

# 西藏羌塘中部亚丹高压变质岩年代学、地球化学特征及其构造意义<sup>\*</sup>

王泉<sup>1</sup> 王根厚<sup>1\*\*</sup> 方子璇<sup>2</sup> 王后<sup>3</sup> 陈贤<sup>4</sup> 郑艺龙<sup>5</sup> 范正哲<sup>1</sup> 高曦<sup>1</sup>

WANG Quan<sup>1</sup>, WANG GenHou<sup>1\*\*</sup>, FANG ZiXuan<sup>2</sup>, WANG Hou<sup>3</sup>, CHEN Xian<sup>4</sup>, ZHENG YiLong<sup>5</sup>, FAN ZhengZhe<sup>1</sup> and GAO Xi<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083

2. 中国地质大学(北京)信息工程学院,北京 100083

3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院,武汉 430074

4. 中国科学院地球化学研究所,贵阳 550081

5. 中国地质科学院地质研究所,北京 100037

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Information Engineering, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

5. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2018-09-10 收稿, 2019-01-08 改回.

Wang Q, Wang GH, Fang ZX, Wang H, Chen X, Zheng YL, Fan ZZ and Gao X. 2019. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of high-pressure metamorphic rocks from Yadan area in Central Qiangtang, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 35(3): 775–798, doi: 10.18654/1000-0569/2019.03.10

**Abstract** The collision of the southern and northern Qiangtang massifs along the Longmucuo-Shuanghu suture zone marks the final closure of the Paleo-Tethyan Ocean in the Central Qiangtang. However, the tectonic evolution of the Paleo-Tethyan Ocean between the two massifs, especially the opening time, has always been ambiguous. In this study, we carried out the study about the petrography, chronology and geochemistry of the metamorphic complexes in Rongma area, southern Longmucuo-Shuanghu suture zone, to restrict the opening and closing time of the Paleo-Tethyan Ocean in northern Tibet and its tectonic evolution after closure. The plagioclase amphibolite yields a weighted average age of  $717 \pm 7\text{Ma}$  ( $n = 61$ ,  $\text{MSWD} = 1.9$ ) by LA-ICP-MS zircon U-Pb dating, which indicates the Precambrian basement exists in the southern Qiangtang massif. In addition, a plagioclase amphibolite also was obtained with yielding a weighted average age of  $163 \pm 2\text{Ma}$  ( $n = 14$ ,  $\text{MSWD} = 1.9$ ), indicating that the protolith was formed in the Middle Jurassic. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating shows that two garnet-polysilicon-muscovite quartz schists yielded concordant ages ranging from 267Ma to 1349Ma and from 214Ma to 2050Ma, respectively. And two groups of polysilicon-muscovite samples show a similar plateau age of  $224.2 \pm 1.5\text{Ma}$  and  $223.9 \pm 1.5\text{Ma}$ , through  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating, respectively, implying that regional metamorphism may sustained from  $\sim 224\text{Ma}$  to 214Ma. The whole-rock geochemical characteristics of Neoproterozoic and Middle Jurassic plagioclase amphibolites show that the former has affinity to E-MORB but the latter is characterized by OIB. Based on the regional rock assemblages and geochemical characteristics, it indicates that both of the two plagioclase amphibolites are formed in extensional environments. The former may be formed in an intracontinental extension environment, responding to the breakup of Rodinia supercontinent and the latter may be formed in a continental rift setting. Combined with previous data, we propose that an unknown continental block might have begun to rift from the Qiangnan-Indian unite block in the Meso-Neoproterozoic ( $\sim 717\text{Ma}$ ), and "the Paleo-Tethys" Ocean might have opened at some time from  $\sim 717\text{Ma}$  to  $\sim 517\text{Ma}$ . Furthermore, the opening time of the Paleo-Tethyan Ocean may be earlier than previously thought. The Paleo-Tethyan Ocean might be closed at  $\sim 224\text{Ma}$ , and the collisional orogeny

\* 本文受中国地质调查局项目(KD-[2018]-XZ-035)资助.

第一作者简介: 王泉,男,1990年生,博士生,构造地质学专业, E-mail: quanwang@cugb.edu.cn

\*\* 通讯作者: 王根厚,男,1963年生,教授,博士生导师,主要从事构造地质学的科研与教学工作, E-mail: wgh@cugb.edu.cn

between the northern and southern Qiangtang massifs might last after 214Ma. Then the region occurred in an intraplate extension setting in the Middle Jurassic, with occurring of alkaline basalts characterized by OIB and bimodal igneous rocks in the region. We proposed the evolution of the ancient ocean might be analogous to the Paleo-Asian Ocean.

**Key words** Qiangtang; Longmucuo-Shuanghu suture zone; Paleo-Tethys Ocean; Metamorphic complex; Zircon U-Pb dating; Geochemistry

**摘要** 羌南和羌北地块沿龙木错-双湖缝合带碰撞对接,标志着古特提斯洋的最终闭合,然而古特提斯洋的构造演化,其它的打开时限一直争议不断。本文对龙木错-双湖缝合带以南荣玛地区的变质杂岩进行了岩相学、年代学和地球化学特征研究,进而约束古特提斯洋的开、合时限及其关闭后的构造演化特征。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,本文首次报道了 1 件新元古代斜长角闪岩,其加权平均年龄为  $717 \pm 7\text{Ma}$  ( $n=61$ , MSWD = 1.9),表明原岩形成于新元古代中期,反映羌南地区存在前寒武基底;另获得 1 件中侏罗世斜长角闪岩的锆石加权平均年龄为  $163 \pm 2\text{Ma}$  ( $n=26$ , MSWD = 1.9),表明其原岩形成于中侏罗世;获得 2 件石榴石多硅白云母石英片岩锆石边部谐和年龄范围分别为 267 ~ 1349Ma 和 214 ~ 2050Ma;另对片岩中 2 组多硅白云母样品进行  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年,分别获得  $224.2 \pm 1.5\text{Ma}$  和  $223.9 \pm 1.5\text{Ma}$  的一致坪年龄,暗示区域变质作用可能从 ~224Ma 持续到 214Ma 之后,且 ~214Ma 的岩浆事件可能形成于碰撞过程中。新元古代和中侏罗世斜长角闪岩的岩石地球化学特征显示,前者原岩具 E-MORB 特征,后者原岩趋向于 OIB 特征。基于区域岩石组合与地球化学特征,推断二者均形成于伸展环境,前者可能形成于陆内伸展背景,响应 Rodinia 超大陆的裂解,后者可能形成于大陆裂谷环境,响应羌南、羌北地块碰撞结束后的裂解。综合前人与本文研究成果,认为新元古代中期(~717Ma)某未知陆块可能就逐渐开始从羌南-印度大陆裂解,导致“古特提斯洋”在 ca. 717 ~ 517Ma 之间的某个时间点就已打开;古特提斯洋可能在 ~224Ma 才完成闭合,羌南、羌北陆陆碰撞挤压持续到 214Ma 之后;中侏罗世区域为裂谷伸展环境,并发育 OIB 特征的碱性玄武岩和双峰式火成岩。

**关键词** 羌塘;龙木错-双湖缝合带;古特提斯洋;变质杂岩;锆石 U-Pb 定年;地球化学

**中图法分类号** P588.344; P597.3

造山带的时空演化一直是国际研究的热点。以往的研究中,一个比较可行的研究思路是通过大陆裂谷 OIB 特征的碱性玄武岩(和/或双峰式火成岩)结晶年龄来限定古大洋打开的时间下限;根据蛇绿岩套基性岩的形成时代来确定古洋壳存续的某个时间段;通过紧随其后的区域低温、高压-超高压变质作用时间(如蓝片岩、榴辉岩和多硅白云母片岩组合的形成时间)来限定大洋关闭的上限时间(Wu *et al.*, 2011; Zhou *et al.*, 2009; Wilde and Zhou, 2015; Zhu *et al.*, 2015)。

众所周知,古特提斯洋的时空演化是长期争论的议题,研究学者一直致力于研究大洋古地理特征,及其打开、扩张、俯冲和碰撞的时空演化过程和机制等重要科学问题,并取得了显著成果(Allègre and Rousseau, 1984; Yin and Harrison, 2000; Stöcklin, 1974, 1989; Kapp *et al.*, 2003; Zhu *et al.*, 2011; 王根厚等, 2007, 2009; 朱弟成等, 2012; 许志琴等, 2013)。然而对于古特提斯洋不同分支的构造演化研究却参差不齐。以青藏高原北部的龙木错-双湖缝合带为例,其贯穿羌塘盆地的腹地,将羌塘盆地分为南羌塘和北羌塘,记录着古特提斯洋时空演化的重要信息,是一条极其重要的构造带;较早的研究,邓万明等(1996)、Kapp *et al.* (2003) 质疑龙木错-双湖缝合带的存在, Kapp *et al.* (2003) 认为构造带上广泛出露的变质岩为变质核杂岩,是陆内伸展的产物;随后在该构造带上先后识别出多处古生代蛇绿岩岩片,如桃形湖蛇绿岩(ca. 467 ~ 460Ma, 李才等, 2008a; 505 ~ 517Ma, 吴彦旺, 2013)、果干加年山蛇绿岩(ca. 438 ~ 431Ma, Zhai *et al.*, 2007; 李才等, 2008a, b; ~272.9Ma, 吴彦旺等, 2010)、角木日二叠纪蛇绿岩(翟庆国等, 2004, 2006);且一些低温高

压-超高压变质杂岩如榴辉岩、蓝片岩(翟庆国, 2008)也被陆续发现,因此,龙木错-双湖缝合带的确切存在才被证实。该缝合带被众多研究者认为是冈瓦纳与欧亚大陆拼合的位置,也是古特提斯洋向北俯冲并最终闭合的位置(李才, 1987, 2008; 李才等, 1995, 2007, 2008a, b, 2009; 翟庆国等, 2004, 2006; Zhai *et al.*, 2013; 董春艳等, 2011),然而,根据目前的古洋壳年代学证据,龙木错-双湖缝合带所代表古特提斯洋也只能追溯到中奥陶世(~467Ma)(李才等, 2008a)或晚寒武世(517Ma, 吴彦旺, 2013),它的闭合时间通过蓝片岩多硅白云母 Ar-Ar 定年目前被限定在晚三叠世 ~ 220Ma 前后(翟庆国等, 2009a; 朱同兴等, 2010),而古大洋打开的起始时间一直不清楚,同时与古大洋演化密切相关的羌南地块属性(如,是否存在前寒武基底)也争论不休,南、北羌塘陆陆碰撞持续时间及其碰撞后的构造演化也有待深入研究。

龙木错-双湖缝合带以南的荣玛地区广泛发育斜长角闪岩、石榴石多硅白云母石英片岩、大理岩、蓝片岩等变质杂岩。以往的研究者对本区蓝片岩做了一些年代学的研究(翟庆国等, 2009a; 张修政等, 2010),而对斜长角闪岩和石榴石多硅白云母片岩并未开展实质研究。本次研究发现,这些斜长角闪岩原岩具有亚碱性-碱性玄武岩特征,而多硅白云母的形成指示高压环境,极可能与碰撞造山有关,因此对这些变质杂岩的深入研究可能为解决古特提斯洋构造演化问题带来契机,故而本文对荣玛地区斜长角闪岩和石榴石多硅白云母片岩开展了锆石 U-Pb 定年、对片岩中多硅白云母进行了 Ar-Ar 定年、对斜长角闪岩开展了岩石地球化学分析,来探讨古特提斯洋的开、合时限及其关闭后的构造演化特征。

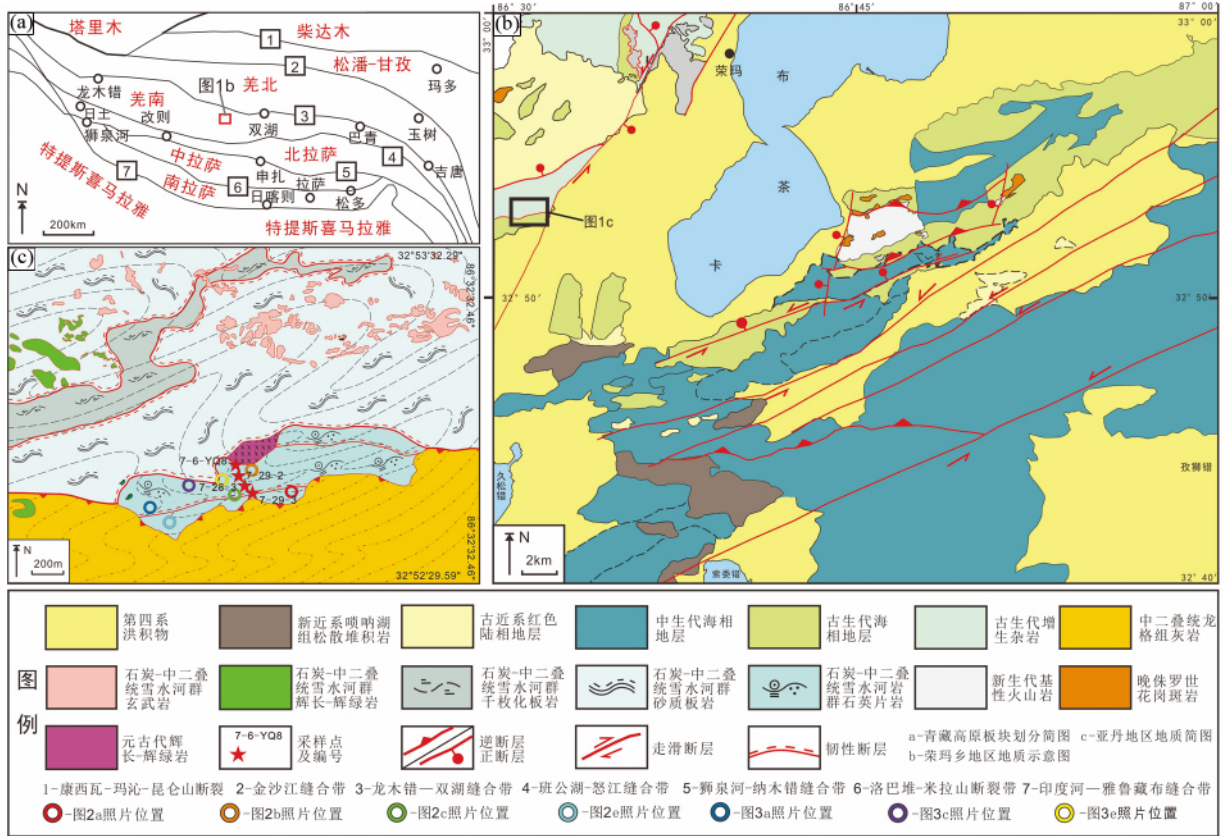


图1 羌塘中部荣玛地区地质简图(据朱弟成等, 2012; 王寒冻, 2015 修改)

Fig.1 Simplified geological map of Rongma area, Central Qiangtang (modified after Zhu et al., 2012; Wang, 2015)

### 1 区域地质背景

青藏高原由一系列的块体构造拼贴而成, 被几条著名的缝合带所分隔(图1a)(朱弟成等, 2012)。羌塘盆地位于青藏高原北缘, 地处欧亚大陆与冈瓦纳大陆的结合部位, 被龙木错-双湖缝合带分为羌南和羌北地块。羌南、羌北地区沉积地层和古生物特征差别较大, 羌南可与冈瓦纳对比, 而羌北的沉积和古生物特征则与欧亚大陆的扬子板块有亲缘性(李才等, 2004, 2005)。研究区位于羌南地块北部荣玛乡亚丹一带, 大地构造位置位于龙木错-双湖缝合带以南 ca. 80 ~ 100km 的地区(图1a)。根据区域地层分布特点, 研究区可划分为增生杂岩区和沉积盖层区, 增生杂岩变形和变质作用均较强, 层序混乱, 可分为基质和岩块的“二元”结构, 为典型碰撞带俯冲增生杂岩。沉积盖层区普遍发育强变形、弱变质作用, 基本沉积层序可以识别。区域主要出露晚古生代-新生代地层, 如泥盆系长蛇山组( $D_{1-3}ch$ )砂岩、粉砂岩, 石炭-二叠系雪水河岩群( $(C-P_2) Xph$ )板岩、千枚岩, 下-中二叠统吞龙共巴组( $P_{1-2}t$ )碎屑岩夹灰岩, 下二叠统龙格组( $P_2l$ )灰岩夹砂岩, 上三叠统日干配错组( $T_3r$ )灰岩夹砂岩, 上白垩统阿布山组( $K_2a$ )砾岩、砂岩, 古近系康托组( $E_3k$ )陆源碎屑岩及第四系陆缘碎屑堆积。区内构造发育, 主要表现为多期的变质

变形作用, 并发育一条 NE-SW 向区域走滑断裂。

区内岩浆岩出露较少, 时代主要集中于晚古生代、中生代和新生代; 晚古生代岩浆岩主要出露于西北部, 中生代和新生代岩浆岩主要分布于中部地区。区内侵入岩包括基性岩墙、岩脉, 以及酸侵入体。基性岩墙、岩脉的岩性主要为辉绿玢岩、辉长岩、辉绿辉长岩等, 形成时代为晚石炭世-早二叠世(李才等, 2005; 翟庆国等, 2009b), 多呈块体产于古生代混杂岩中; 酸性侵入体主要为花岗闪长岩, 多呈岩株、岩枝产出, 其侵位时代为晚侏罗世, 与围岩界线清楚, 热接触作用明显。区内火山岩主要发育古生代杂岩体中的玄武岩块体和新生代纳丁错组玄武岩。区域变质岩广泛发育, 从 NW 至 SE 变质相具由高到低的渐变规律, 变质岩类型主要包括石榴石多硅白云母片岩、蓝片岩、板岩、千枚岩、斜长角闪岩、大理岩和变质石英砂岩等(图1b, c)。野外剖面显示, 石榴石多硅白云母片岩呈近 NW-SE 向展布, 与基性岩和大理岩呈断层接触, 岩层受构造作用强烈影响, 早期经中-浅层次的剪切作用而整体片理化, 后期受南北向的推覆作用而再次强烈变形。

### 2 样品特征及分析方法

#### 2.1 岩石特征

荣玛地区变质杂岩主要包括斜长角闪岩、石榴石多硅白

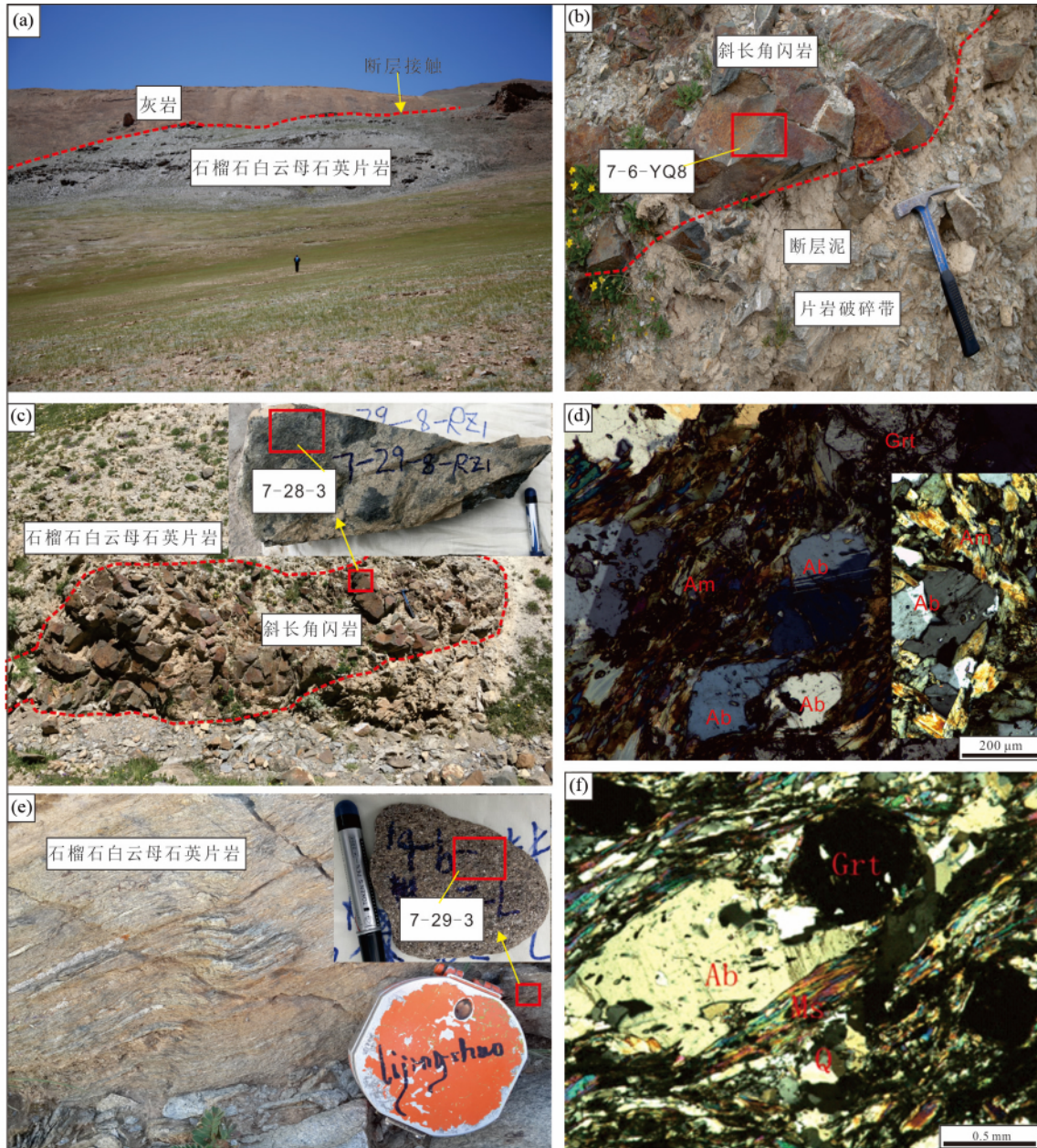


图2 羌塘中部荣玛地区亚丹杂岩野外和镜下特征

(a) 石榴石多硅白云母石英片岩与灰岩呈断层接触; (b) 新元古代斜长角闪岩与石榴石多硅白云母石英片岩呈断层接触; (c) 中侏罗世斜长角闪岩侵入石榴石多硅白云母石英片岩; (d) 中侏罗世斜长角闪岩正交偏光显微镜下照片; (e) 石榴石多硅白云母石英片岩野外手标本照片; (f) 石榴石多硅白云母石英片岩正交偏光显微镜下照片。Ab-钠长石; Am-角闪石; Ms-白云母; Q-石英; Grt-石榴子石

Fig. 2 Field and microscopic photographs of the Yadan metamorphic complex from Rongma area, Central Qiangtang

(a) Garnet-polysilicon muscovite-quartz Schist is in fault contact with limestone; (b) Neoproterozoic plagioclase amphibolite is in fault contact with garnet Muscovite quartz schist; (c) Middle Jurassic plagioclase amphibolite intrudes Garnet-polysilicon muscovite-quartz schist; (d) microscope photograph of the Middle Jurassic plagioclase amphibolite (crossed polarized light); (e) garnet-polysilicon muscovite-quartz schist in the field photograph; (f) garnet-polysilicon muscovite-quartz schist in the crossed polarized light. Ab-albite; Am-amphibole; Ms-muscovite; Q-quartz; Grt-garnet

云母石英片岩、大理岩、蓝片岩等。蓝片岩主要以孤立块状、透镜状发育于板岩和片岩中,局部发育规模较大的块体(翟庆国等,2009a)。石榴石多硅白云母石英片岩与灰岩呈断层接触(图2a);斜长角闪岩与石榴石多硅白云母石英片岩存在断层和侵位两种接触关系(图2b,c)。本次在荣玛乡亚

丹一带主要对斜长角闪岩和石榴石多硅白云母石英片岩进行了系统的采样研究。斜长角闪岩均为粒状变晶结构,块状构造,主要矿物包括角闪石(60%~65%)和斜长石(35%~40%)(图2b-d)。石榴石多硅白云母石英片岩具鳞片粒状变晶结构,片状构造,矿物组成主要包括,石英(45%)、白云

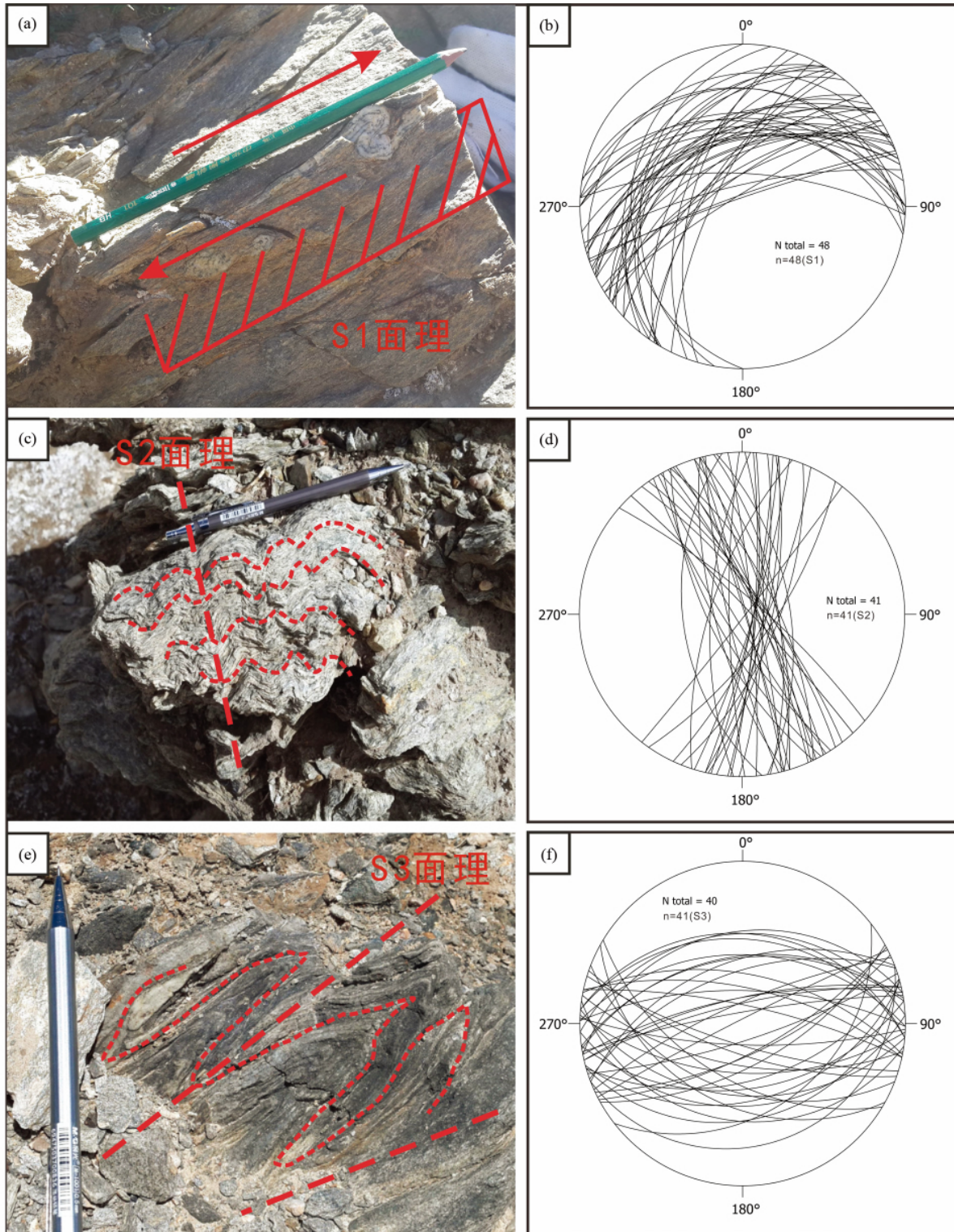


图3 羌塘中部荣玛地区石榴石多硅白云母石英片岩三期变形特征 ( a , c , e ) 和面理赤平投影图下半球 ( b , d , f )

Fig.3 Three stages of deformation ( a , c , e ) and their planar stereographic projection maps of lower hemisphere ( b , d , f ) of garnet-polysilicon-muscovite-quartz schist in Rongma area , Central Qiangtang

母 (35%)、绿泥石 (5%)、钠长石 (10%)、石榴石 (5%) 薄片  
中构造裂隙发育, 内有硅化石英及少量绢云母、原岩碎粉呈  
脉状充填 (图 2e , f)。

野外调研发现, 石榴石多硅白云母石英片岩变形作用发  
育 (图 3a , c , e), 通过系统的产状勘测统计, 对面理产状数  
据进行了赤平投影投图分析, 投图显示, 石榴石多硅白云母

石英片岩发育三期变形作用(图 3a-f)。第一期为韧性平移剪切作用(S1),同时具逆冲推覆的特点,剪切方向近 NW-SE 向,为右行剪切,伴随强烈的变质作用,产生了大量的变质矿物,包括了石榴子石+斜长石+角闪石的变质矿物组合,并形成肠状褶皱和强烈的矿物定向(图 3c, e),岩层同时形成同斜褶皱、鞘褶皱等构造。S1 面理轴面平均产状为  $\sim 271^\circ \angle \sim 47^\circ$ 。第二期变形(S2)主要显示为东西向的挤压作用,以南北向形成片理面的各种弯滑褶皱为特点,轴面方向近东西,较为陡立。此期主要为 S1 后期叠加的一期挤压,主应力方向为东西向,获得 S2 的轴面产状平均为  $\sim 102^\circ \angle \sim 62^\circ$ 。第三期变形(S3)主要形成一系列南北向的宽缓褶皱、局部尖棱褶皱(图 3e)和逆断层等。此期变形主要为南北向的挤压,面理轴面平均产状为  $\sim 158^\circ \angle \sim 43^\circ$  作用范围大,使得整个片岩发生南北向褶皱,并且影响发育多组片岩中的复褶皱,同时发育褶皱相关断层,表现为逆断层。与 S2 期的区别在于此期的规模较大, S3 的影响还使得大理岩受垂向挤压,形成石香肠,推断 S1 和 S2 可能与区域上或周边较早期构造事件有关,而 S3 变形可能与羌南、羌北地块的碰撞造山有关。

## 2.2 分析方法

本次共采集 2 件斜长角闪岩样品(与片岩呈断层和侵位接触关系的样品各 1 件, 7-6-YQ8、7-28-3)和 2 件石榴石多硅白云母石英片岩(7-29-2、7-29-3)用于开展锆石 U-Pb 同位素定年; 2 组共 17 件石榴石多硅白云母石英片岩用于多硅白云母 Ar-Ar 定年; 8 件斜长角闪岩用于开展全岩地球化学分析。

锆石单矿物分选在北京锆年领航科技有限公司实验室完成,分选方法和过程详见王泉(2015)。将选出的锆石与标样一起黏贴在环氧树脂中,抛磨约 1/2,露出锆石矿物的中心面,然后进行透射光、反射光和阴极发光显微照相,用于判断锆石结构和成因类型。选取合适的测试点位,避开裂纹和包裹体,以免影响分析数据质量。样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析在中国地质科学院地质所测试中心完成,测试仪器为 Thermo Element II 质谱仪与 New Wave UP193 激光器,激光波长 193nm,剥蚀激光的束斑大小设定为 35 $\mu$ m,脉冲频率 10Hz。工作条件为:冷却气(Ar)流量为 1.13L/min;激光准备时间 20s,剥蚀时间为 40s。元素含量以 Plesovice 为内部标准进行标定,锆石 U-Pb 年龄测试数据采用澳大利亚 Glitter 4.4 数据处理软件计算获得,用于年龄误差校正的准锆石为 GJ-1,单个测点数据点误差为  $1\sigma$ ,加权平均值误差为  $2\sigma$ 。标样特征和具体分析流程详见王泉(2015)。普通铅校正采用 Anderson(2002)的方法,年龄计算采用国际标准程序 Isoplot(Ludwing *et al.*, 2003)。测试得到的年龄数据 <1Ga 的点使用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和对应的  $1\sigma$  作为年龄,  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的比值计算谐和度; >10Ga 的点使用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  和对应的  $1\sigma$  作为年龄,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  的比值计算谐和度。本次谐和度计算结果采用 0.93~1.0 之间的为谐和点。

多硅白云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年在中国地质科学院地质研究

所国土资源部同位素地质重点实验室完成。样品的阶段升温加热通过电子轰击炉完成,质谱分析在 MM-1200B 质谱计上完成;所有数据都经过质量歧视校正、大气氩校正、空白校正和干扰元素同位素校正。实验分析流程详见陈文等(2006)、翟庆国等(2009a)。

全岩主、微量和稀土元素分析在河北省中铁物探勘察有限公司实验中心完成,主量元素通过 ARL Advant XP + XRF 仪测定分析,分析精度一般优于 3%;微量元素用 X 系列 2/SN01831C 等离子质谱(ICP-MS)进行分析,分析精度一般优于 3%。分析流程见 Liu *et al.* (2016)。

斜长角闪岩 Nd 同位素分析在南京大学实验中心完成。同位素的测试则在该实验室的多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICPMS)上采用静态模式(Static mode)进行。分析全程采用 USGS 标准物质 BHVO-2、BCR-2、AGV-2 进行质量监控。仪器测试利用  $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$  依据指数法则作内部校正。锆石原位 Hf 同位素在天津地质调查中心实验测试室完成,在激光剥蚀多接收器等离子质谱仪上完成,仪器由美国 ESI 公司 NEW WAVE 193nm FX 激光器和美国赛默飞世尔公司 NEPTUNE 多接收器等离子质谱组成。其性能参数包括:质量数范围  $A \sim 310\text{amu}$ ;分辨率, >450(平顶峰,10%峰谷定义);丰度灵敏度, < $5 \times 10^{-6}$ (无 RPQ)、< $0.5 \times 10^{-6}$ (有 RPQ);测定峰稳定性包括磁场和电场漂移, < $50 \times 10^{-6}/\text{h}$ ;激光脉冲频率为 8Hz,剥蚀孔径为 45 $\mu$ m,锆石 GJ-1 作为同位素监控标样,锆石 91500 作为校正标样。

## 3 测试结果

### 3.1 锆石 U-Pb 年代学

本次对 2 件斜长角闪岩和 2 件石榴石多硅白云母石英片岩进行了锆石 U-Pb 定年,分析结果见表 1,锆石 U-Pb 谐和年龄图见图 4。阴极发光图(图 5)显示,斜长角闪岩锆石呈短柱状,环带发育,部分锆石样品发育一圈较薄的增生边;石榴石多硅白云母石英片岩锆石主要呈椭圆状和柱状,有磨圆特征,反映沉积岩特征,锆石增生边发育,本次锆石圈点都集中于边部并尽量避免增生边,斜长角闪岩和多硅白云母石英片岩的 Th/U 比值主要集中于 0.2~1.0 之间,主要显示岩浆锆石特征,所测年龄可以代表锆石寄主原岩的结晶时间。

样品 7-6-YQ8 斜长角闪岩,与石榴石多硅白云母石英片岩呈断层接触(图 2b),其阴极发光图像(图 5a)显示典型的岩浆振荡环带,锆石呈短柱状,部分锆石边部发育一圈较薄的增生边;锆石 Th/U 比值介于 0.1~1.2 之间,显示典型的岩浆成因,对 225 颗锆石打点,选取其中谐和度介于 0.9~1.1 之间的点共计 120 个,其余不谐和的数据 105 个舍弃。其中 61 个低年龄群数据比较集中,加权平均年龄为  $717 \pm 7\text{Ma}$  ( $n=61$ , MSWD=1.9),小于 700Ma 的谐和数据加权平均年龄为  $680 \pm 7\text{Ma}$  ( $n=15$ , MSWD=0.38),其中 717Ma 可能代表斜长角闪岩原岩的形成年龄(新元古代中期),680Ma 可

表1 西藏羌塘荣玛地区变质杂岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 分析结果

Table 1 U-Pb isotope compositions of the zircons from metamorphic complex from Rongma area in Central Qiangtang

测点号	Th/U	同位素原子比率						年龄( Ma)						谐和度
		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	2 $\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	2 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	2 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	2 $\sigma$	
7-19RZ 新元古代斜长角闪岩( 对应样品号为 7-6-YQ8)														
7-19-RZ1_1	0.7	0.13944	0.00376	1.38783	0.04636	0.0695	0.0016	842	21	884	20	914	47	95
7-19-RZ1_11	0.5	0.11233	0.00302	1.09976	0.02567	0.07052	0.00135	686	18	753	12	943	39	91
7-19-RZ1_13	0.7	0.10782	0.00292	1.03918	0.0315	0.06965	0.00156	660	17	724	16	918	45	91
7-19-RZ1_15	0.7	0.11569	0.00314	1.13883	0.03576	0.07017	0.00159	706	18	772	17	933	46	91
7-19-RZ1_18	0.3	0.11524	0.00312	1.12579	0.03088	0.07102	0.00148	703	18	766	15	958	42	91
7-19-RZ1_2	1	0.13979	0.00374	1.3738	0.03182	0.07019	0.00133	844	21	878	14	934	39	96
7-19-RZ1_24	0.9	0.12143	0.0033	1.1568	0.03308	0.06678	0.00142	739	19	780	16	831	44	94
7-19-RZ1_25	0.5	0.13357	0.00368	1.34955	0.05171	0.07198	0.00181	808	21	867	22	986	50	93
7-19-RZ1_27	0.7	0.12149	0.0033	1.13443	0.02812	0.0681	0.00134	739	19	770	13	872	40	95
7-19-RZ1_29	0.8	0.1167	0.00322	1.15969	0.04309	0.07068	0.00179	712	19	782	20	948	51	91
7-19-RZ1_30	0.4	0.11112	0.00303	1.03011	0.02954	0.06704	0.00145	679	18	719	15	839	44	94
7-19-RZ1_31	0.6	0.13123	0.00358	1.23448	0.03135	0.06819	0.00135	795	20	816	14	874	41	97
7-19-RZ1_32	0.6	0.12433	0.00341	1.18769	0.03754	0.0673	0.00152	755	20	795	17	847	46	94
7-19-RZ1_33	0.7	0.11603	0.00319	1.14217	0.03896	0.06999	0.00167	708	18	774	18	928	48	91
7-19-RZ1_35	0.5	0.1421	0.00391	1.4125	0.04674	0.07157	0.00163	857	22	894	20	974	46	95
7-19-RZ1_38	0.6	0.12341	0.00338	1.15605	0.03083	0.06673	0.00136	750	19	780	15	829	42	96
7-19-RZ1_39	0.7	0.13544	0.00375	1.32549	0.04971	0.06801	0.0017	819	21	857	22	869	51	95
7-19-RZ1_4	0.5	0.12036	0.00323	1.14307	0.03109	0.06782	0.00141	733	19	774	15	863	43	94
7-19-RZ1_40	0.6	0.12029	0.00329	1.18055	0.02836	0.07094	0.00137	732	19	792	13	956	39	92
7-19-RZ1_42	0.6	0.11577	0.00318	1.07106	0.02782	0.06798	0.00138	706	18	739	14	868	41	95
7-19-RZ1_43	0.7	0.1248	0.00342	1.22536	0.03167	0.07092	0.00142	758	20	812	14	955	40	93
7-19-RZ1_44	0.9	0.11832	0.00325	1.08629	0.0299	0.06506	0.00136	721	19	747	15	776	43	96
7-19-RZ1_45	0.4	0.1482	0.00412	1.54791	0.05732	0.0758	0.00182	891	23	950	23	1090	47	93
7-19-RZ1_46	1	0.12527	0.00345	1.22642	0.0324	0.06974	0.00141	761	20	813	15	921	41	93
7-19-RZ1_47	0.7	0.11708	0.00321	1.08467	0.0261	0.06665	0.00129	714	19	746	13	827	40	95
7-19-RZ1_48	0.2	0.12576	0.00347	1.23693	0.03703	0.07105	0.00154	764	20	818	17	959	44	93
7-19-RZ1_49	0.5	0.1138	0.00313	1.06164	0.02706	0.06677	0.00134	695	18	735	13	831	41	94
7-19-RZ1_52	0.9	0.11763	0.00325	1.06986	0.0307	0.06643	0.00142	717	19	739	15	820	44	97
7-19-RZ1_6	0.7	0.12236	0.00329	1.15791	0.0317	0.06857	0.00143	744	19	781	15	886	43	95
7-19-RZ1_7	0.6	0.10945	0.003	1.04996	0.04223	0.07108	0.00195	670	17	729	21	960	55	91
7-19-RZ2_13	0.9	0.11585	0.00329	1.10681	0.04913	0.07105	0.00208	707	19	757	24	959	59	93
7-19-RZ2_20	1	0.12603	0.00357	1.21726	0.04479	0.06912	0.00172	765	20	809	21	902	50	94
7-19-RZ2_26	0.8	0.11569	0.00308	1.11199	0.03217	0.06788	0.00147	706	18	759	15	865	44	93
7-19-RZ2_32	0.8	0.1178	0.00314	1.1484	0.03175	0.07012	0.00148	718	18	777	15	932	43	92
7-19-RZ2_33	0.1	0.11758	0.00315	1.12436	0.03671	0.06881	0.00161	717	18	765	18	893	47	93
7-19-RZ2_36	0.5	0.13852	0.00371	1.29831	0.04106	0.06769	0.00152	836	21	845	18	859	46	98
7-19-RZ2_40	0.7	0.11781	0.0032	1.15644	0.04561	0.06852	0.00182	718	18	780	21	884	54	92
7-19-RZ2_41	0.5	0.11164	0.00298	1.07696	0.02634	0.06834	0.00135	682	17	742	13	879	40	91
7-19-RZ2_5	0.2	0.12437	0.00348	1.21533	0.05132	0.07126	0.00197	756	20	808	24	965	55	93
7-19-RZ2_8	0.5	0.12207	0.00336	1.15567	0.02966	0.06878	0.00138	743	19	780	14	892	41	95
7-19-RZ4_1	0.7	0.11175	0.003	1.08556	0.05377	0.06903	0.00222	683	17	746	26	900	65	91
7-19-RZ4_10	0.6	0.12817	0.00335	1.23296	0.02897	0.06765	0.00131	777	19	816	13	858	40	95
7-19-RZ4_12	0.2	0.10921	0.00287	1.04474	0.02869	0.0674	0.00144	668	17	726	14	850	44	92
7-19-RZ4_14	0.5	0.11678	0.00308	1.13964	0.03524	0.06754	0.00154	712	18	772	17	854	47	92
7-19-RZ4_16	0.6	0.11316	0.00299	1.05407	0.02833	0.0661	0.00139	691	17	731	14	810	43	94
7-19-RZ4_2	0.8	0.14215	0.00373	1.46231	0.05633	0.07503	0.0019	857	21	915	23	1069	50	93
7-19-RZ4_25	0.4	0.11283	0.00302	1.09743	0.03279	0.06961	0.00155	689	17	752	16	917	45	91
7-19-RZ4_26	1	0.12359	0.00333	1.15995	0.03941	0.06741	0.00162	751	19	782	19	850	49	96
7-19-RZ4_27	0.8	0.1412	0.00377	1.37241	0.03407	0.06861	0.00135	851	21	877	15	887	40	97

续表 1

Continued Table 1

测点号	Th/U	同位素原子比率						年龄( Ma)						谐和度
		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$2\sigma$	
7-19-RZ4_28	1.3	0.11987	0.00328	1.12962	0.04861	0.06747	0.00195	730	19	768	23	853	59	95
7-19-RZ4_29	0.2	0.14413	0.00388	1.39457	0.04321	0.06777	0.0015	868	22	887	18	861	45	97
7-19-RZ4_31	0.6	0.12569	0.0034	1.23603	0.0408	0.06954	0.00162	763	19	817	19	915	47	93
7-19-RZ4_32	0.3	0.12481	0.00339	1.18613	0.04213	0.06825	0.00169	758	19	794	20	876	51	95
7-19-RZ4_33	0.4	0.12171	0.00328	1.18488	0.03018	0.07067	0.00142	740	19	794	14	948	41	93
7-19-RZ4_34	0.3	0.12194	0.0033	1.18305	0.0367	0.0693	0.00156	742	19	793	17	908	46	93
7-19-RZ4_35	0.8	0.1223	0.00338	1.16402	0.05347	0.06659	0.002	744	19	784	25	825	61	94
7-19-RZ4_38	0.5	0.1226	0.00334	1.14825	0.03352	0.06826	0.00148	746	19	776	16	877	44	96
7-19-RZ4_41	1	0.12401	0.00339	1.23255	0.03558	0.07048	0.00151	754	19	816	16	943	43	92
7-19-RZ4_7	1.1	0.11682	0.00304	1.10057	0.02723	0.06719	0.00135	712	18	754	13	844	41	94
7-19-RZ4_8	0.8	0.12432	0.00325	1.1857	0.03245	0.06741	0.00142	755	19	794	15	851	43	95
7-19-RZ7_12	0.4	0.11365	0.00283	1.08681	0.0318	0.06951	0.00155	694	16	747	15	914	45	92
7-19-RZ7_15	0.7	0.12562	0.00313	1.21809	0.0318	0.069	0.00143	763	18	809	15	899	42	94
7-19-RZ7_19	0.6	0.12304	0.00308	1.15836	0.03078	0.06823	0.00143	748	18	781	14	876	43	95
7-19-RZ7_20	1.1	0.1309	0.0033	1.20412	0.04054	0.06594	0.00158	793	19	803	19	805	49	98
7-19-RZ7_22	0.9	0.11444	0.00296	1.12109	0.05001	0.06894	0.00204	699	17	764	24	897	60	91
7-19-RZ7_24	0.4	0.12104	0.00305	1.21462	0.03187	0.07196	0.00149	737	18	807	15	985	42	91
7-19-RZ7_25	0.8	0.1264	0.00322	1.26915	0.04433	0.07335	0.00178	767	18	832	20	1024	48	92
7-19-RZ7_26	0.7	0.12806	0.00323	1.25211	0.03235	0.06941	0.00142	777	18	824	15	911	42	94
7-19-RZ7_27	0.1	0.12489	0.00314	1.22117	0.02778	0.06845	0.00133	759	18	810	13	882	40	93
7-19-RZ7_30	0.7	0.13552	0.00346	1.31336	0.04303	0.07095	0.00165	819	20	852	19	956	47	96
7-19-RZ7_32	0.9	0.124	0.00319	1.23494	0.04222	0.07041	0.0017	754	18	817	19	940	49	92
7-19-RZ7_35	0.4	0.14815	0.00377	1.43791	0.03545	0.06963	0.00138	891	21	905	15	918	40	98
7-19-RZ7_37	0.6	0.13229	0.0034	1.25689	0.03786	0.06964	0.00155	801	19	827	17	918	45	96
7-19-RZ7_38	0.5	0.13092	0.00336	1.30532	0.03666	0.06983	0.00149	793	19	848	16	923	43	93
7-19-RZ7_40	0.6	0.13016	0.00337	1.26964	0.04331	0.06851	0.00163	789	19	832	19	884	49	94
7-19-RZ7_41	1.1	0.12841	0.0033	1.31871	0.03428	0.07176	0.00146	779	19	854	15	979	41	91
7-19-RZ7_44	2.2	0.12323	0.00318	1.21126	0.03246	0.06982	0.00145	749	18	806	15	923	42	92
7-19-RZ7_7	0.7	0.11886	0.00296	1.11852	0.0368	0.06738	0.00161	724	17	762	18	850	49	95
7-19-RZ7_9	0.4	0.11997	0.00297	1.17111	0.03186	0.06941	0.00148	730	17	787	15	911	43	92
8-15-4-RZ1_10	0.9	0.14372	0.00401	1.33902	0.0451	0.06792	0.00157	866	23	863	20	866	47	99
8-15-4-RZ1_11	0.8	0.13233	0.00368	1.22537	0.03307	0.06643	0.00135	801	21	812	15	820	42	98
8-15-4-RZ1_12	0.9	0.11415	0.00317	1.09636	0.02826	0.06898	0.00138	697	18	752	14	898	41	92
8-15-4-RZ1_13	0.9	0.11584	0.00323	1.06295	0.02947	0.068	0.00142	707	19	735	15	869	43	96
8-15-4-RZ1_14	0.1	0.1282	0.00356	1.19631	0.02821	0.06763	0.00128	778	20	799	13	857	39	97
8-15-4-RZ1_17	0.7	0.11684	0.00324	1.09573	0.02423	0.06784	0.00125	712	19	751	12	864	38	94
8-15-4-RZ1_18	0.9	0.1308	0.00366	1.27568	0.03979	0.06845	0.00151	792	21	835	18	882	45	94
8-15-4-RZ1_19	0.2	0.12979	0.00361	1.21077	0.02783	0.06818	0.00128	787	21	806	13	874	38	97
8-15-4-RZ1_2	0.4	0.14322	0.00395	1.33545	0.03461	0.0689	0.00136	863	22	861	15	896	40	99
8-15-4-RZ1_20	0.5	0.10975	0.00309	1.04676	0.03533	0.06997	0.00168	671	18	727	18	927	48	92
8-15-4-RZ1_21	0.7	0.12975	0.00365	1.23237	0.04176	0.06717	0.00157	787	21	815	19	843	48	96
8-15-4-RZ1_22	0.3	0.11006	0.00307	1.0481	0.02373	0.06911	0.00129	673	18	728	12	902	38	92
8-15-4-RZ1_23	0.2	0.12588	0.00351	1.18635	0.02846	0.0677	0.00129	764	20	794	13	859	39	96
8-15-4-RZ1_27	1.1	0.12558	0.00351	1.16164	0.02607	0.0673	0.00124	763	20	783	12	847	38	97
8-15-4-RZ1_28	0.6	0.12399	0.00348	1.21395	0.0321	0.07044	0.00141	754	20	807	15	941	41	93
8-15-4-RZ1_29	0.5	0.12667	0.00356	1.21562	0.0358	0.06838	0.00146	769	20	808	16	880	44	95
8-15-4-RZ1_3	1.5	0.13519	0.00375	1.29865	0.03956	0.06887	0.0015	817	21	845	17	895	44	96
8-15-4-RZ1_30	0.9	0.11321	0.00318	1.07489	0.03051	0.07007	0.00148	691	18	741	15	931	43	93
8-15-4-RZ1_31	0.6	0.11784	0.00337	1.09643	0.04608	0.06628	0.00185	718	19	752	22	815	57	95
8-15-4-RZ1_39	0.5	0.12027	0.00339	1.12079	0.03009	0.06717	0.00137	732	20	763	14	843	42	95



续表 1

Continued Table 1

测点号	Th/U	同位素原子比率						年龄( Ma)						谐和度
		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$2\sigma$	
8-15-4-RZ1_4	0.7	0.12849	0.0036	1.27426	0.0503	0.0691	0.00177	779	21	834	22	902	52	93
8-15-4-RZ1_40	0.6	0.11799	0.00333	1.14428	0.03057	0.06959	0.00141	719	19	775	14	916	41	92
8-15-4-RZ1_43	0.4	0.12657	0.00358	1.18017	0.03049	0.06794	0.00135	768	20	791	14	867	41	97
8-15-4-RZ1_44	0.7	0.11907	0.00336	1.17333	0.02906	0.07095	0.00137	725	19	788	14	956	39	92
8-15-4-RZ1_5	0.8	0.11505	0.00318	1.13933	0.02831	0.07214	0.00141	702	18	772	13	990	39	90
8-15-4-RZ1_6	1.1	0.13264	0.00368	1.25818	0.0359	0.06835	0.00143	803	21	827	16	879	43	97
8-15-4-RZ1_8	1.7	0.13908	0.00385	1.31587	0.0326	0.06705	0.0013	840	22	853	14	839	40	98
8-15-4-RZ1_9	0.4	0.12215	0.00355	1.12725	0.06714	0.06644	0.00247	743	20	766	32	820	76	96
7-19-RZ4_22	2.1	0.17507	0.00465	1.92327	0.05482	0.07715	0.00158	1040	26	1089	19	1125	40	95
8-15-4-RZ1_15	0.6	0.20322	0.00567	2.33308	0.07218	0.08376	0.00172	1193	30	1222	22	1287	39	97
7-19-RZ7_29	0.2	0.21432	0.0054	2.65285	0.0563	0.08697	0.00161	1252	29	1315	16	1360	35	95
8-15-4-RZ1_36	0.4	0.22819	0.00643	2.83468	0.08007	0.08838	0.00171	1325	34	1365	21	1391	37	97
7-19-RZ7_36	0.6	0.28488	0.00728	4.37639	0.12871	0.10769	0.00211	1616	37	1708	24	1761	35	94
7-19-RZ1_16	0.7	0.31695	0.00855	4.70598	0.12216	0.10846	0.00202	1775	42	1768	22	1774	34	99
7-19-RZ4_39	0.6	0.35055	0.00949	5.82944	0.13385	0.11835	0.00216	1937	45	1951	20	1932	32	99
7-19-RZ4_37	0.7	0.36056	0.00982	6.65024	0.23388	0.1306	0.00258	1985	47	2066	31	2106	34	96
7-19-RZ2_6	0.7	0.37973	0.01065	6.98654	0.37769	0.13121	0.00298	2075	50	2110	48	2114	39	98
8-15-4-RZ1_24	0.6	0.42233	0.01183	7.65221	0.25162	0.13262	0.00251	2271	54	2191	30	2133	33	96
8-15-4-RZ1_38	0.9	0.44995	0.01267	10.25977	0.29521	0.16489	0.003	2395	56	2459	27	2506	30	97
8-15-4-RZ1_25	1	0.45975	0.01285	10.48845	0.30058	0.1622	0.00295	2439	57	2479	27	2479	30	98
7-19-RZ2_43	0.7	0.61644	0.01646	20.39347	0.58638	0.23812	0.00434	3096	66	3110	28	3107	29	99
7-28-3 中侏罗世斜长角闪岩														
7.29.8. RZ. 1	0.7	0.0265	0.0004	0.1838	0.0108	0.0503	0.003	169	3	171	10	210	138	98
7.29.8. RZ. 2	0.5	0.0253	0.0004	0.1723	0.0086	0.0494	0.0025	161	2	161	8	166	117	100
7.29.8. RZ. 3	0.3	0.026	0.0005	0.1809	0.0102	0.0505	0.003	165	3	169	9	217	138	97
7.29.8. RZ. 4	0.4	0.0257	0.0004	0.1838	0.0059	0.052	0.0015	163	2	171	6	283	66	95
7.29.8. RZ. 5	0.9	0.0253	0.0004	0.1803	0.0071	0.0516	0.002	161	2	168	7	268	91	95
7.29.8. RZ. 7	1.1	0.023	0.0004	0.1562	0.0067	0.0493	0.0021	146	2	147	6	164	98	99
7.29.8. RZ. 8	1.3	0.0624	0.0009	0.4704	0.0114	0.0546	0.0012	390	5	391	10	397	51	99
7.29.8. RZ. 9	0.7	0.0259	0.0004	0.1863	0.0091	0.0521	0.0026	165	3	174	8	290	114	94
7.29.8. RZ. 10	0.5	0.0267	0.0004	0.1914	0.0074	0.052	0.0022	170	3	178	7	284	95	95
7.29.8. RZ. 11	1	0.0233	0.0004	0.1627	0.0107	0.0506	0.0033	149	3	153	10	222	152	97
7.29.8. RZ. 14	0.6	0.0239	0.0003	0.1612	0.004	0.0489	0.0011	152	2	152	4	143	53	100
7.29.8. RZ. 15	0.6	0.0777	0.0011	1.0859	0.0375	0.1014	0.0035	482	7	747	26	1649	63	64
7.29.8. RZ. 16	0.6	0.0405	0.0006	0.2813	0.0071	0.0504	0.0012	256	4	252	6	213	54	98
7.29.8. RZ. 17	0.8	0.0407	0.0006	0.2836	0.0086	0.0506	0.0015	257	4	253	8	222	67	98
7.29.8. RZ. 18	0.1	0.0639	0.001	0.4834	0.0117	0.0549	0.0012	399	6	400	10	406	48	99
7.29.8. RZ. 19	0.6	0.038	0.0005	0.2707	0.0072	0.0517	0.0013	240	3	243	6	272	59	98
7.29.8. RZ. 20	0.8	0.0401	0.0006	0.292	0.009	0.0528	0.0015	254	4	260	8	318	66	97
7.29.8. RZ. 21	0.3	0.0248	0.0003	0.1761	0.0043	0.0515	0.0012	158	2	165	4	265	52	95
7.29.8. RZ. 22	0.6	0.0254	0.0005	0.1749	0.015	0.0499	0.0044	162	3	164	14	192	204	98
7.29.8. RZ. 23	0.1	0.0253	0.0004	0.175	0.0048	0.0502	0.0012	161	2	164	5	206	58	98
7.29.8. RZ. 24	0.4	0.0265	0.0005	0.1843	0.0062	0.0505	0.0016	168	3	172	6	218	74	97
7.29.8. RZ. 25	0.5	0.0391	0.0006	0.2707	0.0086	0.0502	0.0015	247	4	243	8	203	70	98
7.29.8. RZ. 26	0.2	0.0321	0.0005	0.223	0.0057	0.0504	0.0013	204	3	204	5	212	59	100
7.29.8. RZ. 28	0.2	0.0255	0.0004	0.1699	0.0079	0.0484	0.0021	162	3	159	7	120	104	98
7.29.8. RZ. 29	0.2	0.0257	0.0003	0.1821	0.0055	0.0513	0.0015	164	2	170	5	256	65	96
7.29.8. RZ. 30	0.5	0.0252	0.0005	0.1706	0.0111	0.0491	0.0032	161	3	160	10	151	153	99
7.29-3 石榴石多硅白云母石英片岩														
7.29. RZ2. 1	0.7	0.1254	0.0017	1.1233	0.0274	0.065	0.0015	762	10	765	19	773	48	99

续表 1

Continued Table 1

测点号	Th/U	同位素原子比率						年龄( Ma)						谐和度
		$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$2\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$2\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$2\sigma$	
7. 29. RZ2. 2	0. 0	0. 0602	0. 0008	0. 4625	0. 0107	0. 0558	0. 0013	377	5	386	9	443	51	97
7. 29. RZ2. 3	0. 5	0. 1526	0. 0021	1. 5238	0. 0332	0. 0724	0. 0014	916	13	940	20	997	40	97
7. 29. RZ2. 4	0. 3	0. 1671	0. 0029	1. 7819	0. 0444	0. 0774	0. 0015	996	17	1039	26	1130	39	95
7. 29. RZ2. 5	0. 1	0. 1109	0. 0017	0. 9637	0. 0215	0. 063	0. 0013	678	10	685	15	708	43	98
7. 29. RZ2. 6	0. 7	0. 187	0. 0026	2. 0358	0. 0431	0. 0789	0. 0015	1105	15	1128	24	1171	38	97
7. 29. RZ2. 7	0. 0	0. 0536	0. 001	0. 4045	0. 0118	0. 0547	0. 0012	337	6	345	10	401	50	97
7. 29. RZ2. 8	0. 8	0. 1415	0. 002	1. 3131	0. 0377	0. 0673	0. 0019	853	12	852	24	848	59	99
7. 29. RZ2. 9	0. 3	0. 2159	0. 0037	2. 847	0. 0697	0. 0956	0. 0019	1260	21	1368	33	1541	38	92
7. 29. RZ2. 10	0. 5	0. 2012	0. 0038	2. 5697	0. 068	0. 0926	0. 0019	1182	22	1292	34	1480	39	91
7. 29. RZ2. 11	0. 5	0. 1664	0. 0029	2. 0649	0. 0534	0. 09	0. 0018	992	17	1137	29	1425	39	87
7. 29. RZ2. 12	0. 8	0. 1759	0. 0023	2. 004	0. 042	0. 0826	0. 0016	1045	13	1117	23	1260	38	93
7. 29. RZ2. 13	0. 5	0. 2343	0. 0034	2. 794	0. 0598	0. 0865	0. 0016	1357	20	1354	29	1349	37	99
7. 29. RZ2. 14	0. 2	0. 0856	0. 0014	0. 988	0. 025	0. 0837	0. 0017	530	9	698	18	1285	39	75
7. 29. RZ2. 15	0. 8	0. 1361	0. 0026	1. 2844	0. 0408	0. 0685	0. 0019	823	16	839	27	882	57	98
7. 29. RZ2. 16	0. 5	0. 1287	0. 0017	1. 1689	0. 0248	0. 0659	0. 0013	780	10	786	17	802	41	99
7. 29. RZ2. 17	0. 4	0. 1093	0. 0015	0. 935	0. 0216	0. 062	0. 0014	669	9	670	15	675	48	99
7. 29. RZ2. 18	0. 5	0. 1215	0. 002	1. 081	0. 0291	0. 0645	0. 0017	739	12	744	20	759	55	99
7. 29. RZ2. 19	0. 3	0. 182	0. 0048	2. 4773	0. 0873	0. 0987	0. 0021	1078	28	1265	45	1600	39	85
7. 29. RZ2. 20	0. 0	0. 0464	0. 0007	0. 3355	0. 008	0. 0524	0. 0011	293	4	294	7	303	48	99
7. 29. RZ2. 21	0. 0	0. 0424	0. 0006	0. 3032	0. 0072	0. 0519	0. 0011	267	4	269	6	282	50	99
7. 29. RZ2. 22	0. 5	0. 2609	0. 0046	4. 0848	0. 1052	0. 1136	0. 0022	1494	26	1651	43	1857	35	90
7. 29. RZ2. 23	0. 7	0. 1314	0. 0017	1. 1966	0. 0254	0. 066	0. 0013	796	10	799	17	808	41	99
7. 29. RZ2. 24	0. 7	0. 1304	0. 0017	1. 185	0. 0258	0. 0659	0. 0013	790	11	794	17	803	43	99
7-29-2 石榴石多硅白云母石英片岩														
7. 29. RZ3. 1	0. 4	0. 3201	0. 0045	8. 1509	0. 1777	0. 1847	0. 0035	1790	25	2248	49	2695	31	79
7. 29. RZ3. 2	0. 7	0. 3187	0. 0043	4. 6719	0. 0978	0. 1063	0. 002	1783	24	1762	37	1737	35	98
7. 29. RZ3. 3	0. 1	0. 0941	0. 0028	1. 1818	0. 0501	0. 091	0. 0023	580	17	792	34	1448	49	73
7. 29. RZ3. 4	0. 6	0. 1471	0. 0022	1. 4228	0. 0301	0. 0701	0. 0014	885	13	899	19	933	41	98
7. 29. RZ3. 5	0. 7	0. 2003	0. 0026	2. 8432	0. 0624	0. 1029	0. 0021	1177	15	1367	30	1678	37	86
7. 29. RZ3. 6	0. 2	0. 1932	0. 005	2. 3882	0. 0793	0. 0897	0. 0018	1138	30	1239	41	1419	39	91
7. 29. RZ3. 7	0. 6	0. 2773	0. 004	3. 738	0. 0858	0. 0978	0. 0021	1578	23	1580	36	1582	40	99
7. 29. RZ3. 8	0	0. 0466	0. 0009	0. 3464	0. 0118	0. 0539	0. 0018	294	5	302	10	367	76	97
7. 29. RZ3. 9	0. 6	0. 3266	0. 0042	5. 0855	0. 1042	0. 1129	0. 0022	1822	24	1834	38	1847	35	99
7. 29. RZ3. 10	0. 7	0. 3326	0. 0047	5. 7208	0. 1211	0. 1248	0. 0023	1851	26	1935	41	2025	33	95
7. 29. RZ3. 11	1	0. 3485	0. 0052	6. 081	0. 1312	0. 1265	0. 0024	1928	29	1988	43	2050	33	96
7. 29. RZ3. 12	0. 3	0. 3069	0. 006	6. 3882	0. 1632	0. 1509	0. 0029	1726	34	2031	52	2357	32	84
7. 29. RZ3. 13	0	0. 0337	0. 0004	0. 2441	0. 0056	0. 0525	0. 0011	214	3	222	5	309	47	96
7. 29. RZ3. 14	0	0. 0567	0. 0011	0. 4192	0. 0122	0. 0536	0. 0014	355	7	355	10	356	59	100
7. 29. RZ3. 15	3. 3	0. 0668	0. 0024	4. 3567	0. 2118	0. 4728	0. 0288	417	15	1704	83	4159	90	24
7. 29. RZ3. 16	0. 4	0. 1325	0. 0018	1. 2505	0. 0283	0. 0684	0. 0014	802	11	824	19	881	44	97
7. 29. RZ3. 17	0. 2	0. 1325	0. 0017	1. 2418	0. 0263	0. 068	0. 0013	802	10	820	17	867	41	97
7. 29. RZ3. 18	0. 3	0. 2889	0. 004	4. 3854	0. 0963	0. 1101	0. 0022	1636	23	1710	38	1801	36	95
7. 29. RZ3. 19	0. 4	0. 2367	0. 0046	3. 2084	0. 0857	0. 0983	0. 0019	1370	27	1459	39	1592	37	93
7. 29. RZ3. 20	0. 3	0. 3002	0. 0057	8. 1169	0. 2073	0. 1961	0. 0037	1692	32	2244	57	2794	31	75
7. 29. RZ3. 21	0. 5	0. 1322	0. 0018	1. 2082	0. 03	0. 0663	0. 0015	800	11	804	20	816	46	99
7. 29. RZ3. 22	0. 5	0. 2597	0. 0041	3. 6283	0. 0871	0. 1013	0. 0021	1488	24	1556	37	1649	39	95
7. 29. RZ3. 23	0. 4	0. 4572	0. 0069	10. 1231	0. 2231	0. 1606	0. 003	2427	37	2446	54	2462	32	99
7. 29. RZ3. 24	0. 5	0. 1389	0. 0025	1. 2844	0. 0328	0. 0671	0. 0014	838	15	839	21	840	44	99
7. 29. RZ3. 25	0. 6	0. 312	0. 0049	5. 3702	0. 1208	0. 1248	0. 0024	1751	27	1880	42	2026	34	93
7. 29. RZ3. 26	0. 5	0. 2089	0. 0028	2. 3942	0. 053	0. 0831	0. 0017	1223	16	1241	27	1272	40	98
7. 29. RZ3. 27	0. 7	0. 1959	0. 0033	2. 5601	0. 0643	0. 0948	0. 0021	1153	19	1289	32	1524	42	89
7. 29. RZ3. 28	0. 5	0. 1209	0. 0022	1. 5421	0. 049	0. 0925	0. 0023	736	13	947	30	1478	47	77

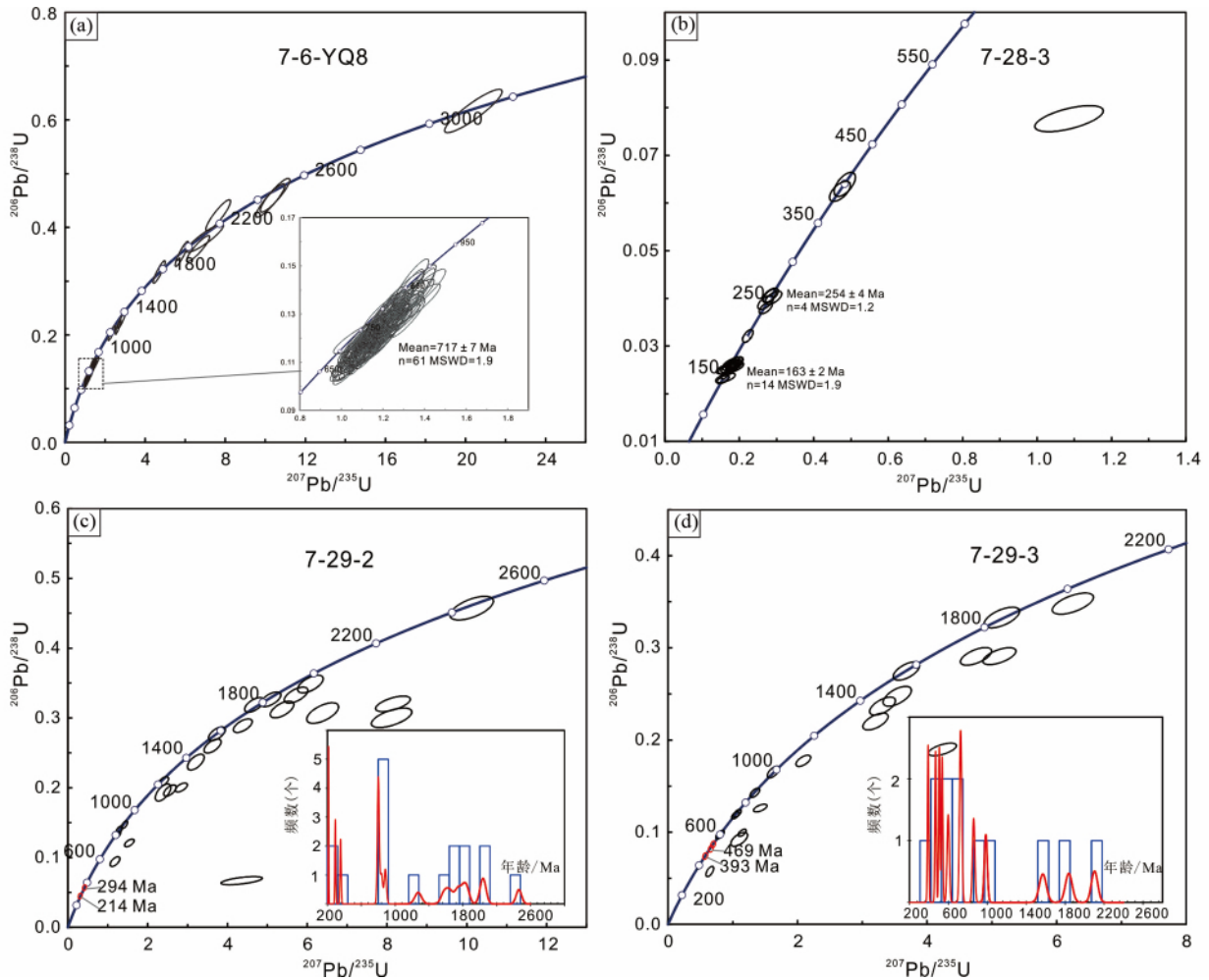


图4 羌南地块荣玛地区杂岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircon data from metamorphic complex from Rongma area in Central Qiangtang

能与后期变质作用有关,但该值可能代表锆石幔部与增生边的混合年龄,所以不代表准确变质时间,可能意义不大,实际变质作用时间可能更晚。样品含丰富继承锆石,年龄范围介于 ca. 3096 ~ 800Ma 之间,集中于 ~900Ma、1400Ma、~1900Ma、~3100Ma 几个峰值。本文首次在羌南地区获得前寒武时期的岩石,暗示区内存在古老基底。

样品 7-28-3 斜长角闪岩,侵位于石榴石多硅白云母石英片岩中(图 2c),其阴极发光图像(图 5b)显示典型的岩浆振荡环带,锆石呈短柱状,部分锆石边部发育一圈较薄的增生边;锆石 Th/U 比值介于 0.1 ~ 1.2 之间,显示典型的岩浆成因,对 26 颗锆石打点 26 个,获得 25 个谐和度大于 95% 的数据,1 个低于 90% 的数据,被摒弃。14 个数据加权平均年龄为  $163 \pm 2\text{Ma}$  ( $n = 14$ , MSWD = 1.9),可近似代表该期斜长角闪岩原岩形成的时间。样品也含丰富继承锆石,年龄范围介于 ca. 400 ~ 200Ma 之间,主要集中于 ~200Ma、~254Ma、~400Ma 三个年龄峰。

样品 7-29-2 和 7-29-3,均为石榴石多硅白云母石英片岩,阴极发光图像(图 5c, d)显示锆石形态复杂,长柱状、短柱状和椭圆状均等发育,部分锆石磨圆明显,显示复杂的锆

石来源,锆石 Th/U 比值变化较大,主要介于 0.02 ~ 1.0 之间,暗示原岩具有沉积岩特征。样品 7-29-2 共对 24 颗锆石进行了 24 个数据点分析,其中谐和度大于 91 的有 20 个,其余 4 个数据谐和度低于 90%,样品整体铅丢失不明显,谐和数据都靠近谐和曲线分布。谐和年龄变化范围集中于 214 ~ 2050Ma,主要包括 ~214Ma、~294Ma、~850Ma、~1200Ma、~1500Ma、~1800Ma 和 ~2000Ma 峰值,表明此件样品同期的沉积作用发生于 214Ma 之后。样品 7-29-3 共进行 28 颗锆石的 28 个测点分析,其中 20 个数据谐和度大于 91 可用,其余 8 个数据谐和度低于 90%,摒弃。样品有弱的铅丢失,但大部分数据均靠近谐和曲线,表明谐和数据可用。该件样品年龄范围变化于 393 ~ 2102Ma,但也可能存在更年轻的锆石,只是未被分析到,已有年龄峰值主要集中于 ~393Ma、~460Ma、~700Ma、~1000Ma、~1400Ma、~1800Ma 和 2100Ma,表明沉积作用发生于 393Ma 之后。其中前寒武时期的年龄数据与全球哥伦比亚超大陆和罗迪尼亚超大陆拼合、裂解相对应,可能暗示羌南地块存在古老基底,或者其源于具有古老基底的超大陆。

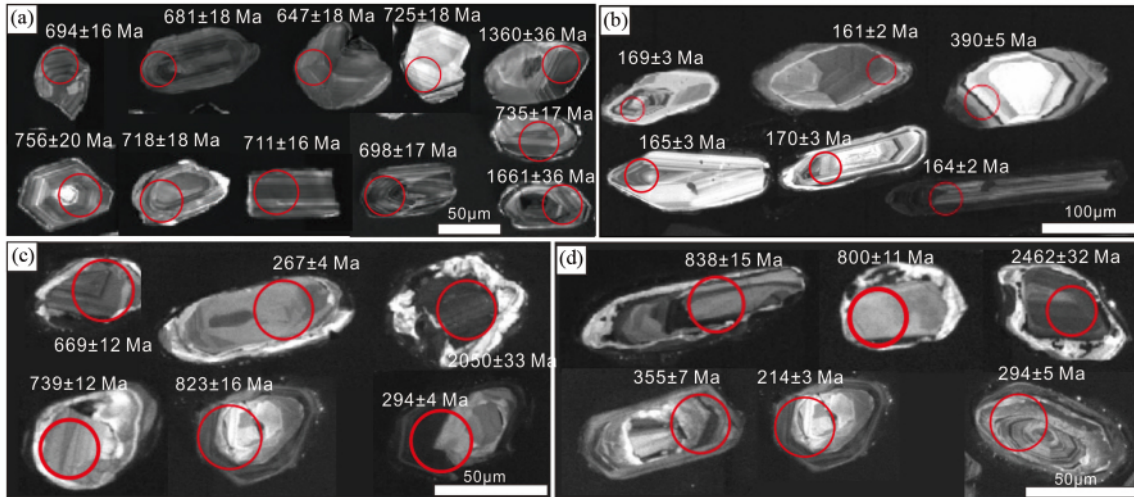


图5 羌塘中部荣玛地区杂岩锆石阴极发光 (CL) 图

(a) 样品 7-6-YQ8; (b) 样品 7-28-3; (c) 样品 7-29-2; (d) 样品 7-29-3

Fig. 5 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from metamorphic complex from Rongma area in Central Qiangtang

(a) Sample 7-6-YQ8; (b) Sample 7-28-3; (c) Sample 7-29-2; (d) Sample 7-29-3

表2 羌塘中部荣玛地区石榴石多硅白云母石英片岩中多硅白云母<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar 定年结果

Table 2 Result of <sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar stepwise heating dating for phengite of garnet-polysilicon-muscovite-quartz schist from Rongma area in central Qiangtang

T (°C)	( <sup>40</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>36</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>37</sup> Ar <sub>0</sub> / <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	( <sup>38</sup> Ar/ <sup>39</sup> Ar) <sub>m</sub>	F	<sup>39</sup> Ar (×10 <sup>-14</sup> mol)	年龄 (Ma)	±1σ (Ma)
7-19-DF1 多硅白云母								
700	448.7063	1.3874	3.2227	0.3001	39.0419	0.04	146	17
750	72.3282	0.0434	0.1537	0.0212	59.5044	0.33	218	2.6
790	70.481	0.0297	0.2084	0.0183	61.732	0.42	225.7	2.5
820	68.7682	0.0248	0.2015	0.0187	61.4698	0.94	224.8	2.2
850	65.8487	0.0149	0.1602	0.016	61.467	0.81	224.8	2.2
880	65.2448	0.0138	0.0836	0.016	61.1575	1.35	223.7	2.1
910	63.6852	0.0083	0.1091	0.0146	61.2262	2.01	224	2.1
940	64.2623	0.0093	0.0084	0.0148	61.5056	1.5	224.9	2.2
980	65.57	0.0138	0	0.0153	61.4986	1.53	224.9	2.1
1040	64.1267	0.0099	0.0081	0.0146	61.1974	2.43	223.9	2.1
1130	63.4163	0.01	0.1352	0.0151	60.4807	0.73	221.4	2.2
1400	448.7457	1.1979	15.011	0.2651	97.009	0.004	343	312
8-15-7DF1 多硅白云母								
700	128.6619	0.2576	0	0.0612	52.5351	0.13	197.2	2.9
800	105.3481	0.1516	0.012	0.0416	60.5355	1.37	225.5	2.2
840	73.1321	0.0433	0.0089	0.0208	60.3253	1.43	224.7	2.1
880	65.8725	0.0204	0.0607	0.0169	59.8414	1.84	223	2.1
920	64.1061	0.014	0.0018	0.0151	59.9718	1.71	223.5	2.1
960	65.9062	0.0199	0.0475	0.0157	60.034	1.21	223.7	2.1
1000	64.4602	0.0144	0	0.0154	60.201	1.58	224.3	2.1
1040	62.393	0.008	0.0176	0.0144	60.0347	2.17	223.7	2.1
1080	85.0279	0.0862	0.1108	0.0296	59.578	0.5	222.1	2.4
1140	77.6814	0.0586	0.0335	0.0251	60.3532	0.21	224.8	2.7
1240	224.6681	0.5475	0	0.1121	62.8881	0.09	233.7	1.9
1400	1901.408	6.2339	0	1.1564	59.2963	0.01	221	43

注: 表中下标 m 代表样品中测定的同位素比值; F = <sup>40</sup>Ar\* / <sup>39</sup>Ar 指放射性成因<sup>40</sup>Ar 与 K 生成的<sup>39</sup>Ar 的比值

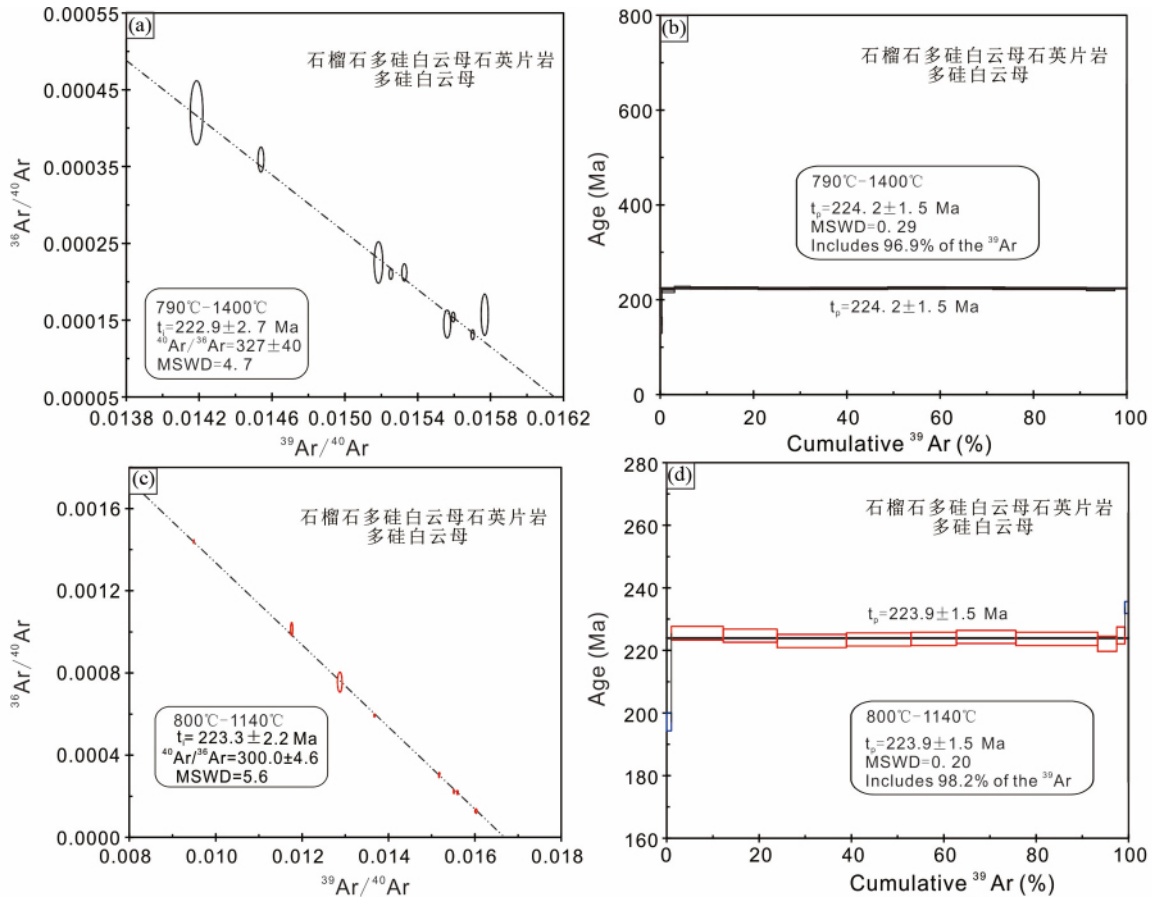


图6 羌塘中部荣玛地区石榴石多硅白云母石英片岩中多硅白云母<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar等时线图(a,c)和年龄谱图(b,d)

Fig.6 The isochronic age (a, c) and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar plateau age (b, d) diagrams of phengite of garnet-polysilicon muscovite-quartz schist from Rongma area in central Qiangtang

3.2 多硅白云母<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年代学

考虑到本次获得的石榴石多硅白云母片岩年龄数据中有1件样品存在~214Ma的谐和岩浆锆石年龄,表明区域上可能存在214Ma以后的变质作用。因此我们先后两次到研究区不同位置进行采样分析,并先后2次对对石榴石多硅白云母石英片岩中的多硅白云母进行了<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar定年,多硅白云母阶段升温定年分析结果见表2。2次分析的样品等时线图(图6a,c)和年龄谱图(图6b,d)显示,所有样品均获得一致年龄谱,总气体年龄为~224Ma,其中790~1400°C和800~1140°C的11个阶段都分别构成了一个很好的年龄坪,tp<sub>1</sub>=224.2±1.5Ma,tp<sub>2</sub>=223.9±1.5Ma,分别对应了96.9%和98.2%的<sup>39</sup>Ar释放量,对应的<sup>36</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar等时线年龄分别为t<sub>11</sub>=222.9±2.7Ma,t<sub>11</sub>=223.3±2.2Ma;<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar初始值分别为327±40(MSWD=4.7),300±4.6(MSWD=5.6)。因此~224Ma可以代表多硅白云母的形成年龄,反映一期显著的区域变质事件。目前在荣玛地区并未获得低于214Ma的变质年龄,但前人在邻区红脊山地区发现了~213Ma的区域变质年龄(蓝片岩

中蓝闪石<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar年龄,白艳萍等,2010)。

3.3 岩石主微量元素

本次分别对新元古代和中侏罗世斜长角闪岩进行了元素地球化学特征分析(表3)。3件新元古代斜长角闪岩样品SiO<sub>2</sub>含量介于46.65%~48.42%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为12.43%~15.55%,TiO<sub>2</sub>含量较高(1.34%~4.44%),MgO含量较高(5.10%~9.57%),Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>T</sup>含量介于10.47%~15.94%之间,烧减量LOI变化于2.67%~3.28%。在全岩SiO<sub>2</sub>-Nb/Y和Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y图解中(图7a,b,Winchester and Floyd,1977;Zhou et al.,2009)2件样品落于碱性玄武岩区,1件落于亚碱性玄武岩区域。在稀土和微量元素标准化图解中(图8a,b)3件样品稀土元素都呈现明显右倾趋势,几乎没有Eu的异常,2件碱性玄武岩区样品具有高的LREE含量(147×10<sup>-6</sup>~151×10<sup>-6</sup>),投点落于亚碱性玄武岩区的那1件斜长角闪岩具有相对低的LREE量(47×10<sup>-6</sup>)。碱性玄武岩区的样品比亚碱性玄武岩区样品显示更高的LREE/HREE和(La/Yb)<sub>N</sub>比值;3件样品均富集高场强元素(如Nb、Ta、Th)和大离子亲石元素(如K、Rb、Ba),但碱性

表3 羌塘中部荣玛地区斜长角闪岩全岩地球化学组成(主量:wt%;微量: $\times 10^{-6}$ )Table 3 Major elements (wt%) and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) concentrations of plagioclase amphibolites from Rongma area in the central Qiangtang

样品号	7-28-3	7-28-4-a	7-28-4-b	7-29-1-2-a	7-29-1-2-b	7-6-YQ8-1	7-6-YQ8	8-13-YQ4
时代	中侏罗世				新元古代			
SiO <sub>2</sub>	47.50	47.31	47.27	47.57	47.65	46.65	48.42	46.73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.15	11.99	11.94	12.37	12.40	12.88	12.43	15.55
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	16.40	15.87	15.87	16.66	16.64	15.94	14.31	10.47
MgO	4.72	4.89	4.87	5.22	5.24	5.18	5.10	9.57
CaO	8.74	9.18	9.19	6.83	6.83	8.52	8.66	10.51
Na <sub>2</sub> O	3.09	3.11	3.12	1.75	1.75	2.65	2.84	2.05
K <sub>2</sub> O	0.42	0.61	0.61	0.30	0.23	0.66	0.37	0.49
MnO	0.20	0.19	0.19	0.263	0.26	0.24	0.23	0.12
TiO <sub>2</sub>	4.28	3.99	4.02	4.30	4.34	4.44	4.19	1.34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.41	0.40	0.40	0.47	0.47	0.47	0.43	0.13
FeO	11.76	12.01	11.57	9.27	11.38	11.94	11.42	7.23
LOI	1.96	2.35	2.39	1.85	2.07	3.28	2.67	3.11
Sr	420	436	438	224	221	225	250	390
Rb	16	15	18	20	19	20	11	16
Ba	292	297	322	269	271	244	135	259
Th	3.51	3.22	3.16	3.68	3.68	5.00	5.00	2.19
Ta	2.42	2.16	2.19	2.58	2.59	3.44	3.02	0.50
Nb	35.39	32.05	32.07	37.34	37.31	47.30	43.10	8.45
Ce	75.05	68.68	70.56	77.68	77.04	62.30	60.50	20.50
Zr	295	275	278	305	304	311	272	82
Hf	6.78	6.24	6.25	7.01	6.92	6.14	6.67	2.12
Sm	9.82	8.93	9.00	10.17	10.13	9.07	8.96	2.74
Y	39.03	35.82	35.80	43.36	43.08	36.80	36.00	17.80
Yb	3.28	3.02	2.93	3.71	3.75	2.93	2.77	1.60
La	34.98	32.36	32.51	36.11	36.02	30.60	29.30	9.06
Ce	75.05	68.68	70.56	77.68	77.04	62.30	60.50	20.50
Pr	10.25	9.35	9.40	10.47	10.40	9.09	9.02	2.64
Nd	43.67	40.00	39.99	44.50	44.51	37.20	36.80	10.90
Sm	9.82	8.93	9.00	10.17	10.13	9.07	8.96	2.74
Eu	3.04	2.80	2.80	3.16	3.15	2.89	2.72	1.12
Gd	10.31	9.31	9.20	10.84	10.74	8.62	8.43	3.06
Tb	1.67	1.49	1.48	1.83	1.81	1.42	1.35	0.53
Dy	8.59	7.77	7.74	9.62	9.67	7.62	7.24	3.23
Ho	1.55	1.43	1.43	1.75	1.75	1.49	1.41	0.69
Er	3.66	3.67	3.41	4.19	4.16	3.60	3.44	1.84
Tm	0.53	0.48	0.48	0.60	0.60	0.55	0.52	0.29
Yb	3.28	3.02	2.93	3.71	3.75	2.93	2.77	1.60
Lu	0.44	0.41	0.41	0.51	0.51	0.40	0.40	0.23
Y	39.03	35.82	35.80	43.36	43.08	36.80	36.00	17.80
ΣREE	207	190	191	215	214	178	173	58
LREE	177	162	164	182	181	151	147	47
HREE	30	28	27	33	33	27	26	11
LREE/HREE	5.89	5.88	6.07	5.51	5.49	5.68	5.76	4.09
(La/Yb) <sub>N</sub>	7.65	7.70	7.96	6.98	6.89	7.49	7.59	4.06
δEu	0.92	0.93	0.93	0.91	0.92	0.98	0.94	1.18

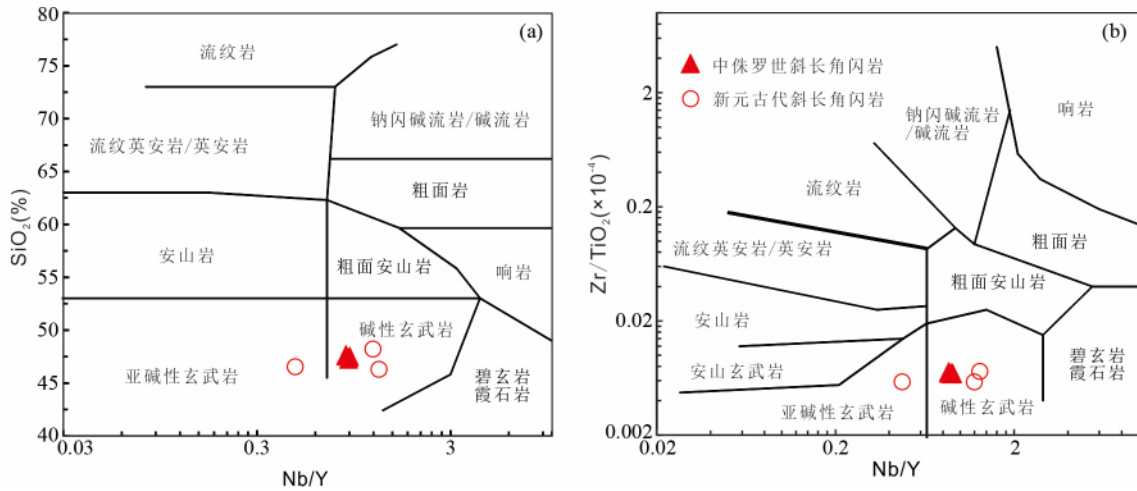


图7 羌塘中部荣玛地区斜长角闪岩  $SiO_2$ -Nb/Y (a 据 Le Bas ,2000) 和  $Zr/TiO_2$ -Nb/Y (b 据 Winchester and Floyd ,1977)  
 Fig.7  $SiO_2$  vs. Nb/Y diagram ( a ,after Le Bas ,2000) and  $Zr/TiO_2$  vs. Nb/Y diagram ( b ,after Winchester and Floyd ,1977) for plagioclase amphibolites from Rongma area in the Central Qiangtang

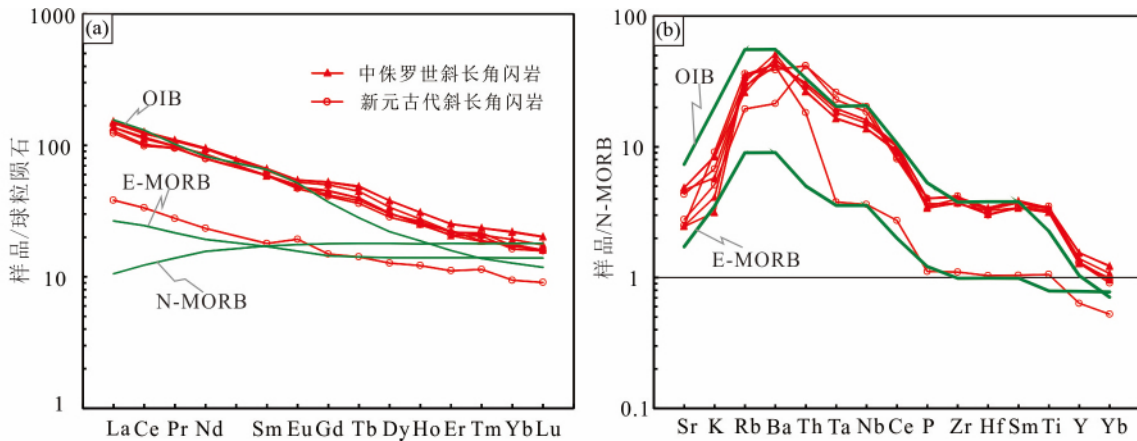


图8 羌塘中部荣玛地区斜长角闪岩球粒陨石标准化稀土元素配分图 (a) 和 N-MORB 标准化微量元素蛛网图 (b) ( OIB、N-MORB 和 E-MORB 数据及标准化值据 Sun and McDonough ,1989)  
 Fig.8 Chondrite-normalized REE diagram ( a) and N-MORB-normalized trace element diagram ( b) for plagioclase amphibolite from Rongma area in the Central Qiangtang ( data of OIB , N-MORB , E-MORB and normalization values are from Sun and McDonough ,1989)

玄武岩区样品 Nb、Ta 值比亚碱性玄武岩区样品更高,前者整体类似 OIB 特征,后者则类似 E-MORB。此外前者具有低 MgO(5.10% ~ 5.18%) 后者高 MgO(9.57%) 因此,亚碱性玄武岩更接近于新元古代斜长角闪岩原岩的特征,而它的 OIB 特征可能是由于陆壳的强烈混染所致,这与该期斜长角闪岩中发育丰富古老继承锆石(3.0 ~ 1.8Ga)的事实相一致。

5 件中侏罗世斜长角闪岩样品  $SiO_2$  含量介于 47.27% ~ 47.65%  $Al_2O_3$  含量较低为 11.94% ~ 12.40%  $TiO_2$  含量介于 3.99% ~ 4.34% 之间, MgO 含量较高(4.72% ~ 5.22%), 全铁含量较高介于 15.87% ~ 16.66% 之间, 烧失量 LOI 变化于 1.85% ~ 2.39%。在全岩  $SiO_2$ -Nb/Y 和  $Zr/TiO_2$ -Nb/Y 图解中(图 7a, b, Winchester and Floyd, 1977; Zhou *et al.*,

2009), 所有样品点都落于碱性玄武岩区。在稀土和微量元素标准化图解中(图 8a, b) 5 件样品稀土元素都无 Eu 异常, 具高 LREE 含量( $162 \times 10^{-6} \sim 182 \times 10^{-6}$ ) 稀土配分图解呈明显的右倾趋势,  $LREE/HREE = 5.49 \sim 6.07$  ( $La/Yb$ )<sub>N</sub> = 6.89 ~ 7.96; 5 件样品都高度富集高场强元素(如 Nb、Ta、Th) 和大离子亲石元素(如 K、Rb、Ba), 类似于 OIB 特征。这与全岩  $Zr/Yb$ - $Zr/Nb$ - $Nb/Yb$ - $Th/Yb$  投图结果(图 9a, b) 一致。

3.4 岩石-锆石 Nd-Hf 同位素

对中侏罗世斜长角闪岩进行了全岩 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素分析, 分析结果见表 4 和表 5。岩石  $^{143}Nd/^{144}Nd$  比值介于 0.512277 ~ 0.512777 之间,  $\epsilon_{Nd}(t)$  值为 -5.8 ~ 3.8,

表4 中侏罗世斜长角闪岩全岩 Nd 同位素组成

Table 4 Whole rock Nd isotopic compositions of the Middle Jurassic plagioclase amphibolite from Rongma area in the Central Qiangtang

样品号	Age (Ma)	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} (2\sigma)$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} (2\sigma)$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i (2\sigma)$	$2\sigma (6\text{SE})$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$
7-28-3		0.512764	0.145641	0.512609	3	3.5	867
7-28-4-a		0.512773	0.144593	0.512619	3	3.7	834
7-28-4-b		0.512776	0.145763	0.512621	4	3.8	842
7-29-1-2-a	163	0.512777	0.148018	0.512619	3	3.7	869
7-29-1-2-b		0.512749	0.147403	0.512592	9	3.2	925
7-29-1-1-a		0.512661	0.144956	0.512506	3	1.5	1087
7-29-1-1-b		0.512277	0.136644	0.512131	6	-5.8	1727

表5 中侏罗世斜长角闪岩锆石 Hf 同位素组成

Table 5 Zircon Hf isotopic compositions of the Middle Jurassic plagioclase amphibolite from Rongma area in the Central Qiangtang

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
7-29-8.1	169	0.0146	0.0001	0.0006	0.0000	0.282064	0.000025	0.282062	-21.4	1655	-0.98
7-29-8.2	161	0.0325	0.0002	0.0012	0.0000	0.2819	0.000026	0.281897	-27.4	1910	-0.96
7-29-8.3	165	0.0049	0.0003	0.0002	0.0000	0.282057	0.000023	0.282056	-21.7	1648	-0.99
7-29-8.5	163	0.0223	0.0004	0.0009	0.0000	0.281951	0.000027	0.281948	-25.6	1824	-0.97
7-29-8.6	163	1.6395	0.1169	0.0402	0.0029	0.311386	0.007155	0.311264	1011.5	149404	0.21
7-29-8.7	161	0.0135	0.0004	0.0005	0.0000	0.282139	0.000043	0.282138	-18.9	1551	-0.98
7-29-8.8	146	0.0401	0.0011	0.0015	0.0000	0.282643	0.000028	0.282638	-1.5	876	-0.95
7-29-8.11	390	0.018	0.0006	0.0007	0.0000	0.281955	0.000029	0.28195	-20.5	1810	-0.98
7-29-8.12	149	0.0253	0.0007	0.0008	0.0000	0.28903	0.001220	0.289028	224.6	-8953	-0.98
7-29-8.14	152	0.0339	0.0014	0.0013	0.0001	0.282031	0.000025	0.282027	-23	1734	-0.96
7-29-8.15	482	0.0451	0.0021	0.0017	0.0001	0.282812	0.000027	0.282796	11.5	637	-0.95
7-29-8.16	256	0.0683	0.0031	0.0027	0.0001	0.283021	0.000043	0.283008	14	343	-0.92
7-29-8.19	240	0.0243	0.0002	0.0009	0.0000	0.282575	0.000024	0.282571	-1.8	957	-0.97
7-29-8.20	254	0.0392	0.0003	0.0014	0.0000	0.282744	0.000027	0.282737	4.3	728	-0.96
7-29-8.21	158	0.0272	0.0003	0.0008	0.0000	0.282005	0.000019	0.282002	-23.8	1748	-0.98
7-29-8.22	162	0.0118	0.0003	0.0005	0.0000	0.281955	0.000023	0.281953	-25.4	1800	-0.99
7-29-8.24	168	0.028	0.0005	0.0009	0.0000	0.281985	0.000018	0.281983	-24.2	1779	-0.97
7-29-8.25	247	0.0129	0.0004	0.0006	0.0000	0.282249	0.000018	0.282246	-13.2	1400	-0.98
7-29-8.26	204	0.0173	0.0010	0.0006	0.0000	0.282168	0.000024	0.282165	-17	1515	-0.98
7-29-8.29	164	0.0334	0.0007	0.0017	0.0000	0.282334	0.000038	0.282329	-12.1	1322	-0.95
7-29-8.30	161	0.0053	0.0001	0.0002	0.0000	0.281919	0.000018	0.281919	-26.7	1836	-0.99

注: 点 8.6 和点 8.12 由于误差值较大, 不予采用

$t_{\text{DM}}$  为 834 ~ 1727Ma。锆石  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值变化较大介于 0.281900 ~ 0.283021 之间,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 -27.4 ~ 14.0,  $t_{\text{DM}}$  介于 343 ~ 1910Ma 之间。

## 4 讨论

### 4.1 岩石成因

如前所述, 3 件新元古代斜长角闪岩样品显示低  $\text{SiO}_2$ 、高  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{FeO}^{\text{T}}$  在全岩  $\text{SiO}_2$ -Nb/Y 和  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ -Nb/Y 图解中(图 7a, b, Winchester and Floyd, 1977; Zhou *et al.*,

2009) 2 件样品投到碱性玄武岩区, 1 件位于亚碱性玄武岩区。在稀土和微量元素标准化图解中(图 8a, b) 2 件碱性玄武岩区样品整体类似 OIB 特征, 而投点落于亚碱性玄武岩区的那一件样品则具有 E-MORB 特征, 与全岩  $\text{Zr}/\text{Yb}$ - $\text{Zr}/\text{Nb}$ / $\text{Yb}$ - $\text{Th}/\text{Yb}$  图解投图结果(图 9a, b) 一致, 然而前者具有低  $\text{MgO}$ (5.10% ~ 5.18%) 后者高  $\text{MgO}$ (9.57%) 因此, 我们认为具 E-MORB 特征的亚碱性玄武岩更接近于新元古代斜长角闪岩原岩的特征, 而它的 OIB 特征可能是由于陆壳的强烈混染所致, 这与该期斜长角闪岩中发育丰富古老继承锆石(3.0 ~ 1.8Ga) 的事实相一致。对于 E-MORB 的成因, 一般认为形成于海山环境, 或者形成于同时具有富集和亏损源区



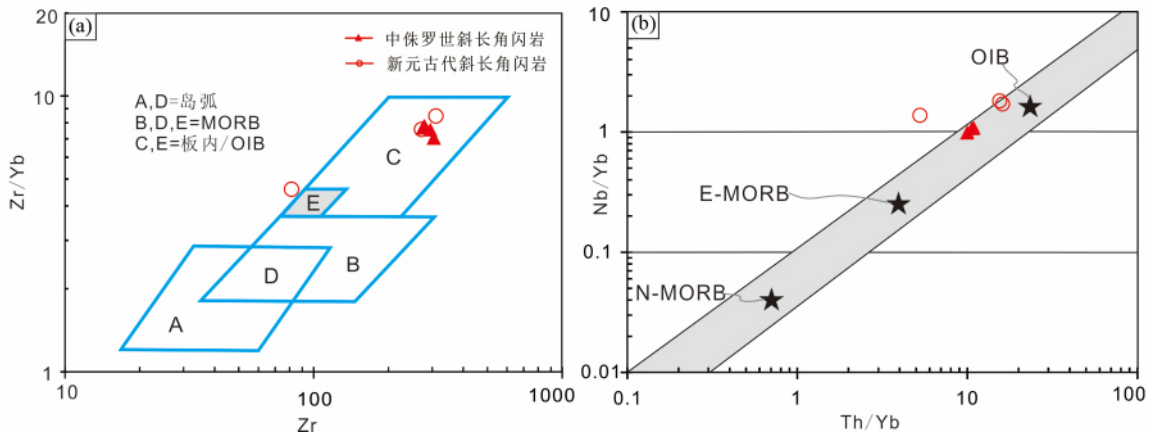


图9 羌塘中部荣玛地区斜长角闪岩的玄武质原岩构造环境判别图

(a) Zr/Yb-Zr 判别图( Pearce and Cann ,1973) ; (b) Nb/Yb-Th/Yb 判别图( Pearce and Peate ,1995)

Fig. 9 Basalt discrimination diagrams showing composition of plagioclase amphibolite from Rongma area in the Central Qiangtang (a) Zr/Yb vs. Zr ( after Pearce and Cann ,1973) ; and (b) Nb/Yb vs. Th/Yb ( after Pearce and Peate ,1995)

的地幔柱扩张中心附近( Thompson *et al.* , 1989; Zhou *et al.* , 2009)。基于发育大量古老继承锆石的证据可推知,新元古代斜长角闪岩原岩应形成于大陆环境,而不可能是海山环境,因此,我们认为本次获得的新元古代斜长角闪岩原岩更大可能形成于陆内伸展环境,并可能与地幔柱有关,并响应新元古代时期 Rodinia 超大陆的裂解。此外,综观整个青藏高原区域,其他微陆块中也见有新元古代斜长角闪岩的报道,如,辜平阳等(2012)在羌塘以东的聂荣微地块中发现了  $863 \pm 10\text{Ma}$  的斜长角闪岩;胡道功等(2005)在拉萨地块纳木错西缘地区识别出了  $782 \pm 11\text{Ma}$  的斜长角闪岩。这些新元古代斜长角闪岩原岩成因都被认为与 Rodinia 超大陆裂解有关。

另外 5 件中侏罗世斜长角闪岩样品显示较低的  $\text{SiO}_2$ 、高  $\text{MgO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{FeO}^T$ , 低烧失量 LOI 特征,在全岩  $\text{SiO}_2$ -Nb/Y 和  $\text{Zr}/\text{TiO}_2$ -Nb/Y 图解中(图 7a, b, Winchester and Floyd, 1977; Zhou *et al.* , 2009),所有投点都落于碱性玄武岩区。然而该样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量(11.99% ~ 12.40%)比普通玄武岩低(13% ~ 19%),可能暗示岩石原岩形成或者变质过程中铝质的流失,如低温高压变质作用过程中富铝矿物斜长石和暗色造岩矿物的变质反应可形成熔体,并可能导致部分铝质进入熔体中而分离(魏春景等,2017)。蓝片岩中也发育这种低  $\text{Al}_2\text{O}_3$  特征,如我国东北地区牡丹江缝合带中超高压变质作用形成的拉斑玄武质蓝片岩  $\text{Al}_2\text{O}_3$  极低为 8% ~ 12.56% (Zhu *et al.* , 2015);此外,在全球数据库中,低  $\text{Al}_2\text{O}_3$  玄武岩也较发育(GEOROC)。因此,该斜长角闪岩原岩应具有玄武质岩石特征。在稀土和微量元素标准化图解中(图 8a, b) 5 件样品稀土元素都无 Eu 异常,具高 LREE、LREE/HREE 和  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  高度富集高场强元素(如 Nb、Ta、Th)和大离子亲石元素(如 K、Rb、Ba),类似于 OIB 特征,在全岩  $\text{Zr}/\text{Yb}$ -Zr、Nb/Yb-Th/Yb 图解中,它们也都落到 OIB 区域(图 9a, b)。OIB 一般认为与大陆裂谷或大洋板内的地幔柱有关

(Doubleday *et al.* , 1994)。锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值( -27.4 ~ 14.0) 和岩石  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值( -5.8 ~ 3.8) 变化较大(图 10a, b), 岩石 Nb/U 比值较大, Ba/Th 比值较低, 远离陆壳端元(图 10c), 且岩石  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值与 Nb/U 没有负相关关系(图 10d), 暗示斜长角闪岩原岩可能不存在显著的地壳混染(Gao *et al.* , 2004; Cheng *et al.* , 2018), 尽管发育一些继承锆石。这些表明中侏罗世斜长角闪岩可能主要源于富集地幔源区, 因此我们倾向于认为中侏罗世斜长角闪岩的原岩(碱性玄武岩)形成于大陆裂谷环境。

#### 4.2 变质杂岩形成和变质时间

一般认为,样品中最年轻的碎屑锆石谐和年龄代表着沉积和变质作用的下限(最大年龄)(Fedo *et al.* , 2003; Nelson, 2001; Williams, 2001)。本次 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年显示 2 件石榴石多硅白云母石英片岩锆石边部谐和年龄范围分别为 267 ~ 1349Ma 和 214 ~ 2050Ma。因此暗示石榴石多硅白云母石英片岩原岩沉积和变质时间发生于 267Ma 之后某个时间点,且持续到 214Ma 之后。石榴石多硅白云母石英片岩中 2 组多硅白云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年,均获得一致的 ~224Ma 坪年龄,代表多硅白云母的形成时间。由于多硅白云母的封闭温度为 ~350°C,是低温高压变质作用的产物,常形成于碰撞造山带(Jäger, 1979)。结合区域动力学演化的资料(详见 4.3 节),本次获得的 ~224Ma 多硅白云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  坪年龄最可能代表因羌南、羌北发生碰撞而导致的区域变质作用时间。但本次在荣玛地区石榴石多硅白云母石英片岩中还发现 214Ma 的最年轻谐和锆石年龄,暗示羌南、羌北的碰撞作用和区域变质作用持续到 214Ma 之后。此外,本文首次报道了 1 件新元古代斜长角闪岩,其与石榴石多硅白云母石英片岩呈断层接触,加权平均年龄为  $717 \pm 7\text{Ma}$ , 并含丰富的继承锆石( $n=59$ , 年龄值介于 800 ~ 3096Ma 之间),表明原岩形成于新元古代中期。此外,还获得 1 件侵

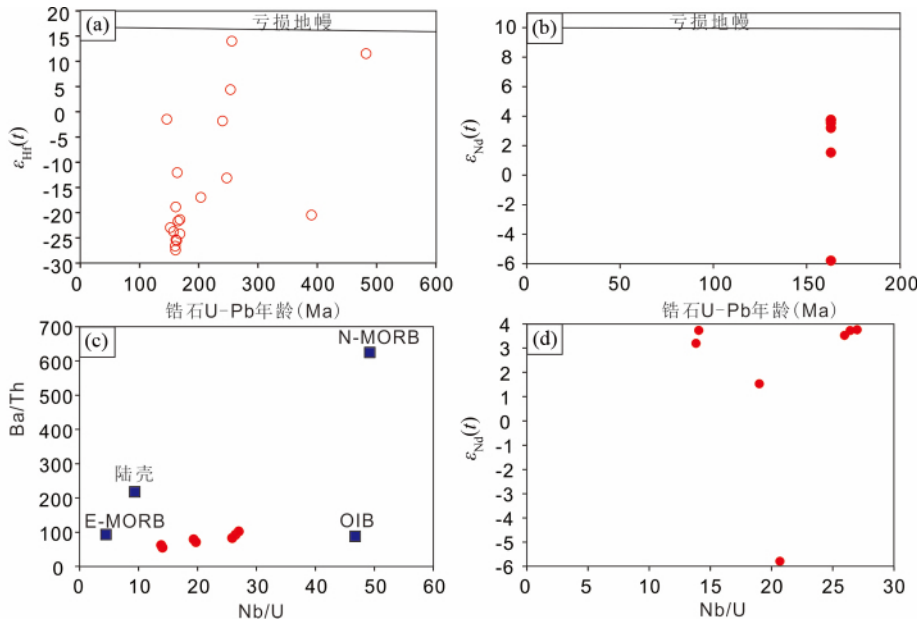


图 10 中侏罗世斜长角闪岩地球化学图解

(a) 锆石 U-Pb 年龄- $\epsilon_{Hf}(t)$  协变图; (b) 岩石结晶年龄- $\epsilon_{Nd}(t)$  协变图; (c) 岩石 Nb/U-Ba/Th 图; (d) 岩石 Nb/U- $\epsilon_{Nd}(t)$  协变图

Fig. 10 Geochemical diagrams of the Middle Jurassic plagioclase amphibolite

(a) diagram of zircon crystallization age vs.  $\epsilon_{Hf}(t)$ ; (b) whole rock crystallization age vs.  $\epsilon_{Nd}(t)$ ; (c) Nb/U vs. Ba/Th diagram; (d) Nb/U vs.  $\epsilon_{Nd}(t)$  diagram

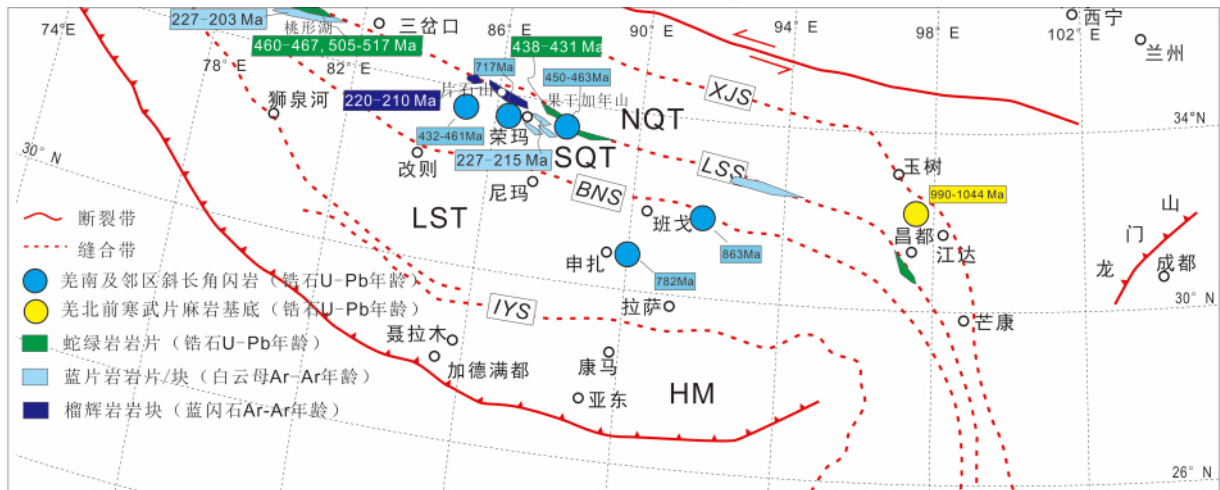


图 11 羌塘中部高压变质带俯冲-碰撞地质记录和邻区前寒武基底分布(据杨耀等, 2014 修改)

年龄数据源于胡道功等(2005)、Zhai *et al.* (2007, 2011)、王立全等(2008)、张修政等(2010)、辜平阳等(2012)、何世平等(2013)、彭智敏等(2014)、杨桂花等(2017)。LST-拉萨地块; SQT-羌南地块; NQT-羌北地块体; HM-喜马拉雅造山带; IYS-雅鲁藏布江缝合带; BNS-班公湖-怒江缝合带; LSS-龙木错-双湖缝合带; XJS-西金乌兰-金沙江缝合带

Fig. 11 The records of subduction-collision in the high pressure metamorphic belt, Central Qiangtang and the distribution of Precambrian basement in its adjacent areas (modified after Yang *et al.*, 2014)

Age data after Hu *et al.* (2005), Zhai *et al.* (2007, 2011), Wang *et al.* (2008), Zhang *et al.* (2010), Gu *et al.* (2012), He *et al.* (2013), Peng *et al.* (2014), Yang *et al.* (2017). LST-Lhasa Massif; AQT-Qiangnan Massif; NQT-Qiangbei Massif; HM-Himalaya orogenic belt; IYS-Yarlung Zangbo River Suture Zone; BNS-Bangong Lake-Nujiang Suture Zone; LSS-LongmuTso-Shuanghu Suture Zone; XJS-Xijinwulan-Jinshajiang Suture Zone

位于石榴石多硅白云母石英片岩中的斜长角闪岩锆石加权平均年龄为  $163 \pm 2$  Ma, 含 200 ~ 400 Ma 的继承锆石, 表明其

原岩形成于中侏罗世, 且其变质时间应该发生于中侏罗世之后, 可能与羌南以南的大洋俯冲事件有关。

4.3 羌南地块基底属性

对于羌塘盆地是否存在前寒武基底, 在过去几十年的研究中一直存在争议, 部分学者依据地层中发育丰富古老继承锆石的地质证据, 推断羌南、羌北都可能存在前寒武基底, 且可能存在太古宙陆核(纪云龙, 2000; Wang and Wang, 2001; 谭富文等, 2009), 另一种观点则相反, 由于早期研究过程中并未在羌塘盆地中发现前寒武时期的古老岩石, 因此认为羌塘盆地中不存在前寒武基底(李才等, 2005)。近年来, 在羌北地区已发现多处中-新元古代片麻岩, 证实羌北存在前寒武结晶基底(何世平等, 2013)。然而羌南地区虽然广泛发现古老的碎屑锆石年龄记录, 但以往发现的最老岩石时代为早古生代, 一直未发现前寒武时期的岩石, 因此, 羌南地区是否发育前寒武时期的结晶基底一直不清楚。如前所述, 本次研究中, 我们首次在羌南荣玛地区发现了新元古代中期的斜长角闪岩( ~717Ma), 同时研究区的石榴石多硅白云母石英片岩和斜长角闪岩中均发育丰富的继承老锆石, 反映羌南地区可能存在前寒武基底, 且本次发现的新元古代斜长角闪岩显示 E-MORB 特征, 指示新元古代中期羌南地块北缘处于板内伸展环境, 这为研究羌南地块和特提斯域前寒武时期构造演化提供了关键证据。此外, 如前所述, 新元古代变质岩记录也存在于青藏高原其他微陆块中(图 11), 如, 羌塘以东的聂荣微地块中  $863 \pm 10\text{Ma}$  的斜长角闪岩(辜平阳等, 2012); 拉萨地块纳木错西缘地区  $782 \pm 11\text{Ma}$  的斜长角闪岩(胡道功等, 2005); 马攸木地区  $1.1 \sim 0.8\text{Ga}$  的石英片岩(多吉等, 2007)。这些发现也暗示前寒武基底可能普遍存在于西藏地区各微陆块中。

4.4 构造意义

充分的碎屑锆石年龄证据表明, 羌南地块源于印度冈瓦纳, 且其大致于晚古生代早-中期从印度大陆裂解出来(Zhu et al., 2011; 朱弟成等, 2012), 因此晚古生代之前, 羌南地块很可能与印度冈瓦纳连接。如前文分析, 本次报道的新元古代中期斜长角闪岩显示 E-MORB 特征, 且其加权平均年龄为  $717 \pm 7\text{Ma}$ , 形成于陆内伸展环境(图 12a), 获得小于  $700\text{Ma}$  的谐和数据加权平均年龄为  $680 \pm 7\text{Ma}$ , 此年龄很可能是锆石幔部与变质增生边的混合年龄, 变质作用应当发生于  $680\text{Ma}$  之后。本次羌南地块北缘新元古代 E-MORB 特征斜长角闪岩的发现, 暗示新元古代中期可能有一个未知陆块从羌南-印度联合陆块逐渐离裂, 并导致“古特提斯洋”的最终打开。同时研究区寒武系与奥陶系角度不整合的发现(杨耀等 2014) 及泛非基底的存在(董春艳等, 2011), 认为“古特提斯洋”可能经历了短暂的洋盆裂开与闭合, 其后, 古特提斯洋盆( $517 \sim 471\text{Ma}$ ) 开始持续裂开。以往研究中, 代表古特提斯洋壳残余的蛇绿岩也只能追溯到中奥陶世( ~  $467\text{Ma}$ ) (李才等, 2008a) 或晚寒武世( $517\text{Ma}$ , 吴彦旺, 2013), 因此, 古特提斯洋的打开时间可能比之前认为的更

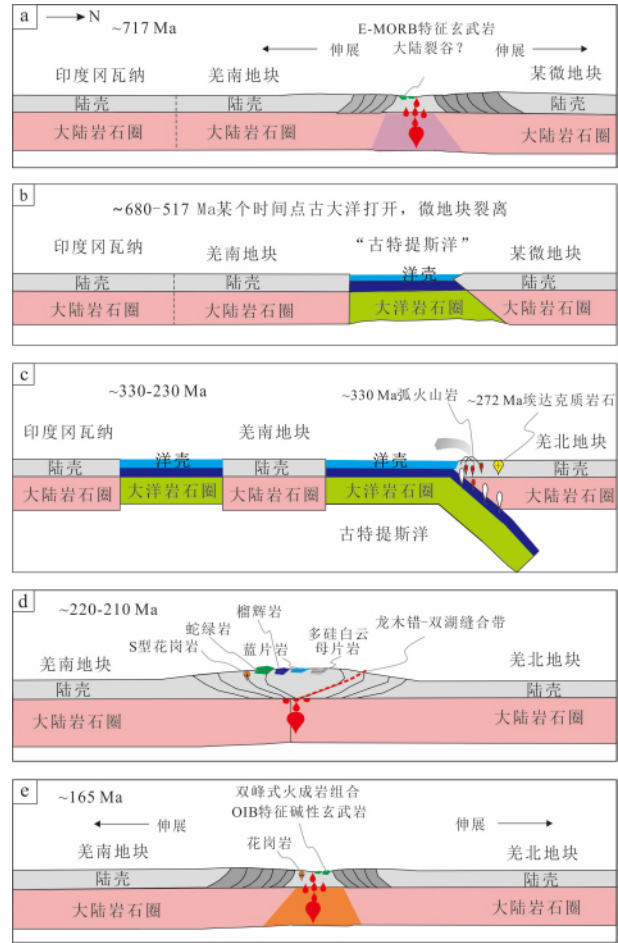


图 12 古特提斯洋构造域构造演化模型图

Fig. 12 Tectonic model of the Paleo-Tethys Ocean in Central Qiangtang

早, 它很有可能在  $680 \sim 517\text{Ma}$  的某个时间点就已打开(图 12b), 如果这个认识正确, 那么古特提斯洋就可能可以与古亚洲洋类比, 正如我国东北地区古亚洲洋分支就是在中-晚三叠世沿西拉沐沦河-延吉缝合带拼合的(Zhou et al., 2009; 周建波等, 2012; 徐东卓等, 2014), 而其打开则追溯到新元古代(Rojas-Agramonte et al., 2011)。

基于晚石炭-早二叠世埃达克质岩石和岛弧安山岩的发现暗示古大洋在晚古生代已经发生了俯冲作用(图 12c, 张修政等, 2010)。根据区域榴辉岩蓝闪石、蓝片岩多硅白云母 Ar-Ar 定年结果(表 6、图 11) 和本次报道的石榴石多硅白云母石英片岩中多硅白云母 Ar-Ar 年龄数据( ~  $224\text{Ma}$ ), 表明, 古特提斯洋在晚三叠世( ~  $224\text{Ma}$ ) 才最终闭合。李静超等(2015) 在荣玛乡冈塘发现了同期的 S 型花岗岩(  $222 \sim 214\text{Ma}$ ), 也指示羌南、羌北地块在晚三叠世发生了拼合。而本次报道的荣玛地区石榴石多硅白云母石英片岩中发现  $214\text{Ma}$  最年轻谐和锆石年龄, 暗示南、北羌塘的碰撞作用和区域变质作用持续到  $214\text{Ma}$  之后(图 12d), 且该期岩浆事件( ~  $214\text{Ma}$ ) 可能发生于陆陆碰撞过程中。由于蓝闪石的坪

表6 羌塘中部高压变质带部分变质杂岩年龄数据

Table 6 The chronological data for the metamorphic complexes in the high pressure metamorphic belt, Central Qiangtang

采样位置	岩石名称	定年矿物	年龄( Ma)	来源
羌塘片石山	石榴石白云母片岩	多硅白云母	Ar-Ar 217.2 ± 1.8	李才等, 2006
羌塘片石山	石榴石白云母片岩	多硅白云母	Ar-Ar 217.2 ~ 223.2	翟庆国等, 2009a
羌塘片石山	石榴石白云母片岩	白云母	Ar-Ar 213.2 ± 1.3	张修政等, 2010
羌塘果干加年山	石榴石白云母片岩	白云母	Ar-Ar 242.3 ± 1.5	张修政等, 2010
羌塘冈玛错	蓝片岩	蓝闪石	Ar-Ar 275.0 ~ 282.4	邓希光等, 2000
羌塘蓝岭东	石榴石白云母片岩	多硅白云母	Ar-Ar 215 ~ 222	李才等, 2006
羌塘蓝岭	蓝片岩	多硅白云母	Ar-Ar 219.1 ~ 211.9	Liang <i>et al.</i> , 2012
羌塘中部才多茶卡	蓝片岩	蓝闪石	Ar-Ar 209 ± 4	朱同兴等, 2010
羌塘荣玛	石榴石白云母片岩	多硅白云母	Ar-Ar 222.9 ~ 223.3	本文
片石山	榴辉岩	多硅白云母	Ar-Ar ~ 214	张修政等, 2010
桃形湖	蛇绿岩	锆石	U-Pb 467 ~ 460,	李才等, 2008a
桃形湖	蛇绿岩	锆石	U-Pb 505 ~ 517	吴彦旺, 2013
果干加年山	蛇绿岩	锆石	U-Pb 438 ~ 431	Zhai <i>et al.</i> , 2007

年龄代表了大洋板块快速俯冲消减、以及蓝片岩形成的时代, 而多硅白云母的封闭温度在 350°C 左右( Jäger, 1979), 低于蓝闪石, 因此本文获得的 222.9 ~ 223.3 Ma 的多硅白云母年龄代表了板块俯冲作用的结束, 含石榴石白云母片岩开始折返抬升, 并持续到 214 Ma 之后, 在南北向伸展背景下, 出露地表( Liang *et al.*, 2017)。

此外, 本次发现的中侏罗世斜长角闪岩( ~ 163 Ma) 原岩显示 OIB 特征, 如前所述, 其形成于陆内裂谷环境。羌南地块发育同期花岗岩和碱性玄武岩( 刘函等, 2015; 胡培远等, 2013), 与该期斜长角闪岩原岩构成双峰模式, 表明在晚三叠世羌南、羌北碰撞造山后, 进入中侏罗世后区域转为板内伸展背景( 图 12e)。

## 5 结论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年获得荣玛地区两件不同产状斜长角闪岩的原岩结晶年龄分别为 717 ± 7 Ma 和 163 ± 2 Ma, 近似代表两期斜长角闪岩原岩的形成时间, 暗示羌南地区存在前寒武基底; 2 件石榴石多硅白云母石英片岩锆石边部谐和年龄范围分别为 267 ~ 1349 Ma 和 214 ~ 2050 Ma; 2 组石榴石多硅白云母石英片岩中多硅白云母  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  定年, 分别获得分别获得 224.2 ± 1.5 Ma 和 223.9 ± 1.5 Ma 的坪年龄。

(2) 荣玛地区新元古代斜长角闪岩原岩具有 E-MORB 特征, 而中侏罗世斜长角闪岩则显示 OIB 特征, 前者可能形成于陆内伸展环境, 响应 Rodinia 超大陆裂解事件, 后者可能形成于大陆裂谷环境。

(3) 新元古代中期( ~ 717 Ma) 某未知陆块可能就已逐渐开始从羌南-印度联合大陆裂解, “古特提斯洋”可能在 ca. 717 ~ 517 Ma 之间的某个时间点就已打开, 可能比以往

认为的要早, 甚至可与古亚洲洋类比; 大洋可能在晚三叠世早期( ~ 224 Ma) 才关闭, 羌南、羌北的陆陆碰撞作用可能持续到 214 Ma 以后, 随后中侏罗世区域可能发生陆内伸展, 发育碱性玄武岩和双峰式火成岩。

致谢 样品采集过程得到荣玛乡项目组成员王寒冻、杨波、孙喜辉、焦鹏伟等的大力协助, 在此表示感谢。

## References

- Allègre CJ and Rousseau D. 1984. The growth of the continent through geological time studied by Nd isotope analysis of shales. *Earth and Planetary Science Letters*, 67(1): 19–34
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192(1): 9–79
- Bai YP, Liu SQ, Tang ZH, Zhang N and Lu JP. 2010. Maershan boundary fault along the south edge of Hongjishan tectonic mixite in North Tibet. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(2): 202–207 (in Chinese with English abstract)
- Chen W, Zhang Y, Zhang YQ, Jin GS and Wang QL. 2006. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan Plateau: Evidence from Ar-Ar thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867–872 (in Chinese with English abstract)
- Cheng ZG, Zhang ZC, Xie QH, Hou T and Ke S. 2018. Subducted slab-plume interaction traced by magnesium isotopes in the northern margin of the Tarim Large Igneous Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 489: 100–110
- Deng WM, Yin JX and Guo ZP. 1996. The study on volcanic rocks and basic ultrabasic rocks in Chabu-Shuanghu area, Qiangtang. *Science in China (Series D)*, 26(4): 296–301 (in Chinese)
- Deng XG, Ding L, Liu XH, Zhou Y, Yin A, Kapp PA, Murphy MA and Manning CE. 2001. Petrology and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  iso-topic ages of blueschists in Gangmar, central Qiangtang, northern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 46(5): 423–427
- Dong CY, Li C, Wan YS, Wang W, Wu YW, Xie HQ and Liu DY. 2011. Detrital zircon age model of Ordovician Wenquan quartzite south of Lungmuco-Shuanghu Suture in the Qiangtang area, Tibet: Constraint on tectonic affinity and source regions. *Science China*

- (Earth Sciences), 54(7): 1034–1042
- Doubleday PA, Leat PT, Alabaster T, Nell PAR and Tranter TH. 1994. Allochthonous oceanic basalts within the Mesozoic accretionary complex of Alexander Island, Antarctica: Remnants of proto-Pacific oceanic crust. *Journal of the Geological Society*, 151(1): 65–78
- Duo J, Wen CQ, Guo JC, Fan XP and Li XW. 2007. 4.1 Ga old detrital zircon in western Tibet of China. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 23–26
- Fedo CM, Sircombe KN and Rainbird RH. 2003. Detrital zircon analysis of the sedimentary record. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 277–303
- Gao S, Rudnick RL, Yuan HL, Liu XM, Liu YS, Xu WL, Ling WL, Ayers J, Wang XC and Wang QH. 2004. Recycling lower continental crust in the north China craton. *Nature*, 432(7019): 892–897
- Gu PY, Li RS, He SP, Zha XF, Yu PS, Shi C, Pan SJ and Wang Y. 2012. The amphibolite from Nyainrong rock group in northern Nagqu: Geological records of break-up of the supercontinent Rodinia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(2): 145–154 (in Chinese with English abstract)
- He SP, Li RS, Wang C, Gu PY, Yu PS, Shi C and Zha XF. 2013. Research on the formation age of Ningduo rock group in Changdu Block: Evidence for the existence of basement in the North Qiangtang. *Earth Science Frontiers*, 20(5): 15–24 (in Chinese with English abstract)
- Hu DG, Wu ZH, Jiang W, Shi YR, Ye PS and Liu QS. 2005. SHRIMP zircon U-Pb age and Nd isotopic study on the Nyainqêntangha Group in Tibet. *Science in China (Series D)*, 48(9): 1377–1386
- Hu PY, Li C, Xie CM, Wu YW, Wang M and Su L. 2013. Albite granites in Taoxinghu ophiolite in central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, China: Evidences of Paleo-Tethys oceanic crust subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 29(12): 4404–4414 (in Chinese with English abstract)
- Jäger E. 1979. Introduction to geochronology. In: Jäger E and Hunziker JC (eds.). *Lectures in Isotope Geology*. Berlin: Springer-Verlag, 1–12
- Ji YL. 2000. The ownership of the Qiangtang basin, Tibet, China. *Earth Science Frontiers*, 7(4): 370 (in Chinese)
- Kapp P, Yin A, Manning CE, Harrison TM, Taylor MH and Ding L. 2003. Tectonic evolution of the Early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet. *Tectonics*, 22(4): 1043
- Li C. 1987. The Longmuco-Shuanghu-Lancangjiang plate suture and the north boundary of distribution of Gondwana facies Permo-Carboniferous system in northern Xizang, China. *Journal of Changchun University of Earth Science*, 17(2): 155–166 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Cheng LR, Zhang YC and Zhai QG. 2004. Discovery of Ordovician-Devonian strata in the south of the Qiangtang area, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 23(5–6): 602–604 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Zhai QG, Cheng LR, Xu F and Huang XP. 2005. Thought on some key geological problems in the Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 24(4): 295–301 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Zhai QG, Chen W, Yu JJ, Huang XP and Zhang Y. 2006. Ar-Ar chronometry of the eclogite from central Qiangtang area, Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2843–2849 (in Chinese without English abstract)
- Li C, Zhai QG, Dong YS, Zeng QG and Huang XP. 2007. Lungmu Co-Shanghu plate suture in the Qinghai-Tibet Plateau and records of the evolution of the Paleo-Tethys Ocean in the Qiangtang area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 13–21 (in Chinese with English abstract)
- Li C. 2008. A review on 20 years' study of the Longmu Co-Shuanghu-Lancang River Suture Zone in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau. *Geological Review*, 54(1): 105–119 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Zhai QG, Dong YS, Jiang GW, Xie CM, Wu YW and Wang M. 2008a. Oceanic crust on the northern margin of Gondwana: Evidence from Early Paleozoic ophiolite in central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1605–1612 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Dong YS, Zhai QG, Wang LQ, Yan QR, Wu YW and He TT. 2008b. Discovery of Eopaleozoic ophiolite in the Qiangtang of Tibet Plateau: Evidence from SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(1): 31–36 (in Chinese with English abstract)
- Li C, Zhai GY, Wang LQ, Yin FG and Mao XC. 2009. An important window for understanding the Qinghai-Tibet Plateau: A review on research progress in recent years of Qiangtang area, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1169–1177 (in Chinese with English abstract)
- Li JC, Zhao ZB, Zheng YL, Yuan GL, Liang X, Wang GH and Liu X. 2015. The magmatite evidences in southern Qiangtang for Paleo-Tethys ocean subducting collision: Gangtang-Co granites in Rongma, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 2078–2088 (in Chinese with English abstract)
- Liang X, Wang GH, Yuan GL and Liu Y. 2012. Structural sequence and geochronology of the Qomo Ri accretionary complex, Central Qiangtang, Tibet: Implications for the Late Triassic subduction of the Paleo-Tethys Ocean. *Gondwana Research*, 22(2): 470–481
- Liang X, Wang GH, Yang B, Ran H, Zheng YL, Du JX and Li LG. 2017. Stepwise exhumation of the Triassic Lanling high-pressure metamorphic belt in Central Qiangtang, Tibet: Insights from a coupled study of metamorphism, deformation, and geochronology. *Tectonics*, 36(4): 652–670
- Liu H, Wang BD, Chen L, Li XB and Wang LQ. 2015. Early Carboniferous subduction of Lungmu Co-Shuanghu Paleo-Tethys Ocean: Evidence from island arc volcanic rocks in Riwanhaka, Central Qiangtang. *Geological Bulletin of China*, 34(2–3): 274–282 (in Chinese with English abstract)
- Liu HY, Guo HM, Xing LN, Zhan YH, Li FL, Shao JL, Niu H, Liang X and Li CQ. 2016. Geochemical behaviors of rare earth elements in groundwater along a flow path in the North China Plain. *Journal of Asian Earth Sciences*, 117: 33–51
- Ludwig KR. 2003. *Isoplot/Ex Version 3.00: A Geochronology Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70
- Nelson DR. 2001. An assessment of the determination of depositional ages for precambrian clastic sedimentary rocks by U-Pb dating of detrital zircons. *Sedimentary Geology*, 141–142: 37–60
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300
- Pearce JA and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251–285
- Peng ZM, Geng QR, Pan GT, Wang LQ, Zhang Z, Cong F and Guan JL. 2014. Zircon SHRIMP geochronology and Nd-Pb isotopic characteristics of the meta-basalt in the central part of Tibetan Plateau's Qiangtang region. *Science China (Earth Sciences)*, 57(3): 428–438
- Rojas-Agramonte Y, Kroner A, Demoux A, Wang W, Donskaya T, Liu D and Sun M. 2011. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: Significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 19(3): 751–763
- Stöcklin J. 1974. Possible ancient continental margins in Iran. In: Burke CA and Drake CL (eds.). *The Geology of Continental Margins*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 873–877
- Stöcklin J. 1989. Tethys Evolution in the Afghanistan-Pamir-Pakistan Region. *Tectonic Evolution of the Tethyan Region*. Springer Netherlands, 256: 241–264

- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Tan FW, Wang J, Fu XG, Chen M and Du BW. 2009. U-Pb zircon SHRIMP age of metamorphic rocks from the basement of the Qiangtang basin, northern Tibet, and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 139–146 (in Chinese with English abstract)
- Thompson G, Bryan WB and Humphris SE. 1989. Axial volcanism of the East Pacific Rise, 10–12°N. Geological Society, London, Special Publications, 42: 281–200
- Wang GH, Liang DY, Zhang WJ, Jia JC, Zhou ZG, Wan YP and Yu HL. 2007. Tectono-paleogeographic characteristics in northeastern Tibet, China and spatial-temporal transition of the northern boundary of Gondwana. *Geological Bulletin of China*, 26(8): 921–928 (in Chinese with English abstract)
- Wang GH, Han FL, Yang YJ, Li YQ and Cui JL. 2009. Discovery and geologic significance of Late Paleozoic accretionary complexes in central Qiangtang, northern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 28(9): 1181–1187 (in Chinese with English abstract)
- Wang GZ and Wang CS. 2001. Disintegration and age of basement metamorphic rocks in Qiangtang, Tibet, China. *Science China (Earth Sciences)*, 44(Suppl. 1): 86–93
- Wang HD. 2015. Age redetermination of the Kangtuo Formation in eastern Yibucaka Lake, Northern Qiangtang. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 1–76 (in Chinese with English summary)
- Wang LQ, Pan GT, Li C, Dong YS, Zhu DC, Yuan SH and Zhu TX. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of Eoaleozoic cumulate in Guogangjianshan Mt. from central Qiangtang area of northern Tibet: Considering the evolution of Proto-and Paleo-Tethys. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2045–2056 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q. 2015. The deformation and metamorphic features of Yadan schist and geological significance in Rongma area, Qiangtang, Tibet. Master Degree Thesis. Beijing: China University of Geosciences, 1–84 (in Chinese with English summary)
- Wei CJ, Guan X and Dong J. 2017. HT-UHT metamorphism of metabasites and the petrogenesis of TTGs. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1381–1404 (in Chinese with English abstract)
- Wilde SA and Zhou JB. 2015. The Late Paleozoic to Mesozoic evolution of the eastern margin of the Central Asian Orogenic Belt in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 909–921
- Williams IS. 2001. Response of detrital zircon and monazite, and their U-Pb isotopic systems, to regional metamorphism and host-rock partial melting, Cooma Complex, southeastern Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48(4): 557–580
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Wu FY, Sun DY, Ge WC, Zhang YB, Grant ML, Wilde SA and Jahn BM. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China. *Journal of Asian Earth Science*, 41(1): 1–30
- Wu YW, Li C, Xie CM, Wang M and Hu PY. 2010. Petrology and geochronology of Guogangjianshan Permian ophiolite in central Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau, China. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1773–1780 (in Chinese with English abstract)
- Wu YW. 2013. The evolution record of Longmuco-Shuanghu-Lancang Ocean: Cambrian-Permian ophiolites. Ph. D. Dissertation. Changchun: Jilin University, 1–162 (in Chinese)
- Xu DZ, Zhang WJ, Zhou HT and Sun QK. 2014. Characteristics, zircon dating and tectonic significance of the gabbros along the north-central segments of the Alxa Block, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 33(5): 661–671 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Li WC, Li HQ, Cai ZH, Yan Z and Ma CQ. 2013. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1847–1860 (in Chinese with English abstract)
- Yang GH, Peng ZM, Zhang Z and Guan JL. 2017. The amphibolite from the Shuanghu region, Qiangtang Basin, Qinghai-Xizang Plateau: Geochronological and geological implications. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 37(3): 96–102 (in Chinese with English abstract)
- Yang Y, Zhao ZB, Yuan TY, Liu Y and Li CY. 2014. Ordovician parallel unconformity in Qiangtang terrane, northern Tibet: Implications to Early Paleozoic evolution of northern Tibetan regions. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2381–2392 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211–280
- Zhai QG, Li C, Cheng LR and Zhang YC. 2004. Geological features of Permian ophiolite in the Jiaomuri area, Qiangtang, Tibet, and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 23(12): 1228–1230 (in Chinese with English abstract)
- Zhai QG, Li C and Huang XP. 2006. Geochemistry of Permian basalt in the Jiaomuri area, central Qiangtang, Tibet, China, and its tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 25(12): 1419–1427 (in Chinese with English abstract)
- Zhai QG, Li C and Huang XP. 2007. The fragment of Paleo-Tethys ophiolite from central Qiangtang, Tibet: Geochemical evidence of metabasites in Guogangjianshan. *Science China (Earth Sciences)*, 50(9): 1302–1309
- Zhai QG. 2008. Petrology, geochemistry and tectonic evolution of the eclogite from central Qiangtang area, Northern Tibet. Ph. D. Dissertation. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 1–114 (in Chinese with English summary)
- Zhai QG, Li C, Wang J, Chen W and Zhang Y. 2009a. Petrology, mineralogy and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar chronology for Rongma blueschist from central Qiangtang, northern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9): 2281–2288 (in Chinese with English abstract)
- Zhai QG, Li C, Wang J, Ji ZS and Wang Y. 2009b. SHRIMP U-Pb dating and Hf isotopic analyses of zircons from the mafic dyke swarms in central Qiangtang area, Northern Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 54(13): 2279–2285
- Zhai QG, Jahn BM, Zhang RY, Wang J and Su L. 2011. Triassic subduction of the Paleo-Tethys in northern Tibet, China: Evidence from the geochemical and isotopic characteristics of eclogites and blueschists of the Qiangtang Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1356–1370
- Zhai QG, Jahn BM, Su L, Wang J, Mo XX, Lee HY, Wang KL and Tang SH. 2013. Triassic arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: Zircon U-Pb ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics, and tectonic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 162–178
- Zhang XZ, Dong YS, Li C, Chen W, Shi JR, Zhang Y and Wang SY. 2010. Identification of the eclogites with different ages and their tectonic significance in Central Qiangtang, Tibetan Plateau: Constraints from <sup>40</sup>Ar-<sup>39</sup>Ar geochronology. *Geological Bulletin of China*, 29(12): 1815–1824 (in Chinese with English abstract)
- Zhou JB, Wilde SA, Zhang XZ, Zhao GC, Zheng CQ, Wang YJ and Zhang XH. 2009. The onset of Pacific margin accretion in NE China: Evidence from the Heilongjiang high-pressure metamorphic belt. *Tectonophysics*, 478(3–4): 230–246
- Zhou JB, Zeng WS, Gao JL, Han J and Guo XD. 2012. The tectonic framework and evolution of the NE China: From ~500Ma to ~180Ma. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1298–1316 (in Chinese with English abstract)
- Zhu CY, Zhao GC, Sun M, Liu Q, Han YG, Hou WZ, Zhang XR and Eizenhofer PR. 2015. Geochronology and geochemistry of the Yilan blueschists in the Heilongjiang Complex, northeastern China and tectonic implications. *Lithos*, 216–217: 241–253

- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Mo XX, Chung SL, Hou ZQ, Wang LQ and Wu FY. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth and Planetary Science Letters*, 301(1-2): 241-255
- Zhu DC, Zhao ZD, Niu YL, Wang Q, Dilek Y, Dong GC and Mo XX. 2012. Origin and Paleozoic tectonic evolution of the Lhasa Terrane. *Geological Journal of China Universities*, 18(1): 1-15 (in Chinese with English abstract)
- Zhu TX, Zhang QY, Feng XT, Dong H, Yu YS and Li HR. 2010.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isotopic dating of the glaucophane in Caiduo Caka, Central Qiangtang area, Northern Tibet, China and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 84(10): 1448-1456 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献**
- 白艳萍, 刘苏桥, 唐专红, 张能, 陆济璞. 2010. 藏北红脊山构造混杂岩带南缘猫耳山边界断裂初探. *桂林理工大学学报*, 30(2): 202-207
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 金贵善, 王清利. 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据. *岩石学报*, 22(4): 867-872
- 邓万明, 尹集祥, 芮中平. 1996. 羌塘茶布-双湖地区基性超基性岩和火山岩研究. *中国科学(D辑)*, 26(4): 296-301
- 邓希光, 丁林, 刘小汉, 周勇, Yin A, Kapp PA, Murphy MA, Manning CE. 2000. 青藏高原羌塘中部冈玛日地区蓝闪石片岩及其  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  年代学. *科学通报*, 45(21): 2322-2326
- 董春艳, 李才, 万渝生, 王伟, 吴彦旺, 颜炳强, 刘敦一. 2011. 西藏羌塘龙木错-双湖缝合带南侧奥陶纪温泉石英岩碎屑锆石年龄分布模式: 构造归属及物源区制约. *中国科学(地球科学)*, 41(3): 299-308
- 多吉, 温春齐, 郭建慈, 范小平, 李小文. 2007. 西藏 4.1Ga 碎屑锆石年龄的发现. *科学通报*, 52(1): 19-22
- 辜平阳, 李荣社, 何世平, 查显锋, 于浦生, 时超, 潘术娟, 王轶. 2012. 西藏那曲县北聂荣微地块聂荣岩群中斜长角闪岩——Rodinia 超大陆裂解的地质纪录. *岩石矿物学杂志*, 31(2): 145-154
- 何世平, 李荣社, 王超, 辜平阳, 于浦生, 时超, 查显锋. 2013. 昌都地块宁多岩群形成时代研究: 北羌塘基底存在的证据. *地学前缘*, 20(5): 15-24
- 胡道功, 吴珍汉, 江万, 石玉若, 叶培盛, 刘琦胜. 2005. 西藏念青唐古拉岩群 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素研究. *中国科学(D辑)*, 35(1): 29-37
- 胡培远, 李才, 解超明, 吴彦旺, 王明, 苏犁. 2013. 藏北羌塘中部桃形湖蛇绿岩中钠长花岗岩——古特提斯洋壳消减的证据. *岩石学报*, 29(12): 4404-4414
- 纪云龙. 2000. 藏北羌塘地块的归属问题. *地学前缘*, 7(4): 370
- 李才. 1987. 龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带与石炭二叠纪冈瓦纳北界. *长春地质学院学报*, 17(2): 155-166
- 李才, 程立人, 张以春, 翟庆国. 2004. 西藏羌塘南部发现奥陶纪-泥盆纪地层. *地质通报*, 23(5-6): 602-604
- 李才, 翟庆国, 程立人, 徐峰, 黄小鹏. 2005. 青藏高原羌塘地区几个关键地质问题的思考. *地质通报*, 24(4): 295-301
- 李才, 翟庆国, 陈文, 于介江, 黄小鹏, 张彦. 2006. 青藏高原羌塘中部榴辉岩 Ar-Ar 定年. *岩石学报*, 22(12): 2843-2849
- 李才, 翟庆国, 董永胜, 曾庆高, 黄小鹏. 2007. 青藏高原龙木错-双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录. *地质通报*, 26(1): 13-21
- 李才. 2008. 青藏高原龙木错-双湖-澜沧江板块缝合带研究二十年. *地质评论*, 54(1): 105-119
- 李才, 翟庆国, 董永胜, 蒋光武, 解超明, 吴彦旺, 王明. 2008a. 冈瓦纳大陆北缘早期的洋壳信息——来自青藏高原羌塘中部早古生代蛇绿岩的依据. *地质通报*, 27(10): 1605-1612
- 李才, 董永胜, 翟庆国, 王立全, 阎全人, 吴彦旺, 何彤彤. 2008b. 青藏高原羌塘早古生代蛇绿岩-堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP 定年及其意义. *岩石学报*, 24(1): 31-36
- 李才, 翟刚毅, 王立全, 尹福光, 毛晓长. 2009. 认识青藏高原的重要窗口——羌塘地区近年来研究进展评述(代序). *地质通报*, 28(9): 1169-1177
- 李静超, 赵中宝, 郑艺龙, 袁国礼, 梁晓, 王根厚, 刘曦. 2015. 古特提斯洋俯冲碰撞在南羌塘的岩浆岩证据: 西藏荣玛乡冈塘错花岗岩. *岩石学报*, 31(7): 2078-2088
- 刘函, 王保弟, 陈莉, 李小波, 王立全. 2015. 龙木错-双湖古特提斯洋俯冲记录: 羌塘中部日湾茶卡早石炭世岛弧火山岩. *地质通报*, 34(2-3): 274-282
- 彭智敏, 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 张璋, 丛峰, 关俊雷. 2014. 青藏高原羌塘中部变玄武岩锆石 SHRIMP 年代学及 Nd-Pb 同位素特征. *中国科学(地球科学)*, 44(5): 872-883
- 谭富文, 王剑, 付修根, 陈明, 杜佰伟. 2009. 藏北羌塘盆地基底变质岩的锆石 SHRIMP 年龄及其地质意义. *岩石学报*, 25(1): 139-146
- 王根厚, 梁定益, 张维杰, 贾建称, 周志广, 万永平, 于海亮. 2007. 藏东北构造古地理特征及冈瓦纳北界的时空转换. *地质通报*, 26(8): 921-928
- 王根厚, 韩芳林, 杨运军, 李元庆, 崔江利. 2009. 藏北羌塘中部晚古生代增生杂岩的发现及其地质意义. *地质通报*, 28(9): 1181-1187
- 王寒冻. 2015. 藏北依布茶卡东康托组重新厘定. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1-76
- 王立全, 潘桂棠, 李才, 董永胜, 朱弟成, 袁四化, 朱同兴. 2008. 藏北羌塘中部果干加年山早古生代堆晶辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄——兼论原古特提斯洋的演化. *地质通报*, 27(12): 2045-2056
- 王泉. 2015. 西藏羌塘荣玛地区亚丹片岩变形变质特征及地质意义. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学, 1-84
- 魏春景, 关晓, 董杰. 2017. 基性岩高温-超高温变质作用与 TTG 质岩成因. *岩石学报*, 33(5): 1381-1404
- 吴彦旺, 李才, 解超明, 王明, 胡培远. 2010. 青藏高原羌塘中部果干加年山二叠纪蛇绿岩岩石学和同位素定年. *地质通报*, 29(12): 1773-1780
- 吴彦旺. 2013. 龙木错-双湖-澜沧江历史记录-寒武纪-二叠纪的蛇绿岩. 博士学位论文. 长春: 吉林大学, 1-162
- 徐东卓, 张维杰, 周海涛, 孙启凯. 2014. 内蒙古阿拉善地块中北部地区辉长岩岩体特征、锆石定年及其构造意义. *地质通报*, 33(5): 661-671
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 李化启, 蔡志慧, 闫臻, 马昌前. 2013.

- 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用. 岩石学报, 29(6): 1847-1860
- 杨桂花, 彭智敏, 张璋, 关俊雷. 2017. 青藏高原羌塘中部双湖早古生代斜长角闪岩年代学及地质意义. 沉积与特提斯地质, 37(3): 96-102
- 杨耀, 赵中宝, 苑婷媛, 刘焰, 李聪颖. 2014. 藏北羌塘奥陶纪平行不整合面的厘定及其构造意义. 岩石学报, 30(8): 2381-2392
- 翟庆国, 李才, 程立人, 张以春. 2004. 西藏羌塘角木日地区二叠纪蛇绿岩的地质特征及意义. 地质通报, 23(12): 1228-1230
- 翟庆国, 李才, 黄小鹏. 2006. 西藏羌塘中部角木日地区二叠纪玄武岩的地球化学特征及其构造意义. 地质通报, 25(12): 1419-1427
- 翟庆国. 2008. 藏北羌塘中部榴辉岩岩石学、地球化学特征及构造演化过程. 博士学位论文. 北京: 中国地质科学院, 1-114
- 翟庆国, 李才, 王军, 陈文, 张彦. 2009a. 藏北羌塘中部绒玛地区蓝片岩岩石学、矿物学和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学. 岩石学报, 25(9): 2281-2288
- 翟庆国, 李才, 王军, 纪战胜, 王永. 2009b. 藏北羌塘地区基性岩墙群锆石 SHRIMP 定年及 Hf 同位素特征. 科学通报, 54(21): 3331-3337
- 张修政, 董永胜, 李才, 陈文, 施建荣, 张彦, 王生云. 2010. 青藏高原羌塘中部不同时代榴辉岩的识别及其意义——来自榴辉岩及其围岩 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年代学的证据. 地质通报, 29(12): 1815-1824
- 周建波, 曾维顺, 曹嘉麟, 韩杰, 郭晓丹. 2012. 中国东北地区的构造格局与演化: 从500Ma到180Ma. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1298-1316
- 朱弟成, 赵志丹, 牛耀龄, 王青, Dilek Y, 董国臣, 莫宣学. 2012. 拉萨地体的起源和古生代构造演化. 高校地质学报, 18(1): 1-15
- 朱同兴, 张启跃, 冯心涛, 董瀚, 于远山, 李鸿睿. 2010. 西藏羌塘中部才多茶卡蓝闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学及地质意义. 地质学报, 84(10): 1448-1456