 质的造山带底部——扬子陆块的新元古代基底(850 ~750 Ma)和微量地幔物质的贡献(Roger et al., 2004; Zhang Hongfei et al., 2006)。晚中生代期 间,松潘-甘孜曾处于相对平静和缓慢隆升的初始高 原以及龙门山的崛起阶段(Roger et al., 2004; Xu Zhiqin et al., 2016).

中新世形成的 NW—SE 向弧形鲜水河走滑剪 切带将东松潘-甘孜地体分割成两部分:东北部的丹 巴-马尔康亚地体和西南部的雅江-木里亚地体 (Xu Zhiqin et al., 1992),位于川西地区的甲基卡和马 尔康锂矿带,便出露在鲜水河走滑剪切带两侧的三 叠纪地层中,与中生代花岗岩相伴(Xu Zhiqin et al., 1992; Fu Xiaofang et al., 2015)。

1.2 马尔康地区地质背景

马尔康矿集区位于松潘-甘孜造山带腹地,发育 早中生代的花岗质侵入岩和三叠纪变质沉积岩。近 年来,在马尔康地区陆续发现大型伟晶岩型锂矿床, Li₂O的远景资源潜力达 700 万 t 以上,可望成为世 界级 锂 矿 区 (Yue Xiangyuan et al., 2016)。Xu Zhiqin et al. (2018)认为该区的基本构造特征以马 尔康片麻岩穹隆为主要特征,由核部花岗岩以及幔 部变质沉积岩组成,大量含锂矿伟晶岩侵位于幔部 变质岩中(图1)。

1.2.1 三叠纪花岗岩类侵入岩

马尔康片麻岩穹隆的核部单元为三叠纪花岗岩 类侵入岩,主要由东部的可尔因花岗岩基和西部的 太阳河花岗闪长岩体(Deschamps et al., 2017)组 成,二者均是三叠纪一侏罗纪造山作用的产物。

1.2.1.1 可尔因岩体

东西向可尔因岩体延伸约 35 km,南北向延伸 约 15 km。可尔因岩体主要为二云二长花岗岩,部 分为钾长花岗岩,主要造岩矿物为石英、钾长石、斜 长石、黑云母、白云母和褐帘石。其外侧零星分布有 白云母钠长花岗岩,主要矿物组成为钠长石、白云 母、石榴子石、电气石、钾长石等。

前人将可尔因岩体分为两种岩相:具有长石斑 晶的斑状花岗岩和细粒淡色花岗岩(Roger et al., 2004; De Sigoyer et al., 2014),其形成于 153±3 Ma(Roger et al., 2004)。Deschamps et al.(2017) 认为可尔因岩体主要为 S 型过铝质中一粗粒花岗 岩,侵位时代 231~209 Ma,估计侵位深度为约 11 km。通过 Sr-Nd 同位素分析,认为可尔因岩体是松 潘-甘孜变质沉积岩在至少 20 km 深度角闪岩相环 境下发生部分熔融形成。岩浆序列从母岩浆开始演 化,通过结晶分异作用形成残留 S-型、过铝质、含长 石斑晶粗粒花岗岩。

1.2.1.2 太阳河岩体

太阳河岩体出露于可尔因岩体西南侧 2 km,呈 南北向延伸,总面积约为 15 km × 5 km。岩体内部 大致可分为两部分,西北侧主体为 I 型,高 K 钙碱 性,细粒一粗粒闪长岩-正长闪长岩等,其北、东、南 侧则主要为花岗闪长岩-花岗岩。二者呈过渡关系, 部分地区闪长岩呈不规则捕掳体出露于花岗岩闪长 岩中。

Li Jiankang(2006)认为,太阳河和可尔因岩体 经历了由石英闪长岩-黑云二长花岗岩-二云母花岗 岩-白云母钠长花岗岩的演化。Roger et al. (2004) 在穹隆核部获得淡色花岗岩年龄为约 188 Ma 和粗 粒花岗岩约 153 Ma 的年龄,认为马尔康地区的侵 入岩形成于后碰撞环境。Deschamps et al. (2017) 认为可尔因岩体为 S 型过铝质花岗岩,侵位于 231 ~209 Ma; 而太阳河岩体 I 型幔源高钾钙碱性花岗 闪长岩,侵位于 239~202 Ma 之间,通过 Sr-Nd 同



图 1 马尔康片麻岩穹隆在松潘-甘孜造山带中的位置(a)及其构造平面图(b)和剖面图(c)

(据 Zheng Yilong et al., 2020; Xu Zhiqin et al., 2020a 修改)

Fig. 1 The tectonic location (a), schematic geological map (b) and cross-section (c) of the Markam gneiss dome

(modified after Zheng Yilong et al., 2020; Xu Zhiqin et al., 2020a)

A—A'为剖面位置;MRKD—马尔康拆离断层;KRYT—可尔因逆断层

A-A'shows the locatin of the cross-section; MRKD-Markam detachment; KRYT-Keryin thrust

位素分析,认为可尔因岩体是松潘-甘孜变质沉积岩 在至少 20 km 深度角闪岩相环境下发生部分熔融 形成。岩浆序列从母岩浆开始演化,通过结晶分异 作用形成残留 S-型,过铝质,含长石斑晶粗粒花岗 岩。Zhao Zhongbao et al. (2018) 报道了可尔因花 岗岩锆石 U-Pb 年龄为 213~212 Ma。

1.2.2 三叠纪变质沉积岩

Li Jiankang(2006)提出,马尔康地区的三叠纪

沉积岩主要遭受区域变质岩、接触变质和动力变质 作用改造,其中区域变质包括:①低绿片岩相-黑云 母带;②高绿片岩相-红柱石带;③低角闪岩相-十 字石-钙铝榴石带。接触变质岩则包括:①辉石角 岩相-砂线石-普通辉石带;②角闪角岩相-透辉石-普通角闪石带;③钠长-绿帘石角岩相-黑云母-白云 母带。Zhao Zhongbao et al. (2018)则认为马尔康 变质沉积岩经历了类似巴罗式变质作用,并对其峰 期变质温、压条件进行估算,获得 700~800 MPa, 550~620℃的温、压条件。

1.2.3 伟晶岩

大量的伟晶岩脉(包括含锂辉石)出露在花岗岩 体内部及变质围岩之中,主要分布在金川县观音桥、 太阳河、业隆沟、根扎及马尔康市木尔宗、可尔因、热 水塘、白湾、脚木足与壤塘县斯约武等地(图1)。由 于岩浆演化和脉动充填作用,这些伟晶岩脉的矿物 组成变化较大,从下部含大量黑云母和电气石到外 缘只有白云母和石榴子石。Li Jiankang(2006)按脉 体矿物组合、生成顺序、空间上由内向外将其划分为 四个分带: Ⅰ带为自白云母花岗岩内—岩体顶部为 二云母微斜长石型;Ⅱ带为白云母微斜长石型;Ⅲ带 为白云母钠长石锂辉石型;Ⅳ带为钠长石锂云母型, 并在伟晶岩脉中获得约 152 Ma 的云母 Ar-Ar 年 龄。Fei Guangchun et al. (2014)在此基础上增加 了最外围的石英脉, 且该团队在李家沟矿区含矿伟 晶岩脉中获得 198 Ma 的锆石 U-Pb 年龄 (Fei Guangchun et al. ,2018)

2 野外观察和构造解析

2.1 片麻岩穹隆的厘定

在马尔康地区,出露由核部早中生代花岗岩体 及幔部中上三叠统变质沉积岩组成的穹隆构造,在 穹隆外部,三叠纪地层仍保留造山早期挤压收缩形 成的轴面近直立的圆滑和尖楞构造组成的西康式褶 皱(Xu Zhiqin et al., 1992);而在穹隆内部,通过对 不同构造单元的变形特征分析,我们发现在区域大 规模挤压收缩事件之后,又叠加了三期构造变形,依 次为:

第一期变形(D1):马尔康韧性拆离剪切带(MRKD)的形成。

D1 主要表现为向南剪切的马尔康拆离断层相 关的剪切面理 S1 及伴随的"A"型平卧褶皱(图 2)。 该拆离断层主要出露于马尔康片麻岩穹隆南侧,于 穹隆顶部局部残留。发育于核部可尔因-太阳河花 岗质岩体与幔部变质沉积岩之间,近东西向延伸约 50 km,由下部为糜棱岩带和上部拆离断层主体组 成。糜棱岩带包括糜棱岩化花岗岩、糜棱岩化变质 沉积岩;拆离断层主体为发育不对称褶皱平卧、斜卧 褶皱为主的强变形带、相对弱变形带相间的变质沉 积岩(图 2)。

第二期变形(D2)为穹隆构造。

D2 变形控制了马尔康片麻岩穹隆多数露头的

构造样式,是发育于可尔因-太阳河花岗岩体周围的 上三叠统幔部变质沉积岩的一期与"底辟穹隆"效应 相关的脆韧性下滑构造,以靠近岩体顶部的变质沉 积岩中发育近水平—缓倾面理(<35°)和近水平平 卧褶皱,及其外围大量放射状分布的不对称褶皱为 特征。这些不对称褶皱指示了向外下滑剪切作用, 北侧向北,南侧向南,西侧向西,东侧向东(图 3)。 面理和不对称褶皱的轴面劈理从穹隆边缘向核部倾 角逐渐变缓,且叠加在三叠系中形成与印支早期的 陡倾面理和直立西康式褶皱之上(Xu Zhiqin et al., 1992)。在马尔康片麻岩穹隆的南侧,陡倾的下滑构 造叠加改造了马尔康拆离断层中的近水平的糜棱岩 带(图 3b);且在韧性剪切带中矿物拉伸线理之上叠 加了后期指示向穹隆外侧下滑的韧性热擦痕和矿物 显微组成的下滑线理以及后期产生的脆性正断层。 显然,这期下滑构造形成在拆离断层之后。

第三期变形(D3)喜山期脆韧性一脆性变形。

D3 在马尔康片麻岩穹隆中主要表现为发育于 可尔因-太阳河岩体的南缘的东西向可尔因逆冲断 层(KRYT),切割了马尔康片麻岩穹隆中的下滑构 造,并将核部花岗岩向南逆冲叠置于幔部变质岩之 上。KRYT 主断层面是以宽 5~15 m 的断层带为 特征,断层上部较陡,向下逐渐变缓,形成铲式断层。 断层带主要由花岗质和伟晶岩质断层角砾和断层碎 屑岩组成,仅在上部卷入少量变质沉积岩。断层以 脆性破裂为主,发育断层角砾和断层碎裂岩,且该逆 断层在高尔达西侧切割了未变形的伟晶岩脉,表明 该断层发育于马尔康"穹隆构造"之后。

2.2 片麻岩穹隆中的伟晶岩脉及其含矿性

大量的伟晶岩和淡色花岗岩脉侵入马尔康片麻 岩穹隆的幔部变质岩石之中,根据其变形特征,大致 可将其分为两种类型:早期强烈变形平行面理的伟 晶岩脉(Peg-1)以及较宽的平行面理的弱变形伟晶 岩脉,晚期为切穿面理的未变形伟晶岩(包含锂辉石 伟晶岩)(Peg-2a、Peg-2b)和淡色花岗岩岩墙、岩脉 (Leu-2a)。早期同构造强变形的伟晶岩脉主要分布 于马尔康拆离剪切带(MRKD)内,呈透镜状、同构 造褶皱脉,规模较小,宽度为毫米级至几十厘米级, 延伸距离较短。在糜棱岩带中的伟晶岩脉和淡色花 岗岩脉、在同构造变形中被拉长、拉断,呈构造透镜 体平行于糜棱面理定向排列;而靠近拆离断层上部 的淡色花岗岩脉、伟晶岩脉则是以不对称透镜体和 褶皱为特征(图 4a),其褶皱轴面平行于构造面理, 并指示了向南的剪切作用。



图 2 马尔康韧性剪切带(MRKD) 野外和显微照片(据 Zheng Yilong et al., 2020 修改) Fig. 2 Photographs of various outcrops and photomicrographs of the Markam ductile shear zone (MRKD) (modified after Zheng Yilong et al., 2020)

(a) 一糜棱岩化砂线石片岩中的伟晶岩脉形成的σ型旋转碎斑系和不对称褶皱指示向南剪切;(b) 一马尔康片麻岩穹隆顶部变质沉积岩中发 育的不对称褶皱;(c,d) 一可尔因花岗岩体顶部糜棱岩化花岗片麻岩中的长石Σσ型旋转碎斑系和S-C组构的显微照片;S₁ 一面理; Peg-1一变 形伟晶岩脉; Peg-2a 一未变形伟晶岩脉; Bt 一黑云母; Sil 一矽线石; Pl 一斜长石; Qtz 一石英

(a)—Asymmetric "σ" type (Peg-1) and asymmetric folds of pegmatite (Peg-2a) in the mylonitic sillimanite-bearing schist; (b)—asymmetric folds in the meta-sedimentary rocks on top of the Markam gneiss dome; (c, d)—S-C structures in the mylonite at the roof of the Keryin granitoid; S1—foliation; Peg-1—deformed pegmatite; Peg-2a—undeformed pegmatite; Bt—biotite; Sil—sillimanite; Pl—plagioclase; Qtz—quartz

平行面理的未变形伟晶岩和淡色花岗岩脉规模 较大,宽度通常为米级至十米级,延伸较远,可达 10 km 以上,呈岩席状出露(图 4b~d)。早期平行面理 脉体应为与拆离剪切带形成同时的同构造侵位。而 在可尔因岩体东南侧晚期未变形伟晶岩脉切割了陡 倾的下滑构造,表明未变形的伟晶岩脉形成于马尔 康片麻岩穹隆下滑构造之后(图 4e~f)。

马尔康可尔因花岗岩体南侧金川县李家沟矿区 的地表岩脉有两类:平行面理(缓倾)的花岗细晶岩 脉,成分为微斜长石、钠长石、石英、白云母、黑云母, 形成较早;另一类为呈岩墙状切割面理的花岗伟晶 岩脉,形成较晚。由微斜长石、钠长石、锂辉石、锂云 母组成。李家沟锂矿区出露(或掩埋)的大量锂辉石 伟晶岩脉群,侵位在靠近核部花岗岩的面积约 24 km × 50 km 范围的红柱石-十字石变质带内(图 5)。李家沟锂矿区是目前马尔康片麻岩穹隆中最大 的锂集区,主矿产 LiO₂的资源储量达到 50 万 t,平 均品位 1.30%,是目前探明并取得采矿权证的亚洲 最大锂矿石矿。李家沟锂矿床出露在上三叠统侏倭 组中,原岩为一套含炭泥质岩、钙质长石石英细砂 岩、杂砂岩、粉砂岩等呈韵律式互层的海相沉积。按 岩石地球化学组分恢复原岩为长英质及钙硅铁镁质 两类。以可尔因花岗岩体为中心,自下而上的垂直 分带为:微斜长石伟晶岩带、微斜长石钠长石伟晶 岩、钠长石型伟晶岩、钠长石锂辉石带和石英带。在 李家沟矿区,规模较大矿体一般长度 50~400 m,最



图 3 不对称褶皱显示可尔因片麻岩穹隆周缘放射状的正向滑移剪切构造(a、b、c、d分别对应穹隆北侧、 南侧西侧和东侧,据 Zheng Yilong et al., 2020 修改)

Fig. 3 Asymmetric folds indicating normal sliding on the northern, southern, western and eastern margins of the Keryin pluton (a, b, c, d, respectively), confirming the domal structure of the Markam gneiss dome

(modified after Zheng Yilong et al., 2020)

S₁₋₂一面理; Peg-2a一未变形伟晶岩脉 S₁₋₂-foliation; Peg-2a-undeformed pegmatite

长 2000 m。一般厚度 15~30 m,最厚 124.15 m。 含锂云母的花岗伟晶岩矿化主要产在矿脉顶部,呈 透镜状,周围为锂辉石花岗伟晶岩的矿体,规模较 小,两者无明显的分界线。锂辉石矿石呈微晶、细 晶、中晶和粗晶结构、极少巨晶(长>50 cm,宽>5 cm)。

李家沟矿区 3700 m 平硐中的 1 号伟晶岩脉为 宽度 50 m 的切穿围岩面理、向 NW 陡倾的富含锂 辉石的矿脉,围岩由含十字石-红柱石-堇青石-石榴 子石的黑云母石英片岩组成,伟晶岩含石英、钠长 石、微斜长石、锂辉石、绿柱石、黑云母、白云母和电 气石,其中1 号脉 3700 m 平硐中垂直脉壁生长的锂 辉石含量达到 15%~20%,该脉上部 LiO₂含量高, 下部 LiO₂含量低,而下部含铌钽高而上部低。图 5 为金川县李家沟矿区含锂辉石伟晶岩脉勘探-平硐 剖面图,表明李家沟 5 号勘探-平硐剖面的锂辉石的 陡倾-岩墙状产出以及与围岩上三叠统侏倭组近水 平面理的切割关系。伟晶岩脉被后期脆性的向 SE 缓倾的两条正断层所切,代表了片麻岩穹隆隆升后 期的脆性变形。

3 马尔康片麻岩穹隆伟晶岩的地球化 学特征

地球化学分析(表 1)显示,马尔康地区的伟晶 岩具有高 SiO₂(多数分布于 72%~79%之间)。全 碱含量变化较大,含锂辉石伟晶岩脉全碱含量较低 $(0.69\%\sim4.12\%)$,且 Na₂O>K₂O;而不含锂辉石 伟晶岩脉全碱含量较高(7.66%~13.82%),MnO、 CaO、MgO、TiO₂、FeO 和 Fe₂O₃低(均小于 1%)。 含锂辉石伟晶岩的分异指数(DI)为 83~88,不含锂 辉石伟晶岩为 91~99,随着 SiO₂含量的升高以及分 异指数的增加,表明岩浆发生了高程度的分异。





图 4 马尔康片麻岩穹隆中不同期次和不同变形程度的伟晶岩和淡色花岗岩脉(据 Zheng Yilong et al., 2020 修改) Fig. 4 Pegmatite and leucogranite veins of different stages and deformation degrees in the Markam gneiss dome (modified after Zheng Yilong et al., 2020)

(a)—同构造伟晶岩,在拆离剪切作用下被拉断、布丁化或形成平行面理的"A"型平卧褶皱;(b~d)—平行面理的未变形淡色花岗岩脉;(e~f)— 切割面理的岩墙状伟晶岩脉,包括含锂辉石的伟晶岩脉;(g)—含锂辉石伟晶岩显微照片;Leu-1a—变形淡色花岗岩;Leu-2a—未变形淡色花岗 岩;Peg-2a、Peg-2b—未变形伟晶岩;Spd—spodumene

(a)—Syn-tectonic granitoid veins, which were folded and pulled apart during movement on the detachment; $(b \sim d)$ —undeformed leucogranite veins along foliations; $(e \sim f)$ —pegmatitic veins including spodumene-bearing varieties vein crosscutting the foliation; (g)-thin section photo of a spodumene-bearing pegmatite; Leu-1a—deformed leucogranites; Leu-2a—undeformed leucogranites; Peg-2a, Peg-2b—deformed pegmatites; Spd—spodumene

从图 6 可以看出,不同伟晶岩类型中稀有元素 含量变化较大。多数样品稀有元素含量呈整体变 化,其中含锂辉石伟晶岩中的稀有元素普遍高于不 含锂辉石伟晶岩,且相对富集 Li(288.81×10⁻⁶~23039.82×10⁻⁶)和 Rb(27.07×10⁻⁶,263.63×10⁻⁶~442.3×10⁻⁶)。微量元素原始地幔标准化蛛



图 5 金川县李家沟矿区含锂辉石伟晶岩脉勘探剖面图

Fig. 5 Exploration profile through spodumene-bearing pegmatite veins in Lijiagou mining area, Jinchuan County



图 6 马尔康片麻岩穹隆伟晶岩主量元素(a)、稀有元素含量变化(b) Fig. 6 Variation of major elements (a) and rare elements (b) in the pegmatites of Markam gneiss dome

网图(图 7)显示含锂辉石伟晶岩和不含锂辉石伟晶 岩微量元素的大离子亲石元素 Rb、K 明显富集,而 高场强元素 Ba、Th、Nb、Ti 等均强烈亏损,这些特 征与新疆可可托海 3 号伟晶岩相类似。

从图 7 可看出除了含锂辉石伟晶岩总稀土含量 较高($\Sigma REE = 226.83 \times 10^{-6}$),不含锂辉石伟晶岩 的稀土含量均较低($\Sigma REE = 0.99 \times 10^{-6} \sim 16.84 \times$ 10⁻⁶)。上述两类伟晶岩的轻重稀土分馏较为明显 (LREE/HREE=1.9~9.6), δEu 多数小于1(0~ 0.73), 为负异常, 表明岩浆演化过程由偏基性向碱 性演化, 稀土元素逐渐减少(表1)。

在 Ta-Yb 和 Rb-(Y+Nb)判别图中(图 8),绝 大多数伟晶岩落入同碰撞花岗岩区,尽管 Rb 因为 K 的变化而有较大的变化范围,但 Ta、Yb 在变质过



图 7 马尔康片麻岩穹隆中的伟晶岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)与球粒陨石标准化稀土元素配分图(b) Fig. 7 Spider diagram of trace elements normalized by primitive mantle (a) and REE distribution patterms normalized by chondrite (b) in the pegmatites from Markam gneiss dome





程中属于不活动的元素,因而研究区的伟晶岩可能 形成于碰撞造山时期。

通过上述地球化学数据分析,含锂辉石伟晶岩 和不含锂辉石伟晶岩均形成于碰撞造山环境。Li 元素含量方面,含锂辉石伟晶岩的稀有金属元素含 量高,不含锂辉石伟晶岩稀有金属含量低,富集于锂 辉石的 Li 和 Rb 与富集于钠长石的 Be、Nb、Ta 之 间的分异不明显。

4 变质沉积岩的温压轨迹

马尔康片麻岩穹隆群的幔部单元为巨厚层三叠 纪变质沉积岩,经历了高温和中一低压变质作用,显 示了明显的变质分带。自里往外为:矽线石(蓝晶 石)一十字石一红柱石-石榴子石一黑云母一绢云 母一绿泥石带。马尔康的主要锂矿床:党坝、业隆和 观音桥锂矿床均分布在石榴子石-十字石变质带中。

除了上述与花岗岩体侵位有关的巴罗-巴肯式 变质作用,研究区的沉积岩后期还叠加了伟晶岩脉 侵入时局部热接触变质作用,主要发育透辉石角岩、 角闪角岩、红柱石角岩和黑云母角岩等。电子探针 温度-压力(P-T)分析结果表明,部分变质沉积岩的 变质温压条件为570~590℃、330~370 MPa和592 ~628℃、360~440 MPa,形成于高温低压环境,应 代表晚期叠加变质作用。另有部分样品的变质温压 条件为664~704℃、700~720 MPa,该样品形成于 高温中压环境,应代表早期巴罗式变质作用(图9, 表2)。此结果与 Zhao Zhongbao et al. (2018)的 马尔康巴罗式变质峰期变质温、压条件估算(700~ 800 MPa、550~620℃)对比有一定差别,可能与样 品的选择有一定关系。

表1 马尔康片麻岩穹隆幔部含锂辉石、不含锂辉石伟晶岩主量(%)和微量元素(×10⁻⁶)分析结果

Table 1 Major (%) and trace element concentrations ($\times 10^{-6}$) of the spodumene-bearing and

non-spodumene-bearing pegmatites in mantle of the Markam gneiss dome

样品	含锂辉石伟晶岩				不含锂辉石伟晶岩					
	MK18-3-5①a	MK18-3-5①b	MK89-3-43	MK89-3-44	MK89-3-42	MK89-4-12	MK89-4-2①	MK89-4-7①	MK89-8-4①	MK89-4-82
SiO ₂	77.93	76.51	73.98	77.73	72.57	76.73	68.51	77.23	75.09	78.75
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	15.42	15.03	19.51	17.78	12.24	13.65	16.76	13.35	14.59	12.02
TiO_2	0	0	0	0	0.72	0.03	0	0	0	0.01
Fe_2O_3	0.27	0.28	0.05	0	0.7	1.49	0.01	0	0	0.21
FeO	0.4	0.53	0.17	0.13	2.87	0.67	0.14	0.21	0.2	0.18
CaO	0.19	0.77	0.19	0.16	7.4	0.41	0.1	0.71	0.45	0.39
MgO	0.04	0.07	0.02	0	1.53	0.23	0.03	0.07	0.12	0.07
K ₂ O	1, 12	1, 15	0.93	0.62	0.36	0.79	10.57	1.34	2.9	3, 75
Na ₂ O	2.35	2.97	2.44	0.76	0.33	5.05	3.25	6.41	6.01	3.91
MnO	0.12	0.15	0.05	0.06	0.26	0.07	0.03	0.04	0.04	0.02
P₂O₅	0.15	0.23	0.11	0.1	0.15	0.24	0.29	0.11	0.11	0.23
H_2O_5	0.54	0.86	0.32	0.17	0.10	0.33	0.13	0.25	0.33	0.15
H_2O^-	0.12	0.15	0.02	0.06	0.07	0.09	0.09	0.08	0.12	0.05
	0.66	1.36	0.52	0.00	0.07	0.09	0.03	0.00	0.12	0.03
Total	0.00	1.50	0.52	07 71	0.72	0.05	0.27	0. 47	0.45	0.41
V	90.00	99.00	91.91	97.71	99.04	99.95	99.90	59.94	99.90	99.90
I	1.22	2.09	0.2	0.17	30.06	3.08	0.80	5.20 2.20	1.18	1.40
La	1. 22	1.13	0.31	0.15	48.74	1.87	0.42	3.29	0.81	1.62
Ce	2.13	1.95	0.64	0.25	95.16	3.56	0.76	6.38	1. 22	3.64
Pr	0.27	0.26	0.05	0.05	11.14	0.46	0.08	0.74	0.17	0.49
Nd	0.76	0.85	0.38	0.12	41.85	1.5	0.46	2.5	0.38	1.64
Sm	0.28	0.39	0.06	0.15	7	0.67	0.08	0.94	0.43	0.9
Eu	0.06	0.07	0.06	0	1.51	0.07	0.08	0.09	0.08	0.01
Gd	0.24	0.23	0.06	0.08	6.22	0.51	0.17	0.72	0.2	0.81
Tb	0.05	0.1	0.01	0	0.96	0.17	0.02	0.18	0.03	0.23
Dy	0.18	0.33	0.03	0.05	5.58	0.78	0.16	1.03	0.15	1.43
Но	0.04	0.05	0	0	1.09	0.1	0.01	0.15	0.04	0.24
Er	0.08	0.11	0.03	0.05	3.36	0.24	0.16	0.36	0.09	0.68
Tm	0.03	0.04	0	0.02	0.54	0.06	0.01	0.07	0.04	0.13
Yb	0.12	0.16	0.11	0.06	3.13	0.28	0.19	0.34	0.08	0.7
Lu	0.02	0.02	0.01	0.01	0.55	0.04	0.02	0.05	0.03	0.13
Li	12590.8	8893.62	19835	23039	288.81	67.8	75.15	94.5	216.9	138.06
Be	155.99	193.09	43.79	32.93	2.81	6.73	4.21	15.39	44.72	4.95
Sc	2.43	2.5	2.25	1.9	10.25	2.66	4.09	3.42	2.64	3.54
V	0.87	1.56	0.26	0.11	83.86	1.7	0.54	0.92	1.08	0.32
Cr	2.71	2.4	0.17	1.02	70.99	4.04	3.41	2.54	4.93	2.86
Co	0.36	0.5	0.05	0.02	13.31	0.83	0.11	0.4	0.34	0.09
Ni	0.51	0.44	0.47	0.27	22.22	2.34	2.7	0.82	7.73	1.67
Cu	1.11	1.13	0.39	0.45	9.4	1.08	0.61	1.99	2.05	1.12
Zn	48.05	67.54	9.88	0.25	59.71	235.18	6.39	5.09	10.56	20.76
Ga	28.84	32.88	20.44	15.68	15	25.76	13.12	20.31	20.04	16.79
Rb	344.8	442.3	364.61	263.6	27.07	78.88	1209.8	100.26	345.14	410.34
Sr	24.86	32.18	8.55	9.83	376.11	13.47	17.4	24.27	25.45	8.7
Zr	9.29	5.86	8.91	6.79	433.93	37.03	69.47	9.62	8.98	26.51
Nb	56.07	49.22	16.95	25.17	13.28	53.32	1.23	7.62	8.21	18.38
Mo	0.15	0.44	0.07	0.25	0.34	0.28	0.34	0.04	0.3	0.16
Cd	0.01	0	0.03	0.05	0.08	0.02	0.06	0.02	0	0.03
In	0.17	0.2	0.19	0.14	0.09	0.03	0.06	0.04	0.05	0.05
Cs	35.09	39.45	56.33	39.73	36.57	13.02	48.72	10.07	41.31	37.65
Ba	20.9	32.1	3.02	1.66	199.06	6.8	9.44	13.92	25.24	6.46
Hf	0.48	0.34	1.04	0.8	11.63	1.91	2.01	0.37	0.45	1.64
Та	15.85	8.44	9.24	32.58	1.34	6.84	0.63	1.62	2.67	3.97
W	0.92	1.4	1.21	0.84	0.95	1.18	0.46	1.29	0.9	3.77
Tl	1.59	1.72	1.77	1.27	0.31	0.33	5.78	0.59	1.92	1.68
Pb	3.41	1.67	4.07	2.31	10.47	8.2	34.21	18.51	19.58	14.3
Bi	1.02	2.12	0.14	0.03	0.11	0.28	0.09	0.13	0.32	0.59
Th	0.51	0.31	0.58	0.19	17.17	0.75	0.16	1.51	0.61	2.11
U	0.85	0.86	2.62	0.69	3.55	2.14	0.25	0.91	0.33	3.09



图 9 马尔康变质岩变质温压条件相图(据 Sang Longkang et al., 2012 修改)

Fig. 9 Metamorphic temperature and pressure conditions of metasediments in Markam (after Sang Longkang et al. , 2012)

Qtz-石英;Grt-石榴子石;Ms-白云母;Sil-砂线石;Kfs-钾长石;Czo-斜黝帘石;An-钙长石 Qtz-Quartz;Grt-garnet;Ms-muscovite;Sil-sillimanite;Kfs-K-feldspar;Czo-clinozoisite;An-Anorthite

表 2 马尔康片麻岩穹隆幔部变质沉积岩 变质温-压估算结果

Table 2 Calculated P-T conditions of the metamorphism in the

样品号	温-压估算 结果(单位)	核	边	核	边	核	边
MK2-5	温度(℃)	592.67	570.47	591.18	575.03		
	压力(MPa)	3640.5	3464.8	3717.4	3366.7		
MK2-6	温度(℃)	628.51	602.05	618.37	592.57		586.24
	压力(MPa)	4078.4	3648.5	4372.5	3644.8		3346.2
MK5-3	温度(℃)	704.43	664.28	694 . 76			
	压力(MPa)	7108.2	7062.6.3	7230.5			

sedimentary rocks around the Markam gneiss dome

通过变质温-压条件估算获得高温中压和高温 低压两种差别较大的变质条件,与野外观察到的两 期变质作用叠加相符。而两期变质作用的变质温度 均达到或超过 550℃,而如此高温足以使变质沉积 岩中的 Li 活跃,并脱离岩石进入流体,从而导致流 体中 Li 元素的进一步富集。

5 马尔康片麻岩穹隆形成过程的时间 制约

为了限制马尔康片麻岩穹隆的形成和演化,包 括花岗岩和伟晶岩的侵位年龄以及马尔康拆离断层 的起始和演化时限, Zheng Yilong et al. (2020)对 20 个来自马尔康穹隆的样品进行了锆石 U-Pb 年代 学分析。其中,两个样品来自太阳河岩体(MK3-13, MK3-14), 两个样品来自可尔因岩体(MK18-27, MK2-1); 其他 12 个样品 (MK3-8、MK89-83、 MK89-51, MK18-53, MK18-29, MK89-48, MK89-42、MK89-31、MK89-41、MK89-43、MK18-43 和 MK89-35)来自侵入幔部变质沉积岩的伟晶岩和淡 色花岗岩脉;另有4个样品来自幔部变质沉积岩,对 其碎屑锆石进行分析。来自马尔康片麻岩穹隆的新 锆石 U-Pb 年龄数据表明太阳河岩体侵位年龄约 224~218 Ma, 而可尔因岩体就位年龄约 226~212 Ma(表 3),这与前人(Deschamps et al., 2017)所获 得的研究成果(分别为 239~202 Ma 和 231~209 Ma)大致相同(前人研究使用了单个测试点的年龄, 而本文使用加权平均年龄)。对幔部变质沉积岩下 部马尔康拆离断层中的同构造强变形伟晶岩脉和淡 色花岗岩脉进行定年,获得拆离断层形成年龄约为 212~207 Ma。对侵位马尔康片麻岩穹隆的未变形 的伟晶岩和淡色花岗岩进行定年(包括含锂辉石伟 晶岩脉),获得其锆石 U-Pb 年龄分布于 200~190 Ma之间,代表了未变形岩脉的结晶年龄,也即含锂 伟晶岩脉形成时间为侏罗纪早期。同时,这些年龄 限定了马尔康片麻岩穹隆强变形事件的时间上限, 而含锂辉石伟晶岩矿脉形成于强变形之后,属于造 山折返期。

表 3 马尔康片麻岩穹隆年龄样品采样位置、岩性和锆石 U-Pb 年龄分析结果(据 Zheng Yilong et al., 2020)

Talbe 3 Sampling location, lithology and age results of samples from Markam gneiss dome (after Zheng Yilong et al., 2020)

花岗岩类和伟晶岩								
样品	位置	岩性	年龄值					
MK3-13	太阳河北部	花岗闪长岩	223.6 \pm 2.2 Ma					
MK3-14	太阳河中部	花岗闪长岩	218.9 \pm 8.6 Ma					
MK2-1	高尔达西	花岗岩	226.6 \pm 2.5 Ma					
MK18-27	松岗西	花岗岩	211.9 \pm 2.4 Ma					
MK3-8	太阳河桥	变形淡色花岗岩	Leu-1	212.5 \pm 2.2 Ma				
MK89-83	木尔宗南东	变形伟晶岩	Peg-1	210.1 \pm 2.6 Ma				
MK89-51	白湾东	变形伟晶岩	Peg-1	209.4 \pm 2.5 Ma				
MK18-53	业隆沟北	变形淡色花岗岩	Leu-1	207.8 \pm 1.5 Ma				
MK18-29	高尔达	未变形淡色花岗岩	Leu-2a	200. 3 \pm 2. 7 Ma				
MK89-48	高尔达东	未变形淡色花岗岩	Leu-2a	200. 1 \pm 1. 2 Ma				
MK89-42	高尔达东	未变形伟晶岩	Peg-2a	198.6 \pm 1.5 Ma				
MK89-31	地拉秋南	未变形伟晶岩	Peg-2a	197.7 \pm 1.7 Ma				
MK89-41	高尔达东	未变形伟晶岩	Peg-2b	196.3 \pm 1.4 Ma				
MK89-43	高尔达东	未变形伟晶岩	Peg-2b	194.0 \pm 1.9 Ma				
MK89-34	地拉秋南	未变形伟晶岩	Peg-2b	190.8 \pm 1.6 Ma				
MK89-35	地拉秋南	未变形伟晶岩	Peg-2b	190.1 \pm 1.3 Ma				

6 讨论

6.1 马尔康片麻岩穹隆的构造成因

通过野外观察和构造分析,确定了马尔康片麻 岩穹隆是锂矿床主要赋存的构造样式。马尔康片麻 岩穹隆的早期变形(D1)表现为三叠纪花岗岩和变 质沉积岩之间发育的大型南向剪切的近水平的马尔 康拆离剪切带(MRKD),并在剪切带上部形成平行 糜棱面理侵位的不含锂辉石的同构造伟晶岩脉;拆 离剪切带的形成导致地壳下部挤压上部伸展的环 境,致使早期形成的花岗岩熔浆上涌,形成穹状构造 (D2),表现为围绕花岗质核部的幔部变质岩中发育 放射状正向下滑构造,也就是"变质核杂岩"构造; 受印度-亚洲碰撞的远程影响,形成 E-W 向南向逆 冲断裂(D3),使马尔康花岗岩体向南叠置在三叠纪 变质岩之上。表明马尔康片麻岩穹隆的形成机制可 能为变质核杂岩,其在伸展环境下形成的一系列张 节理和破劈理为伟晶岩脉的扩张外侵提供通道,促 进了伟晶岩的进一步结晶分异作用,同时增加了流 体与围岩的接触面,促进二者之间的物质转换。

6.2 片麻岩穹隆演化与伟晶岩型锂矿形成的探讨

研究表明,马尔康拆离剪切带经历了高温变形作用(>650℃);同时马尔康穹隆幔部变质沉积岩砂 线石-蓝晶石带峰期变质温-压条件为664~704℃, 700~720 MPa,十字石-石榴子石变质带峰期变质 温压条件为618~632℃,600~800 MPa;这些温度 与造山带中酸性侵入岩顶部温度相吻合(约700℃; London,2014);因此,我们认为马尔康拆离断层与 幔部变质沉积岩早期高温中压变质作用发生于岩浆 侵位之后。而在高尔达地区矽线石片岩呈构造透镜 体出露于马尔康拆离断层的韧性剪切带中,表明早 期高温-中压变质作用可能早于剪切变形或与其同 时。而后期叠加变质作用的温压条件为570~ 630℃、330~440 MPa,与花岗岩上部伟晶岩脉的形 成温度相近(约600℃;London,2014),表明二者可 能具有成因联系。而在叠加变质作用过程中,由于 温度达到 Li 元素的活跃温度,因而 Li 可能从变质 沉积岩中被萃取进入热液流体,并最终形成含锂辉 石伟晶岩矿床。

前人对可尔因、太阳河岩体的分析表明可尔因 岩体以S型过铝质花岗岩为主,而太阳河岩体则为 I型花岗岩,高K钙碱性闪长岩和正长闪长岩 (Deschamps et al., 2017),形成于俯冲期增生楔中 不同深度岩石的部分熔融。而通过地球化学的分 析,马尔康片麻岩穹隆含锂辉石伟晶岩和不含锂辉 石伟晶岩均显示了碰撞造山环境的成分特征。表明 研究区在核部岩体侵位到不同类型的伟晶岩侵位至 围岩的过程中,经历了造山折返的演化。

Li 元素物源方面,前人的对可尔因-太阳河岩体的分析显示,太阳河二长花岗岩、石英闪长岩岩体中的锂含量相对较低(86×10⁻⁶~240×10⁻⁶),而可尔因岩体二云母花岗岩中的 Li 含量较高(400×10⁻⁶) (Liao Yuanan et al., 1992)。Deschamps et al. (2017)明确指出可尔因岩体为松潘-甘孜变质沉积 岩在角闪岩相环境下部分熔融形成。富集于锂辉石 的 Li 和 Rb 与富集于钠长石的 Be、Nb、Ta 具有明



图 10 马尔康片麻岩穹隆的演化模式 Fig. 10 Evolution model of the Markam gneiss dome, Songpan-Ganzi terrane TYH—太阳河岩体;KRY—可尔因岩体 TYH—Taiyanghe Pluton; KRY—Keryin Pluton

显分异,Li/Be 为 400/7.4(Liao Yuanan et al., 1992);Rb/Be 为 248/3.5(可尔因岩体)(Deschamps et al., 2017)。

伟晶岩的地球化学分析显示,马尔康地区含锂 辉石伟晶岩和不含锂辉石伟晶岩的并非严格的分异 结晶作用的结果。可能的解释是,在碰撞过程中下 部变质沉积岩部分熔融形成花岗岩岩浆通过结晶分 异作用,形成富 Li 流体的基础上,岩浆房演化后期 高温流体萃取围岩中的 Li 元素,进一步富集形成锂 辉石伟晶岩。

此外,含锂辉石和不含锂辉石的伟晶岩中富集 于锂辉石的 Li 和 Rb 与富集于钠长石的 Be、Nb、Ta 具有明显分异,Li/Be 值分别为 12929/86(平均值, 下同)和 118/15,而可尔因岩体的 Li/Be 值为 400/ 7.4。结合野外观察到的含锂辉石和不含锂辉石的 伟晶岩脉比例,我们认为 Li 元素富集过程中其内部 结晶分异作用可能起主要作用。

6.3 马尔康片麻岩穹隆成矿前景的初步评价

松潘-甘孜造山带以及其他一些造山带(如喜马 拉雅和秦岭)中片麻岩穹隆与伟晶岩型锂(铍)矿富 集存在密切成因关系的事实已经被揭示(Xu Zhiqin et al., 2020a; Zheng Yilong et al., 2020)。在太 阳河闪长岩与可尔因花岗岩组成的核部、晚三叠世 变质沉积岩组成幔部的马尔康片麻岩穹隆中,研究 表明,在约 212~207 Ma 期间向南剪切的马尔康韧 性拆离剪切带的驱动下,马尔康片麻岩穹隆在造山 折返阶段形成,并造成与花岗岩有成因关系的两期 伟晶岩脉的大量侵位。其中约 200~190 Ma 形成 的切割面理的陡倾富锂辉石伟晶岩脉为该区的找矿 突破提供了有利的靶区。印度-亚洲碰撞的远程效 应形成的近东西向马尔康逆冲断裂,造成断裂北部 的岩体的隆升以及南部含大量(锂辉石)伟晶岩脉在 幔部变质沉积岩(特别是十字石-红柱石片岩)中的 埋藏。无疑,马尔康片麻岩穹隆将成为川西地区新 能源锂矿资源的有利开发利用地区之一。

这里还必须注意对比的是位于马尔康穹隆南部 的丹巴片麻岩穹隆。丹巴片麻岩穹隆的核部由经混 合岩化作用的新元古代花岗岩和花岗岩片麻岩组 成,幔部岩石为经过巴罗式中压变质作用的志留— 泥盆系地层。而马尔康片麻岩穹隆是由核部 220~ 210 Ma 的花岗岩和幔部三叠系厚层复理石组成。 由于三叠纪巨厚泥质层含黏土和云母,富含锂元素, 花岗岩的成因与三叠纪岩石的局部熔融有关。因 此,我们认为松潘甘孜三叠系中的片麻岩穹隆为锂 矿富集创造了条件,这也是丹巴片麻岩穹隆未发现 大型锂辉石矿的原因。

7 结论

基于以上分析,我们认为在三叠纪一侏罗纪 (T₃-J₂)造山过程中发生强烈地壳缩短和加厚,在 此过程中基底与盖层之间以及古生代与中生代盖层 的软弱层中(如志留系和三叠系)发生多层次向南的 滑脱作用,并伴随不同层次的部分熔融,形成可尔 因-太阳河花岗岩(230~212 Ma),并引发周围沉积 岩发生巴罗式变质作用(图 10a)。当造山折返开 始,区域构造环境由深部挤压转换为浅部伸展时,由 于上部沉积岩岩相发生变化,造成重力失稳,从而在 岩体顶部形成南向剪切的马尔康拆离断层,断层内 部的同构造伟晶岩和淡色花岗岩脉的定年显示其应 形成于 212~207 Ma 之间。拆离断层的持续进行, 导致了可尔因-太阳河岩体的进一步底辟快速上升, 从而引起上部变质沉积岩向四周滑脱,形成片麻岩 穹隆构造(图 10b)。此后,马尔康片麻岩穹隆中岩 体顶部残余流体发生结晶分异作用,并沿裂隙逐渐 向外扩散,在200~190 Ma期间形成大量未变形的 伟晶岩、淡色花岗岩脉,二者平行或切割面理呈网格 状产出(图 10c)。在离岩体 2 km 左右的区域内,流 体经结晶分异作用,并通过高温萃取围岩中的 Li 元 素,大量锂辉石晶出,形成锂辉石矿床。至新生代印 度-欧亚大陆的碰撞,研究区构造重新活跃起来,发 育的一条近东西向逆断层将可尔因岩体逆冲至变质 沉积岩之上,改造了矿床的原始分布。

致谢:感谢审稿人对初稿提出的宝贵意见。

References

- De Sigoyer J, Vanderhaeghe O, Duchêne S, Billerot A. 2014. Generation and emplacement of Triassic granitoids within the Songpan Ganze accretionary-orogenic wedge in a context of slab retreat accommodated by tear faulting, Eastern Tibetan plateau, China. Journal of Asian Earth Sciences, 88: 192 \sim 216.
- Deschamps F, Duchêne S, De Sigoyer J, Bosse V, Benoit M, Vanderhaeghe O. 2017. Coevalmantle-derived and crust-derived magmas forming two neighbouring plutons in the Songpan Ganze accretionary orogenic wedge (SW China). Journal of Petrology, 58(11): 2221~2256.
- Fei Guangchun, Yuan Tianjing, Tang Wenchun, Zhong Wei, Yang Guibing, Gu Chenghui. 2014. Taxology of the rare-metalbearing pegmatites in Keryin, western Sichuan Province. Mineral Deposits. 33(S1): 187~188 (in Chinese).
- Fei Guangchun, Tian Jingjing, Yang Jiyi, Gao Jianguo, Tang Wenchun, Li Jian, Gu Chenghui. 2018. New zircon U-Pb age of the super-large Lijiagou spodumene deposit in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibet; implications for Early Jurassic raremetal polymetallic event. Acta Geologica Sinica (English Edition), 92; 1274~1275.
- Fu Xiaofang, Hou Liwei, Wang Denghong, Yuan Linping, Liang Bin, Hao Xuefeng, Pan Meng. 2014. Achievements in theinvestigation and evaluation of spodumene resources at Jiajika in Sichuan, China. Geological Survey of China, 1(3): 37 ~43 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaofang, Yuan Linping, Wang Denghong, Hou Liwei, Pan Meng, Hao Xuefeng, Liang Bin, Tang Yi. 2015. Mineralization characteristics and prospecting model of newly discovered X03 rare metal vein in Jiajika orefield, Sichuan. Mineral Deposits, 34(6): 1172~1186 (in Chinese with English abstract).
- Fu Xiaofang, Huang Tao, Zou Fuge, Ling Bin, Hao Xuefeng, Yang Rong, Pan Meng, Tang Yi. 2021. Ore- controlling mechanism and deep prospecting direction of Jiajika-like lithium mines. Acta Geologica Sinica, 95(3):791~808.
- Li Jiankang. 2006. Mineralizing mechanism and continental geodynamics of typical pegmatite deposits in western Sichuan, China. Doctor dissertation of China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Liao yuanan, Yao Xueliang. 1992. Evolution feature and minerogenetic relations peraluminous granites from Jinchuan, western Sichuan. Mineralogy and Petrology, 12(1): 12~22 (in Chinese without English abstract).
- London D. 2014. A petrologic assessment of internal zonation in granitic pegmatites. Lithos, 184~187: 74~104.
- Peng Aiping. 2012. The status quo and future prospective of the lithium industry. 11: 19 ${\sim}\,21$ (in Chinese).
- Roger F, Malavieille J, Leloup P H, Calassou S, Xu Z. 2004. Timing of granite emplacement and cooling in the Songpan-Garzê Fold Belt (eastern Tibetan Plateau) with tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 22(5): 465 \sim 481.
- Roger F, Jolivet M, Malavieille J. 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic topresent: a synthesis. Journal of Asian Earth Sciences, 39(4): 254~269.
- Sang Longkang, Ma Changqian. 2012. Petrology. Bejing: Geological Pulishing House, 1~320 (in Chinese).
- Sovacool B K, Ali S H, Bazilian M, Radley B, Nemery B, Okata J, Mulvaney D. 2020. Sustainable minerals and metals for a lowcarbon future. Science, 367 (6473): 30~33.
- Wang He, Li Pei, Ma Huadong, Zhu Bingyu, Qiu Lin, Zhang Xiaoyu, Dong Rui, Zhou Kailin, Wang Min, Wang Qian, Yan Qinghe, Wei Xiaopeng, He Bin, Lu Hong, Gao Hao. 2017. Discovery of the Bailongshan superlarge lithium-rubidium

deposit in Karakorum, Hetian, Xinjiang, and its prospecting implication. Geotectonica et Metallogenia, 161: 1053~1062 (in Chinese with English abstract).

- Wang Denghong, Fu Xiaofang. 2013. Breakthrough in lithium exploration on the outskirt of the Jiajika area, Sichuan Province. Rock and Mineral Analysis, 32 (6): 987 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu, Fu Xiaofang, Huang Minghua. 1992. Orogenic Process of Songpan-Ganze Orogenic Belt of China. Beijing: Geological Publishing House, 190 (in Chinese).
- Xu Zhiqin, Ma Xuxuan. 2015. The Chinese Phanerozoic gneiss domes: subduction-related type, collision-related type and combination type of subduction-collision. Acta Petrologica Sinica, 31 (12): 3509 ~ 3523 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Fu Xiaofang, Ma Xuxuan, Qi Xuexiang, Wu Chan, Hou Liwei, Zhao Zhongbao. 2016. The gneiss domes in Tibetan Plateau and their potential for prospecting. Acta Geologica Sinica, 90 (11): 2971 ~ 2981 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhao Zhongbao, Fu Xiaofang. 2018. On the structural back grounds of the large-scale "hard-rock type" lithium ore belts in China. Acta Geologica Sinica, 92 (6): 1091~1106 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Fu Xiaofang, Wang Rucheng, Li Guangwei, Zheng Yilong, Zhao Zhongbao, Lian Dongyang. 2020a. Generation of lithium-bearing pegmatite deposits within the Songpan-Ganze orogenic belt, East Tibet. Lithos, 354-355: 105281.
- Xu Zhiqin, Wang Rucheng, Zhu Wenbin, Qin Yulong, Fu Xiaofang, Li Guangwei. 2020b. Scientific drilling project of granite-pegmatite-type lithium deposit in western Sichuan: scientific problems and significance. Acta Geologica Sinica, 94 (8): 2177~2189.
- Yue Xiangyuan, Zhang Yi, Zhou Xiong. 2016. Metallogenic geological background of the Dilaqiu lithium deposit in Barkam County, Sichuan Province. Geological Review, 62(S1): 69~70 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Wu Fuyuan, Hu Ruizhong, Jiang Shaoyong, Li Wenchang, Wang Rucheng, Wang Denghong, Qi Tao, Qin Kezhang, Wen Hanjie. 2019. Critical metal mineral resources current research status and scientific issues. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 33(2): 106~111 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongfei, Zhang Li, Harris N, Jin Lanlan, Yuan Honglin. 2006. U-Pb zircon ages, geochemical and isotopic compositions of granitoids in Songpan-Garze fold belt, eastern Tibetan Plateau: constraints on petrogenesis and tectonic evolution of the basement. Contributions to Mineralogy and Petrology, 152 (1): 75~88.
- Zhao Zhongbao, Du Jinxue, Liang Fenghua, Wu Chan, Liu Xiaojia. 2018. Structure andmetamorphism of Markam gneiss dome from the eastern Tibetan Plateau and its implications for crustal thickening, metamorphism, and exhumation. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20(1): 24~45.

Zheng Mianping, Liu Xifang. 2007. The lithium resources in China. Advanced Materials Industry, 8: 13~16 (in Chinese).

Zheng Yilong, Xu Zhiqin, Li Guangwei, Lian Dongyang, Zhao Zhongbao, Ma Zeliang, Gao Wenqi. 2020. Genesis of the Markam gneiss dome within the Songpan-Ganzi orogenic belt, eastern Tibetan Plateau. Lithos, 362-363, 105475.

参考文献

- 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 (S1):187~188.
- 付小方,侯立玮,王登红,袁蔺平,梁斌,郝雪峰,潘蒙. 2014. 四川甘 孜甲基卡锂辉石矿矿产调查评价成果. 中国地质调查,1(3): 37~43.
- 付小方,袁蔺平,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. 矿床地质,34(6):1172~1186.
- 付小方,黄韬,邹付戈,邹付戈,梁斌,郝雪峰,杨荣,潘蒙,唐屹. 2021. 甲基卡式锂矿田控矿作用与深部找矿方向.地质学报, 95(3):791~808.
- 李建康. 2006. 川西典型伟晶岩型矿床的形成机理及其大陆动力学 背景. 中国地质大学(北京)博士学位论文.
- 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.
- 彭爱平. 2012. 锂工业发展现状及未来趋势. 中国金属通报, 11: 19 ~21.
- 桑隆康,马昌前. 2012. 岩石学. 北京:地质出版社,1~320.
- 王登红,付小方. 2013.四川甲基卡外围锂矿找矿取得突破.岩矿测试,32(06):987.
- 王核,李沛,马华东,朱柄玉,邱林,张晓宇,董瑞,周恺麟,王敏,王 茜,闫庆贺,魏小鹏,何斌,卢鸿,高昊. 2017. 新疆和田县白龙 山超大型伟晶岩型锂铷多金属矿床的发现及其意义. 大地构造 与成矿. 161: 1053~1062.
- 许志琴,侯立玮,王宗秀,付小芳,黄明华. 1992. 中国松潘-甘孜造山 带的造山过程. 北京:地质出版社, 190.
- 许志琴,马绪宣. 2015. 中国大陆显生宙俯冲型、碰撞型和复合型片 麻岩穹窿(群). 岩石学报,31(12):3509~3523.
- 许志琴,付小方,马绪宣,戚学祥,吴婵,侯立伟,赵中宝.2016.青藏 高原片麻岩穹窿与找矿前景.地质学报,90(11):2971~2981.
- 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.
- 许志琴,王汝成,朱文斌,秦宇龙,付小芳,李广伟. 2020. 川西花岗-伟晶岩型锂矿科学钻探:科学问题和科学意义.94(8):2177 ~2189.
- 岳相元,张贻,周雄. 2016. 四川省马尔康县地拉秋锂辉石矿床成 矿地质背景. 地质论评,62(S1):69~70.
- 翟明国,吴福元,胡瑞忠,蒋少涌,李文昌,王汝成,王登红,齐涛,秦 克章,温汉捷.2019. 战略性关键金属矿产资源:现状与问题. 中国科学基金,33(2):106~111.
- 郑绵平, 刘喜方. 2007. 中国的锂资源. 新材料产业, 8:13~16.

Tectonic genesis of the Markam gneiss dome and pegmatitic lithium deposits in western Sichuan Province

ZHENG Yilong¹⁾, XU Zhiqin^{*2)}, GAO Wenqi³⁾, ZHENG Bihai²⁾, GAO Jianguo⁴⁾, YAN Haoyu²⁾

1) Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

2) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210023, China;

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

4) College of Earth Science, Chengdu University of Technology 610059, China

* Corresponding author: xzq@nju.edu.cn

Abstract

Gneiss dome is an important structural style formed during orogenic exhumation. The Markam lithium deposit, located in the Markam gneiss dome at the hinterland of the Songpan-Ganzi orogenic belt, is composed of the Taiyanghe granodiorite and the Keryin granite in the core, with Late Triassic metamorphic sedimentary rocks in the mantle, whose protoliths were Triassic abyssal and bathyal flysch and turbidity deposits. A large number of pegmatite sheets and dykes were intruded into the metasedimentary rocks. Through field geological investigation and microstructural analysis, three stages of structural deformations superimposed on the earlier compressional deformation are identified in the Markam gneiss dome: the first stage deformation (D1) is a top-to-the-south large-scale Markam detachment fault (MRKD), which separates the granitoid core from the overlying Upper Triassic metasedimentary rocks; the second stage deformation (D2) is the "domal structure"; the third stage deformation (D3) introduces a near E-W trending Cenozoic thrust fault. New zircon U-Pb geochronological data reveal that the crystallization ages of the Taiyanghe and Keryin granitoids are ca. $226 \sim 212$ Ma and ca. 224~218 Ma, respectively. In addition, zircon U-Pb dating of syn-tectonic pegmatites in the MRKD reveals ages of ca. $212 \sim 207$ Ma, while undeformed pegmatitic dykes (including spodumene-bearing veins) have ages of ca. $200 \sim 190$ Ma. We suggest that during the early compressional orogeny, granites emplaced at $220 \sim 212$ Ma, resulting in middle-low pressure Barrovian metamorphism. Then, the top-to-the-south detachment shear zone associated with metamorphic core complex structure was formed during the transformation from deep compressional to shallow extensional ($212 \sim 207$ Ma). It also resulted in the upwelling of granitic magma and the formation of gneiss dome. Since $200 \sim 190$ Ma, a large number of reticular pegmatites (including spodumene-bearing pegmatites) intruded in the meta-sedimentary rocks in the mantle zone. The formation of lithium deposits in the accumulated fluid at the top of the plutonic core is the result of both fractional crystallization and high temperature extraction of Li from the country rocks. We conclude that the Cenozoic thrust fault has uplifted the Keryin and Taiyanghe granitoids in the north, simultaneously deeply burying the meta-sedimentary rocks in the south. Therefore, it has created a favorable condition for the preservation of the lithium deposits.

Key words: Songpan-Ganzi orogeny; gneiss dome; pegmatitic-type lithium deposit; tectonic genesis