

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.163>



# 川西可尔因地区侏倭组变质沉积岩地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素特征及其地质意义

袁彦伟<sup>1</sup>, 费光春<sup>1</sup>, 郑 磊<sup>2</sup>, 蒋建文<sup>2</sup>, 马志平<sup>2</sup>, 江笑梅<sup>2</sup>, 张 贵<sup>3</sup>

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, 四川成都 610059

2. 四川能投锂业有限公司, 四川成都 610095

3. 四川德鑫矿业资源有限公司, 四川阿坝 624101

**摘要:** 为研究可尔因地区侏倭组的物源体系及其与可尔因地区李家沟伟晶岩之间的成因联系, 对出露于西康群侏倭组中的变质沉积岩进行了全岩地球化学、锆石 U-Pb 定年以及 Lu-Hf 同位素分析。分析结果显示侏倭组变质沉积岩具高 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的地球化学特征, 稀土元素配分曲线整体右倾, 与澳大利亚晚太古宙沉积岩(PAAS)配分一致。阴极发光图像(CL)显示, 碎屑锆石普遍具有岩浆震荡环带, 部分受重结晶改造及存在变质增生边。碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱具有 313~227 Ma 和 461~401 Ma 两个主峰以及 938~774 Ma 和 2 048~1 928 Ma 两个次峰。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 -17.1~+13.3 之间, 二阶段模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )分布在 3 240~499 Ma 之间。综合全岩地球化学、锆石 U-Pb-Hf 同位素特征及区域地质对比, 认为可尔因地区侏倭组变质沉积岩的物源主要为来自大陆岛弧的长英质岩石, 并伴有一些再循环沉积物, 主要接收了来自东昆仑、北秦岭及扬子陆块的物质。可尔因地区李家沟伟晶岩为侏倭组变质沉积岩直接部分熔融固结形成。

**关键词:** 侏倭组变质沉积岩; 碎屑锆石; U-Pb 年龄; Lu-Hf 同位素; 可尔因地区; 地球化学。

中图分类号: P595

文章编号: 1000-2383(2022)08-2902-23

收稿日期: 2021-06-25

## U-Pb Age and Lu-Hf Isotope of Detrital Zircons, Geochemical Characteristics and Geological Significance for Zhuwo Formation Meta-Sedimentary Rocks in Ke'eryin Region, Western Sichuan

Yuan Yanwei<sup>1</sup>, Fei Guangchun<sup>1</sup>, Zheng Luo<sup>2</sup>, Jiang Jianwen<sup>2</sup>, Ma Zhiping<sup>2</sup>, Jiang Xiaomei<sup>2</sup>, Zhang Gui<sup>3</sup>

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, China

2. Sichuan Energy Investment Lithium Technology Co., Ltd., Chengdu 610095, China

3. Sichuan Dexin Mineral Resources Co., Ltd., A'ba 624101, China

**Abstract:** In order to decipher the provenance system of the Triassic Zhuwo Formation meta-sedimentary rocks and its genetic

**基金项目:** 国家自然科学基金(No. 41702074); 四川省科技厅应用基础研究项目(Nos. 2019jy0285, 2021jy0309); 成都理工大学中青年教学骨干教师(No. JXGG201701).

**作者简介:** 袁彦伟(1997—), 男, 硕士研究生, 地球化学专业。ORCID: 0000-0001-7937-3245. E-mail: 503073850@qq.com

\* **通讯作者:** 费光春, ORCID: 0000-0001-7377-7329. E-mail: feiguangchun07@cdut.cn

**引用格式:** 袁彦伟, 费光春, 郑磊, 蒋建文, 马志平, 江笑梅, 张贵, 2022. 川西可尔因地区侏倭组变质沉积岩地球化学、碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素特征及其地质意义. 地球科学, 47(8):2902—2924.

**Citation:** Yuan Yanwei, Fei Guangchun, Zheng Luo, Jiang Jianwen, Ma Zhiping, Jiang Xiaomei, Zhang Gui, 2022. U-Pb Age and Lu-Hf Isotope of Detrital Zircons, Geochemical Characteristics and Geological Significance for Zhuwo Formation Meta-Sedimentary Rocks in Ke'eryin Region, Western Sichuan. *Earth Science*, 47(8):2902—2924.

relationship with Lijiagou pegmatite in Ke'eryin area, LA-ICP-MS U-Pb micro-dating, Lu-Hf isotope analysis of detrital zircons and whole-rock geochemical analysis of meta-sedimentary rocks were conducted. Geochemical analysis results show that the meta-sedimentary rocks of Zhuwo Formation are characterized by high  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content. The chondrite-normalized REE patterns are characterised by light REE enrichment, which is similar to the Late Archean sedimentary rocks in Australia (PASS). Detrital Zircons show magmatic oscillating zonation, and are partially surrounded by metamorphic accretionary rims due to recrystallization. U-Pb age of detrital zircons yields two main clusters at 313~227 Ma and 461~401 Ma, as well as two minor clusters at 938~774 Ma and 2 048~1 928 Ma.  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of detrital zircons varies from -17.1 to +13.3 with two-stage Hf model ages ( $T_{\text{DM2}}$ ) of 3 240~499 Ma. Based on the results above, we conclude that the provenance of Zhuwo Formation meta-sedimentary rocks in Ke'eryin includes felsic rocks from continental arcs accompanied by some recycled materials mainly receiving materials from East Kunlun, North Qinling orogenic belt and Yangtze blocks. Lijiagou pegmatite in Ke'eryin area was formed by direct partial melting of Triassic Zhuwo Formation meta-sedimentary rocks.

**Key words:** meta-sedimentary rocks of Zhuwo Formation; detrital zircon; U-Pb age; Lu-Hf isotope; Ke'eryin area; geochemistry.

碎屑沉积物记录了沉积盆地演化过程中物源区的物质组成、构造环境及地壳演化等信息(Cox *et al.*, 1995)。对沉积岩进行全岩地球化学研究可以反映其源区物质组成、限定源区构造背景(Nesbitt and Yong, 1982)。锆石因具有独特的物理化学稳定性,高U、Th和Hf含量,高U-Th-Pb体系及Lu-Hf体系封闭温度等性质,使之成为碎屑岩物源区研究中的理想矿物。通过碎屑锆石的CL图像、U-Pb年龄峰值及结合锆石原位Lu-Hf同位素分析可以有效追溯沉积物物源区信息、恢复古地理环境、限定地层最大沉积年代及区域构造演化(Federico *et al.*, 2004)。

川西可尔因地区处于松潘甘孜造山带主体的马尔康弧,其西以金沙江缝合带与冈瓦纳大陆外缘的羌塘—昌都陆块相邻,东南缘以龙门山断裂带与扬子陆块相隔(图1a)(许志琴等,2018)。区域上发育一套巨厚层的西康群复理石沉积建造并有大面积的可尔因复式岩体侵位,岩体邻区带状成群分布着与稀有金属矿产相关的伟晶岩(图1b)。前人已对可尔因复式岩体开展了地球化学、年代学和构造背景等方面的研究(廖远安和姚学良,1992;李建康,2006;Fei *et al.*, 2020)。而对花岗岩体邻区伟晶岩的研究,则主要集中在其与稀有金属成矿的联系之上(李建康,2006;古国会,2014;费光春等,2014,2020;Fei *et al.*, 2020, 2021;许家斌等,2020),且在伟晶岩成因方面存在着花岗质残余岩浆结晶分异和变质沉积岩部分熔融两种不同的观点(廖远安和姚学良,1992;李建康,2006;Fei *et al.*, 2020)。上三叠统侏罗组( $T_{\text{zjw}}$ )变质沉积岩是可尔因地区富含稀有金属伟晶岩的主要围岩,但针对这些变质沉积岩的全岩地球化学和碎屑锆石年代学的研究至今尚未开展。前人对松潘甘孜造山带中三叠系复理石沉积岩的物源分析做了较多工作(刘飞等,2006;

Weislogel *et al.*, 2006; Enkelmann *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2015; Jian *et al.*, 2019; 秦宇龙等,2020; Gong *et al.*, 2021),但目前对其碎屑物质主要来自东昆仑、羌塘、秦岭、华北陆块或扬子陆块并没有统一的认识。松潘甘孜造山带作为中国三叠纪面积如此之广的深海浊积沉积盆地,其必然存在多个沉积中心,不同时代、区域其沉积物源存在差异。对此,本文在对松潘甘孜造山带中部的可尔因地区侏罗组( $T_{\text{zjw}}$ )变质沉积岩进行野外地质调查及岩石学研究的基础上,结合全岩地球化学分析及碎屑锆石U-Pb定年、Lu-Hf同位素分析等方面的研究,对沉积物质的组成、来源及物源区构造背景进行限定。此外,通过与早三叠世同属松潘—甘孜洋盆浊流沉积形成的甲基卡地区侏罗组的碎屑锆石年龄结构对比,讨论松潘甘孜造山带中部与南部沉积差异因素,为更加系统地研究松潘甘孜造山带物源体系提供新的资料。结合前人研究,深入探讨可尔因李家沟侏罗组沉积围岩与伟晶岩、花岗岩在时空方面的亲缘性以及与稀有金属矿产相关的伟晶岩的成因。

## 1 区域地质背景

松潘甘孜造山带位于中国西部,其北以阿尼玛卿缝合带与东昆仑—柴达木地体相邻,西北以秦岭造山带与华北地块相隔,东南以龙门山断裂与扬子地块相接,西南以金沙江缝合带与羌塘—昌都地体相连,整个构造带呈狭长的“三叉戟”形状(图1a)(许志琴等,2018)。早三叠世松潘甘孜造山带为深海浊积沉积,属古特提斯洋体系,至晚三叠世开始从残余洋盆向造山带演化。区域内发育巨厚层的三叠系复理石沉积建造,并被大面积的晚三叠世—早

侏罗世的花岗岩侵位(胡健民等,2005;Fei *et al.*, 2020).

可尔因地区位于松潘甘孜造山带的中部,区域内出露的地层主要有西康群和少量第四系沉积物(图1b). 西康群包括上三叠统杂谷脑组( $T_3z$ )、侏倭组( $T_3zw$ )和新都桥组( $T_3x$ )等,因该区印支期碰撞造山使地壳抬升并且在燕山期遭受长时间的剥蚀而缺失侏罗系、白垩系和第三系. 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. 可尔因侏倭组( $T_3zw$ )因侵入岩体岩浆的烘烤作用在与其接

触部位及邻区发生了热接触变质作用,岩性以黑云石英角岩、二云角岩、角闪长英角岩、石榴角闪长石角岩以及少部分黑云、二云变粒岩为主(图2a、2b). 位于可尔因南部的甲基卡地区(图1a)其区域上也少量出露侏倭组,岩性以灰色碳质绢云板岩、粉砂质板岩、变质长石石英砂岩及岩屑石英砂岩为主. 在甲基卡马颈子附近出露侏倭组( $T_3zw$ )因岩浆侵位影响发生了热接触变质作用,岩性以二云石英片岩、角岩化石英砂岩为主.

可尔因复式岩体呈不规则三叉状岩基在区内广泛出露(图1b),岩性包括石英闪长岩、黑云母二长花岗岩、黑云母钾长花岗岩、二云母花岗岩和白

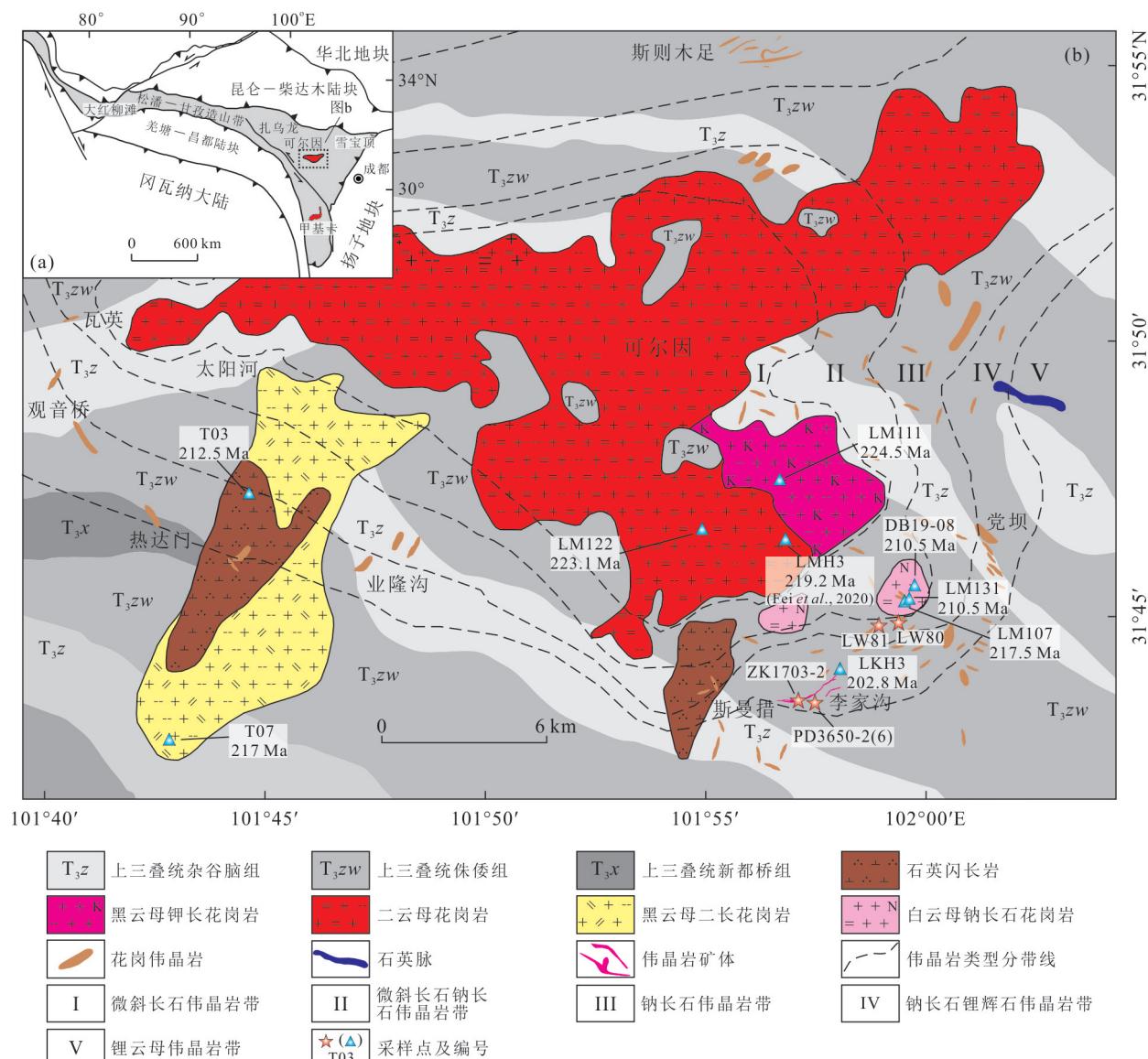


图1 川西可尔因地质简图及采样位置

Fig.1 The geological sketch of Ke' eryin in western Sichuan

据Li *et al.*(2019); Fei *et al.*(2020)修改; 年龄数据引自Fei *et al.*(2020); 费光春(未发表); 五角星为本次研究采样点, 三角形为前人研究采样点

云母(钠长)花岗岩。前人对二云母和白云母钠长花岗岩锆石定年结果分别为 $219.2\pm2.3$  Ma和 $217\pm2.8$  Ma, 地球化学及同位素分析显示其属过铝质S型花岗岩, 具后碰撞花岗岩的特征, 岩浆来源为地壳物质的部分重熔, 为区域上印支期碰撞造山后的产物(Fei *et al.*, 2020)。在可尔因东南部, 伟晶岩围绕可尔因岩体在距其0~5 000 m范围的地层中成群成带分布, 具有明显的水平与垂直分带现象。在水平方向上, 自二云母花岗岩体向外依次出露微斜长石伟晶岩带、微斜长石钠长石伟晶岩带、钠长石伟晶岩带、钠长石锂辉石伟晶岩带、锂云母伟晶岩脉和石英脉。垂直方向上, 伟晶岩类型由二云母二长花岗岩切割最深地段向上, 仍按上述顺序依次变化。前人对区内钠长石伟晶岩开展了锆石定年工作, 对钠长石锂辉石伟晶岩开展了锆石、锡石及铌钽铁矿的定年工作, 获得其年龄集中在198~211 Ma(邓运等, 2018; Fei *et al.*, 2020; 许家斌等, 2020)。

## 2 样品采集与分析方法

本次研究的5件样品均采自可尔因地区侏罗组( $T_{3zw}$ ), 采样位置如图1b所示。所采样品均为角岩, 颜色呈深灰色、灰色, 具致密块状构造。样品PD3650-2和PD3650-6与锂辉石伟晶岩呈侵入接触(图2a), 样品ZK1703-2、LW80及LW81与白云钠长石花岗岩呈侵入接触, 接触界限截然(图2c)。PD3650-2和PD3650-6岩性为二云母石英角岩, 镜下具鳞片粒状变晶结构, 由石英(35%~40%)、白云母(20%~25%)、黑云母(20%~25%)、绢云母(~5%)、斜长石(~5%)、铯榴石(<3%)、石榴石(<3%)、褐帘石(<3%)等矿物组成, 白云母、黑云母呈断续条带状分布, 并且其在局部较为富集(图2d、2e)。ZK1703-2岩性为绿泥石黑云石英角岩, 由石英(45%~50%)、黑云母(30%~35%)、绿泥石(10%~15%)、透辉石(~3%)等组成。LW80和LW81岩性为角闪褐帘黑云母石英角岩, 由石英(~60%)、黑云母(15%~20%)、褐帘石(~10%)、角闪石(5%~10%)、红柱石(<3%)、绿帘石(<3%)、电气石(<3%)等组成(图2f)。

锆石单矿物分选、制靶、透反射和阴极发光显微照相以及之后的U-Pb定年和Lu-Hf同位素原位分析均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、清洗、筛选, 经磁选、重

选并在双目镜下挑选颗粒较大晶形较好的锆石。将挑选好的锆石制靶, 然后根据锆石反射光、透射光和阴极发光图像(CL), 选取合适的锆石测点位置, 以避开裂隙和包裹体, 从而减少普通铅的影响。

锆石U-Pb测年工作由准分子激光器(型号:NWR193、波长:193 nm)和PlasmaQuant MS elite四级杆质谱组成的LA-ICP-MS联用分析系统完成。激光剥蚀时, 束斑直径为25  $\mu\text{m}$ , 频率为8 Hz。采样方式为单点剥蚀, 以氦气作为剥蚀物质的载气。每测试5个未知样品交替测试两次Plesovice和SA01标样, 以Plesovice为外标进行U-Th-Pb同位素分馏效应和仪器漂移校正, 元素质量分数采用NIST610作外标,  $^{29}\text{Si}$ 作内标。数据处理采用Glitter程序, 谐和图以及频率直方图等绘制均采用Isoplot宏程序(Ludwig, 2003)。

锆石U-Pb测年结束后, 进行锆石原位Lu-Hf同位素分析。所用仪器型号为RESOlution LR的193 nm ArF准分子激光剥蚀系统和型号为Nu Plasma II的电感

耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)。实验过程中以氦气作为剥蚀载气, 剥蚀束斑直径50  $\mu\text{m}$ , 剥蚀频率9 Hz。每隔15颗样品锆石, 交替测试3颗标物锆石(包括GJ-1、91500、Plešovice、Mud Tank、Penglai), 以检验锆石Hf同位素比值的数据质量。在Hf同位素数据处理过程中首先采用 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}=0.7325$ , 获得Hf同位素质量歧视因子 $\beta_{\text{Hf}}$ ; 通过人工合成的高Yb锆石( $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf} \approx 0.15$ )自身的 $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb}$ 实测数据, 获得Yb同位素质量歧视因子 $\beta_{\text{Yb}}$ , 再采用 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5887$ (Vervoort *et al.*, 2004)扣除 $^{176}\text{Yb}$ 对 $^{176}\text{Hf}$ 的同量异位干扰; 由于Lu只有 $^{175}$ 与 $^{176}\text{Lu}$ 两个同位素, 假定 $\beta_{\text{Lu}}=\beta_{\text{Hf}}$ , 并采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02655$ (Vervoort *et al.*, 2004)扣除 $^{176}\text{Lu}$ 对 $^{176}\text{Hf}$ 的同量异位干扰。

此次研究的5件侏罗组变质沉积岩样品的全岩主微量元素分析测试在广州拓岩检测技术有限公司完成。主量元素采用ICP-OES(Agilent 720)进行测定, 主要氧化物浓度(>0.5%)的分析精度为±2%, 次要氧化物浓度(0.1%~0.5%)的分析精度为±5%。微量元素的测定采用Jena等离子体质谱法(ICP-MS), 对大多数元素, ICP-MS分析的误差值为±5%~10%。

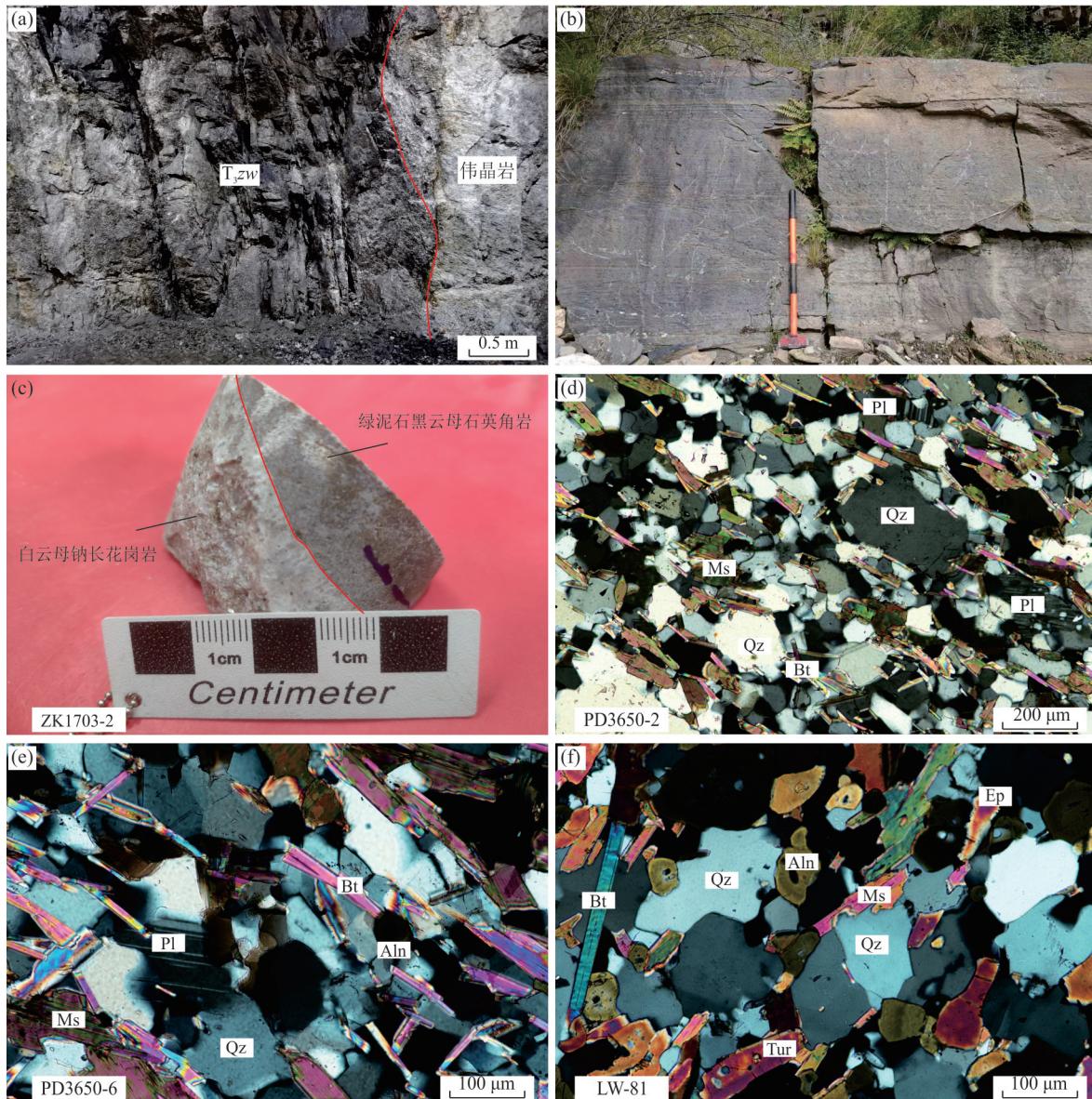


图 2 川西可尔因地区侏儒组变质沉积岩野外及镜下照片

Fig. 2 Field photographs and micrographs of meta-sedimentary rocks from Zhuwo Formation in Ke'eryin area, western Sichuan  
 a. 伟晶岩和围岩( $T_3zw$ )分界线;b. 侏儒组基岩;c. ZK1703-2手标本,深灰色部分为绿泥石黑云母石英角岩,浅灰色为白云母钠长花岗岩;d. PD3650-2镜下照片;e. PD3650-6镜下照片;f. LW-81镜下照片;Qz. 石英;Ms. 白云母;Bt. 黑云母;Ep. 绿帘石;Pl. 斜长石;Aln. 褐帘石;Tur. 电气石

### 3 分析结果

#### 3.1 锆石形态及成因

对可尔因地区侏儒组变质沉积岩样品 PD3650-2 中的锆石进行 U-Pb 测年, CL 图像(图 3)显示碎屑锆石为灰白色、深灰色, 其形态以短柱状、不规则浑圆状为主。粒度大小不一, 集中在 75~150  $\mu\text{m}$  之间, 长宽比介于 1:1~1:3 之间。锆石整体晶形较好, 以半自形为主, 部分呈四方双锥和复四方双锥的自形

晶, 个别受机械破碎作用不完整。从锆石内部结构来看, 可以大致将其分为 3 类, 第一类锆石从核部至边部均具有均匀的岩浆振荡环带, 为典型的岩浆成因锆石; 第二类锆石内部浑浊不清、结构复杂, 仅部分可见较弱的振荡环带(如图 3 测点 46、50、60、70、87 等的锆石), 推测其可能来自于古老的结晶基底, 经历了重结晶作用; 第三类锆石具明显的核一边结构(如图 3 测点 56、57 和 97、98 的锆石), 指示其经过了后期的改造。



图3 川西可尔因地区侏罗组变质沉积岩典型碎屑锆石阴极发光图(实线为U-Pb测年位置,虚线为Hf同位素分析位置)

Fig. 3 Cathodoluminescence images of typical detrital zircons of meta-sedimentary rocks from Zhuwo Formation in Ke' eryin area, western Sichuan (Solidline is location of in-situ zircon U-Pb analysis;dotted line is location of in-situ zircon Hf analysis)

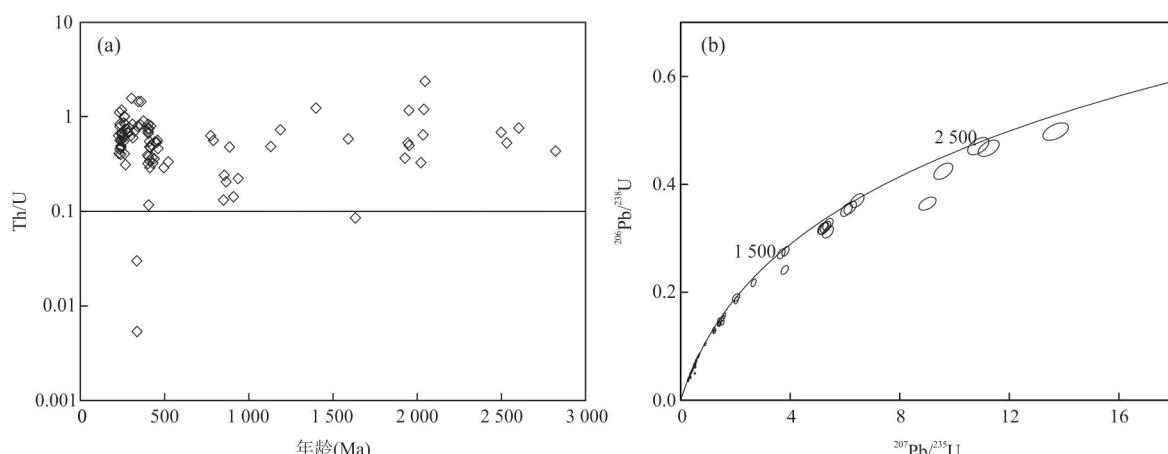


图4 川西可尔因地区侏罗组变质沉积岩锆石Age-Th/U图(a)和U-Pb年龄谐和图(b)

Fig. 4 Zircon age-Th/U image (a) and U-Pb age concordia diagram (b) of meta-sedimentary rocks from Zhuwo Formation in Ke' eryin area, western Sichuan

通常岩浆锆石具有较高的 Th/U 比值 ( $\text{Th}/\text{U} > 0.4$ ), 而变质锆石具有较低的 Th/U 比值 ( $\text{Th}/\text{U} < 0.1$ ) (吴元保和郑永飞, 2004). PD3650-2 样品 Th、U 含量变化大, Th 含量为  $2 \times 10^{-6} \sim 1000 \times 10^{-6}$ , U 含量为  $20 \times 10^{-6} \sim 1510 \times 10^{-6}$ , Th/U 为  $0.01 \sim 2.36$  (排除无效数据, 仅 3 个小于 0.1). 结合锆石 age-Th/U 比值图(图 4a)和 CL 图像特征(图 3)判断此次所测锆石主要为岩浆成因, 少部分年龄较老的锆石(如图 3 测点 46、50、60、87 等的锆石)多具云雾状、

面状无分带等特征, 为变质重结晶锆石, 记录了相应时期的变质年龄信息.

### 3.2 锆石 U-Pb 年龄

本次锆石 LA-LCP-MS 定年实测 100 个点. 对年龄大于 1000 Ma 的锆石, 选取  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄值; 对年龄小于 1000 Ma 的锆石, 选取  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值. 选取谐和度  $>90\%$  的数据, 并排除位于核一边接触部位的测试点(如图 3, 测点 97), 剩余有效测点 93 个, 对应的年龄数据和谐和图见表 1、图 4b. 从碎

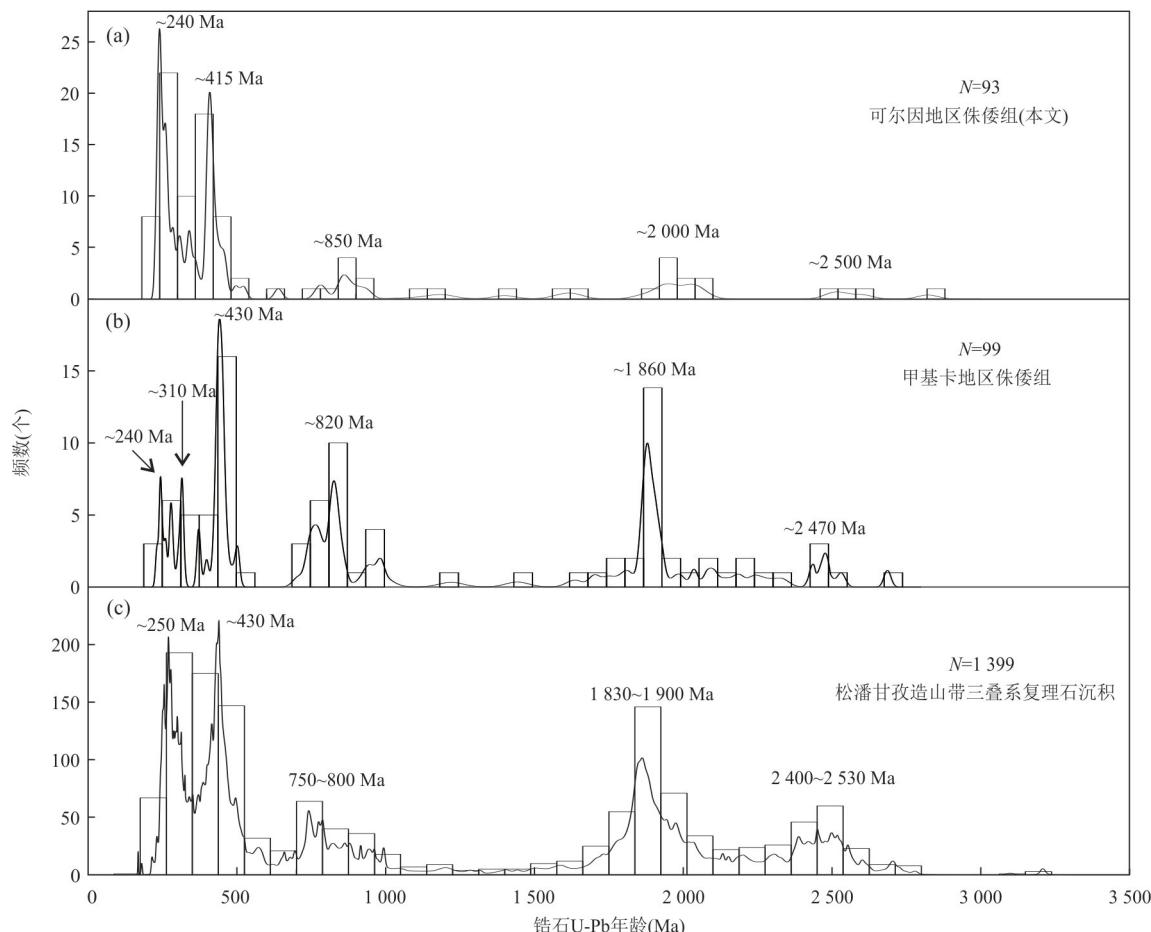


图 5 川西松潘甘孜造山带三叠系复理石沉积及区内部分地层碎屑锆石 U-Pb 年龄频率图

Fig.5 Detrital zircon U-Pb age histograms of Triassic sediments and some strata in SGFB, western Sichuan

松潘甘孜造山带三叠系沉积物数据引自刘飞等(2006); Weislogel *et al.*(2006); Enkelmann *et al.*(2007); 王伟等(2007); 秦宇龙等(2020); 甲基卡地区侏罗组数据引自秦宇龙等(2020)

屑锆石年龄频率分布直方图(图 5a)可以看出,在 313~227 Ma 和 461~401 Ma 出现两个主峰,其中 313~227 Ma 范围内有锆石 34 颗,461~401 Ma 范围内有 24 颗;在 938~774 Ma 和 2048~1928 Ma 出现两个次级峰,各有 8 颗锆石。除此之外,376~323 Ma 有 8 颗锆石,639~496 Ma 有 2 颗,1635~1131 Ma 有 5 颗,2603~2500 Ma 有 3 颗,>2603 Ma 有 1 颗。

### 3.3 锆石 Hf 同位素

在已经进行过 U-Pb 测年的碎屑锆石中选取 46 颗具有代表性的进行 Lu-Hf 同位素原位测试(表 2)。所测的碎屑锆石  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  比值均小于 0.002, 指示放射性成因累积的 Hf 很少(吴福元等, 2007)。碎屑锆石的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  变化范围较大, 分布在 -17.1 至 +13.3 之间(图 6a), 正负值各占 50%, 表明这些锆石既有来自古老地壳物质的再循环, 同样也有来自新生地壳或亏损地幔的物质加入(吴福元等, 2007)。二阶段

模式年龄( $T_{\text{DM2}}$ )分布在 3240~499 Ma 之间(图 6b)。并且在不同年龄区间  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值和  $T_{\text{DM2}}$  各有其特点。

### 3.4 地球化学特征

本次研究样品的全岩主微量分析结果见表 3。样品中  $\text{SiO}_2$  含量介于 67.47%~73.70%,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量介于 10.69%~15.85%,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$  含量介于 4.09%~6.47%,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量介于 0.23%~2.37%,  $\text{K}_2\text{O}$  含量介于 1.33%~2.75%。

所研究的 5 个样品稀土元素总量变化范围较小,  $\sum \text{REE} = 135.42 \times 10^{-6}$ ~ $167.22 \times 10^{-6}$ 。LREE/HREE 比值为 6.98~9.09, 平均为 8.05;  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  的范围为 8.60~11.12, 平均为 9.81, 轻重稀土分馏明显, 轻稀土较为富集;  $(\text{La}/\text{Sm})_N$  比值范围为 3.15~4.12,  $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$  比值范围为 1.33~1.98。Eu 负异常明显,  $\delta\text{Eu}$  范围为 0.55~0.69。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上(图 7a), 所有样品显示出相似的变化特征, 呈明显的右倾型配分模式, 与澳大利

表1 川西可尔因侏罗组变质沉积岩碎屑锆石LA-ICP-MS U-Pb分析结果(样品PD3650-2)

Table 1 LA-ICP-MS U-Pb analysis results of detrital zircons from Zhuwo Formation meta-sedimentary rocks in Ke'eryinaera, western Sichuan(Sample PD3650-2)

点位	含量( $\times 10^{-6}$ )			同位素比值						年龄(Ma)						
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
1	184	522	706	0.7390	0.0578	0.0012	0.5136	0.0125	0.0646	0.0015	523	45	421	8	403	9
2	18	28	75	0.3767	0.0629	0.0021	0.5310	0.0186	0.0614	0.0015	704	68	433	12	384	9
3	86	230	309	0.7462	0.0538	0.0012	0.4846	0.0121	0.0655	0.0016	362	48	401	8	409	9
4	100	98	135	0.7243	0.0796	0.0017	2.0291	0.0510	0.1852	0.0044	1188	42	1125	17	1095	24
5	106	454	613	0.7400	0.0558	0.0013	0.3353	0.0090	0.0437	0.0010	443	52	294	7	276	6
6	64	122	226	0.5407	0.0564	0.0012	0.5523	0.0140	0.0712	0.0017	468	48	447	9	443	10
7	38	66	139	0.4772	0.0552	0.0013	0.5014	0.0135	0.0660	0.0016	420	52	413	9	412	9
8	65	250	395	0.6316	0.0511	0.0012	0.2870	0.0074	0.0408	0.0010	245	51	256	6	258	6
9	37	121	172	0.7020	0.0531	0.0013	0.3758	0.0105	0.0514	0.0012	334	56	324	8	323	7
10	27	136	164	0.8295	0.0529	0.0015	0.3093	0.0096	0.0425	0.0010	325	64	274	7	268	6
11	80	2	354	0.0054	0.0541	0.0012	0.4012	0.0104	0.0538	0.0013	377	51	343	8	338	8
12	24	18	36	0.4829	0.0774	0.0034	2.0243	0.0896	0.1901	0.0048	1131	84	1124	30	1122	26
13	549	217	318	0.6819	0.1642	0.0034	9.5914	0.2293	0.4243	0.0099	2500	34	2396	22	2280	45
14	174	448	675	0.6642	0.0554	0.0012	0.4947	0.0122	0.0648	0.0015	429	47	408	8	405	9
15	119	373	794	0.4694	0.0509	0.0012	0.2679	0.0069	0.0383	0.0009	235	52	241	6	242	6
16	145	74	115	0.6395	0.1255	0.0026	5.3809	0.1293	0.3115	0.0073	2036	36	1882	21	1748	36
17	7	31	45	0.6943	0.0579	0.0065	0.3326	0.0368	0.0417	0.0012	527	227	292	28	263	8
18	261	58	410	0.1423	0.0738	0.0015	1.5407	0.0370	0.1517	0.0035	1035	41	947	15	911	20
19	98	309	639	0.4839	0.0525	0.0012	0.2734	0.0069	0.0378	0.0009	306	50	245	6	239	5
20	95	43	372	0.1162	0.0564	0.0012	0.5054	0.0126	0.0650	0.0015	469	48	415	9	406	9
21	24	101	122	0.8291	0.0539	0.0015	0.3655	0.0107	0.0492	0.0012	367	59	316	8	310	7
22	43	282	195	1.4438	0.0541	0.0013	0.4089	0.0106	0.0549	0.0013	376	51	348	8	344	8
23	83	93	166	0.5607	0.0672	0.0016	1.2074	0.0322	0.1305	0.0030	844	49	804	15	790	17
24	168	516	1144	0.4507	0.0543	0.0012	0.2786	0.0067	0.0373	0.0009	381	47	250	5	236	5
25	32	135	205	0.6595	0.0528	0.0013	0.2883	0.0078	0.0396	0.0009	320	55	257	6	251	6
26	57	426	385	1.1056	0.0533	0.0012	0.2703	0.0069	0.0368	0.0009	341	51	243	6	233	5
27	106	387	432	0.8966	0.0548	0.0012	0.4531	0.0111	0.0600	0.0014	405	47	380	8	376	8
28	116	92	192	0.4789	0.0685	0.0015	1.3902	0.0336	0.1474	0.0034	883	43	885	14	886	19
29	302	124	236	0.5253	0.1193	0.0025	5.2279	0.1241	0.3182	0.0073	1946	37	1857	20	1781	36
30	66	71	245	0.2890	0.0552	0.0013	0.5036	0.0130	0.0662	0.0015	420	50	414	9	413	9
31	171	213	339	0.6289	0.0703	0.0015	1.2360	0.0297	0.1276	0.0029	938	43	817	13	774	17
32	12	71	71	1.0017	0.0523	0.0019	0.3003	0.0112	0.0417	0.0010	298	80	267	9	263	6
33	40	129	266	0.4866	0.0512	0.0013	0.2687	0.0075	0.0381	0.0009	250	58	242	6	241	5
34	27	143	166	0.8586	0.0531	0.0013	0.2996	0.0081	0.0409	0.0009	334	55	266	6	259	6
35	137	365	912	0.4000	0.0517	0.0011	0.2707	0.0066	0.0380	0.0009	270	49	243	5	241	5
36	35	106	168	0.6313	0.0527	0.0015	0.3464	0.0103	0.0477	0.0011	317	62	302	8	300	7
37	74	610	391	1.5592	0.0547	0.0013	0.3639	0.0092	0.0483	0.0011	399	50	315	7	304	7
38	44	83	155	0.5340	0.0557	0.0017	0.5605	0.0180	0.0730	0.0017	440	66	452	12	454	10
39	40	21	36	0.5819	0.0983	0.0022	3.6743	0.0914	0.2712	0.0062	1592	41	1566	20	1547	31
40	47	7	242	0.0298	0.0569	0.0015	0.4193	0.0120	0.0535	0.0012	485	58	356	9	336	8
41	118	386	464	0.8321	0.0568	0.0013	0.5056	0.0126	0.0646	0.0015	482	49	416	8	404	9
42	50	150	190	0.7928	0.0568	0.0013	0.5249	0.0135	0.0671	0.0015	483	51	428	9	418	9
43	40	173	206	0.8395	0.0754	0.0020	0.5168	0.0147	0.0497	0.0011	1080	52	423	10	313	7
44	36	98	240	0.4076	0.0551	0.0016	0.2753	0.0083	0.0362	0.0008	417	61	247	7	229	5

续表1

点位	含量( $\times 10^{-6}$ )			同位素比值						年龄(Ma)						
	Pb	Th	U	Th/ U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
45	158	473	788	0.600 0	0.050 4	0.001 1	0.345 3	0.008 2	0.049 7	0.001 1	213	49	301	6	313	7
46	28	47	20	2.364 1	0.126 4	0.003 0	6.442 7	0.166 7	0.369 9	0.008 5	2 048	41	2 038	23	2 029	40
47	72	129	415	0.310 4	0.056 9	0.001 3	0.334 5	0.008 4	0.042 7	0.001 0	485	50	293	6	269	6
48	168	196	609	0.321 3	0.056 1	0.001 3	0.535 9	0.013 2	0.069 4	0.001 6	454	49	436	9	432	9
49	49	212	323	0.657 0	0.053 3	0.001 3	0.283 3	0.007 4	0.038 6	0.000 9	342	53	253	6	244	5
50	99	43	178	0.239 3	0.071 3	0.001 6	1.394 5	0.034 1	0.141 9	0.003 2	966	45	887	14	855	18
51	196	55	152	0.364 5	0.118 1	0.002 5	5.185 0	0.121 8	0.318 5	0.007 1	1 928	37	1 850	20	1 782	35
52	474	141	269	0.526 3	0.167 4	0.003 6	10.86 8	0.256 3	0.470 9	0.010 6	2 532	35	2 512	22	2 488	46
53	44	198	315	0.629 0	0.050 6	0.001 4	0.249 5	0.007 4	0.035 8	0.000 8	222	63	226	6	227	5
54	78	290	518	0.559 1	0.054 7	0.001 2	0.280 5	0.006 9	0.037 2	0.000 8	399	49	251	5	236	5
55	74	398	506	0.785 7	0.050 4	0.001 1	0.258 8	0.006 4	0.037 3	0.000 8	213	51	234	5	236	5
56	535	131	402	0.325 5	0.124 6	0.002 6	6.057 0	0.141 1	0.352 7	0.007 9	2 023	37	1 984	20	1 947	38
57	123	67	128	0.526 6	0.114 1	0.002 5	3.798 4	0.090 0	0.241 4	0.005 4	1 866	38	1 592	19	1 394	28
58	107	411	606	0.678 2	0.053 5	0.001 2	0.333 7	0.008 2	0.045 2	0.001 0	351	50	292	6	285	6
59	61	71	224	0.317 7	0.058 1	0.001 4	0.515 0	0.013 4	0.064 3	0.001 4	534	52	422	9	402	9
60	44	38	32	1.195 3	0.125 9	0.002 8	6.188 4	0.151 4	0.356 6	0.008 0	2 041	39	2 003	21	1 966	38
61	282	471	1022	0.460 4	0.055 4	0.001 2	0.566 1	0.013 6	0.074 1	0.001 7	428	48	456	9	461	10
62	91	518	619	0.836 6	0.055 1	0.001 2	0.283 2	0.006 9	0.037 3	0.000 8	415	48	253	5	236	5
63	215	300	243	1.232 3	0.088 8	0.001 9	2.662 6	0.062 4	0.217 5	0.004 8	1 399	40	1 318	17	1 269	26
64	361	517	1369	0.377 5	0.056 6	0.001 2	0.504 8	0.011 9	0.064 7	0.001 4	476	47	415	8	404	9
65	799	277	552	0.5007	0.179 5	0.003 8	9.012 8	0.207 8	0.364 2	0.008 1	2 648	34	2 339	21	2 002	38
66	208	329	839	0.391 7	0.057 7	0.001 2	0.510 0	0.012 0	0.064 2	0.001 4	516	47	418	8	401	9
67	199	899	1344	0.668 8	0.051 6	0.001 1	0.273 0	0.006 4	0.038 4	0.000 9	267	49	245	5	243	5
68	40	258	178	1.446 7	0.054 4	0.001 3	0.432 3	0.011 4	0.057 7	0.001 3	387	54	365	8	361	8
69	92	253	365	0.695 2	0.054 5	0.001 2	0.484 0	0.011 7	0.064 4	0.001 4	391	49	401	8	403	9
70	231	90	182	0.494 4	0.119 7	0.002 5	5.376 7	0.124 3	0.325 7	0.007 2	1 952	37	1 881	20	1 817	35
71	30	51	109	0.468 0	0.055 0	0.002 0	0.506 2	0.018 6	0.066 7	0.001 5	414	78	416	13	416	9
72	105	222	406	0.545 6	0.056 1	0.001 3	0.508 8	0.012 5	0.065 8	0.001 4	454	50	418	8	411	9
73	249	612	1510	0.405 6	0.055 7	0.001 2	0.320 2	0.007 5	0.041 7	0.000 9	442	47	282	6	263	6
74	86	270	617	0.437 7	0.057 3	0.001 3	0.281 9	0.006 8	0.035 7	0.000 8	503	49	252	5	226	5
75	120	162	475	0.341 1	0.055 7	0.001 2	0.507 5	0.012 1	0.066 1	0.001 5	440	48	417	8	413	9
76	172	182	549	0.331 3	0.057 8	0.001 3	0.673 3	0.016 4	0.084 5	0.001 9	523	49	523	10	523	11
77	23	21	71	0.289 3	0.057 1	0.002 0	0.629 5	0.022 0	0.079 9	0.001 8	496	74	496	14	496	11
78	97	135	366	0.368 0	0.056 6	0.001 3	0.536 4	0.013 1	0.068 7	0.001 5	476	50	436	9	428	9
79	70	89	250	0.356 6	0.056 9	0.001 4	0.553 5	0.014 0	0.070 5	0.001 5	489	52	447	9	439	9
80	159	311	556	0.559 9	0.056 2	0.001 3	0.570 9	0.014 0	0.073 6	0.001 6	461	50	459	9	458	10
81	127	471	767	0.614 4	0.056 2	0.001 2	0.307 0	0.007 3	0.039 6	0.000 9	459	48	272	6	251	5
82	46	162	245	0.663 4	0.055 0	0.001 3	0.340 9	0.008 6	0.045 0	0.001 0	412	51	298	7	284	6
83	308	112	549	0.204 4	0.077 3	0.001 6	1.532 3	0.035 2	0.143 7	0.003 1	1 130	42	943	14	866	18
84	142	254	508	0.500 9	0.057 1	0.001 4	0.531 9	0.013 3	0.067 6	0.001 5	495	52	433	9	422	9
85	233	999	1302	0.767 8	0.055 8	0.001 2	0.352 9	0.008 1	0.045 8	0.001 0	446	47	307	6	289	6
86	50	305	303	1.007 0	0.057 3	0.001 3	0.326 5	0.008 0	0.041 4	0.000 9	501	51	287	6	261	6
87	112	106	91	1.162 0	0.119 7	0.002 6	5.296 7	0.124 7	0.321 0	0.007 0	1 951	39	1 868	20	1 795	34
88	40	300	256	1.172 8	0.052 9	0.001 4	0.283 5	0.007 7	0.038 8	0.000 8	326	58	253	6	246	5
89	48	184	233	0.791 9	0.056 5	0.001 4	0.422 8	0.010 7	0.054 3	0.001 2	469	53	358	8	341	7
90	1261	97	1140	0.084 7	0.100 6	0.002 1	3.826 2	0.086 7	0.275 9	0.005 9	1 635	39	1 598	18	1 571	30

续表1

点位	含量( $\times 10^{-6}$ )			同位素比值						年龄(Ma)						
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
91	79	314	504	0.6232	0.0547	0.0012	0.3040	0.0072	0.0403	0.0009	400	49	270	6	255	5
92	774	317	419	0.7567	0.1748	0.0037	11.2460	0.2541	0.4667	0.0100	2604	35	2544	21	2469	44
93	152	281	592	0.4751	0.0583	0.0013	0.5341	0.0123	0.0664	0.0014	541	47	435	8	415	9
94	79	293	357	0.8207	0.0562	0.0013	0.4422	0.0104	0.0571	0.0012	460	49	372	7	358	7
95	47	170	305	0.5570	0.0553	0.0013	0.2939	0.0072	0.0385	0.0008	425	50	262	6	244	5
96	58	198	361	0.5476	0.0520	0.0012	0.2924	0.0071	0.0408	0.0009	284	52	261	6	258	5
97	468	20	1210	0.0169	0.0621	0.0014	0.8930	0.0207	0.1042	0.0022	679	46	648	11	639	13
98	142	33	255	0.1311	0.0729	0.0016	1.4176	0.0327	0.1410	0.0030	1012	43	896	14	850	17
99	595	130	300	0.4338	0.1995	0.0042	13.691	0.3087	0.4978	0.0106	2822	34	2729	21	2604	46
100	162	59	264	0.2221	0.0735	0.0016	1.5873	0.0364	0.1567	0.0033	1027	43	965	14	938	19

表2 川西可尔因侏罗组变质沉积岩碎屑锆石LA-ICP-MS Lu-Hf同位素测试结果

Table 2 LA-ICP-MS Lu-Hf isotopic test results of detrital zircons from Zhuwo Formation meta-sedimentary rocks in Ke'eryin area, western Sichuan

点位	年龄(Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_t$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}$ (Ma)	$T_{\text{DM2}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
3	409	0.0367	0.0013	0.282749	0.000021	0.282739	-0.8	7.8	718	899	-0.96
5	276	0.0294	0.0012	0.282509	0.000020	0.282503	-9.3	-3.5	1055	1515	-0.96
6	443	0.0544	0.0021	0.282740	0.000015	0.282722	-1.1	8.0	747	915	-0.94
7	412	0.0110	0.0004	0.282279	0.000016	0.282275	-17.5	-8.5	1352	1937	-0.99
8	258	0.0485	0.0017	0.282654	0.000014	0.282646	-4.2	1.2	862	1205	-0.95
11	338	0.0034	0.0001	0.282418	0.000016	0.282417	-12.5	-5.1	1151	1668	-1.00
15	242	0.0392	0.0014	0.282509	0.000016	0.282502	-9.3	-4.2	1063	1538	-0.96
16	2036	0.0176	0.0006	0.281624	0.000029	0.281602	-40.6	4.1	2253	2387	-0.98
18	911	0.0429	0.0014	0.282091	0.000020	0.282067	-24.1	-4.8	1650	2081	-0.96
19	239	0.0497	0.0016	0.282720	0.000021	0.282712	-1.9	3.2	766	1067	-0.95
23	790	0.0222	0.0007	0.282217	0.000013	0.282207	-19.6	-2.5	1447	1848	-0.98
25	251	0.0341	0.0012	0.282659	0.000012	0.282653	-4.0	1.3	844	1193	-0.96
28	886	0.0429	0.0014	0.282257	0.000018	0.282233	-18.2	0.5	1419	1728	-0.96
29	1946	0.0322	0.0011	0.281687	0.000015	0.281645	-38.4	3.6	2200	2350	-0.97
31	774	0.0169	0.0005	0.281979	0.000016	0.281971	-28.0	-11.3	1768	2382	-0.98
32	263	0.0222	0.0007	0.282417	0.000014	0.282413	-12.6	-6.9	1171	1724	-0.98
33	241	0.0133	0.0005	0.282488	0.000015	0.282485	-10.1	-4.8	1066	1577	-0.98
34	259	0.0335	0.0011	0.282670	0.000015	0.282664	-3.6	1.9	827	1164	-0.97
35	241	0.0355	0.0014	0.282512	0.000015	0.282505	-9.2	-4.1	1058	1533	-0.96
38	454	0.0288	0.0009	0.282603	0.000018	0.282595	-6.0	3.7	917	1195	-0.97
40	336	0.0149	0.0006	0.282605	0.000021	0.282602	-5.9	1.4	905	1255	-0.98
42	418	0.0155	0.0005	0.282542	0.000020	0.282537	-8.1	0.9	992	1347	-0.98
44	229	0.0407	0.0015	0.282904	0.000015	0.282897	4.7	9.5	500	656	-0.95
46	2048	0.0150	0.0005	0.281310	0.000016	0.281289	-51.7	-6.7	2675	3062	-0.98
48	432	0.0450	0.0015	0.282556	0.000014	0.282544	-7.6	1.5	996	1323	-0.96
49	244	0.0280	0.0010	0.282727	0.000016	0.282722	-1.6	3.6	744	1043	-0.97
50	855	0.0350	0.0012	0.282239	0.000016	0.282220	-18.9	-0.6	1435	1777	-0.96
51	1928	0.0451	0.0015	0.281571	0.000029	0.281516	-42.5	-1.4	2382	2643	-0.95
53	227	0.0307	0.0011	0.282891	0.000020	0.282887	4.2	9.0	512	682	-0.97

续表2

点位	年龄 (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_t$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$T_{\text{DM1}}$ (Ma)	$T_{\text{DM2}}$ (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
60	2 041	0.013 5	0.000 4	0.281 227	0.000 021	0.281 209	-54.7	-9.7	2 780	3 240	-0.99
62	236	0.031 2	0.001 1	0.282 521	0.000 013	0.282 516	-8.9	-3.9	1 037	1 511	-0.97
64	404	0.012 1	0.000 5	0.282 466	0.000 012	0.282 462	-10.8	-2.1	1 097	1 526	-0.98
67	243	0.045 8	0.001 7	0.282 511	0.000 018	0.282 503	-9.2	-4.2	1 067	1 536	-0.95
70	1 952	0.040 8	0.001 3	0.281 676	0.000 015	0.281 628	-38.8	3.1	2 225	2 384	-0.96
71	416	0.014 5	0.000 6	0.282 680	0.000 016	0.282 675	-3.2	5.8	801	1 038	-0.98
72	411	0.019 9	0.000 7	0.282 798	0.000 014	0.282 792	0.9	9.8	639	778	-0.98
75	413	0.033 5	0.001 0	0.282 523	0.000 015	0.282 515	-8.8	0.0	1 031	1 400	-0.97
78	428	0.069 1	0.002 2	0.282 472	0.000 015	0.282 455	-10.6	-1.8	1 137	1 525	-0.93
80	458	0.020 2	0.000 8	0.282 498	0.000 015	0.282 492	-9.7	0.2	1 059	1 424	-0.98
82	284	0.048 6	0.001 7	0.282 121	0.000 018	0.282 112	-23.0	-17.1	1 620	2 382	-0.95
83	866	0.107 2	0.003 2	0.282 215	0.000 021	0.282 163	-19.7	-2.4	1 551	1 896	-0.90
87	1 951	0.029 2	0.000 9	0.281 440	0.000 020	0.281 405	-47.1	-4.8	2 526	2 871	-0.97
89	341	0.033 7	0.001 2	0.282 943	0.000 015	0.282 935	6.0	13.3	440	499	-0.97
91	255	0.023 0	0.000 9	0.282 535	0.000 016	0.282 531	-8.4	-2.9	1 011	1 467	-0.97
93	415	0.011 3	0.000 4	0.282 330	0.000 014	0.282 327	-15.6	-6.6	1 280	1 820	-0.99
100	938	0.014 8	0.000 4	0.282 207	0.000 016	0.282 199	-20.0	0.5	1 451	1 770	-0.99

表 3 四川西部可尔因侏儒组变质沉积岩主量元素(%)及微量元素( $\times 10^{-6}$ )含量Table 3 Major(%) and trace( $\times 10^{-6}$ ) elements data of Zhuwo Formation meta-sedimentary rocks in Ke'eryin area, western Sichuan

样品编号	LW-80	LW-81	ZK1703-2	PD3650-2	PD3650-6
$\text{SiO}_2$	67.47	70.81	70.24	73.70	72.47
$\text{TiO}_2$	0.75	0.62	0.49	0.50	0.60
$\text{Al}_2\text{O}_3$	15.85	14.76	10.69	11.06	13.23
$\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$	6.16	6.47	4.36	5.14	4.09
$\text{MnO}$	0.08	0.08	0.10	0.11	0.05
$\text{MgO}$	2.17	2.40	2.49	1.90	1.60
$\text{CaO}$	0.51	0.60	7.24	2.90	0.86
$\text{Na}_2\text{O}$	2.18	1.21	0.23	1.53	2.37
$\text{K}_2\text{O}$	2.74	1.33	1.57	1.58	2.75
$\text{P}_2\text{O}_5$	0.20	0.29	0.12	0.15	0.13
$\text{LOI}/\text{H}_2\text{O}^+$	1.00	0.70	1.94	0.88	1.31
Total	99.11	99.26	99.46	99.46	99.45
DF	-2.89	-6.03	-2.99	-3.85	-2.25
ICV	0.92	0.85	1.53	1.23	0.93
Li	1 080	611	822	773	890
B	2 640	2 010	22.6	20.5	230
Rb	655	391	640	173	151
Ba	478	207	220	375	437
Th	11.1	11.1	9.2	9.82	12
U	3.83	3.85	2.56	2.57	2.93
Ta	7.6	10.6	1.07	0.739	1.21
Nb	52.1	35.8	12.6	10.2	11.4
Sr	158	96.3	192	361	159
Zr	180	173	149	170	210
Hf	4.98	5.13	3.84	4.48	5.68

续表3

样品编号	LW-80	LW-81	ZK1703-2	PD3650-2	PD3650-6
Y	28.4	25.7	22.7	24.9	23.8
La	32.9	27.2	29.6	32.9	36.6
Ce	64	53.7	54.8	67.6	68.4
Pr	7.53	6.57	6.38	8.46	8.36
Nd	29.2	25.7	24.3	32.6	30.3
Sm	6.06	5.57	4.67	6.57	5.74
Eu	1.27	0.982	0.921	1.25	1.24
Gd	5.62	5.15	4.39	5.71	5.08
Tb	0.866	0.805	0.7	0.876	0.781
Dy	5.1	4.81	3.96	4.59	4.38
Ho	0.961	0.907	0.753	0.876	0.812
Er	2.77	2.53	2.23	2.56	2.46
Tm	0.391	0.345	0.316	0.346	0.34
Yb	2.57	2.27	2.08	2.38	2.36
Lu	0.38	0.33	0.32	0.38	0.37
REE	159.62	136.87	135.42	167.09	167.22
$\delta\text{Ce}$	0.96	0.95	0.93	0.97	0.92
$\delta\text{Eu}$	0.65	0.55	0.61	0.61	0.69
$(\text{La}/\text{Sm})_N$	3.51	3.15	4.09	3.23	4.12
$(\text{La}/\text{Yb})_N$	9.18	8.60	10.21	9.92	11.12
$(\text{Sm}/\text{Nd})_N$	0.63	0.66	0.59	0.62	0.58
$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$	1.81	1.88	1.75	1.98	1.78
LREE/HREE	7.55	6.98	8.18	8.43	9.09

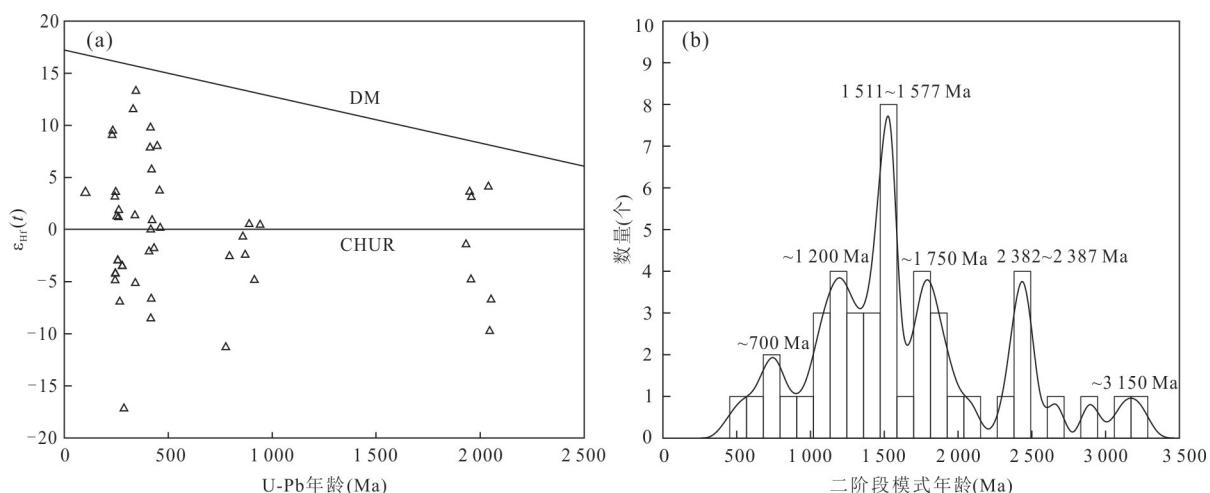
图6 川西可尔因地区侏罗组变质沉积岩碎屑锆石U-Pb年龄- $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图(a)、 $T_{\text{DM}2}$ 频率直方图(b)

Fig. 6 U-Pb age versus  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  value plot (a) and  $T_{\text{DM}2}$  histogram (b) of detrital zircons from Zhuwo Formation meta-sedimentary rocks in Ke'eryin area, western Sichuan

亚后太古宙沉积岩(PAAS)稀土分配曲线相近。本次研究样品与松潘甘孜三叠系沉积物的稀土元素球粒陨石分配模式基本一致,表现出相似的变化特

征(图7a),但La、Ce、Pr、及Nd元素的含量偏低。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图7b),除LW80和LW81明显富集Ta和Nb外,侏罗组样

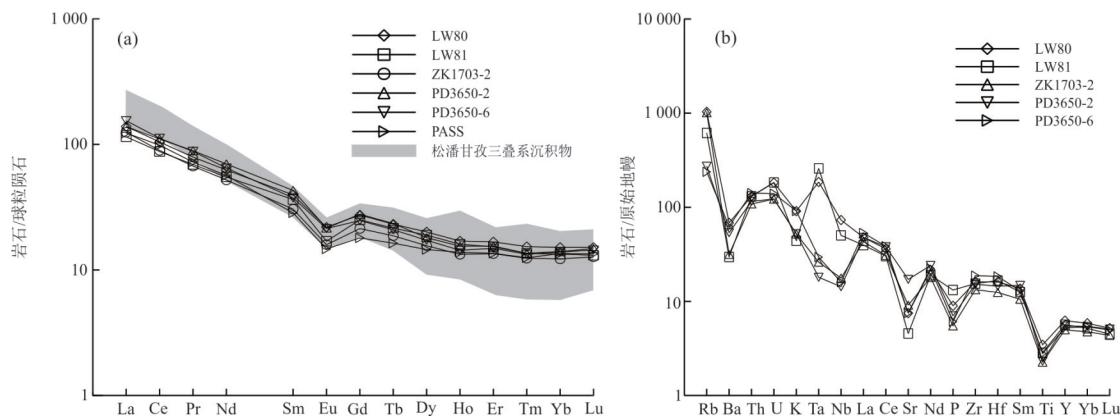


图 7 川西可尔因地区侏儒组变质沉积岩及松潘甘孜三叠系沉积物稀土配分模式图(a)及微量元素蛛网图(b)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams (b)

PASS-澳大利亚后太古宙沉积岩平均值,据 McLennan(1989);松潘甘孜三叠系沉积物数据于远山等(2018);Gong *et al.*, (2021);标准化数值据 Sun and McDonough(1989)

品元素分配模式基本一致,整体上表现出高场强元素 Ta、Nb、P、Ti 亏损, Hf、Zr 及 REE 富集,大离子亲石元素 Ba、K 亏损, Rb 富集的特点。

## 4 讨论

### 4.1 原岩恢复及源区特征

由于本文研究的样品经历了变质作用,部分活动性较强元素(如 Rb、K、Ba、U、Th 等)的含量可能随着变质作用的进行随之变化,在进行原岩恢复和源区特征讨论时应避免使用或配合其他图解一起使用。同时,部分主量元素(如  $TiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MgO$ 、 $P_2O_5$ )活动性较弱,稀士元素和高场强元素(如 Zr, Th, Ta 等)在变质过程中也可以基本保持稳定性(Nance and Taylor, 1976; Feng and Kerrich, 1990),因此可以用于变质岩原岩恢复和源区特征讨论。

根据 Shaw(1972)提出的 DF 判别式( $DF = 10.44 - 0.21SiO_2 - 0.32Fe_2O_3^T - 0.98MgO + 0.55CaO + 1.46Na_2O + 0.54K_2O$ ),当 DF 值小于 0 表示原岩为副变质岩,大于 0 为正变质岩。可尔因地区侏儒组 5 个变质岩样品 DF 值均小于 0(表 3),指示原岩具有沉积岩亲缘性。在西蒙南及  $\Sigma REE$ -La/Yb 图解(Simonen, 1953; 赵振华, 1997)上,除样品 ZK1703-2 以外,均落于沉积岩区,且在西蒙南图解上更靠近砂质沉积岩(图 8)。样品 ZK1703-2 采自围岩与白云母钠长花岗岩的接触部位(图 2c),可能因靠近白云母钠长花岗岩,该样品在岩浆侵位后与之发生交代作用,活动性强的主量元素发生了迁移,导致其在原岩恢复计算中产生误差,落在火成岩区。综合以上因素,并考虑样品稀土元素

分配曲线与澳大利亚后太古宙页岩(PASS)的一致性(图 7a),认为本次研究的样品均为副变质岩,原岩以砂质、粉砂质沉积岩为主。

成分变异指数(ICV)可以有效地反映碎屑沉积岩是首次沉积的沉积物或者是再循环的沉积物(Cox *et al.*, 1995),该值大于 1 时表示为成熟的再循环沉积物,反之为首次沉积的碎屑物质。可尔因地区侏儒组 5 个岩石样品中有两个值大于 1,3 个值小于 1(表 3)。La/Sc-Co/Th 图解上(Gu *et al.*, 2002)样品主要落在了长英质火山岩附近,并且具有向花岗岩过渡的趋势(图 9a);在 Hf-La/Th 图解上(Floyd and Leveridge, 1987)样品主要落在酸性长英质岛弧源区(图 9b)。综合分析表明,侏儒组( $T_{zsw}$ )碎屑沉积岩物源主要以长英质的火山岩为主,并伴有一些再循环的沉积物。

碎屑岩的物质组成及地球化学特征可以在一定程度上限定碎屑岩物源形成时的构造背景。考虑到本次所研究样品均经历了变质作用,固选用一些不活泼的微量元素如 La、Th、Sc、Zr、Ni 等对可尔因物源区构造背景进行限定,这些元素在沉积成岩过程中相对稳定,不易受风化、搬运、溶解和沉积成岩作用的影响。可尔因地区侏儒组 5 个样品在 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10(Bhatia and Crook, 1986)图解上均落于大陆岛弧(图 10a、10b)。在本次对 5 个可尔因地区侏儒组岩石样品研究基础上,对比前人对区域上松潘甘孜造山带三叠系复理石沉积的研究结果,表明可尔因地区侏儒组变质沉积岩的源区构造背景与整个的松潘甘孜三叠系复理石沉积具有一定的相似性,但松潘甘孜三叠系复理石沉积整体具更

为复杂的物区构造背景.

#### 4.2 侏罗组物源区分析

本次研究中313~227 Ma这个年龄段内的锆石占据主体,共34颗,占比约37%.在这一地质历史时期(晚二叠世—中三叠世),东昆仑地区全区广泛发育的中酸性侵入花岗岩类在年代上与之契合程度较好(图11b).东昆仑造山带在晚古生代—早中生代经历了一个完整的造山旋回,并且在260~230 Ma经受大洋板块大规模的俯冲碰撞,期间发生了强烈的壳幔岩浆混合作用,岩浆活动频繁(郭正府等,1998;王珂等,2020).这与Hf同位素的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值在-17.1~+9.5的特征相吻合.并且,本次研究所得该阶段的模式年龄 $T_{\text{DM2}}$ 为2 382~656 Ma,主要集

中在~1 500 Ma,与东昆仑三叠世花岗质侵入岩类普遍为中元古代古老地壳物质熔融,并有部分地幔物质加入的观点相对应.分析认为313~230 Ma这个年龄段内的锆石来自东昆仑.

古生代461~401 Ma的锆石共24颗,占比约26%.秦岭造山带经历了多期次造山旋回,并伴随各时期的构造演化出露大量的岩浆岩,古生代花岗岩在秦岭岩浆岩中占突出地位,其在整个北秦岭广泛分布(图11c),南秦岭仅有零星出露.前人将北秦岭古生代花岗质岩浆作用划分了3个阶段,分别对应了扬子陆块向华北陆块拼接过程中的俯冲、碰撞及后碰撞造山作用(王涛等,2009;王晓霞等,2015).虽然具体的划分时代间隔有微小差异,但均

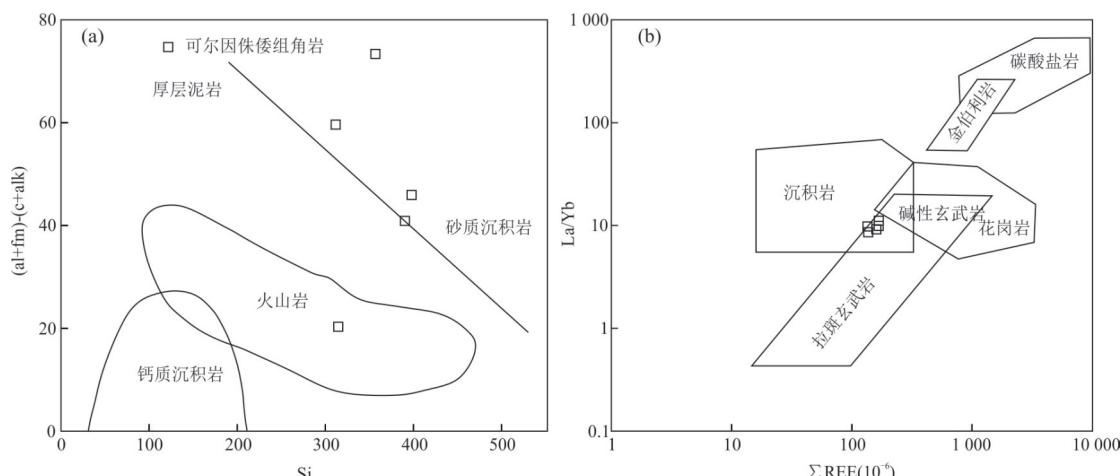


图8 川西可尔因地区侏罗组变质沉积岩西蒙南(a)和 $\Sigma\text{REE}$ -La/Yb(b)原岩恢复图解

Fig.8 Simonen(a) and  $\Sigma\text{REE}$ -La/Yb plot(b) of sedimentary rocks from Zhuwo Formation in Ke' eryin area, western Sichuan  
据Simonen(1953);赵振华(1997)

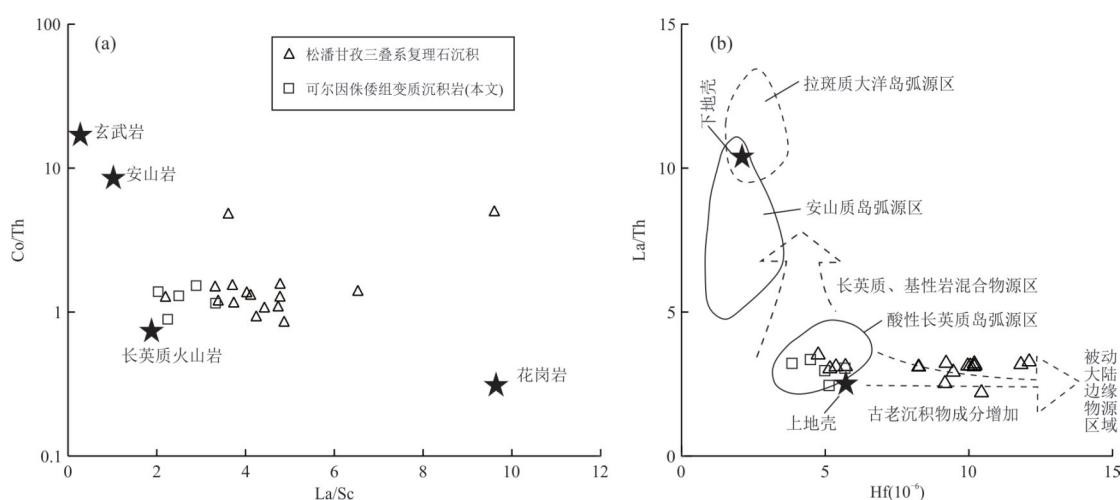


图9 川西松潘甘孜三叠系西康群沉积岩物源属性判别图解

Fig.9 Discrimination diagram of provenance from Triassic Xikang Group in SGFB, western Sichuan  
据Floyd and Leveridge(1987);Gu et al.(2002);松潘甘孜造山带三叠系沉积物数据引自白宪洲等(2010);于远山等(2018)

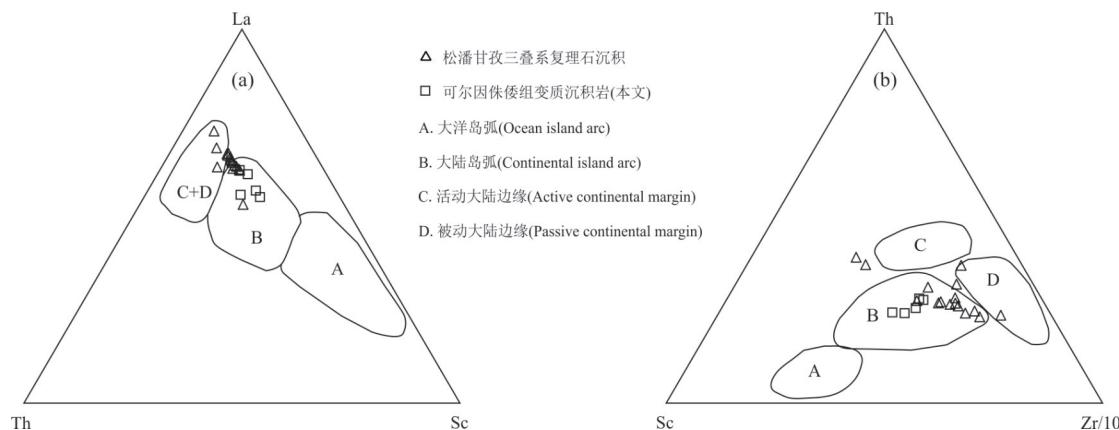


图 10 川西松潘甘孜造山带三叠系西康群沉积岩 La-Th-Sc(a)、Th-Sc-Zr/10(b) 物源区构造环境判别图

Fig. 10 Discriminate La-Th-Sc diagram(a) and Th-Sc-Zr/10 diagram(b) of tectonic setting meta-sedimentary rocks from Triassic Xikang Group in SGFB, western Sichuan

据 Bhatia and Crook(1986);松潘甘孜造山带三叠系复理石沉积数据引自曾宜君等(2006);白宪洲等(2010);于远山等(2018)

表明在约 450~420 Ma(晚奥陶世—中志留世)的岩体分布遍及北秦岭全区,其源区物质主要由地幔物质与地壳物质熔融后混合形成,与此次实验所测的 Hf 同位素所得  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 -8.5~+9.8 范围内相吻合。据此认为在古生代 461~401 Ma 范围内的锆石主要来自北秦岭。

在可尔因地区侏儒组碎屑锆石年龄频率分布图上(图 11a),新元古代 938~774 Ma 以及古元古代 2 048~1 928 Ma 的峰强度并不占优势,均只有 8 颗锆石。除此之外还有新太古代 2 603~2 499 Ma 的 3 颗锆石。本次研究中所涉及的变质锆石均来自新元古代及古元古代(新元古代 2 颗,古元古代 3 颗),锆石 Lu-Hf 同位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值分别为 -11.3~+0.5、-9.7~+4.1,均以负值为主,模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  分别为 2 381~1 728 Ma、3 240~2 350 Ma,代表着以古老地壳物质的再循环为主,有少量新生地壳物质的加入。对比可尔因地区侏儒组(图 11a)、甲基卡地区侏儒组(图 5a)以及松潘甘孜造山带沉积物(图 5c)中的锆石 U-Pb 年龄谱图,这 3 个阶段的峰强度总是同步发生变化,暗示它们可能来自同一物源区。华北地块 U-Pb 年龄谱图如图 11b 所示,华北克拉通经历了 >3.0 Ga 的微板块的形成、2.9~2.7 Ga 地壳增生,2.6~2.5 Ga 和 2.0~1.8 Ga 也记录了两次极为重要的构造—岩浆—热液事件(翟明国和卞爱国,2000)。从年龄结构上来看,来自华北板块的锆石 2 603~2 499 Ma 年龄峰强度和 2 048~1 928 Ma 年龄峰强度应相差不大(图 11c)(Chen *et al.*, 2009; 木红旭, 2020),与本次可尔因地区 2 048~1 928 Ma 占明显优势有所不同(图 11a)。因此华北板块可能并

没有直接向可尔因地区提供物源。另外,东昆仑地区的 U-Pb 年龄谱图上(图 11b),除了典型的中生代年龄外,也能为研究区提供本次研究中新元古代 938~774 Ma、古元古代 2 048~1 928 Ma 及新太古代 2 603~2 499 Ma 这 3 个年龄阶段内的锆石(图 11a)。但是假若东昆仑向可尔因地区侏儒组提供了这 3 个阶段的锆石,则无法解释甲基卡地区侏儒组中这 3 个阶段中的锆石数量明显增加的现象,因为随着搬运距离的增加,位于可尔因地区南部的甲基卡地区侏儒组中这 3 个阶段的锆石应该同中生代 313~227 Ma 的峰强度一样呈现减少的趋势(图 5b、图 11a)。因此东昆仑并没有向可尔因地区提供新元古代 938~774 Ma、古元古代 2 048~1 928 Ma 及新太古代 2 603~2 499 Ma 的锆石。扬子北缘及西缘锆石 U-Pb 年龄谱图如图 11e、f 所示。新元古代是扬子陆块统一基底形成和后续演化的重要阶段,在其北缘及西缘更是先后揭示出大量的岩浆活动事件。如汉南基性—超基性侵入岩、关刀山闪长岩体等(Sun and Zhou, 2008; Zhao and Zhou, 2008)。但考虑到这些岩体其 Hf 同位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为正值,模式年龄  $T_{\text{DM2}}$  集中在 1 200~850 Ma、且其 Th/U 比值普遍偏大,无变质锆石等因素,排除其主要为可尔因地区提供新远古代 938~774 Ma 锆石的可能。除此之外,扬子北缘的莲沱组,扬子西缘的盐边群、东川群等因其碎屑岩的年龄谱系的主要波峰集中在新元古代 950~750 Ma、古元古代 2 000~1 800 Ma,及次级波峰为 2 500~2 300 Ma,并且其中同样出现少量变质锆石, Hf 同位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值也以负值为主,与本次所测的 Hf 同位素  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值契合程度较高(任光明,

2020;徐琼,2021).据此认为,本次所测的新元古代938~774 Ma、古元古代2 048~1 928 Ma及新太古代2 603~2 499 Ma的碎屑锆石主要为来自扬子陆块的再循环沉积物经四川前陆盆地搬运至可尔因地区.

晚三叠世松潘甘孜可尔因地区侏罗组碎屑物质来源过程如图12所示.此时,松潘甘孜盆地以北至东昆仑地区发育南北向的古河流(Weislogel *et al.*, 2010;Ding *et al.*, 2013),东昆仑区内广泛发育的中酸性花岗岩类被风化剥蚀,其碎屑物质被河流带至松潘甘孜洋盆.同时,此时秦岭洋自东向西开始闭合,使得携带着北秦岭古生代碎屑物质的海水由东向西开始消退,并将碎屑物质搬运至可尔因地区.扬子西缘的四川前陆盆地在晚三叠世与松潘甘孜残余洋盆处于连通状态,扬子北缘因与华北板块的碰撞而抬升,并且在扬子西缘,一些区域形成古隆起(如川中泸州古隆起)(黄涵宇等,2019).这些地势较高的地区遭受剥蚀,碎屑物质被搬运至川西前陆盆地继而进入松潘甘孜残余洋盆.龙门山冲断带晚三叠世延着走向自北向南差异性隆升(木红旭,2020;李智武等,2021),侏罗组沉积时,龙门山北段及中段已经发生隆升,成为川西前陆盆地和松潘甘孜残余洋盆物源输送的屏障,而南段的隆升此时还没有开始,成为两个盆地之间的主要物质疏导体系,造成位于可尔因地区南部的甲基卡地区沉积了相对较多的来自扬子陆块北缘及西缘的再循环碎屑物质,反映在年龄谱图上其在元古代938~774 Ma、古元古代2 048~1 928 Ma及新太古代2 603~2 499 Ma峰强度更高(图5b).综上所述,可尔因侏罗组变质沉积岩中的碎屑物质主要来自东昆仑、北秦岭地区,其次还有少部分来自扬子陆块的再循环沉积物经四川前陆盆地的搬运.

### 4.3 伟晶岩成因及物源分析

伟晶岩的成因与邻区花岗岩之间的成因联系主要有两种观点:一是伟晶岩是花岗岩浆演化到后期的、共结的、富含挥发分的残余熔体结晶而形成,伟晶岩具有花岗岩母岩(Selway *et al.*, 2005; Roda-Robles *et al.*, 2018);二是伟晶岩由变质沉积岩的深熔作用或选择重熔作用形成的熔体直接固结成岩(Barros and Menute, 2016; Dill, 2018).前人对可尔因复式岩体及其邻区的伟晶岩的研究,存在伟晶岩是花岗残余岩浆结晶分异的产物(廖远安和姚学良,1992;李建康,2006)和围岩部分熔融直接固结

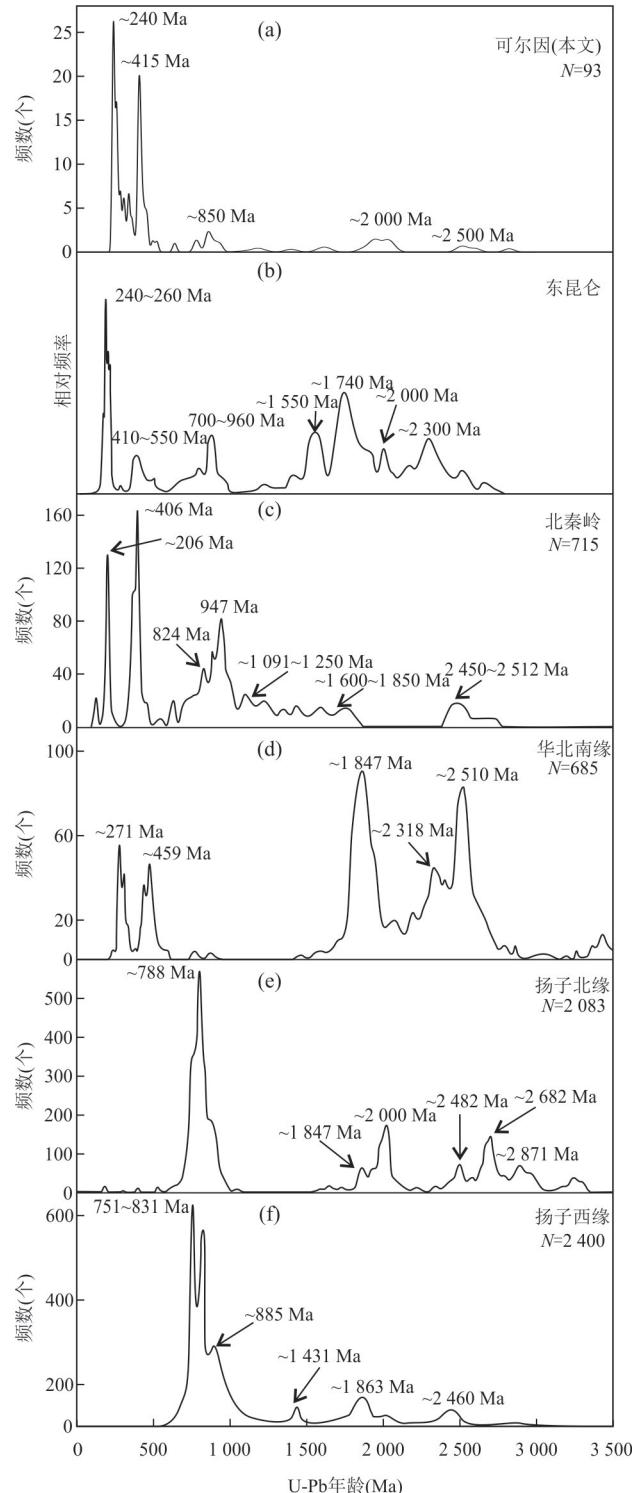


图11 松潘甘孜造山带周缘构造单元锆石U-Pb年龄分布

Fig.11 Histograms of U-Pb ages of zircons in the peripheral tectonic units of the SGFB

b. 据裴磊等(2017);c~f. 据 Shi *et al.*(2013)

成岩(Fei *et al.*, 2020)两种不同观点.对可尔因区内的花岗岩和李家沟伟晶岩进行了锆石U-Pb测年,采样位置如图1所示(Fei *et al.*, 2020;费光春,

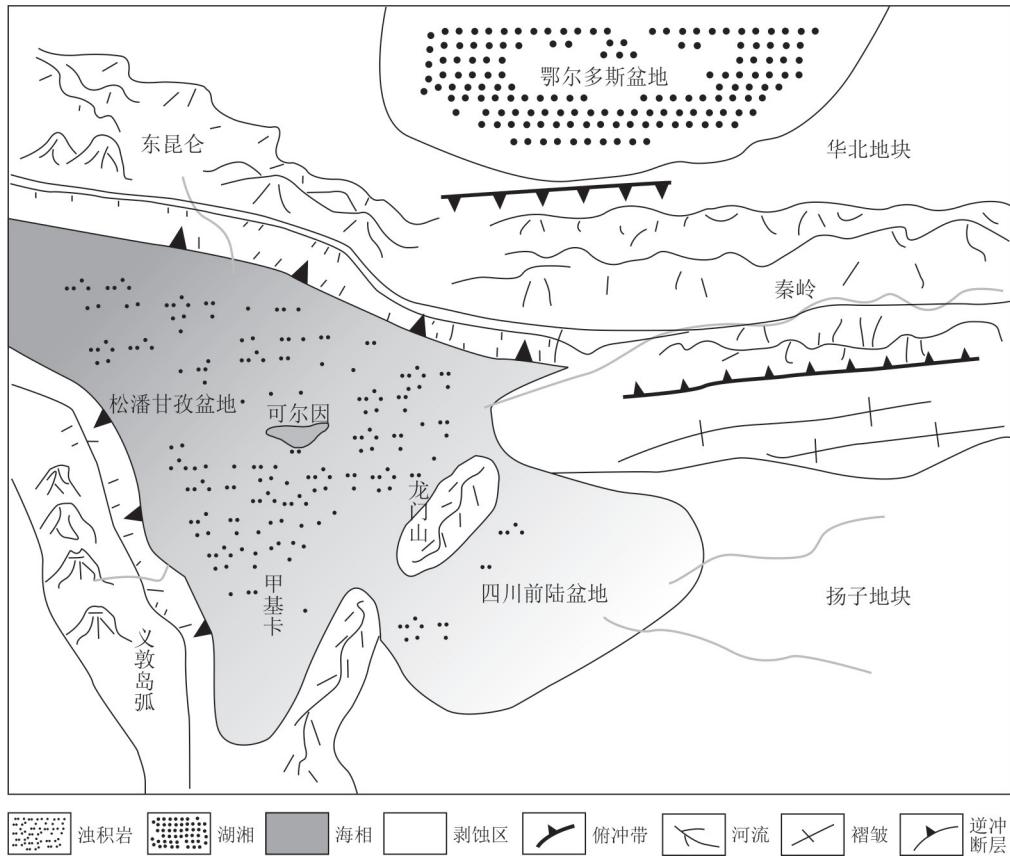


图 12 晚三叠世松潘甘孜可尔因地区侏儒组物质来源示意图(据邓飞,2006 改)

Fig.12 Sketch map for provenance of Zhuwo Formation in Ke'eryin area of SongpanGanzi in the Late Triassic(modified after Deng et al., 2006)

未发表数据),所得锆石 U-Pb 测年结果中出现了较 多大于岩体自身结晶时代的年龄(后文称之为异常 年龄)(表 4)。在花岗岩中异常年龄主要分布在 293~231 Ma 这个区间,白云母花岗岩(LM107)中 还出现一个次级 339~334 Ma 的区间,除此之外还 有两颗为 383 Ma 和 1 325 Ma 的锆石。在微斜长石 钠长石伟晶岩(DB19-08)中出现了 258~247 Ma 和 424~417 Ma 这两个阶段的异常年龄,该样品与钠 长石伟晶岩(LKH3)中还各出现了一颗新元古代的 (836 Ma 和 890 Ma) 锆石。花岗岩和伟晶岩中异常 年龄的锆石可以由深部岩浆在运移上升过程中携 带古老基底、捕获围岩或者直接来自于围岩(西康 群)部分熔融的残留等多种方式获得。对比本次研 究的侏儒组变质沉积岩的碎屑锆石年龄与花岗岩、 伟晶岩中的异常年龄,伟晶岩中异常年龄相比于花 岗岩与侏儒组碎屑锆石的年龄结构具有更好的一 致性,因此可以说伟晶岩相比花岗岩与围岩(侏儒 组)具有更好的亲缘性。其次区内的伟晶岩假若通 过花岗岩残余岩浆的连续结晶分异而形成,则在母岩

(花岗岩)中应大量出现在 424~417 Ma 这一年龄阶 段的和新元古代的锆石。因为演化至后期的残余花 岗岩浆再去捕获前期并没有捕获到的相对较多的 424~417 Ma 这一年龄阶段的和新元古代的锆石,然 后再结晶分异形成伟晶岩的概率极低。

前人对可尔因地区李家沟花岗岩和伟晶岩做 了 Hf 同位素的研究,根据其数据所得模式年龄  $T_{DM2}$  的 频率直方图如图 13 所示,其中李家沟花岗岩模式 年龄  $T_{DM2}$  在 3711~825 Ma, 主要集中在 1 824~ 1 726 Ma, 李家沟伟晶岩模式年龄  $T_{DM2}$  为 1 947~ 1 199 Ma, 主要集中在 ~1 530 Ma。本次所测样品 PD3650-2 侏儒组围岩模式年龄  $T_{DM2}$  在 3 239~499 Ma, 主要集中在 1 577~1 511 Ma(图 6b)。仅从年 龄结构分析,李家沟伟晶岩相比花岗岩与围岩的模 式年龄  $T_{DM2}$  更具一致性,再者考虑到花岗岩中出现一 颗模式年龄  $T_{DM2}$  为 3 710 Ma 的锆石,其比本次所测 围岩最大的模式年龄  $T_{DM2}$  为 3 239 Ma 更老。据此, 可以假设可尔因三叠系沉积物之下具更为古老的 下地壳结晶基底,并且其部分熔融形成的花岗岩具

表4 川西可尔因地区花岗岩、伟晶岩锆石U-Pb年龄

Table 4 Zircon U-Pb ages of granites and pegmatites in Ke'eryinaera, western Sichuan

编号	岩性	结晶年龄(Ma)	>结晶年龄(Ma)	数量(个)	来源
LM107	白云母花岗岩	217±2.8	339~334	3	Fei <i>et al.</i> (2020)
LM131	白云母花岗岩	214.9±1.0	383	1	费光春(未发表)
LM122	二云母花岗岩	223.1±1.3	246~239	6	
LMH3	二云母花岗岩	219.2±2.3	254~232 1325	4 1	Fei <i>et al.</i> (2020)
LM111	斑状黑云母花岗岩	224.5±2.4	293~245	8	
T07	黑云母二长花岗岩	217.0±2.8	242~231	7	费光春(未发表)
T03	花岗闪长岩	212.5±2.0	231、238	2	
LKH3	钠长石伟晶岩	202.8±4.9	231、890	2	Fei <i>et al.</i> (2020)
			258~247	5	
DB19-08	微斜长石钠长石伟晶岩	210.5±3.4	424~417 368、376、836	6 3	费光春(未发表)

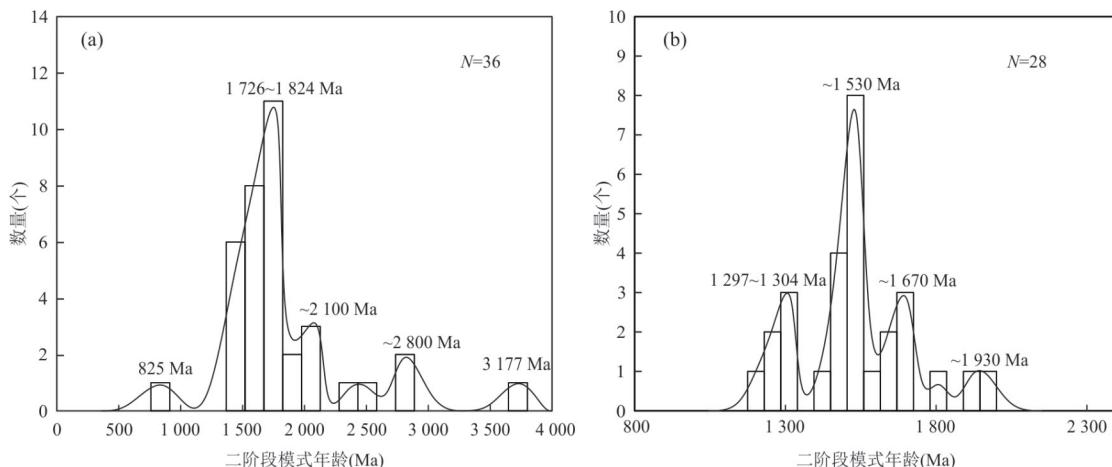


图13 川西可尔因花岗岩(a)及伟晶岩(b)Hf同位素二阶段模式年龄频率直方图

Fig.13  $T_{DM2}$  histogram of Hf isotope from granite(a)andpegmatite(b)in Ke' eryin area, western Sichuan数据来源 Fei *et al.*(2020)

源岩 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值,因下地壳比上地壳(侏儒组)具有更高的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值,那么通过计算则花岗岩中可出现大于围岩侏儒组模式年龄 $T_{DM2}$ 的锆石。相反,假若李家沟花岗岩通过侏儒组部分熔融的岩浆固结而形成则不应出现上述情况。

松潘甘孜地区在印支期发生陆内造山,伴随大规模滑脱剪切及逆冲推覆,至后造山阶段地壳明显增厚(许志琴等,2018)。增厚的地壳因等温面下移、下地壳密度增加等因素发生拆沉作用导致地幔岩浆底侵,底侵的岩浆带来的热量引起了中—上地壳发生大规模的熔融形成花岗岩浆(Sonder *et al.*, 1987)。在可尔因地区花岗岩浆沿断裂虚脱部位上升侵位至三叠系西康群中,形成属过铝质S型、呈面状展布的可尔因花岗岩体。同时花岗岩浆运移、侵

位过程中积累的热量在较低温度下部分熔融侏儒组变质沉积岩,其主要可能涉及白云母脱水熔融。伟晶岩中没有黑云母产出,表明熔融温度低于其脱水熔融温度。此外,伟晶岩中较低的稀土元素含量符合其在较低温的条件下白云母脱水熔融(Chen *et al.*, 2020),因为稀土元素主要赋存在磷灰石、锆石、独居石等中,其在较低温度的熔融过程中保持稳定,主要残留于侏儒组源岩中。侏儒组因前期韧性滑脱剪切、岩浆烘烤等发生了不同程度的变质作用而相较其他岩石具更低的熔点。并且由于助溶剂组分的加入(如Li、B、P、F、 $\text{H}_2\text{O}$ 等)白云母熔融温度明显降低(Bartels *et al.*, 2013)。侏儒组围岩地层中Li的含量( $611 \times 10^{-6} \sim 1080 \times 10^{-6}$ , 平均  $835 \times 10^{-6}$ )高于可尔因二云母花岗岩( $93 \times 10^{-6} \sim 211 \times 10^{-6}$ , 平

均  $159 \times 10^{-6}$ ) 和白云母花岗岩 ( $53 \times 10^{-6} \sim 215 \times 10^{-6}$ , 平均  $258 \times 10^{-6}$ ), 但含量变化较大 (Fei et al., 2020), 其为主要的助溶剂。电气石、独居石(少量磷灰石)在无矿伟晶岩中普遍存在, 独居石也在少部分含矿伟晶岩中出现; 且靠近无矿伟晶岩脉的围岩 (LW80、LW81) 中 B、P 含量明显高于靠近含矿伟晶岩脉的围岩 (ZK1703-2、PD3650-2、PD3650-6) 中的含量 (表 3), 说明 B 和 P 也是主要的助溶剂。源岩为更多的砂质岩或者泥质岩, 则变质为富黑云母变质沉积岩 (黑云母多于白云母), 在白云母脱水熔融为主的重熔过程中, 大部分的 Li 将被保留在高 Li 分配系数的黑云母中; 当源岩为含高比例的富铝粘土矿物的泥岩, 变质为富含更多白云母的沉积变质岩 (白云母多余黑云母), 白云母脱水熔融可将丰富的 Li 有效释放到熔体中, 形成富 Li 伟晶岩浆。熔融形成的熔体因助溶剂组分作用具较低粘度使其从熔融源区脱离并沿围岩 ( $T_{\text{zw}}$ ) 裂隙运移, 并且因源岩矿物组成 (黑云母和白云母含量差异性)、助溶剂组分 (尤其是 Li) 含量差异等因素的影响导致不同的熔融演化过程, 形成李家沟含矿和无矿伟晶岩。

综上所述, 碎屑锆石 U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素、围岩化学成分及矿物组成证据支持李家沟伟晶岩的成岩物质来源为侏罗组变质沉积岩的部分熔融, 可尔因花岗岩体的岩浆侵位提供热源使侏罗组变质沉积岩发生部分熔融形成伟晶岩浆, 而后直接结晶形成李家沟伟晶岩。

## 5 结论

(1) 松潘甘孜造山带可尔因地区侏罗组变质沉积岩的物源以长英质岩石为主, 并伴有一些再循环沉积物, 其物源区的构造背景为大陆岛弧。

(2) 松潘甘孜造山带可尔因地区侏罗组变质沉积岩, 主要接收了来自东昆仑、北秦岭以及少量扬子陆块再循环的碎屑物质。

(3) 可尔因地区李家沟伟晶岩是侏罗组变质沉积岩的部分熔融形成的熔体直接固结形成。

**致谢:** 感谢中国地质调查局成都中心曹华文副研究员, 成都理工大学冉波、郎兴海、齐靓老师对本文提出的有益的建议和意见。感谢三位审稿专家及编辑部认真审阅了本文, 并提出了宝贵的修改意见。

## References

- Bai, X.Z., He, M.Y., Wang, Y.T., et al., 2010. Analysis of Geochemical Characteristics, Provenance Area and Paleo Weathering Degree of Xikang Group in Ruo'erga Area, Sichuan. *Geoscience*, 24(1): 151–157 (in Chinese with English abstract).
- Bhatia, M. R., Crook, K. A. W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181–193. <https://doi.org/10.1007/bf00375292>
- Barros, R., Menoge, J. F., 2016. The Origin of Spodumene Pegmatites Associated with the Leinster Granite in Southeast Ireland. *The Canadian Mineralogist*, 54(4): 847–862. <https://doi.org/10.3749/canmin.1600027>
- Chen, B., Huang, C., Zhao, H., 2020. Lithium and Nd Isotopic Constraints on the Origin of Li-Poor Pegmatite with Implications for Li Mineralization. *Chemical Geology*, 551(6): 119769. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2020.119769>
- Cox, R., Lowe, D. R., Cullers, R. L., 1995. The Influence of Sediment Recycling and Basement Composition on Evolution of Mudrock Chemistry in the Southwestern United States. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(14): 2919–2940. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00185-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00185-9)
- Chen, Y. L., Li, D. P., Zhou, J., et al., 2009. U-Pb Dating, Geochemistry, and Tectonic Implications of the Songpan-Ganzi Block and the Longmen Shan, China. *Geochemical Journal*, 43(2): 77–99. <https://doi.org/10.2343/geochemj.1.0009>
- Deng, Y., Fei, G.C., Li, J., et al., 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).
- Dill, H. G., 2018. Geology and Chemistry of Variscan-Type Pegmatite Systems (SE Germany) with Special Reference to Structural and Chemical Pattern Recognition of Felsic Mobile Components in the Crust. *Ore Geology Reviews*, 92(41–6): 205–239. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.016>
- Ding, L., Yang, D., Cai, F. L., et al., 2013. Provenance Analysis of the Mesozoic Hoh-Xil-Songpan-Ganzi Turbidites in Northern Tibet: Implications for the Tectonic Evolution of the Eastern Paleo-Tethys Ocean. *Tectonics*, 32(1): 34–48. <https://doi.org/10.1002/tect.20013>
- Enkelmann, E., Weislogel, A., Ratschbacher, L., et al., 2007. How was the Triassic Songpan-Ganzi Basin Filled? A Provenance Study. *Tectonics*, 26(4): 4007. <https://doi.org/10.1029/2006tc002078>

- Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones. *Jour. Geol. Soc. London*, 144(4): 531—542. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
- Federico, L., Capponi, G., Crispini, L., et al., 2004. Exhumation of Alpine High-Pressure Rocks: Insights from Petrology of Eclogite Clasts in the Tertiary Piedmontese Basin (Ligurian Alps, Italy). *Lithos*, 74(1—2): 21—40. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2003.12.001>
- Fei, G. C., Menuge, J. F., Chen, C. S., et al., 2021. Evolution of Pegmatite Ore-Forming Fluid: The Lijiangou Spodumene Pegmatites in the Songpan-Garze Fold Belt, Southwestern Sichuan Province, China. *Ore Geology Reviews*, 139(4): 104441. <https://doi.org/10.1016/j.oregeo-rev.2021.104441>
- Fei, G. C., Menuge, J. F., Li, Y. Q., et al., 2020. Petrogenesis of the Lijiangou Spodumene Pegmatites in Songpan-Garze Fold Belt, West Sichuan, China: Evidence from Geochemistry, Zircon, Cassiterite and Coltan U-Pb Geochronology and Hf Isotopic Compositions. *Lithos*, 364—365(3): 105555. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105555>
- Fei, G.C., Yang, Z., Yang, J.Y., et al., 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 (in Chinese with English abstract).
- Fei, G.C., Yuan, T.J., Tang, W.C., et al., 2014. Classification Analysis of Ore-Bearing Pegmatite in Ke'eryin Ore-field, West Sichuan. *Mineral Deposit*, 33(Suppl.): 187—188 (in Chinese with English abstract).
- Feng, R., Kerrich, R., 1990. Geochemistry of Fine-Grained Clastic Sediments in the Archean Abitibi Greenstone Belt, Canada: Implications for Provenance and Tectonic Setting. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(4): 1061—1081. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90439-r](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90439-r)
- Gu, C.H., 2014. Metallogenetic Regularity of Spodumene Deposits in the Closely Spaced Pegmatite Area in the Southeastern Ke'eryin Pegmatite Field, Sichuan Province. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 29(1): 59—65 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z.F., Deng, J.F., Xu, Z.Q., et al., 1998. Late Palaeozoic-Mesozoic Intracontinental Orogenic Process and Intermediate-Acidic-Igneous Rocks From the Eastern Kunlun Mountains of Northwestern China. *Geoscience*, 12(3): 344—352 (in Chinese with English abstract).
- Gu, X. X., Liu, J. M., Zheng, M. H., et al., 2002. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Turbidites in Hunan, South China: Geochemical Evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393—407. <https://doi.org/10.1306/081601720393>
- Gong, D. X., Wu, C. H., Zou, H., et al., 2021. Provenance Analysis of Late Triassic Turbidites in the Eastern Songpan-Ganzi Flysch Complex: Sedimentary Record of Tectonic Evolution of the Eastern Paleo-Tethys Ocean. *Marine and Petroleum Geology*, 126(B8): 104927. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2021.104927>
- Huang, H.Y., He, D.F., Li, Y.Q., et al., 2019. Determination and Formation Mechanism of the Luzhou Paleo-Uplift in the Southeastern Sichuan Basin. *Earth Science Frontiers*, 26(1): 102—120 (in Chinese with English abstract).
- Hu, J.M., Meng, Q.R., Shi, Y.R., et al., 2005. SHRIMP U-Pb Dating of Zircons from Granitoid Bodies in the Songpan-Ganzi Terrane and Its Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 867—880 (in Chinese with English abstract).
- Jian, X., Weislogel, A., Pullen, A., 2019. Triassic Sedimentary Filling and Closure of the Eastern Paleo-Tethys Ocean: New Insights from Detrital Zircon Geochronology of Songpan-Ganzi, Yidun, and West Qinling Flysch in Eastern Tibet. *Tectonics*, 38(2): 767—787. <https://doi.org/10.1029/2018tc005300>
- Liao, Y.A., Yao, X.L., 1992. Evolution Feature and Minero-genetic Relations of Peraluminous Granites from Jinchuan, Western Sichuan. *Mineral Petrology*, 12(1): 12—22 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F., Chen, Y. L., Su, B. X., et al., 2006. Geochemistry and Zircon Ages of Triassic Detrital Sedimentary Rocks from the Garze-Songpan Block. *Acta Geoscientica Sinica*, 27(4): 289—296 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.K., 2006. Mineralizing Mechanism and Continental Geodynamics of Typical Pegmatite Deposits in Western, Sichuan, China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Li, P., Li, J. K., Chou, I. M., et al., 2019. Mineralization Epochs of Granitic Rare-Metal Pegmatite Deposits in the Songpan-Ganzé Orogenic Belt and their Implications for Orogeny. *Minerals*, 9(5): 280. <https://doi.org/10.3390/min9050280>
- Li, Z.W., Song, T.H., Wang, Z.J., et al., 2021. Strike Variation Evolution of the Basin-Mountain System in Western Sichuan Longmenshan as Recorded by Deformation Exhumation and Deposition and Discussion on the Period of Key Structural Transformation. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*

- tion*), 48(3):257—282(in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2003. ISOPLOT: A Geochronological Tool kit for Microsoft Excel. Berkeley geochronology center special publication, Berkeley.
- Nance, W. B., Taylor, S. R., 1976. Rare Earth Element Patterns and Crustal Evolution-I. Australian Post-Archean Sedimentary Rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40(12): 1539—1551.[https://doi.org/10.1016/0016-7037\(76\)90093-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90093-4)
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic Climates and Plate Motions Inferred from Major Element Chemistry of Lutites. *Nature*, 299(5885): 715—717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- McLennan, S.M., 1989. Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks: Influence of Provenance and Sedimentary Processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 21(1): 169—200.
- Mu, H.X., 2020. Formation and Evolution of the Late Triassic Foreland Basin in Western Sichuan(Dissertation). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Pei, L., Li, R.B., Pei, X.Z., et al., 2017. Sediment Source Analysis for the Maerzheng Formation Sandstone in Gerizhuotuo Area, Southern Margin of East Kunlun Region: Evidence for Detrital Zircon U-Pb Geochronology. *Acta Geologica Sinica*, 91(6): 1326—1344(in Chinese with English abstract).
- Qin, Y.L., Li, M.Z., Xiong, C.L., et al., 2020. Depositional Provinces and Tectonic Background of the Zhuwo Formation in the Jiajika Region, Western Sichuan Province: Evidence from Detrital Zircon U-Pb Ages. *Acta Geologica Sinica*, 94(8): 2400—2409 (in Chinese with English abstract).
- Ren, G.M., Pang, W.H., Wang, L.Q., et al, 2020. Detrital Zircons of 3.8 Ga Southwestern Yangtze Block and Its Geological Implications. *Earth Science*, 45(8): 3040—3053 (in Chinese with English abstract).
- Roda-Robles, E., Villaseca, C., Pesquera, A., et al., 2018. Petrogenetic Relationships Between Variscan Granitoids and Li-(F-P)-Rich Aplite-Pegmatites in the Central Iberian Zone: Geological and Geochemical Constraints and Implications for Other Regions from the European Variscides. *Ore Geology Reviews*, 95: 408—430. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.02.027>
- Selway, J.B., Breaks, F.W., Tindle, A.G., 2005. A Review of Rare-Element (Li-Cs-Ta) Pegmatite Exploration Techniques for the Superior Province, Canada, and Large Worldwide Tantalum Deposits. *Exploration and Mining* *Geology*, 14(1/2/3/4): 1—30.<https://doi.org/10.2113/gsemg.14.1-4.1>
- Shaw, D. M., 1972. The Origin of the Apsley Gneiss, Ontario. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 9(1): 18—35. <https://doi.org/10.1139/e72-002>
- Shi, Y., Yu, J. H., Santosh, M., 2013. Tectonic Evolution of the Qinling Orogenic Belt, Central China: New Evidence from Geochemical, Zircon U-Pb Geochronology and Hf Isotopes. *Precambrian Research*, 231(Suppl.): 19—60.<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.03.001>
- Simonen, A., 1953. Stratigraphy and Sedimentation of the Svecofennidic, Early Archean Supracrustal Rocks in southwestern Finland. *Bulletin of the Geological Society of Finland*, 160: 1—64.
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Sun, W. H., Zhou, M. F., 2008. The ~860 Ma, Cordilleran - Type Guandaoshan Dioritic Pluton in the Yangtze Block, SW China: Implications for the Origin of Neoproterozoic Magmatism. *The Journal of Geology*, 116(3): 238—253.<https://doi.org/10.1086/587881>
- Sonder, L. J., England, P. C., Wernicke, B. P., et al., 1987. A Physical Model for Cenozoic Extension of Western North America. *Geological Society, London, Special Publications*, 28(1): 187—201. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1987.028.01.14>
- Vervoort, J. D., Patchett, P. J., Söderlund, U., et al., 2004. Isotopic Composition of Yb and the Determination of Lu Concentrations and Lu/Hf Ratios by Isotope Dilution Using MC-ICPMS. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(11): 1—5.<https://doi.org/10.1029/2004gc000721>
- Weislogel, A. L., Graham, S. A., Chang, E. Z., et al., 2010. Detrital Zircon Provenance from Three Turbidite Depocenters of the Middle - Upper Triassic Songpan - Ganzi Complex, Central China: Record of Collisional Tectonics, Erosional Exhumation, and Sediment Production. *Geological Society of America Bulletin*, 122 (11/12): 2041—2062.<https://doi.org/10.1130/b26606.1>
- Weislogel, A. L., Graham, S. A., Chang, E. Z., et al., 2006. Detrital Zircon Provenance of the Late Triassic Songpan - Ganzi Complex: Sedimentary Record of Collision of the North and South China Blocks. *Geology*, 34 (2): 97.<https://doi.org/10.1130/g21929.1>
- Wang, K., Wang, L.X., Ma, C.Q., et al., 2020. Petrogenesis and Geological Implication of the Middle Triassic Garnet-

- Bearing Two-Mica Granite from Jialuhe Region, East Kunlun. *Earth Science*, 45(2): 400—418 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Wang, X.X., Tian, W., et al., 2009. North Qinling Paleozoic Granite Associations and Their Variation in Space and Time: Implications For Orogenic Processes in the Orogens of Central China. *Scientia Sinica Terra*, 39 (7): 949—971 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.X., Wang, T., Zhang, C.L., 2015. Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, Central China and Its Bearing on Orogenic Evolution. *Scientia Sinica Terra*, 45(8): 1109—1125 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Li, F.L., Bao, Z.Y., 2007. U-Pb Constraints on Provenance and Evolution of Middle to Late Triassic Sediment in Songpan-Garze Basin. *Geological Science and Technology Information*, 26(6): 35—44 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F.Y., Li, X.H., Zheng, Y.F., et al., 2007. Lu-Hf Isotopic Systematics and Their Applications in Petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y.B., Zheng, Y., 2004. Zircon Genetic Mineralogy and its Constraints on U-Pb Age Interpretation. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J.B., Fei, G.C., Qin, L.Y., et al., 2020. LA-MC-ICP-MS U-Pb Dating of Cassiterite from the Lijiagou Pegmatite Rare-Metal Deposit in the Ke'eryin Orefield, Sichuan Province and Its Geological Implication. *Geology and Exploration*, 56(2): 346—358 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q., Jiang, T., Hou, L.C., et al., 2021. Detrital Zircon Composition of U-Pb Ages and Hf Isotope for the Sandstone of the Liantuo Formation from the Three Gorges Area, Yangtze Block and its Geological Significance. *Earth Science*, 46(4): 1217—1230 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Wang, R.C., Zhao, Z.B., et al., 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).
- Yu, Y.S., Liao, S.P., Pan, Z.X., et al., 2018. Geochemical Characteristics and Formation Background of Triassic Fine Clastic Rocks in Daofu Area, Western Sichuan. *Mineral Petrology*, 38(2): 94—103 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, Y.J., Huang, S.J., Kan, Z.Z., et al., 2006. Geochemical Characteristics and Tectonic Setting of the Xikang Group of Triassic in Western Sichuan. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(1): 22—29 (in Chinese with English abstract).
- Zhai, M.G., Bian, A.G., 2000. Late Neoproterozoic Supercontinent Merging and Paleoproterozoic Mid-Proterozoic Pyrolysis in North China Craton. *Science in China (Series D)*, 30 (Supp.): 129—137 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.H., Zhou, M.F., 2008. Neoproterozoic Adakitic Plutons in the Northern Margin of the Yangtze Block, China: Partial Melting of a Thickened Lower Crust and Implications for Secular Crustal Evolution. *Lithos*, 104(1—4): 231—248. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.12.009>
- Zhao, Z.H., 1997. Geochemistry of Trace Elements. Science Press, Beijing, 1—238 (in Chinese).
- Zhang, Y.X., Zeng, L., Li, Z.W., et al., 2015. Late Permian Beijing: Triassic Siliciclastic Provenance, Palaeogeography, and Crustal Growth of the Songpan Terrane, Eastern Tibetan Plateau: Evidence from UBeijing:Pb Ages, Trace Elements, and Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Geology Review*, 57(2): 159—181. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.999356>
- ### 附中文参考文献
- 白宪洲,何明友,王玉婷,等,2010.四川若尔盖地区西康群地球化学特征及其物源区和古风化程度分析.现代地质,24(1): 151—157.
- 邓运,费光春,李剑,等,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,杨峥,杨继忆,等,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锡石定年的证据.地质学报,94(3): 836—849.
- 费光春,袁天晶,唐文春,等,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(5): 187—188.
- 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.
- 郭正府,邓晋福,许志琴,等,1998.青藏东昆仑晚古生代末—中生代中酸性火成岩与陆内造山过程.现代地质, (3): 51—59.
- 黄涵宇,何登发,李英强,等,2019.四川盆地东南部泸州古隆起的厘定及其成因机制.地学前缘,26(1): 102—120.
- 胡健民,孟庆任,石玉若,等,2005.松潘—甘孜地体内花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年及其构造意义.岩石学报, (3): 867—880.
- 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,(1): 12—22.
- 刘飞,陈岳龙,苏本勋,兰中伍,等,2006.松潘—甘孜地区三

- 叠系碎屑沉积岩地球化学特征及其锆石年龄研究. 地球学报, 27(4):289—296.
- 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(博士毕业论文). 北京: 中国地质大学.
- 李智武, 宋天慧, 王自剑, 等, 2021. 川西—龙门山盆山系统走向差异演化的变形、隆升和沉积记录及关键构造变革期讨论. 成都理工大学学报(自然科学版), 48(3):257—282.
- 木红旭, 2020. 川西晚三叠世前陆盆地的形成与演化(博士毕业论文). 北京: 中国地质大学.
- 裴磊, 李瑞保, 裴先治, 等, 2017. 东昆仑南缘哥日卓托地区马尔争组沉积物源分析: 碎屑锆石 U-Pb 年代学证据. 地质学报, 91(6):1326—1344.
- 秦宇龙, 李名则, 熊昌利, 等, 2020. 川西甲基卡地区侏罗组沉积物源分析——来自碎屑锆石 U-Pb 年龄证据. 地质学报, 94(8): 2400—2409.
- 任光明, 庞维华, 王立全, 等, 2020. 扬子陆块西南缘 3.8 Ga 碎屑锆石及其地质意义. 地球科学, 45(8): 3040—3053.
- 王珂, 王连训, 马昌前, 等, 2020. 东昆仑加鲁河中三叠世含石榴石二云母花岗岩的成因及地质意义. 地球科学, 45(2): 400—418.
- 王涛, 王晓霞, 田伟, 等, 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. 中国科学(D辑: 地球科学), 39(7): 949—971.
- 王伟, 李方林, 鲍征宇, 2007. 松潘—甘孜盆地中、晚三叠世沉积物来源及演化的锆石 U-Pb 年代学制约. 地质科技情报, (5): 35—44.
- 王晓霞, 王涛, 张成立, 2015. 秦岭造山带花岗岩浆作用与造山带演化. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1109—1125.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, (2): 185—220.
- 吴元保, 郑永飞, 2004. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, (16): 1589—1604.
- 许家斌, 费光春, 覃立业, 等, 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.
- 徐琼, 江拓, 侯林春, 等, 2021. 扬子陆块三峡地区莲沱组砂岩中碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. 地球科学, 46(4): 1217—1230.
- 许志琴, 王汝成, 赵中宝, 等, 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.
- 于远山, 廖声萍, 潘忠习, 等, 2018. 川西道孚地区三叠系细碎屑岩的地球化学特征及成生背景. 矿物岩石, 38(2): 94—103.
- 曾宜君, 黄思静, 阚泽忠, 等, 2006. 四川西部三叠系西康群地球化学特征与大地构造背景. 沉积与特提斯地质, (1): 22—29.
- 翟明国, 卞爱国, 2000. 华北克拉通新太古代末超大陆拼合及古元古代末—中元古代裂解. 中国科学(D辑: 地球科学), (增刊): 129—137.
- 赵振华, 1997. 微量元素地球化学原理. 北京: 科学出版社, 1—238.