

doi:10.3799/dqkx.2015.006

# 西藏尕尔穷—嘎拉勒铜金矿集区 火山岩年代学及地球化学

张志<sup>1</sup>, 陈毓川<sup>2</sup>, 唐菊兴<sup>2\*</sup>, 李壮<sup>1</sup>, 宋俊龙<sup>1</sup>,  
杨毅<sup>1</sup>, 胡正华<sup>1</sup>, 杨欢欢<sup>1</sup>, 杨超<sup>2</sup>, 康浩然<sup>2</sup>

1. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059

2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037

**摘要:** 尕尔穷—嘎拉勒铜金矿集区是班—怒结合带南部的重要矿集区。矿集区内发育大面积火山岩, 利用锆石 U-Pb 年代学方法, 首次精确测定了研究区内不同地层中火山岩年龄, 并结合其岩石地球化学特征探讨了其形成构造背景。研究表明, 区内朗久组火山角砾岩成岩年龄为  $141.70 \pm 0.47$  Ma (MSWD=0.43), 多爱组流纹岩年龄为  $136.80 \pm 0.48$  Ma (MSWD=0.79), 形成时代为早白垩世初期, 属于班公湖—怒江洋南向俯冲的岩浆作用响应; 原定多爱组火山角砾岩 (GE 火山角砾岩) 年龄为  $85.20 \pm 0.53$  Ma (MSWD=3.40), 形成时代为晚白垩世, 不属于早白垩世多爱组产物, 属于洋盆消亡后羌塘陆块与冈底斯陆块汇聚阶段的火山作用产物, 晚于尕尔穷铜金矿的成矿年龄 ( $86.87 \pm 0.50$  Ma)。岩石地球化学特征表明, 区内火山岩均具有相对富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素 (LILE), 而亏损 Ta、Nb、Yb、Ti 等高场强元素 (HFSE) 的特征, 显示出弧火山岩特性。结合区域已有火山岩研究资料表明, 在班公湖—怒江洋南向俯冲过程中, 从早白垩世初至中晚期均有比较连续的火山作用, 持续时间约为 30 Ma (140~110 Ma); 在班公湖—怒江洋盆消亡后的羌塘陆块与冈底斯陆块汇聚晚阶段, 又伴随有晚白垩世火山作用的发生, 该期火山作用与区内成矿岩体年龄相当, 可能为同一岩浆系统的产物。

**关键字:** 火山岩; 班公湖—怒江特提斯洋; 俯冲; 碰撞; 尕尔穷—嘎拉勒矿集区; 地球化学。

中图分类号: P581

文章编号: 1000-2383(2015)01-0077-21

收稿日期: 2014-04-10

## Zircon U-Pb Age and Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks in Gaerqiong-Galale Cu-Au Ore District, Tibet

Zhang Zhi<sup>1</sup>, Chen Yuchuan<sup>2</sup>, Tang Juxing<sup>2\*</sup>, Li Zhuang<sup>1</sup>, Song Junlong<sup>1</sup>,  
Yang Yi<sup>1</sup>, Hu Zhenghua<sup>1</sup>, Yang Huanhuan<sup>1</sup>, Yang Chao<sup>2</sup>, Kang Haoran<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

**Abstract:** Located in the southern Bangong Co-Nujiang River suture zone, the Gaerqiong-Galale ore district is an important Cu-Au ore dense district with a large area of volcanics. This study firstly accurately determinates the ages of volcanics in different strata using U-Pb zircon geochronology method, then discusses the structural setting during formation combining the geochemistry characteristics. The results show that volcanic breccia age of Langjiu Group is  $141.70 \pm 0.47$  Ma (MSWD=0.43), rhyolite age of Duoai Group is  $136.80 \pm 0.48$  Ma (MSWD=0.79), formation age is early Early Cretaceous, being attributed to volcanism of Bangong-Nujiang southward subduction; volcanic breccias age of Duoai Group (GE volcanic breccias) is  $85.20 \pm 0.53$  Ma (MSWD=3.40), formation age is Late Cretaceous and does not belong to the Early Cretaceous Duoai Group, which was the

**基金项目:** 国土资源部公益性行业科研专项项目 (No. 201011013—3); 国家“973”项目 (No. 2011CB403103); 国家自然科学基金项目 (No. 41172077); 青藏专项优选项目 (No. 12120113037400) 联合资助。

**作者简介:** 张志 (1985—), 男, 博士研究生, 主要从事青藏高原地质矿产研究. E-mail: tancer@qq.com

\* 通讯作者: 唐菊兴, E-mail: tangjuxing@126.com

**引用格式:** 张志, 陈毓川, 唐菊兴, 等, 2015. 西藏尕尔穷—嘎拉勒铜金矿集区火山岩年代学及地球化学. 地球科学——中国地质大学学报, 40(1): 77—97.

volcanism product of Qiangtang landmass and Gangdese landmass converging after ocean basin demise and was later than the mineralization age ( $86.87 \pm 0.50$  Ma) of the Gaerqiong Cu-Au deposit. Geochemical characteristics indicate that volcanics are enriched in LILE, e.g. Rb, Th, U and others, but depleted in Ta, Nb, Yb, Ti and other HFSE, and it exhibits arc volcanic rock characteristics. It is found that there was continuous volcanism from early to middle Early Cretaceous during Bangong-Nujiang southward subduction about 30 Ma (140–110 Ma); it was also accompanied by volcanism of Late Cretaceous during Qiangtang landmass and Gangdese landmass converging after ocean basin demise; the age of this volcanism is similar to that of rock mineralization in district, and they may belong to the same magma system.

**Key words:** volcanic rock; Bangong Co-Nujiang Tethys ocean; subduction; collision; Gaerqiong-Galale ore district; geochemistry.

横贯青藏高原中部的班公湖—怒江缝合带是冈底斯陆块与羌塘陆块的分界线(任纪舜和肖黎薇, 2004), 相对于缝合带北缘的成岩、成矿及火山作用响应研究等多点开花的局面(李光明等, 2007; 李金祥等, 2008; 杜德道等, 2011; 唐菊兴等, 2014; 周涛等, 2014), 其南缘的构造属性研究却一直步履维艰。早期时候, 随着冈底斯成矿带成岩成矿理论研究的逐步深化及找矿勘查取得巨大成功, 新特提斯洋壳北向俯冲的影响力使得处于冈底斯中北部—班公湖—怒江缝合带南缘地域的岩浆活动成因总是扑朔迷离, 在缺乏高质量年代学数据的支撑以及班公湖—怒江特提斯洋俯冲极性尚存在较大争论的环境下, 诸多学者开展了其到底是新特提斯洋壳北向低角度俯冲产生的还是班公湖—怒江洋南向俯冲所致之间的激烈争论(Coulon *et al.*, 1986; Kapp *et al.*, 2003, 2005, 2007; Leier *et al.*, 2007; Hsü *et al.*, 1995; 潘桂堂等, 2004, 2006; 莫宣学等, 2005; 朱弟成等, 2006). 伴随班公湖—怒江特提斯洋从单向俯冲至双向俯冲观点的转变(Pearce and Deng, 1988; Kapp *et al.*, 2003; 秦克章等, 2006; 李光明等, 2007; 许荣科等, 2007; 李金祥等, 2008; 康志强等, 2010; 杜德道等, 2011; 耿全如等, 2011), 人们开始认识到班公湖—怒江特提斯洋壳南向俯冲的成岩成矿响应问题, 并相继报道了一系列以此为背景的火山活动(莫宣学等, 2005; 朱弟成等, 2006, 2008; 康志强等, 2008, 2009, 2010), 且成岩成矿响应方面也取得了突破性的进展(李志军等, 2011a, 2011b; 唐菊兴等, 2013; 姚晓峰等, 2013; 张志等, 2013a). 新近成岩成矿年代学及地球化学研究表明, 班公湖—怒江特提斯洋壳至少在中侏罗世便已开始南向俯冲, 碰撞闭合时限很可能在早白垩世中晚期(Zhu *et al.*, 2009, 2011; 高顺宝等, 2011; 赵元艺等, 2011), 而前人报道的与之相关的火山活动基本集中在  $130 \sim 110$  Ma 之间(朱弟成等, 2006, 2008; 康志强等, 2008, 2009), 该年龄域显然还不能完全揭示缝合带南缘构造演化过程中的火山作用响应, 更为宽广的火山作用年代

学研究对于还原缝合带南缘构造演化过程中的火成作用来说十分必要。

尕尔穷—嘎拉勒大型铜金矿集区位于班公湖—怒江缝合带西段, 是该缝合带南缘勘查评价出具有代表性的碰撞期成矿事件(李志军等, 2011a, 2011b; 唐菊兴等, 2013; 张志等, 2013a, 2013b, 2013c), 具有重要的科研与经济价值. 区内前期研究均集中于矿床地质特征(李志军等, 2011a; 胡正华等, 2012)、成岩成矿年代学(李志军等, 2011b; 吕立娜等, 2011; 姚晓峰等, 2012, 2013)、矿物学(张志等, 2013b; 2013c)、勘查模型与成矿规律(张志等, 2012; 唐菊兴等, 2013)等方面, 但对于遍布矿集区内的火山岩却并没有重视. 本文首次报道了尕尔穷—嘎拉勒矿集区内不同层位火山岩年龄及其地球化学特征, 探讨了火山作用背景, 并结合区域上已报道的火山作用事件, 拓宽了班公湖—怒江洋南向俯冲期火山作用时限并首次识别出碰撞期火山作用事件, 进一步还原了班公湖—怒江缝合带南缘构造演化过程中的火山作用响应.

## 1 矿区地质

尕尔穷—嘎拉勒矿集区大地构造位置处于羌塘—三江复合板片与冈底斯—念青唐古拉复合板片的交汇处, 展布于班公湖—怒江缝合带南侧的措勤—申扎岩浆弧内, 现今区内现已勘查出尕尔穷斑岩—矽卡岩型铜金(钼)矿床及嘎拉勒矽卡岩型铜金(钼)矿床, 两矿区紧邻(图 1), 其金资源量均已达到大型以上规模.

尕尔穷—嘎拉勒矿集区内虽然可见大量火山岩分布, 但由于分布不连续, 各地层火山岩分布有重叠, 加之其具备旋回式喷发特点, 至今未能在矿集区内识别出真正意义上的火山机构. 然而, 笔者本次在尕尔穷采集 GE 火山角砾岩(原多爱组火山角砾岩)时, 对该地区火山岩进行了较为详细的火山岩分布

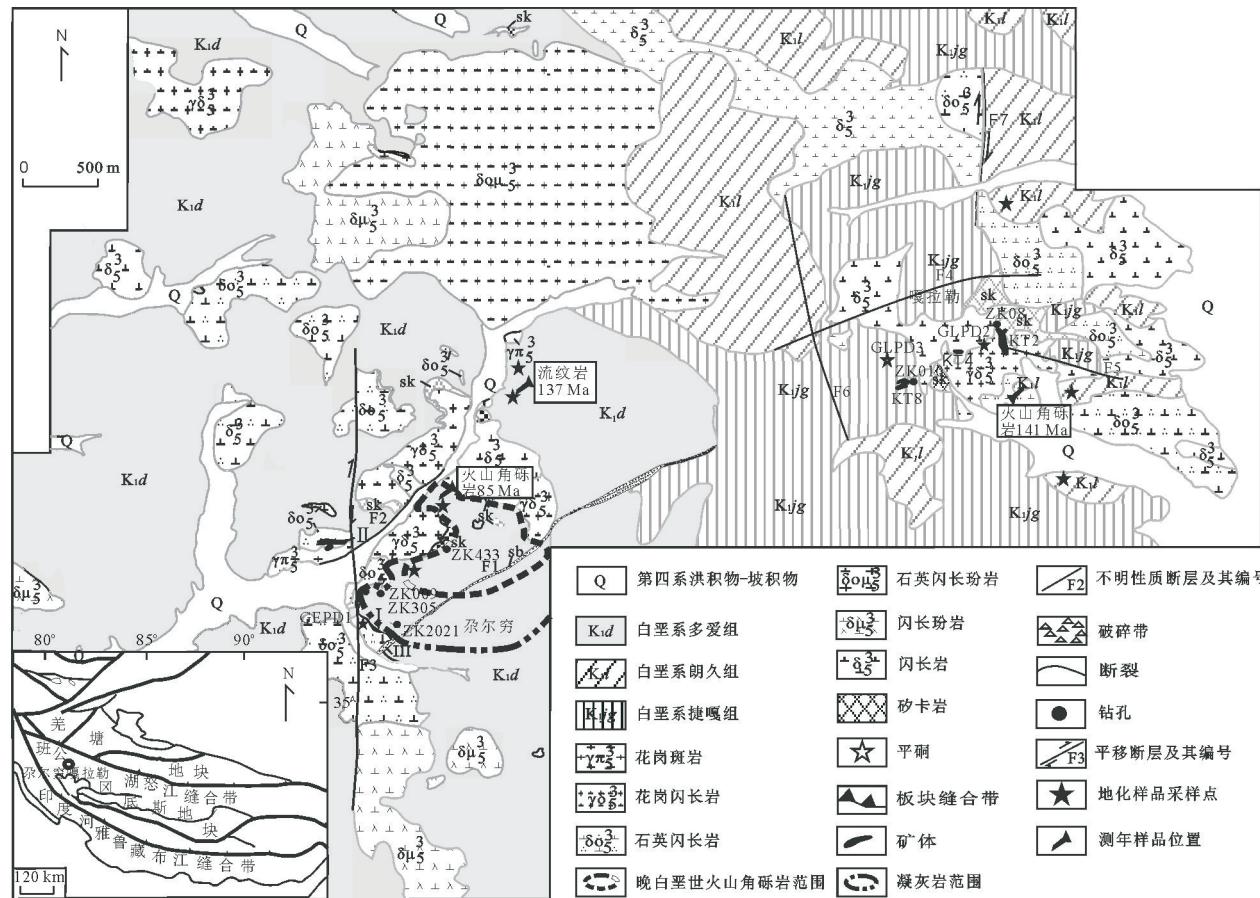


图1 尕尔穷—嘎拉勒矿集区地质简图

Fig.1 Generalized geological map of the Gerqiong-Glale Cu-Au ore field  
据唐菊兴等,2013 修改

范围填图,并划分出了较为准确的GE火山角砾岩及其外围分布的凝灰岩范围,可视为尕尔穷矿区内的一个小型火山机构(图1)。

### 1.1 尕尔穷矿床

尕尔穷矿区出露地层主要为白垩系多爱组(K<sub>1</sub>d)及第四系(Q)(图1).多爱组地层主要由碳酸盐岩及火山碎屑岩组成,碳酸盐岩主要由大理岩、灰岩组成,为矿床形成的有利围岩;火山碎屑岩主要由凝灰岩、火山角砾岩、火山集块岩等组成。

区内岩浆岩主要为燕山晚期中酸性花岗岩类,主要可见石英闪长岩、闪长玢岩、花岗闪长岩以及花岗斑岩等,其中呈岩株形式产出的石英闪长岩与成矿关系最为密切,矿区主矽卡岩型铜金矿产于石英闪长岩与大理岩或灰岩接触带矽卡岩内,花岗斑岩为成矿后侵位,对前期形成的矽卡岩型矿体具有一定的破坏作用.邓世林等(2011)研究表明,石英闪长岩为钙碱性同熔型中酸性岩体,而花岗斑岩为陆—陆同碰撞钙碱性重熔型酸性岩体.姚晓峰等

(2013)对矿区石英闪长岩进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测定,测得石英闪长岩加权平均年龄为87.1±0.40 Ma(MSWD=0.88),代表了矿区成矿母岩成岩年龄.李志军等(2011b)对矿区辉钼矿进行了Re-Os年龄测定,测得其等时线年龄为86.87±0.50 Ma,指出矿区成矿事件发生在晚燕山期.

区内构造主要可见断裂构造及少量褶皱构造.区内断裂主要可见F1、F2、F3三条断层,其中F1断层与成矿关系密切,经工程揭露其倾向多变,具先张后扭的特点,是对成矿有利的导矿容矿构造.F3断层为平移断层,并切断了F1断层南西端,表明F3断层形成晚于F1断层,且F3断层错断了I号主矿体北西段,显示为成矿后破矿断层构造,其与F2断层先后关系不明.褶皱构造主要表现为在多爱组碳酸盐岩分布区域可见少量小型褶皱构造,在这种小型褶皱构造中背斜的核部往往形成富厚矽卡岩型铜金矿体.

尕尔穷矿区矿体主要有I、II和III号矿体3个

矿体(图 1),其中Ⅰ号矿体为矿区主矿体,为斑岩—矽卡岩型铜金(钼)矿体,上部为矽卡岩型铜金矿体,产于石英闪长岩与大理岩或灰岩的接触带钙质矽卡岩内,下部为斑岩型钼(铜)矿体,产于闪长玢岩岩体内;Ⅱ号矿体产于石英闪长玢岩与大理岩内接触带;Ⅲ号矿体赋存于 F1 断层构造破碎带内,为铁氧化物—铜金矿体。矿区金属矿物主要可见黄铜矿、斑铜矿、磁铁矿、赤铁矿、辉钼矿、自然金、金矿物、银矿物等,脉石矿物主要为矽卡岩矿物。围岩蚀变主要可见矽卡岩化、大理岩化、青盘岩化以及角岩化等。

## 1.2 嘎拉勒矿床

嘎拉勒矿区出露地层主要可见白垩系朗久组( $K_1l$ )、捷嘎组( $K_1jg$ )及第四系(Q)(图 1)。朗久组岩性组合由流纹质—英安质火山碎屑岩、角闪石英粗安岩等组成;捷嘎组地层与成矿关系密切,岩性组合包括白云岩、白云质大理岩、泥晶灰岩、生物介壳灰岩及砂砾岩等,其中白云岩及白云质大理岩为成矿有利围岩。矿区构造主要可见断裂构造,在已发现的主矿体周围分布有 F4、F5、F6、F7 四条断层,其中 F4 与 F5 断层对矿体具有一定破坏作用,F6 与 F7 断层与成矿关系暂不明。

区内发育一套以巨斑状石英闪长岩—闪长岩—石英闪长岩—花岗闪长岩—花岗斑岩为主的燕山晚期中酸性侵入岩。其中以岩株形式产出的花岗闪长岩与成矿关系最为密切,矿区主矽卡岩型铜金矿体产于花岗闪长岩与白云岩或白云质大理岩接触带矽卡岩内。吕立娜等(2011)对矿区花岗闪长岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,测得花岗闪长岩谐和年龄为  $86.52 \pm 0.41$  Ma, MSWD=0.51,表明矿区为燕山晚期成矿。

矿区已发现 KT2、KT4 和 KT8 三个矽卡岩型主铜金矿体(图 1),以 KT2 与 KT8 矿体规模最大,已发现矿体均产于花岗闪长岩与白云岩接触带矽卡岩内。金属矿物主要可见磁铁矿、黄铜矿、斑铜矿、辉铜矿、兰辉铜矿、铜兰、褐铁矿、钛铁矿、赤铁矿、金矿

物、银矿物等,非金属矿物主要为一套镁质矽卡岩矿物(张志等,2013c)。围岩蚀变主要可见矽卡岩化、大理岩化、硅化、绿泥石化、绿帘石化、角岩化等。

## 2 样品采集与分析方法

### 2.1 采样位置及样品描述

本次研究对矿集区内不同地层火山岩分别采样,其中锆石样品 3 件,分别为朗久组火山角砾岩、多爱组流纹岩及 GE 火山角砾岩(原多爱组火山角砾岩),此外采集了共 12 件岩石地化样品,采样地点见图 1。在所采集的 12 件岩石地化样品中,除前述 3 种火山岩外,还分别对朗久组凝灰岩及多爱组凝灰岩进行了采样。

朗久组火山角砾岩主要分布于嘎拉勒矿区中南部,北部也有少量分布,样品呈灰色—灰褐色,火山角砾结构,块状构造,主要由火山角砾(约 60%)及凝灰质(约 40%)组成,样品总体较新鲜,表面具少量皮壳状褐铁矿化(图 2a)。多爱组流纹岩仅在尕尔穷矿区中部可见,样品呈灰色—灰白色,斑状结构,块状构造,部分具流纹构造,斑晶主要由石英及钾长石组成,样品较新鲜(图 2d)。GE 火山角砾岩分布于尕尔穷矿区中北部,灰褐色,火山角砾结构,块状构造,主要由火山角砾(约 40%)及凝灰质(约 60%)组成,样品表面具褐铁矿化(图 2c)。凝灰岩在朗久组及多爱组中均有分布,主要呈灰色—灰黑色,凝灰结构,块状构造(图 2b)。

### 2.2 分析方法

本次锆石样品破碎和挑选由河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成,破碎后样品经淘洗除去比重轻的矿物,采用浮选和磁选方法分选出锆石,最后在双目镜下挑选出晶形较好,透明度较高的锆石晶体。挑选出的锆石样品与标准锆石一起用环氧树脂充分固定、制靶,然后磨蚀和抛光至锆石核心出露(宋彪等,2002)。对锆石样品进行反射光和透射

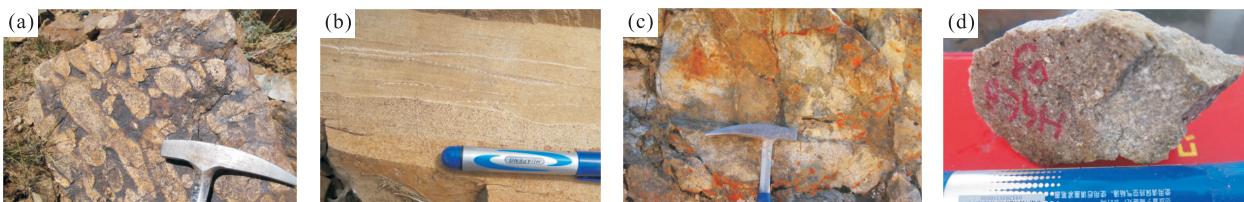


图 2 敖尔穷—嘎拉勒矿集区火山岩照片

Fig.2 The Photos of volcanic rocks in Gaerqiong-Galale ore district

a.朗久组火山角砾岩;b.多爱组凝灰岩;c.GE 火山角砾岩;d.多爱组流纹岩

光照相后,利用阴极发光(CL)显微照相观察锆石的内部结构,避开包裹体、裂隙及残留核,然后选择合适的测点进行分析.LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析在天津地质矿产研究所同位素地质学研究年代中心完成。锆石年龄计算以国际标准锆石 91500 为外标。测试结果用 GLITTER(ver4.0)软件计算得出,并进行普通铅校正,之后用 Isoplot 程序完成年龄计算及谐和图绘制。具体分析步骤和数据处理过程参见文献(Gao *et al.*, 2002; 柳小明等, 2002; 袁洪林等, 2003; 侯可军等, 2009)。

主量元素和微量元素分析均在西南冶金地质测试所完成。主量元素采用 X 荧光光谱法(XRF)分析,分析精度优于 5%;微量元素采用等离子质谱(ICP-MS)分析方法,测试精度优于 5%~10%。

### 3 锆石 U-Pb 定年

#### 3.1 朗久组火山角砾岩

朗久组火山角砾岩锆石无色透明,长轴与短轴之比在 1.5 : 1.0 ~ 2.5 : 1.0 之间,长轴多大于 100  $\mu\text{m}$ ,颗粒大者长轴可达 250  $\mu\text{m}$ ,主要呈长柱状或短柱状,少数呈浑圆粒状,部分颗粒内部可见细小包裹体(图 3a)。阴极发光图像显示锆石成分含量比较均匀,发育密集震荡环带(图 3a),具岩浆成因锆石特征(Crofu *et al.*, 2003; 吴元保和郑永飞, 2004)。

本次对朗久组火山角砾岩样品挑选出的锆石晶体共进行了 14 个点的测试,锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1。样品中 Th 含量在  $(59.29 \sim 1817.90) \times 10^{-6}$  之间,平均值为  $352.86 \times 10^{-6}$ ; U 含量在  $(66.81 \sim 965.95) \times 10^{-6}$  之间,平均值为  $301.94 \times 10^{-6}$ ; Th/U 比值在 0.67~1.88 之间,具典型岩浆成因锆石特征。样品测点年龄的计算利用 Isoplot 软件进行处理,在置信度 95% 时,14 个样品得到的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $141.70 \pm 0.47 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.43$ )(图 3a),该年龄代表了朗久组火山角砾岩的形成时代,属于晚侏罗世晚期火山作用的产物。在  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和图上可以看出(图 3a),所有分析数据点均分布在谐和曲线上,拟合度较高,得到的年龄值真实可靠。

#### 3.2 GE 火山角砾岩

GE 火山角砾岩中锆石的颜色相对较深,多呈短柱状或浑圆粒状,长轴与短轴在 1.0 : 1.0 ~ 1.5 : 1.0 之间,个别颗粒长轴近 200  $\mu\text{m}$ ,绝大多数锆石均发育震荡环带结构,另外部分颗粒边缘具非常明显

的港湾状结构(图 3b)。

本次 GE 火山角砾岩样品共进行了 15 个点的测试,测试分析结果见表 2。分析结果表明,火山角砾岩锆石样品中 Th 含量  $(440.00 \sim 1125.61) \times 10^{-6}$  之间,平均值为  $759.13 \times 10^{-6}$ ; U 含量在  $(270.93 \sim 857.56) \times 10^{-6}$  之间,平均值为  $524.93 \times 10^{-6}$ ; Th/U 比值在 0.97~2.01 之间,具一般岩浆成因锆石特征。利用 Isoplot 程序对锆石测年数据进行谐和曲线的投影和  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄的计算,从谐和图上可以看出(图 3b),所有数据分析点均位于谐和曲线上,拟合度非常高,所得加权平均年龄为  $85.20 \pm 0.53 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD}=3.40$ )(图 3b),该年龄代表了 GE 火山角砾岩的形成时代,属于晚白垩世火山作用的产物,而不属于早白垩世多爱组地层的产物。

#### 3.3 多爱组流纹岩

多爱组流纹岩锆石晶形较好,无色透明,多呈长柱状,少数呈短柱状或浑圆粒状,长轴多数大于 100  $\mu\text{m}$ ,颗粒大的长轴可达 300  $\mu\text{m}$ ,长短轴比值在 1 : 1 ~ 3 : 1 之间。部分颗粒可见包裹体及残留核,绝大多数锆石均发育震荡环带结构(图 3c)。

本次流纹岩样品共进行了 15 个有效点的测试,测试结果见表 3。样品中 Th 含量在  $(55.87 \sim 293.82) \times 10^{-6}$  之间,平均值为  $147.71 \times 10^{-6}$ ; U 含量在  $(82.99 \sim 461.55) \times 10^{-6}$  之间,平均值为  $223.57 \times 10^{-6}$ ; Th/U 比值在 0.53~1.05 之间,具一般岩浆成因锆石特征。测试结果利用 Isoplot 软件计算本次 15 个有效测点所得出的锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄为  $136.80 \pm 0.48 \text{ Ma}$  ( $\text{MSWD}=0.79$ ),该年龄代表多爱组流纹岩的形成时代,属于早白垩世火山作用的产物。在  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$  谐和图上可以看出拟合度较高(图 3c),得到的年龄值真实可靠。

### 4 地球化学特征

#### 4.1 主量元素

尕尔穷—嘎拉勒矿集区火山岩主量元素分析结果见表 4。据分析结果可知,研究区内火山岩主要为一套中酸性岩石,  $\text{SiO}_2$  含量在 54.03%~81.78% 之间,不具备基性组分。朗久组凝灰岩与多爱组凝灰岩均显示中性火山岩特征,  $\text{SiO}_2$  含量在 54.03%~58.71% 之间,  $\text{TiO}_2$  含量在 0.61%~0.87% 之间,  $\text{MgO}$  含量在 2.24%~4.18% 之间;全碱( $\text{Na}_2\text{O} +$

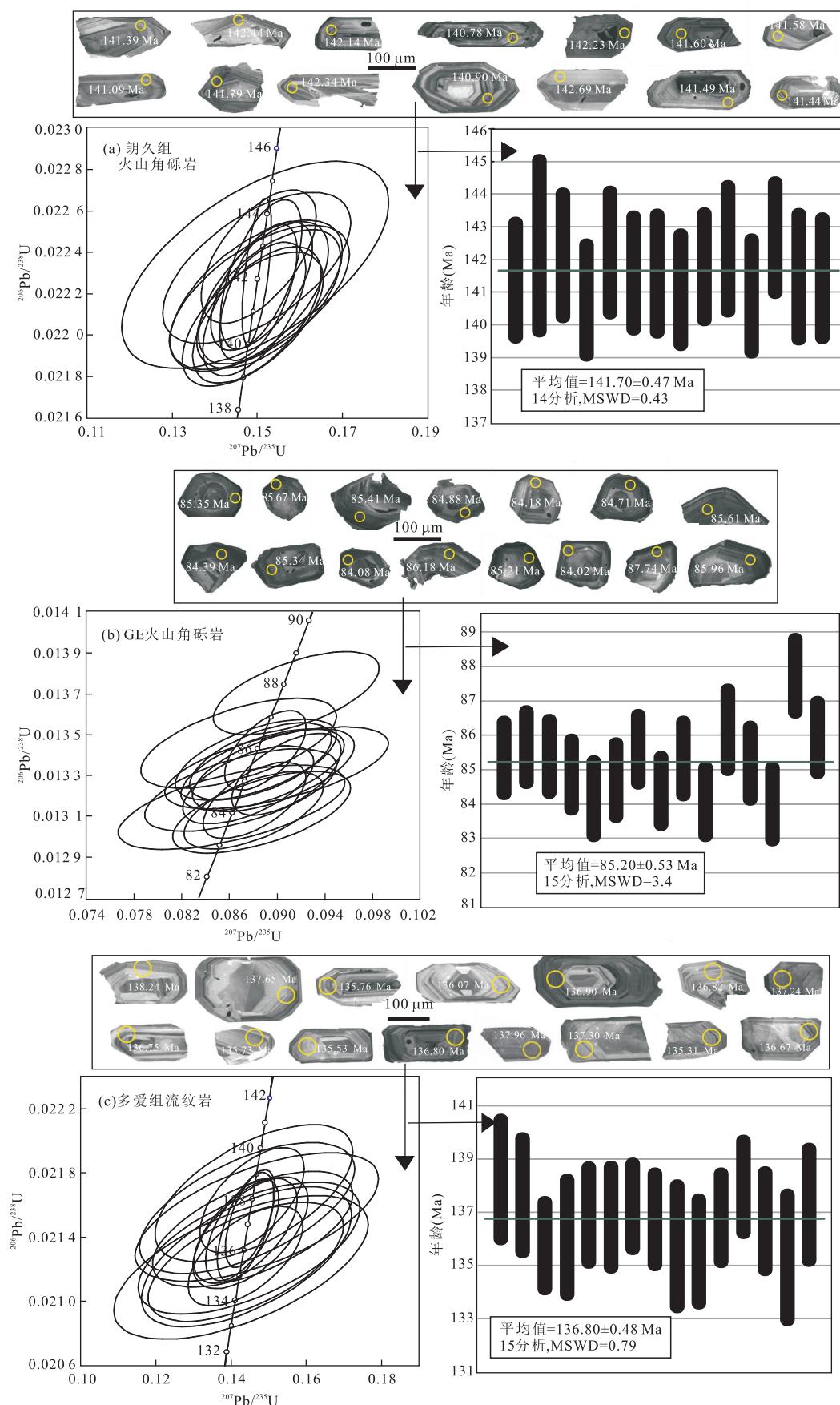


图 3 犁尔穷—嘎拉勒矿集区火山岩锆石 CL 图像及锆石年龄谐和图

Fig.3 CL image and concordia diagram of U-Pb data for zircons of volcanic rocks in Gaerqiong-Galale ore district

表1 尕尔穷—嘎拉勒矿集区朗久组火山角砾岩LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测年结果  
Table 1 Zircons U-Pb data of the Langjiu group volcanic breccias in Gaerqiong-Galale ore district

测点号	元素含量( $10^{-6}$ )			同位素比值			表面年龄(Ma)					
	Pb	U	Tu	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
1	4.34	188.55	125.90	0.67	0.049 9	0.0022	0.152 7	0.006 9	0.022 2	0.000 1	191.84	101.50
2	1.61	66.81	59.29	0.89	0.048 5	0.0042	0.149 5	0.012 8	0.022 3	0.000 2	125.17	202.68
3	9.29	360.88	344.95	0.96	0.049 1	0.0013	0.150 9	0.003 9	0.022 3	0.000 1	151.72	61.20
4	6.64	261.36	295.70	1.13	0.048 9	0.0022	0.148 9	0.006 8	0.022 1	0.000 1	143.59	104.70
5	28.96	965.95	1817.90	1.88	0.048 7	0.0004	0.149 8	0.001 4	0.022 3	0.000 1	133.99	18.38
6	8.96	370.09	289.90	0.78	0.049 1	0.0012	0.150 2	0.003 7	0.022 2	0.000 1	150.74	57.92
7	4.67	190.09	156.45	0.82	0.049 5	0.0020	0.151 4	0.006 2	0.022 2	0.000 1	169.78	95.71
8	5.57	234.62	166.34	0.71	0.048 9	0.0016	0.149 3	0.004 9	0.022 1	0.000 1	144.27	77.47
9	8.34	331.49	299.56	0.90	0.049 2	0.0016	0.151 0	0.004 9	0.022 2	0.000 1	159.41	74.68
10	3.70	146.37	136.50	0.93	0.048 7	0.0026	0.149 8	0.009 0	0.022 3	0.000 1	131.74	127.31
11	6.41	251.87	279.12	1.11	0.049 2	0.0020	0.149 9	0.006 2	0.022 1	0.000 1	157.12	96.51
12	3.88	158.51	120.75	0.76	0.048 7	0.0018	0.150 3	0.005 5	0.022 4	0.000 1	133.77	86.41
13	10.58	385.37	542.74	1.41	0.048 9	0.0019	0.149 6	0.008 3	0.022 2	0.000 1	143.33	93.29
14	5.03	171.36	304.90	1.78	0.049 2	0.0028	0.150 5	0.008 6	0.022 2	0.000 1	157.42	130.87

表 2 祁尔穷—嘎拉勒矿区 GE 火山角砾岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果

Table 2 Zircons U-Pb data of the Duai group volcanic breccias in Gaerqiong-Gale ore district

测点号	元素含量( $10^{-6}$ )			同位素比值			表面年龄(Ma)					
	Pb/U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$
1	10.84	720.49	702.24	0.97	0.048 3	0.001 6	0.088 8	0.002 8	0.013 3	0.000 1	114.09	77.34
2	7.43	463.57	635.91	1.37	0.047 8	0.001 5	0.088 2	0.002 8	0.013 4	0.000 1	90.66	74.74
3	8.50	507.48	802.55	1.58	0.048 9	0.001 8	0.089 9	0.003 8	0.013 3	0.000 1	143.46	86.47
4	9.25	534.29	987.51	1.85	0.047 9	0.001 2	0.087 6	0.002 2	0.013 3	0.000 1	95.08	59.49
5	4.64	270.93	503.85	1.86	0.047 5	0.002 1	0.086 2	0.003 9	0.013 1	0.000 1	76.70	105.38
6	6.79	383.34	769.37	2.01	0.047 7	0.001 8	0.086 9	0.003 3	0.013 2	0.000 1	82.33	88.27
7	8.49	496.48	822.28	1.66	0.048 1	0.001 3	0.088 6	0.002 4	0.013 4	0.000 1	102.66	63.81
8	12.78	788.11	1125.61	1.43	0.048 5	0.001 0	0.088 1	0.001 8	0.013 2	0.000 1	122.66	46.28
9	6.18	399.04	440.00	1.10	0.048 8	0.001 5	0.089 7	0.002 8	0.013 3	0.000 1	138.38	70.48
10	7.42	452.13	672.36	1.49	0.048 6	0.001 3	0.088 0	0.002 4	0.013 1	0.000 1	129.40	62.49
11	6.08	368.33	487.05	1.32	0.046 8	0.001 8	0.086 8	0.003 3	0.013 5	0.000 1	37.04	91.90
12	12.33	739.63	1120.10	1.51	0.049 5	0.001 0	0.090 8	0.001 9	0.013 3	0.000 1	170.17	44.92
13	7.39	462.43	639.68	1.38	0.049 0	0.001 7	0.088 7	0.003 1	0.013 1	0.000 1	149.29	80.73
14	7.27	430.22	618.90	1.44	0.048 5	0.001 5	0.091 6	0.002 8	0.013 7	0.000 1	122.51	71.75
15	13.64	857.56	1059.60	1.24	0.048 1	0.000 7	0.089 0	0.001 4	0.013 4	0.000 1	103.57	35.90

表3 尕尔穷—嘎拉勒矿集区多爱组流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果  
Table 3 Zircons U-Pb data of the Duoai group rhyolite in Gaerqiong-Galele ore district

测点号	元素含量( $10^{-6}$ )			同位素比值			表面年龄(Ma)		
	Pb/U	Tu	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
1	2.00	82.99	60.18	0.73	0.0489	0.0036	0.1460	0.0107	0.0217
2	2.64	112.21	70.50	0.63	0.0485	0.0039	0.1442	0.0117	0.0216
3	10.51	461.55	293.82	0.64	0.0490	0.0021	0.1437	0.0062	0.0213
4	2.80	110.62	114.95	1.04	0.0492	0.0041	0.1447	0.0120	0.0213
5	8.10	354.85	190.97	0.54	0.0486	0.0010	0.1438	0.0031	0.0215
6	2.36	103.22	55.87	0.54	0.0493	0.0036	0.1457	0.0109	0.0215
7	9.18	400.03	212.78	0.53	0.0489	0.0009	0.1450	0.0027	0.0215
8	6.39	260.55	221.41	0.85	0.0486	0.0019	0.1437	0.0056	0.0214
9	2.53	95.59	99.99	1.05	0.0491	0.0038	0.1440	0.0114	0.0213
10	3.50	151.53	79.57	0.53	0.0491	0.0036	0.1438	0.0106	0.0212
11	8.90	378.02	227.20	0.60	0.0483	0.0014	0.1429	0.0040	0.0214
12	6.83	300.99	131.64	0.44	0.0488	0.0019	0.1455	0.0057	0.0216
13	5.97	248.47	204.18	0.82	0.0491	0.0021	0.1451	0.0062	0.0214
14	3.59	148.34	126.59	0.85	0.0487	0.0048	0.1425	0.0138	0.0212
15	3.43	144.59	125.98	0.87	0.0494	0.0044	0.1467	0.0132	0.0215

表 4 尔穷—嘎拉勒矿集区火山岩主量元素( $10^{-2}$ )分析结果Table 4 Major element ( $10^{-2}$ ) composition of volcanic rocks in Gaerqiong-Galale ore district

原样编号	多爱组凝灰岩		朗久组凝灰岩		多爱组流纹岩			朗久组火山角砾岩		GE 火山角砾岩		
	NGB01	NGB02	XGB01	XGB02	HGB01	HGB02	HGB03	EGB01	EGB02	JGB01	JGB02	JGB03
SiO <sub>2</sub>	58.71	58.71	54.03	57.64	81.78	81.61	78.98	66.21	66.15	68.48	71.58	70.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.24	19.09	17.83	16.08	6.39	6.78	6.28	15.23	14.74	12.92	10.78	11.47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.092	0.049	2.00	3.25	0.26	0.052	0.16	0.73	0.84	2.24	1.65	1.85
FeO	3.76	3.71	4.60	3.68	0.61	0.51	0.61	2.30	1.89	1.94	2.66	2.07
MgO	2.24	2.24	4.18	3.39	0.32	0.50	0.44	1.74	1.38	0.91	0.52	0.49
CaO	5.85	5.82	5.89	5.73	3.74	4.04	5.75	3.06	3.89	3.35	4.63	4.69
Na <sub>2</sub> O	1.08	1.09	4.61	3.31	1.09	1.12	0.97	3.41	3.45	2.34	2.31	1.99
K <sub>2</sub> O	6.07	5.97	3.36	2.95	3.29	3.01	2.98	1.81	1.72	4.77	3.73	4.79
TiO <sub>2</sub>	0.62	0.61	0.87	0.76	0.10	0.11	0.10	0.49	0.40	0.41	0.22	0.25
MnO	0.027	0.022	0.14	0.092	0.033	0.029	0.045	0.057	0.066	0.073	0.15	0.12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.045	0.045	0.34	0.28	0.018	0.020	0.017	0.17	0.14	0.091	0.066	0.069
LOSS	1.72	1.97	1.49	2.21	2.24	2.03	3.03	4.63	5.21	2.06	1.31	1.25
Mg <sup>#</sup>	51.70	52.10	62.00	62.40	48.40	63.80	56.30	57.60	56.80	45.70	26.00	29.90
总计	99.50	99.30	99.30	99.40	99.90	99.80	99.40	99.80	99.90	99.60	99.60	99.40
石英(Q)	10.90	11.50	0.00	10.60	58.80	58.50	55.90	30.90	30.00	29.50	35.50	32.60
钙长石(An)	29.50	29.50	18.40	20.90	2.88	4.71	4.14	14.90	19.60	10.90	8.18	8.39
钠长石(Ab)	9.37	9.43	37.90	28.80	9.48	9.66	8.48	30.30	30.90	20.30	19.90	17.10
正长石(Or)	36.70	36.20	20.30	17.90	19.90	18.20	18.30	11.20	10.80	28.90	22.40	28.80
霞石(Ne)	0.00	0.00	1.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
刚玉(C)	0.32	0.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.58	0.43	0.00	0.00	0.00
透辉石(Di)	0.00	0.00	7.72	5.45	3.32	4.23	4.24	0.00	0.00	4.69	9.41	6.68
紫苏辉石(Hy)	11.70	11.70	0.00	9.50	0.00	0.00	0.00	7.61	6.00	1.49	0.00	0.00
硅灰石(Wo)	0.00	0.00	0.00	0.00	5.05	4.41	8.48	0.00	0.00	0.00	1.63	2.99
橄榄石(OI)	0.00	0.00	9.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
钛铁矿(II)	1.21	1.19	1.68	1.48	0.19	0.21	0.20	0.99	0.81	0.79	0.42	0.48
磁铁矿(Mt)	0.14	0.07	2.97	4.64	0.38	0.08	0.24	1.11	1.28	3.19	2.44	2.73
磷灰石(Ap)	0.11	0.11	0.80	0.68	0.04	0.05	0.04	0.41	0.35	0.22	0.15	0.16
锆石(Zr)	0.05	0.05	0.04	0.03	0.01	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02
铬铁矿(Cm)	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
合计	100.04	100.03	99.99	100.02	100.00	100.01	100.02	100.03	100.02	100.03	100.02	100.03
分异指数(DI)	57.00	57.10	59.20	57.40	88.10	86.30	82.70	72.40	71.60	78.70	77.80	78.60
A/CNK	1.01	1.01	0.81	0.84	0.53	0.55	0.41	1.16	1.01	0.86	0.66	0.68
固结指数(SI)	16.90	17.20	22.30	20.50	5.74	9.64	8.52	17.40	14.90	7.47	4.78	4.38

注: Mg<sup>#</sup> = 100 × Mg/(Mg + Fe<sup>2+</sup>).

K<sub>2</sub>O)含量较高, 在 6.27%~7.98%之间, 其中朗久组凝灰岩 K<sub>2</sub>O 含量均大于 5.90%, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值均大于 5, 属于高钾质火山岩。多爱组流纹岩 SiO<sub>2</sub> 含量较高, 在 78.98%~81.78%之间, 平均值为 80.79, TiO<sub>2</sub> 含量在 0.10%~0.11%之间, MgO 含量在 0.32%~0.50%之间, K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O 值在 2.69~3.08 之间。朗久组与 GE 火山角砾岩均显示酸性岩石特征, SiO<sub>2</sub> 含量在 66.15%~71.58%之间, 平均值为 68.56%。相比之下 GE 火山角砾岩 SiO<sub>2</sub> 含量更高, TiO<sub>2</sub> 含量在 0.22%~0.49%之间, MgO 含量在 0.49%~1.74%之间。区内火山岩 Mg<sup>#</sup> 值在 26.0~63.8 之间, 其中 GE 火山角砾岩具较低的 Mg<sup>#</sup> 值, 均小于 45, 而其他样品的数值则基本大于 50。在火山岩全碱—二氧化硅(TAS)图上(图 4a), 研究区内

凝灰岩落入了粗面安山岩区域, 火山角砾岩落入了英安岩区域, 流纹岩样品则均落入了流纹岩区域。在 SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O 图解上(图 4b), 区内凝灰岩显示高钾质火山岩特征, GE 火山角砾岩显示高钾钙碱性至钾玄岩过渡特征, 而朗久组火山角砾岩与多爱组流纹岩则显示为钙碱性系列。在主量元素的 Harker 图解中(图 5), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Na<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub> 含量与 SiO<sub>2</sub> 含量呈明显的负相关关系, 而 K<sub>2</sub>O 与 CaO 含量随着 SiO<sub>2</sub> 含量增加却没有明显的变化。

#### 4.2 稀土元素

区内火山岩稀土元素总量在  $49.34 \times 10^{-6}$ ~ $269.67 \times 10^{-6}$  之间(表 5), 其中凝灰岩稀土总量最高, 而流纹岩稀土总量较低, LREE/HREE 在 7.94~13.80 之间, (La/Yb)<sub>N</sub> 介于 7.29~20.90 之

表5 尕尔穷—嘎拉勒矿集区火山岩微量元素( $10^{-6}$ )分析结果Table 5 Trace element ( $10^{-6}$ ) composition of volcanic rocks in Gaerqiong-Galale ore district

编号	多爱组凝灰岩		朗久组凝灰岩		多爱组流纹岩			朗久组火山角砾岩		GE火山角砾岩		
	NGB01	NGB02	XGB01	XGB02	HGB01	HGB02	HGB03	EGB01	EGB02	JGB01	JGB02	JGB03
As	2.44	2.10	4.24	13.90	67.60	34.90	69.50	5.11	8.18	7.02	9.90	5.53
Ba	357.00	329.00	471.00	578.00	267.00	227.00	258.00	337.00	245.00	774.00	475.00	653.00
Co	9.34	8.86	22.40	13.30	1.37	1.87	1.69	8.89	7.94	6.01	3.06	4.02
Cr	33.50	34.40	15.80	26.70	6.18	5.94	5.97	34.60	31.50	6.57	9.41	6.65
Cs	34.00	36.40	6.52	5.26	3.34	4.76	4.02	5.33	15.10	18.60	19.3	6.26
Cu	26.20	14.50	25.80	9.26	12.60	4.78	4.36	5.06	21.80	51.20	23.10	34.50
Ga	22.50	25.60	19.10	20.00	5.40	5.61	5.47	16.50	17.00	13.60	11.40	11.10
Hf	8.22	8.21	4.95	4.13	1.46	1.81	1.56	3.90	3.23	4.60	3.53	3.44
Nb	15.20	16.90	15.20	12.60	3.81	3.12	3.58	14.30	6.49	10.30	10.40	10.10
Ni	18.70	17.40	13.90	9.03	4.26	5.11	3.97	24.70	22.10	3.32	3.71	2.15
Pb	78.30	94.40	7.23	11.10	19.30	29.30	28.90	14.30	6.58	24.30	17.80	18.50
Rb	382.00	369.00	175.00	134.00	182.00	171.00	158.00	95.00	101.00	189.00	168.00	201.00
Sb	1.06	1.04	0.80	0.66	0.88	1.58	1.47	0.66	0.50	1.39	0.91	0.70
Sc	16.50	15.60	13.70	16.60	1.91	1.99	1.89	6.22	5.67	7.32	5.78	5.58
Sr	174.00	172.00	727.00	561.00	158.00	162.00	131.00	275.00	333.00	327.00	229.00	283.00
Ta	1.40	1.48	0.96	0.86	0.39	0.17	0.27	1.09	0.62	0.86	0.99	0.95
Th	21.50	24.10	7.87	9.21	5.36	5.93	5.10	8.32	6.54	14.40	17.70	17.60
U	2.06	2.32	1.70	1.80	1.19	1.14	1.16	2.05	1.48	2.55	2.31	2.35
V	61.40	58.80	145.00	133.00	10.10	9.29	9.80	55.20	47.00	44.30	21.40	25.30
Zn	51.80	44.10	115.00	65.60	19.60	20.30	23.00	45.00	70.20	47.60	34.60	55.90
Zr	272.00	271.00	185.00	153.00	47.60	59.20	49.50	139.00	117.00	156.00	113.00	109.00
Ce	115.00	111.00	58.70	68.60	25.00	21.80	35.70	48.50	47.60	85.60	67.30	81.10
Dy	7.70	7.21	4.20	4.81	1.44	1.36	2.23	1.83	1.70	3.78	4.00	3.62
Er	4.72	4.37	2.43	2.74	0.95	0.92	1.35	1.05	0.96	2.29	2.47	2.23
Eu	1.91	1.71	1.68	1.89	0.40	0.37	0.58	0.90	0.86	1.23	0.93	0.95
Gd	8.79	7.99	5.25	6.00	1.61	1.44	2.32	2.70	2.70	5.43	4.83	4.85
Ho	1.59	1.48	0.85	0.98	0.31	0.30	0.48	0.36	0.35	0.77	0.83	0.76
La	52.60	50.00	30.50	33.00	12.30	10.60	13.30	28.50	24.30	50.90	39.70	45.00
Lu	0.70	0.68	0.34	0.36	0.16	0.17	0.19	0.15	0.13	0.35	0.37	0.33
Nd	48.80	44.50	28.00	33.00	8.95	7.71	12.10	18.00	18.30	37.00	30.60	32.10
Pr	11.90	10.90	6.69	7.71	2.34	1.93	3.00	4.76	4.68	9.69	7.92	8.57
Sm	9.53	8.52	5.35	6.54	1.66	1.38	2.48	2.82	3.04	6.05	5.26	5.21
Tb	1.33	1.23	0.76	0.88	0.25	0.23	0.38	0.35	0.35	0.72	0.72	0.65
Tm	0.68	0.65	0.34	0.37	0.15	0.15	0.19	0.15	0.13	0.33	0.37	0.32
Y	36.20	35.50	23.90	22.90	9.73	9.30	11.20	10.90	9.58	19.40	21.60	18.70
Yb	4.65	4.42	2.20	2.43	1.04	1.04	1.25	0.98	0.85	2.20	2.51	2.13
$\Sigma$ REE	270.00	254.00	147.00	169.00	56.60	49.30	75.50	111.00	106.00	206.00	168.00	188.00
LREE	240.00	226.00	131.00	151.00	50.70	43.70	67.10	104.00	98.70	190.00	152.00	173.00
HREE	30.20	28.00	16.30	18.60	5.92	5.59	8.39	7.58	7.15	15.90	16.10	14.90
LREE/HREE	7.94	8.08	8.01	8.11	8.56	7.82	8.00	13.70	13.80	12.00	9.41	11.60
$\text{La}_{\text{N}}/\text{Yb}_{\text{N}}$	8.12	8.11	9.95	9.72	8.51	7.29	7.59	20.90	20.60	16.60	11.40	15.20
$\delta$ Eu	0.64	0.63	0.97	0.92	0.75	0.81	0.73	1.00	0.92	0.66	0.56	0.58
$\delta$ Ce	1.12	1.17	1.01	1.06	1.14	1.18	1.39	1.02	1.09	0.95	0.93	1.01

间,指示轻、重稀土元素分馏较明显,通过球粒陨石标准化以后的稀土元素分配曲线(图6b),可知区内火山岩类型的稀土元素特征相似,均表现为右倾型,轻稀土元素富集,而重稀土元素亏损.Eu表现为从较明显的负异常到弱或无异常,其中多爱组凝灰岩及火山角砾岩具有较为明显的负Eu异常.一般而言

Eu负异常通常由于斜长石的分离结晶或部分熔融过程中斜长石在源区作为难熔残留相存在导致.从表1中可以看出,除凝灰岩外,其余火山岩结晶分异指数均较高(71.6~88.1),表明区内酸性火山岩均经历了较强的结晶分异作用,且长石晶出量较大,虽然不能完全排除斜长石在部分

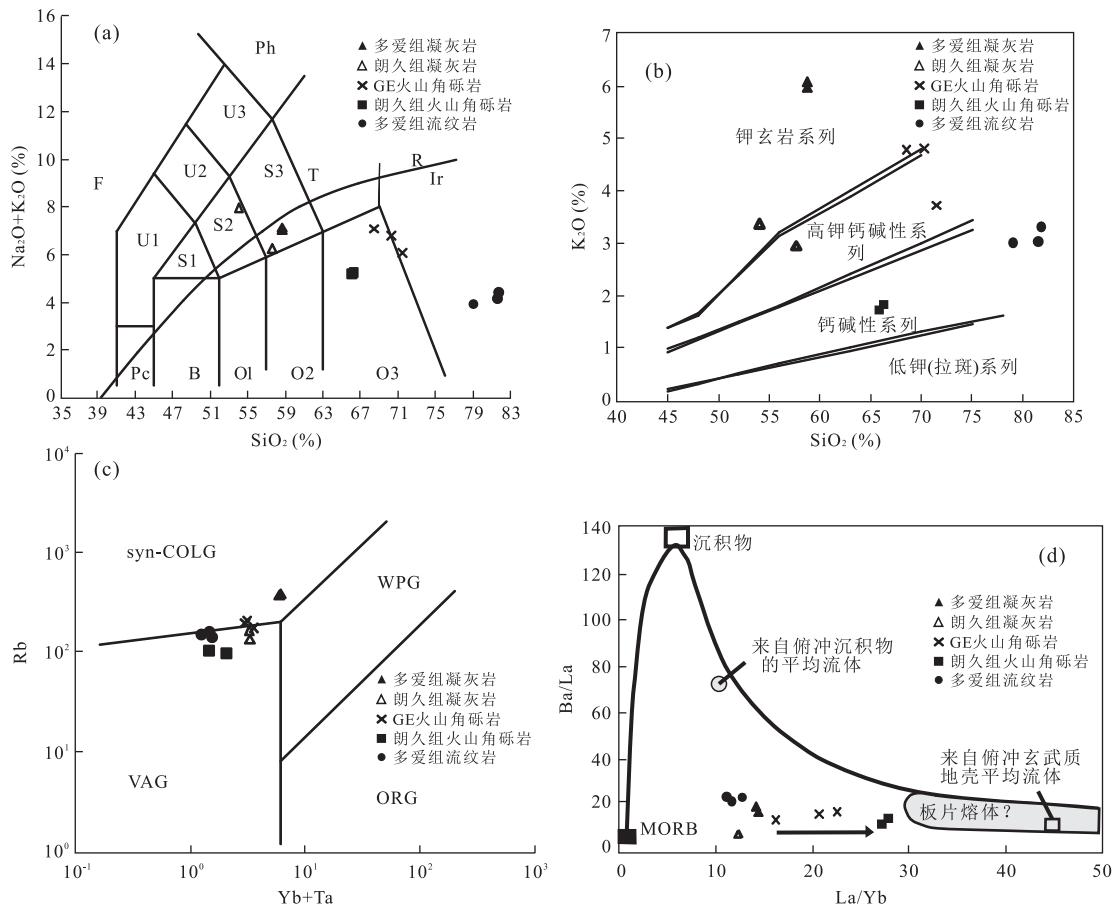


图 4 焦尔穷—嘎拉勒矿集区火山岩 TAS(a)、SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O(b)、Yb+Ta-Rb(c) 和 La/Yb-Ba/La(d) 图解

Fig.4 TAS (a)、SiO<sub>2</sub> vs. K<sub>2</sub>O (b)、Yb+Ta vs. Rb (c)、La/Yb vs. Ba/La (d) diagrams of volcanic rocks in Gaerqiong-Galale ore district  
图 d 底图据朱弟成等(2006)

熔融过程中作为难熔残余相存在的原因,但笔者认为 GE 火山角砾岩 Eu 负异常更多,可能是熔融后形成的岩浆中斜长石结晶分异所致。区内火山岩均无明显 Ce 异常。

#### 4.3 微量元素

矿区火山岩微量元素分析结果见表 5,从原始地幔标准化微量元素蛛网图上可以看出(图 6a),矿区火山岩相对富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素,而亏损 Ta、Nb、Yb、Ti 等高场强元素,总体上体现出弧火山岩特征(Turner *et al.*, 1996; Condie, 2001)。其中,Ba 相对于 Rb、Th 总是处于相对亏损的状态,多爱组凝灰岩、火山角砾岩及流纹岩具有较为明显的 Sr 负异常,与其具有较为明显的 Eu 负异常是比较一致的。

## 5 讨论

### 5.1 矿集区火山作用时代、归属与岩浆活动

焦尔穷—嘎拉勒铜金矿集区是班公湖—怒江缝

合带西段南缘具有代表性的碰撞期成矿事件(唐菊兴等,2013;张志等,2013a,2013b),区内分布有大量火山岩,主要岩性框架为一套比较完整的火山角砾岩(或集块岩)—凝灰岩组合。据 1:25 万狮泉河区域地质调查报告显示,区内火山岩均属于早白垩世则弄群火山岩。本次研究结果表明,朗久组火山角砾岩锆石 U-Pb 年龄为 141.70 ± 0.47 Ma(MSWD=0.43),多爱组流纹岩锆石 U-Pb 年龄为 136.80 ± 0.48 Ma(MSWD=0.79),二者为早白垩世初的火山作用形成,与区域地层相符。但值得重视的是,本次测得原定 GE 火山角砾岩锆石 U-Pb 年龄为 85.20 ± 0.53 Ma(MSWD=3.40),属于晚白垩世火山作用形成(表 5),与区域上多爱组火山岩形成时代是不符的,因此焦尔穷矿区内的火山角砾岩并不是属于多爱组地层的产物,其与焦尔穷矿区晚白垩世侵位的花岗岩体年龄及地球化学特征均非常相似(姚晓峰等,2012,2013;张志等,2013a),指示其可能为同一岩浆系统的产物,即矿区可能存在与成矿具有密切

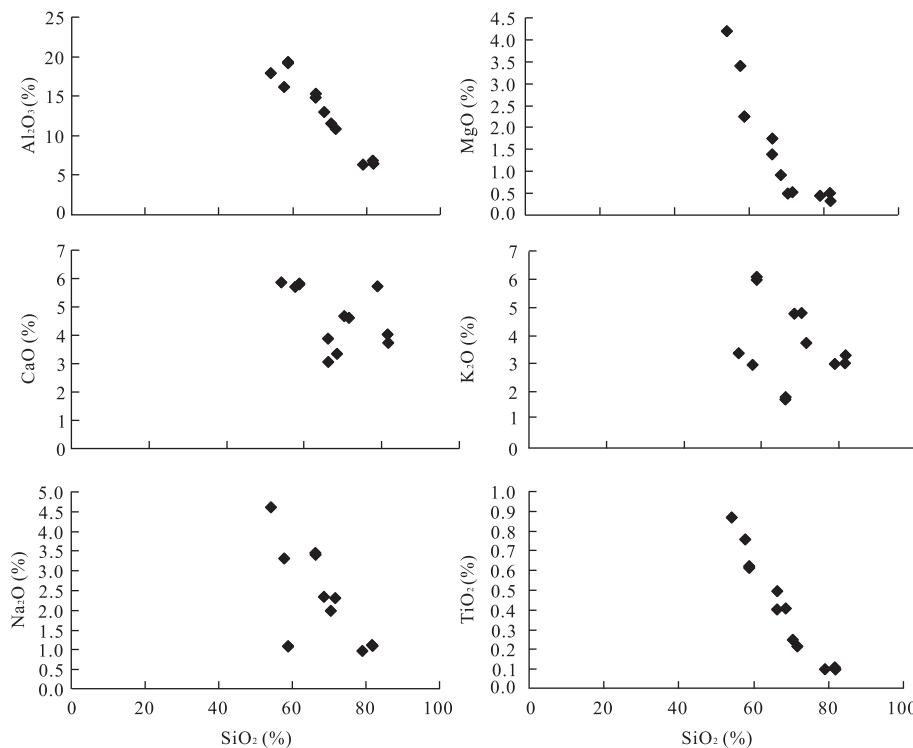


图5 尕尔穷—嘎拉勒矿集区火山岩 HarKer 图解

Fig.5 Harker diagram of volcanic rocks in Gaerqiong-Galale ore district

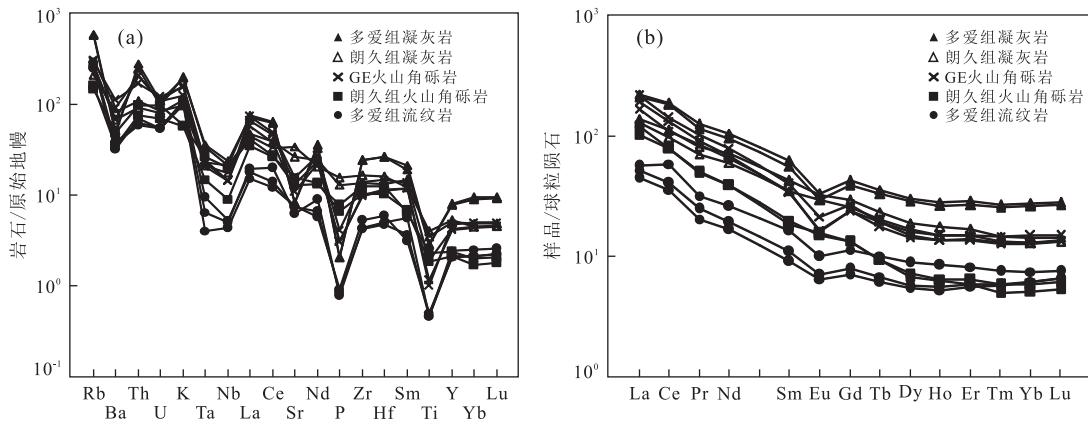


图6 尕尔穷—嘎拉勒矿集区火山岩微量元素标准化蛛网图(a)及稀土元素球粒陨石标准化配分图(b)

Fig.6 Primitive mantle normalized trace element spider diagram (a) and Chondrit-normalized REE-patterns (b) for volcanic rocks in Gaerqiong-Galale ore district

联系的由侵入岩+喷出岩组成的火山机构(图1),该火山机构的识别,对于寻找浅成低温热液型铜金矿床而言十分重要。

结合矿集区内侵入岩年代学研究,表明区内从晚侏罗世至晚白垩世大致发育有3期岩浆活动,第一期为晚侏罗世初期闪长岩侵位(156 Ma;未发表),第二期为早白垩世初的朗久组(141 Ma)与多爱组火山活动(136 Ma)以及巨斑状石英闪长岩侵位(131 Ma)(吕立娜等,2011),第三期为晚白垩世

火山活动及成矿岩体的侵位(姚晓峰等,2012,2013)。

## 5.2 岩石成因与形成环境

矿集区内火山岩缺失基性组分,均为中酸性火山岩,从微量元素蛛网图上可以看出(图6a),矿区中酸性火山岩具有十分相似的微量元素特征,均具有相对富集Rb、Th、U等大离子亲石元素(LILE),而亏损Ta、Nb、Yb、Ti等高场强元素(HFSE),具备弧火山岩特征(Turner *et al.*, 1996; Condie, 2001),

不具备典型埃达克岩地球化学特征,传统意义上的弧火山岩是以低钾、中钾钙碱性火山岩为主,朗久组火山角砾岩及多爱组流纹岩特征与其相似,但区内凝灰岩及 GE 火山角砾岩均表现出高钾甚至超钾特征,该特点与阿根廷西北部典型的大陆边缘火山岩(Cerro Llullaillao to Corrida de Cori)相似(Richards and Villeneuve, 2002);同时钾质火山岩出现更多,可能是大洋岩石圈俯冲结束、陆内汇聚开始的岩石学标志(邓晋福等,1996;莫宣学等,2003).为此,将区内火山岩样品投入  $\text{Yb} + \text{Ta-Rb}$  构造环境判别图解中(图 4c),朗久组火山角砾岩及凝灰岩、多爱组流纹岩均落入了弧花岗岩区域,但多爱组凝灰岩及火山角砾岩却大部分落入了同碰撞花岗岩区域,表明二者并非同一火山—岩浆系统的产物,前者可能产出于较为传统的岛弧环境,而后者则与班公湖—怒江特提斯洋消亡后陆—陆碰撞环境有关,只是其保留了弧火山岩的某些地球化学特征.一种可能的解释是岩浆源区存在角闪石、金红石等难熔残余,在部分熔融过程中,Nb、Ta 优先进入角闪石晶格,Ti 进入金红石晶格,从而造成 Nb、Ta、Ti 在岩浆中呈亏损状态(Rollison, 1993),这种源区在非俯冲带的地壳环境也是可以存在的(莫宣学等,2003),该特点与印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应特征及区内碰撞期侵位的侵入岩地球化学特征相似(莫宣学等,2003;张志等,2013a).

现今区域关于班公湖—怒江缝合闭合的时限问题仍然存在争论(Kapp *et al.*, 2003; 朱弟成等, 2006; 曲晓明等 2012),从现有研究资料来看,尽管早白垩世初碰撞闭合的观点具有来自地质年代学及地球化学方面的证据(Kapp *et al.*, 2003; 曲晓明等 2012),但同时也有较多该方面的证据表明班公湖—怒江缝合带闭合的时间可能会推迟到早白垩世中晚期(朱弟成等, 2006; Kapp *et al.*, 2007; 康志强等, 2008, 2010; 高顺宝等, 2011; 赵元艺等, 2011; Zhu *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2014; 罗亮等, 2014; 张硕等, 2014).结合本区火山岩地球化学特征显示,本区早白垩世初的火山岩显示明显的岛弧火山岩特征,因此笔者更倾向于认为本区于早白垩世初仍处于俯冲环境,而晚白垩世火山角砾岩则是陆—陆碰撞的产物.

区内广泛分布的火山岩大部分属于长英质火山岩,那么该长英质火山岩是怎么形成的呢?一般认为该类火山岩有两种可能的成因:一种是幔源基性岩浆经历广泛结晶分异和同化混染作用的产物(Ba-

con and Druitt, 1988; Ingle *et al.*, 2002);另一种是来自幔源基性岩浆的热量促使地壳物质脱水发生重熔的产物(Guffanti *et al.*, 1996),其主要特征是 Al、Th、LREE 比较富集.从目前的岩石地球化学资料来看,区内长英质火山岩很可能主要与地壳重熔有关,但个别火山岩可能兼有幔源基性岩浆的同化混染(朗久组火山角砾岩).主要表现为:(1)区内主要分布中酸性火山角砾岩及凝灰岩,次要为流纹岩及少量英安岩,基本不见基性岩浆活动,且除 GE 火山角砾岩及凝灰岩外,其余火山岩均没有或仅具有弱的负 Eu 异常,因此幔源基性岩浆广泛结晶分异的可能性较小.(2)La/Yb 可以指示地壳的厚度并反映岩浆来源的深度(康志强等, 2009),区内岩火山 La/Yb 比值都较高,暗示其形成于地壳抬升或加厚环境.其中朗久组火山角砾岩 La/Yb 比值较高(高达 29),其余火山岩则相对较低,指示其岩浆来源深度相对较深.在 La/Yb-Ba/La 图解上可以看出(图 4d),朗久组火山角砾岩具有明显的靠近俯冲板片熔体成分特征,并且 Cr、Ni 含量明显高于其余火山岩类,暗示其源区可能具有受到俯冲板片流体交代过的地幔楔熔体的加入,但其并不具备明显的 Ce 负异常,表明俯冲沉积物组分的贡献很小,且 Th 含量非常高,表明其主要成分地壳物质(Sun *et al.*, 2004).(3)从火山岩  $Mg^{\#}$  值来看,区内火山岩分为两种,GE 火山角砾岩  $Mg^{\#}$  值较低(平均值 33.87),其余火山岩  $Mg^{\#}$  值均较高(均大于 50.00),指示 GE 火山角砾岩形成环境与其余火山岩不一致.一般认为低的  $Mg^{\#}$  值是由下地壳部分熔融形成( $Mg^{\#}$  小于 40)(Atherton and Petford, 1993),因此 GE 火山角砾岩可能源于南羌塘陆块与北冈底斯陆块碰撞过程中下地壳部分熔融形成.(4)多爱组流纹岩具有明显的低 REE 和高  $\text{SiO}_2$  含量特征,其  $\text{SiO}_2$  含量在 78.98%~81.78% 之间,但稀土含量很低,ΣREE 介于 49.3~75.5 之间,表明岩浆源区应为地壳长英质源岩经低熔产生的岩浆,但不能完全排除富含 REE 的副矿物(如榍石)分离结晶的贡献.

### 5.3 区域构造演化及其火山作用响应

班公湖—怒江缝合带构造演化一直以来是地质学界争论的焦点,从最开始的单向俯冲至目前的双向俯冲(Pearce and Deng, 1988; Kapp *et al.*, 2003, 秦克章等, 2006; 李光明等, 2007),缝合带构造演化的神秘面纱被逐步揭开,现今关于班—怒洋在中侏罗世向南向北双向俯冲的观点基本已得到大多数学者的认同(许荣科等, 2007; 李金祥等, 2008; 康志强

等,2010;杜德道等,2011;耿全如等,2011;曲晓明等,2012,2013),但俯冲至碰撞闭合的时限至今不得定论,主要争论在于晚侏罗世末—早白垩世初缝合带是否已闭合问题上。早期研究表明缝合带早在早白垩世初就已碰撞闭合(Kapp *et al.*,2003),并得到了后期班戈—申扎一带A型花岗岩年代学及地球化学特征的证明(曲晓明等,2012,2013)。但近来也有研究表明,班公湖—怒江缝合带闭合时间可能延迟到早白垩世中晚期,主要证据性研究资料包括:拉萨地块北部尼玛地区在125~118 Ma之间地层出现海相至陆相转变的记录(Kapp *et al.*,2007),表明尼玛地区118 Ma左右可能进入陆—陆汇聚阶段;李金祥等(2008)对改则县境内多不杂斑岩铜矿成岩成矿年代学及地球化学研究表明该区于120 Ma左右仍然处于俯冲环境;高顺宝等(2011)对班戈县境内早白垩世至晚白垩世4期侵入岩进行了年代学及地球化学特征详细研究,认为班戈地区早白垩世初仍然处于俯冲环境,碰撞闭合的时间应在白垩世中期(125 Ma左右);康志强等(2009,2010)对拉萨地块北部早白垩世多尼组、去申拉组等火山岩年代学及地球化学研究表明早白垩世初区域上可能处于班公湖—怒江洋南向俯冲环境;赵元艺等(2011)对申扎县内舍索铜矿成岩成矿年代学及地球化学特征研究表明该地区在116 Ma左右尚处于俯冲环境;拉萨地块中北部在113 Ma左右存在带状岩浆爆发事件,并在申扎县内获得了表明班公湖—怒江洋壳于此时发生过与俯冲板片角度变陡相关的板片断离的地质年代学及地球化学证据(张亮亮等,2011;Zhu *et al.*,2011),表明缝合带于110 Ma左右进入了陆—陆主碰撞环境(侯增谦等,2006a;Zhu *et al.*,2009,2011),这与区域上120 Ma左右成矿事件的年代学、地球化学及成矿构造背景研究结果具有较好的承接关系(李金祥等,2008;Li *et al.*,2011;赵元艺等,2011),表明区域上在这段时间内完成了俯冲至碰撞的转换过程;Li *et al.*(2014)通过对南羌塘中酸性侵入岩进行地球化学、锆石年代学及Hf同位素研究表明班公湖—怒江特提斯洋壳从俯冲至碰撞时限为170~110 Ma。综合前述研究资料表明,班公湖—怒江缝合带构造演化是一个复杂的问题,其并非简单的一个年龄所能判别,缝合带多岛弧盆系统从东至西各区域构造演化时限很可能是不一致的,从现有研究资料所立足的地域性限制程度来看,班公湖—怒江缝合带整体上于早白垩世中晚期碰撞闭合(120~110 Ma之间)的观点更具有合理性。

本次研究识别出了晚白垩世火山作用,曲晓明等(2006)及辛洪波等(2007)通过对措勤地区90~88 Ma的日阿铜矿双峰式火山岩的研究指示拉萨地块中北部在早白垩世初期为碰撞后伸展环境,鉴于班公湖—怒江缝合带南缘90 Ma左右为一个重要成矿期,因此对于该时期火山岩浆活动形成构造背景研究至关重要。本次研究表明,区内晚白垩世火山活动不具备双峰式火山岩特征,区内现今为止并未发现与缝合带垂直的高角度正断层或走滑构造,区内基性岩浆活动缺失,且地球化学特征研究表明此时正处于地壳加厚环境,因此区内火山岩浆活动源区更多可能来自于加厚的地壳熔融而并非伸展背景下垮塌或拆沉地壳的部分熔融,表明区内90 Ma左右的火山岩浆活动可能形成于晚碰撞或后碰撞早期挤压环境,该结论与其具有钾质火山岩地球化学特征是相符的(侯增谦等,2006b),且与近来区域上研究显示晚白垩世拉萨地块北部地壳存在强烈缩短的研究结果是一致的(Kapp *et al.*,2003,2005;Volkmer *et al.*,2007)。区域性的碰撞后伸展作用可能在80 Ma左右开始,并形成了一些列南北向或东西向的中酸性脉岩(江军华等,2011)。

班公湖—怒江缝合带南缘(或冈底斯北缘)从西至东均分布有大量中生代火山岩,已有研究资料表明该区域大面积分布的白垩纪火山岩应为班公湖—怒江特提斯洋南向俯冲产生而并非新特提斯洋北向低角度俯冲的产物,但总体研究较弱且缺乏更多精确的年代学数据佐证。康志强等(2009,2010)分别对拉萨地块北部的白垩纪去申拉组火山岩及多尼组火山岩进行了岩石地球化学研究,认为它们都是属于典型的岛弧火山岩,是班公湖—怒江特提斯洋南向俯冲的产物;朱弟成等(2008)对缝合带南缘措勤地区则弄群火山岩进行了锆石U-Pb年代学研究,指出措勤地区则弄群火山岩作用开始于130 Ma,停息于110 Ma,持续时间约为20 Ma,区域上东西延伸约1 000 km的则弄群火山岩作用同时发生在130 Ma左右;康志强等(2009,2010)对位于格仁错南岸的尼阿节附近的则弄群火山岩进行了锆石U-Pb年代学及地球化学进行研究,结果表明该地区火山作用发生于早白垩世中期(113.6 Ma),地球化学特征显示为Slainajap洋在早白垩世向南俯冲消减的产物。除上述研究外,缝合带南缘确定的与班公湖—怒江特提斯洋南向俯冲相关的火山活动已无更多精确的年代学数据,仅130~110 Ma的火山作用显然不能完全揭示班—怒洋南向俯冲至碰撞的火山

作用响应。本次研究不仅识别出了早白垩世初的火山作用(多爱组流纹岩与朗久组火山角砾岩),更首次识别出了区域上晚白垩世火山作用(尕尔穷矿区 GE 火山角砾岩)。结合区域上已有的火山岩研究资料表明,则弄群火山作用至少在早白垩世初便已开始,至早白垩世中晚期均有较为连续的火山作用,持续时间约为 30 Ma(140~110 Ma),于构造背景上表现为对班公湖—怒江特提斯洋南向俯冲过程中的火山作用响应,之后火山作用有所停歇,伴随班—怒洋俯冲结束进入南羌塘陆块与冈底斯陆块汇聚阶段,又发生了晚白垩世挤压背景下的火山作用响应(85 Ma)。

前述研究已表明晚尕尔穷矿区白垩世火山作用与区内已勘查评价出的成矿事件相伴随的侵入岩年龄相当(姚晓峰等,2012,2013),且地球化学特征相似,表明二者可能为同一火山岩浆系统的产物,尽管该时期的火山作用是否与成矿具有某种程度的耦合关系还需要进一步研究,但不可否认其存在与成矿岩体实为同源产物的巨大可能性。因此,晚白垩世火山作用或许将是矿集区内及区域上 90 Ma 左右成矿事件的重要找矿标志。

## 6 结论

(1)通过精确地锆石 U-Pb 年代学研究,获得区内朗久组火山角砾岩年龄为  $141.70 \pm 0.47$  Ma,多爱组流纹岩年龄为  $136.80 \pm 0.48$  Ma,形成时代为早白垩世初期,属于班公湖—怒江洋南向俯冲的火山作用响应;尕尔穷矿区 GE 火山角砾岩成岩年龄为  $85.20 \pm 0.53$  Ma,形成时代为晚白垩世,不属于早白垩世多爱组火山岩,属于洋盆消亡后羌塘地体与冈底斯地体汇聚阶段的火山作用产物。

(2)岩石地球化学特征表明,区内火山岩均具有相对富集 Rb、Th、U 等大离子亲石元素(LILE),而亏损 Ta、Nb、Yb、Ti 等高场强元素(HFSE)的特征,显示出弧火山岩特性。

(3)结合区域已有火山岩研究资料表明,在班公湖—怒江洋南向俯冲过程中,从早白垩世初至中晚期均有比较连续的火山作用,持续时间约为 30 Ma(140~110 Ma);在班公湖—怒江洋盆消亡后的羌塘陆块与冈底斯陆块汇聚阶段,又伴随有晚白垩世火山作用的发生,该期火山作用与区内成矿岩体年龄相当,可能为同一火山岩浆系统的产物,其为矿集区内及区域上 90 Ma 左右成矿事件的重要找矿

标志。

致谢:野外工作中得到了西藏地质二队何林工程师的大力帮助,室内工作得到了成都理工大学李志军老师的悉心指导,在此一并表示诚挚的感谢!同时感谢评审专家和编辑部老师提出的宝贵修改意见!

## References

- Altherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362: 144—146. doi: 10.1038/362144a0
- Bacon, C. R., Druitt, T. H., 1988. Compositional Evolution of the Zoned Calcalkaline Magma Chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 98 (2): 224—256. doi: 10.1007/BF00402114
- Condé, K.C., 2001. Mantle Plumes and Their Record in Earth History. Cambridge University Press, London.
- Coulon, C., Maluski, H., Bollinger, C., et al., 1986. Mesozoic and Cenozoic Volcanic Rocks from Central and Southern Tibet:  $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$  Dating, Petrological Characteristics and Geodynamical Significance. *Earth and Planetary Science Letters*, (79): 281—302. doi: 10.1016/0012-821X(86)90186-X
- Croft, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W., et al., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews Mineral Geochemistry*, 53 (1): 469—495. doi: 10.2113/0530469
- Deng, J. F., Zhao, H. L., Mo, X. X., et al., 1996. Continental Roots-Plume Tectonics of China: Key to the Continental Dynamics. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Deng, S. L., Tang, J. X., Li, Z. J., et al., 2011. Geochemical Characteristics of Rock Mass in the Gaerqiong Cu-Au Deposit, Tibet. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 38(1): 85—91 (in Chinese with English abstract).
- Du, D. D., Qu, X. M., Wang, G. H., et al., 2011. Bidirectional Subduction of the Middle Tethys Oceanic Basin in the West Segment of Bangonghu-Nujiang Suture, Tibet: Evidence from Zircon U-Pb LAICPMS Dating and Petrogeochemistry of Arc Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1993—2002 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S., Liu, X. M., Yuan, H. L., et al., 2002. Determination of Forty-Two Major and Trace Elements of USGS and NIST SRM Glasses by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostand. Newslett.*, 26 (2): 181—196, doi: 10.1111/j.1751—908X.2002.

tb00886.x

Gao, S.B., Zheng, Y.Y., Wang, J.S., et al., 2011. The Geochronology and Geochemistry of Intrusive Rocks in Bange Area: Constraints on the Evolution Time of the Bangong Lake-Nujiang Ocean Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7):1973—1982 (in Chinese with English abstract).

Geng, Q.R., Pan, G.T., Wang, L.Q., et al., 2011. Tethyan Evolution and Metallogenic Geological Background of the Bangong Co-Nujiang Belt and the Qiangtang Massif in Tibet. *Geological Bulletin of China*, 30(8):1261—1274 (in Chinese with English abstract).

Guffanti, M., Clyne, M.A., Muffler, L.J.P., 1996. Thermal and Mass Implications of Magmatic Evolution in the Lassen Volcanic Region, California, and Constraint on Basalt Influx to the Lower Crust. *Journal of Geophysical Research*, 101(B2): 3001—3013. doi: 10.1029/95JB03463

Hou, K.J., Li, Y.H., Tian, Y.R., 2009. In Situ U-Pb Zircon Dating Using Laser Ablation-Multi Ion Counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481—492 (in Chinese with English abstract).

Hou, Z.Q., Yang, Z.S., Xu, W.Y., et al., 2006a. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: I. Mineralization in Main Collisional Orogenic Setting. *Mineral Deposits*, 25(4):337—358 (in Chinese with English abstract).

Hou, Z.Q., Pan, G.T., Wang, A.J., et al., 2006b. Metallogenesis in Tibetan Collisional Orogenic Belt: II. Mineralization in Late-Collisional Transformation Setting. *Mineral Deposits*, 25(5):521—543 (in Chinese with English abstract).

Hsü, K.J., Pan, G.T., Sengör, A.M.C., 1995. Tectonic Evolution of the Tibetan Plateau: A Working Hypothesis Based on the Archipelago Model of Orogenesis. *International Geology Review*, 37(6):473—508. doi: 10.1080/00206819509465414

Hu, Z.H., Ding, F., Tang, J.X., et al., 2012. Geological Characteristics and Genetic Significance of Ga'erqiong Cu-Au Deposits in Ge'gyai County, Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4):588—600 (in Chinese with English abstract).

Ingle, S., Weis, D., Frey, F.A., 2002. Indian Continental Crust Recovered from Elan Bank, Kerguelen Plateau (ODP Leg 183, Site 1137). *Journal of Petrology*, 43:1241—1257. doi: 10.1093/petrology/43.7.1241

Jiang, J.H., Wang, R.J., Qu, X.M., et al., 2011. Crustal Extension of the Bangong Lake Arc Zone, Western Tibetan Plateau, after the Closure of the Tethys Oceanic Basin.

*Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(6): 1021—1032 (in Chinese with English abstract).

Kang, Z.Q., Xu, J.F., Dong, Y.H., et al., 2008. Cretaceous Volcanic Rocks of Zenong Group in North-Middle Lhasa Block: Products of Southward Subducting of the Slainajap Ocean? *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 303—314 (in Chinese with English abstract).

Kang, Z.Q., Xu, J.F., Wang, B.D., et al., 2009. Geochemistry of Cretaceous Volcanic Rocks of Duoni Formation in Northern Lhasa Block: Discussion of Tectonic Setting. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 89—104 (in Chinese with English abstract).

Kang, Z.Q., Xu, J.F., Wang, B.D., et al., 2010. Qushenla Formation Volcanic Rocks in North Lhasa Block: Products of Bangong Co-Nujiang Tethys's Southward Subduction. *Acta Petrologica Sinica*, 26(10):3106—3116 (in Chinese with English abstract).

Kapp, P., DeCelles, P.G., Gehrels, G.E., et al., 2007. Geological Records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian Collisions in the Nima Area of Central Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7):917—932. doi: 10.1130/B26033.I

Kapp, P., Murphy, M.A., Yin, A., et al., 2003. Mesozoic and Cenozoic Tectonic Evolution of the Shiquanhe Area of Western Tibet. *Tectonics*, 22(4): 1029. doi: 10.1029/2001TC001332

Kapp, P., Yin, A., Harrison, T.M., et al., 2005. Cretaceous-Tertiary Shortening, Basin Development, and Volcanism in Central Tibet. *Geological Society of America Bulletin*, 117(7/8):865—878. doi: 10.1130/B25595.1

Leier, A.L., Kapp, P., DeCelles, P.G., et al., 2007. Lower Cretaceous Strata in the Lhasa Terrane, Tibet, with Implications for Understanding the Early Tectonic History of the Tibetan Plateau. *Journal of Sedimentary Research*, 77:809—825. doi: 10.2110/jsr.2007.078

Li, G.M., Li, J.X., Qin, K.Z., et al., 2007. High Temperature, Salinity and Strong Oxidation Ore-Forming Fluid at Duobuza Gold-Rich Porphyry Copper Deposit in the Bangonghu Tectonic Belt, Tibet: Evidence from Fluid Inclusions. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):935—952 (in Chinese with English abstract).

Li, G.M., Li, J.X., Qin, K.Z., et al., 2011. Geology and Hydrothermal Alteration of the Duobuza Gold-Rich Porphyry Copper District in the Bangongco Metallogenic Belt, Northwestern Tibet. *Resource Geology*, 62(1):99—118. doi: 10.1111/j.1751—3928.2011.00182.x

- Li, J. X., Li, G. M., Qin, K. Z., et al., 2008. Geochemistry of Porphyries and Volcanic Rocks and Ore-Forming Geochronology of Duobuza Gold-Rich Porphyry Copper Deposit in Bangonghu Belt, Tibet: Constraints on Metallogenetic Tectonic Settings. *Acta Petrologica Sinica*, 24 (3): 531—543(in Chinese with English abstract).
- Li, J. X., Qin, K. Z., Li, G. M., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry, and Zircon Hf Isotopic Compositions of Mesozoic Intermediate-Felsic Intrusions in Central Tibet: Petrogenetic and Tectonic Implications. *Lithos*, 198: 77—91.doi:10.1016/j.lithos.2014.03.025
- Li, Z. J., Tang, J. X., Yao, X. F., et al., 2011a. Geological Characteristics and Prospecting Potential of Gaerqiong Copper-Gold Polymetallic Deposit in Ali District, Northern Tibet. *Mineral Deposits*, 30(6): 1149—1153 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. J., Tang, J. X., Yao, X. F., et al., 2011b. Re-Os Isotope Age and Geological Significance of Molybdenite in the Gaerqiong Cu-Au Deposit of Geji, Tibet, China. *Journal of Chengdu University of Technology(Science & Technology Edition)*, 38(6): 678—683 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. M., Gao, S., Yuan, H. L., et al., 2002. Analysis of 42 Major and Trace Elements in Glass Standard Reference Materials by 193 nm LA-ICPMS. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3): 408—418 (in Chinese with English abstract).
- Lü, L. N., Cui, Y. B., Song, L., et al., 2011. Geochemical Characteristics and Zircon LA-ICP-MS U-Pb Dating of Galale Skarn Gold(Copper) Deposit, Tibet and Its Significance. *Earth Science Frontiers*, 18(5): 224—242 (in Chinese with English abstract).
- Luo, L., An, X. Y., Wu, N. W., et al., 2014. Evolution of Neoproterozoic-Mesozoic Sedimentary Basins in Bangonghu-Shuanghu-Nujiang-Changning-Menglian Suture Zone. *Earth Science—Journal of China University of Sciences*, 39(8): 1169—1184 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Dong, G. C., Zhao, Z. D., et al., 2005. Spatial and Temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution. *Geological Journal of China Universities*, 11(3): 281—290 (in Chinese with English abstract).
- Mo, X. X., Zhao, Z. D., Deng, J. F., et al., 2003. Research of Volcanism to the India-Asia Collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135—148 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Mo, X. X., Hou, Z. Q., et al., 2006. Spatial-Temporal Framework of the Gangdese Orogenic Belt and Its Evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521—533 (in Chinese with English abstract).
- Pan, G. T., Wang, L. Q., Zhu, D. C., 2004. Thoughts on Some Important Scientific Problems in Regional Geological Survey of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 23(1): 12—19 (in Chinese with English abstract).
- Pearce, J. A., Deng, W. M., 1988. The Ophiolites of the Tibet Geotraverses, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu(1986). *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. Math. Phys. Sci.*, 327 (1594): 215—238. doi: 10.1098/rsta. 1988.0127
- Qin, K. Z., Li, G. M., Zhang, Q., et al., 2006. Metallogenetic Conditions and Possible Occurrences for Epithermal Gold Mineralizations in Gangdese and Bangonghu Belts, Tibet—In View of Porphyry-Epithermal Cu-Au Metallogenetic Systematic. In: Chen, Y. C., Mao, J. W., Xue, C. J., eds., Proceedings of 8th National Conference of Mineral Deposits, China. Geological Publishing House, Beijing, 666—670 (in Chinese).
- Qu, X. M., Xin, H. B., Du, D. D., et al., 2012. Ages of Post-Collisional A-Type Granite and Constraints on the Closure of the Oceanic Basin in the Middle Segment of the Bangonghu-Nujiang Suture, the Tibetan Plateau. *Geochimica*, 41(1): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Xin, H. B., Du, D. D., et al., 2013. Magma Source of the A-Type Granite and Slab Break-Off in the Middle Segment of the Bangonghu-Nujiang Suture, Tibet Plateau. *Acta Geologica Sinica*, 87(6): 759—772 (in Chinese with English abstract).
- Qu, X. M., Xin, H. B., Xu, W. Y., et al., 2006. Discovery and Significance of Copper-Bearing Bimodal Rock Series in Coqin Area of Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 707—716 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. S., Xiao, L. W., 2004. Lifting the Mysterious Veil of the Tectonics of the Qinghai-Tibet Plateau by 1 : 250 000 Geological Mapping. *Geological Bulletin of China*, 23(1): 1—11 (in Chinese with English abstract).
- Richards, J. P., Villeneuve, M., 2002. Characteristics of Late Cenozoic Volcanism along the Archibarca Lineament from Cerro Lluallaco to Corrida de Cori, Northwest Argentina. *Vocalon. Geotherm. Res.*, 116(3—4): 161—200.doi:10.1016/S0377—0273(01)00329—8
- Rollinson, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Group UK Ltd.,

- New York.
- Song, B., Zhang, Y.H., Wan, Y.S., et al., 2002. Mount Making and Procedure of the SHRIMP Dating. *Geological Review*, 48(Suppl.): 26—30 (in Chinese with English abstract).
- Sun, W.D., Bennetta, V.C., Kamenetsky, V.S., et al., 2004. The Mechanism of Re Enrichment in Arc Magmas: Evidence from Lau Basin Basaltic Glasses and Primitive Melt Inclusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 222(1): 101—114, doi:10.1016/j.epsl.2004.02.011
- Tang, J.X., Sun, X.G., Ding, S., et al., 2014. Discovery of the Epithermal Deposit of Cu(Au-Ag) in the Duolong Ore Concentrating Area, Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(1): 6—10 (in Chinese with English abstract).
- Tang, J.X., Zhang, Z., Li, Z.J., et al., 2013. The Metallogenic Regularity, Deposit Model and Prospecting Direction of the Ga'erqiong-Galale Copper-Gold Ore Field, Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(4): 385—394 (in Chinese with English abstract).
- Turner, S., Arnaud, N., Liu, J., et al., 1996. Post-Collision, Shoshonitic Volcanism on the Tibetan Plateau: Implications for Convective Thinning of the Lithosphere and the Source of Ocean Island Basalts. *Petrology*, 37(1): 45—71, doi:10.1093/petrology/37.1.45
- Volkmer, J. E., Kapp, P., Guynn, J. H., et al., 2007. Cretaceous-Tertiary Structural Evolution of the North Central Lhasa Terrane, Tibet. *Tectonics*, 26: TC6007, doi:10.1029/2005TC001832
- Wu, Y.B., Zheng, Y.F., 2004. Minerageny of Zircon and Its Restrict on the Explanation for U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese).
- Xin, H.B., Qu, X.M., Ren, L.K., et al., 2007. The Material Source and Genesis of Copper-Bearing Bimodal Rock Series in Coqin County, Western Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 81(7): 939—945 (in Chinese with English abstract).
- Xu, R.K., Zheng, Y.Y., Zhao, P.J., et al., 2007. Definition and Geological Significance of the Gacangjian Volcanic Arc North of Dongqiao, Tibet. *Geology in China*, 34(5): 768—777 (in Chinese with English abstract).
- Yao, X.F., Tang, J.X., Li, Z.J., et al., 2012. Magma Origin of Two Plutons from Ga'erqiong Copper-Gold Deposit and Its Geological Significance, Western Bangonghu-Nujiang Metallogenic Belt, Tibet: Implication from Hf Isotope Characteristics. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(Suppl. 2): 188—197 (in Chinese with English abstract).
- Yao, X.F., Tang, J.X., Li, Z.J., et al., 2013. The Redefinition of the Ore-Forming Porphyry's Age in Ga'erqiong Skarn-Type Gold-Copper Deposit, Western Bangong Lake-Nujiang River Metallogenic Belt, Xizang (Tibet). *Geological Review*, 59(1): 193—200 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H.L., Wu, F.Y., Gao, S., et al., 2003. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and REE of Cenozoic Pluton in NE China. *Chinese Science Bulletin*, 48(14): 1511—1520 (in Chinese).
- Zhang, L.L., Zhu, D.C., Zhao, Z.D., et al., 2011. Early Cretaceous Granitoids in Xainza, Tibet: Evidence of Slab Break-Off. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1938—1948 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S., Shi, H.F., Hao, H.J., et al., 2014. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Late Cretaceous Adakites in Bangong Lake, Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 39(5): 509—524 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Chen, Y.C., Tang, J.X., et al., 2013c. Geological and Skarn Mineral Characteristics of Galale Cu-Au Deposit in Tibet. *Mineral Deposits*, 32(5): 915—931 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Tang, J.X., Li, Z.J., et al., 2013a. Petrology and Geochemistry of Intrusive Rocks in the Ga'erqiong-Galale Ore Concentration Area, Tibet and Their Geological Implications. *Geology and Exploration*, 49(4): 676—688 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Tang, J.X., Chen, Y.C., et al., 2013b. Skarn Mineral Characteristics of the Ga'erqiong Cu-Au Deposit in Bangong Co-Nujiang River Suture Zone, Tibet. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(3): 305—317 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z., Tang, J.X., Yang, Y., et al., 2012. Element Spatial Distribution of the Ga'erqiong Copper-Gold Deposit in Tibet and Its Geochemical Exploration Model. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 663—672 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y.Y., Cui, Y.B., Lü, L.N., et al., 2011. Chronology, Geochemical Characteristics and the Significance of Shesuo Copper Polymetallic Deposit, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 2132—2142 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, T., Chen, C., Liang, S., et al., 2014. Zircon U-Pb Geochronology and Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks in the Ophiolite Mélange at the Bangong Lake, Tibet. *Geotectonica et Metallogenesis*, 38(1): 157—167 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.C., Mo, X.X., Zhao, Z.D., et al., 2008. Zircon U-Pb Ge-

- ochronology of Zenong Group Volcanic Rocks in Coqin Area of the Gangdese, Tibet and Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 401—412 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.C., Pan, G.T., Mo, X.X., et al., 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous Geodynamic Setting in Middle-Northern Gangdese: New Insights from Volcanic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 534—546 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Niu, Y.L., et al., 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. doi: 10.1016/j.epsl.2010.11.005
- Zhu, D.C., Zhao, Z.D., Pan, G.T., et al., 2009. Early Cretaceous Subduction-Related Adakite-Like Rocks of the Gangdese Belt, Southern Tibet: Products of Slab Melting and Subsequent Melt-Peridotite Interaction? *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3): 298—309, doi: 10.1016/j.jseaes.2008.05.003
- ## 附中文参考文献
- 邓晋福,赵海玲,莫宣学,等,1996.中国大陆根柱构造—大陆动力学的钥匙.北京:地质出版社,1—110.
- 邓世林,唐菊兴,李志军,等,2011.西藏尕尔穷铜金矿床岩体地球化学特征.成都理工大学学报(自然科学版),38(1):85—91.
- 杜德道,曲晓明,王根厚,等,2011.西藏班公湖—怒江缝合带西段中特提斯洋盆的双向俯冲:来自岛弧型花岗岩锆石U-Pb年龄和元素地球化学的证据.岩石学报,27(7):1993—2002.
- 高顺宝,郑有业,王进寿,等,2011.西藏班戈地区侵入岩年代学和地球化学对班公湖—怒江洋盆演化时限的制约.岩石学报,27(7):1973—1982.
- 耿全如,潘桂堂,王立全,等,2011.班公湖—怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景.地质通报,30(8): 1261—1274.
- 侯可军,李延河,田有荣,2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术.矿床地质,28(4):481—492.
- 侯增谦,杨竹森,徐文艺,等,2006a.青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用.矿床地质,25(4):337—358.
- 侯增谦,潘桂堂,王安建,等,2006b.青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用.矿床地质,25(5):521—543.
- 胡正华,丁枫,唐菊兴,等,2012.西藏革吉县尕尔穷铜金矿床地质特征及其成因意义.地球学报,33(4): 588—600.
- 江军华,王瑞江,曲晓明,等,2011.青藏高原西部班公湖岛弧带特提斯洋盆闭合后的地壳伸展作用.地球科学——中国地质大学学报,36(6):1021—1032.
- 康志强,许继峰,董彦辉,等,2008.拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩:Slainajap 洋南向俯冲的产物? 岩石学报, 24(2):303—314.
- 康志强,许继峰,王保弟,等,2009.拉萨地块北部白垩纪多尼组火山岩的地球化学:形成的构造环境.地球科学——中国地质大学学报,34(1):89—104.
- 康志强,许继峰,王保第,等,2010.拉萨地块北部去申拉组火山岩:班公湖—怒江特提斯洋南向俯冲的产物.岩石学报,026(10):3106—3116.
- 李光明,李金祥,秦克章,等,2007.西藏班公湖带多不杂超大型富金斑岩铜矿的高温高盐高氧化成矿流体——流体包裹体证据.岩石学报,23(5):935—952.
- 李金祥,李光明,秦克章,等,2008.班公湖带多不杂富金斑岩铜矿床斑岩—火山岩的地球化学特征与时代:对成矿构造背景的制约.岩石学报,24(3):531—543.
- 李志军,唐菊兴,姚晓峰,等,2011a.藏北阿里地区新发现的尕尔穷铜金多金属矿床地质特征及其找矿前景.矿床地质,30(6):1149—1153.
- 李志军,唐菊兴,姚晓峰,等,2011b.班公湖—怒江成矿带西段尕尔穷铜金矿床辉钼矿 Re-Os 年龄及其地质意义.成都理工大学学报(自然科学版),38(6):678—683.
- 柳小明,高山,袁洪林,等,2002.193nm LA-ICP-MS 对国际地质标准参考物质中 42 种主量和微量元素的分析.岩石学报,18(3):408—418.
- 罗亮,安显银,吴年文,等,2014.班公湖—双湖—怒江—昌宁—孟连新元古代—中生代沉积盆地演化.地球科学——中国地质大学学报,39(8):1169—1184.
- 吕立娜,崔玉斌,宋亮,等,2011.西藏嘎拉勒夕卡岩型金(铜)矿床地球化学特征与锆石的 LA-ICP-MA 定年及意义.地学前缘,18(5):224—242.
- 莫宣学,董国臣,赵志丹,等,2005.西藏冈底斯带花岗岩的时空分布特征及地壳生长演化信息.高校地质学报,11(3):281—290.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等,2003.印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应.地学前缘,10(3):135—148.
- 潘桂堂,莫宣学,侯增谦,等,2006.冈底斯造山带的时空结构及演化.岩石学报,22(3):521—533.
- 潘桂堂,王立全,朱弟成,2004.青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考.地质通报,23(1):12—19.
- 秦克章,李光明,张旗,等,2006.西藏浅成低温金—银矿的成矿条件与可能产出区分析——从斑岩—浅成低温铜金成矿系统的角度.见:陈毓川,毛景文,薛春纪(主编),第八届全国矿床会议论文集.北京:地质出版社,666—670.
- 曲晓明,辛洪波,杜德道,等,2012.西藏班公湖—怒江缝合带中段碰撞后 A 型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束.地球化学,41(1):1—14.
- 曲晓明,辛洪波,杜德道,等,2013.西藏班公湖—怒江缝合带

- 中断 A-型花岗岩的岩浆源区与板片断离.地质学报,87(6):759—772.
- 曲晓明,辛洪波,徐文艺,等,2006.藏西措勤含铜双峰岩系的发现及其意义.岩石学报,22(3):707—716.
- 任纪舜,肖黎薇,2004.1:25万地质填图进一步揭开了青藏高原大地构造的神秘面纱.地质通报,23(1):1—11.
- 宋彪,张玉海,万渝生,等,2002.锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论.地质论评,48(增刊):26—30.
- 唐菊兴,孙兴国,丁帅,等,2014.西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床.地球学报,35(1):6—10.
- 唐菊兴,张志,李志军,等,2013.西藏尕尔穷—嘎拉勒铜金矿集区成矿规律、矿床模型与找矿方向.地球学报,34(4):385—394.
- 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,49(16):1589—1604.
- 辛洪波,曲晓明,任立奎等,2007.藏西措勤含铜岩系的物质来源与成因.地质学报,81(7):939—945.
- 许荣科,郑有业,赵平甲,等,2007.西藏东巧北尕苍见岛弧的厘定及地质意义.中国地质,34(5):768—777.
- 姚晓峰,唐菊兴,李志军,等,2012.班怒带西段尕尔穷铜金矿两套侵入岩源区研究及其地质意义——来自 Hf 同位素特征的指示.吉林大学学报(地球科学版),42(增刊2):188—197.
- 姚晓峰,唐菊兴,李志军,等,2013.班怒带西段尕尔穷矽卡岩型铜金矿含矿母岩成岩时代的重新厘定及其地质意义.地质论评,59(1):193—200.
- 袁洪林,吴福元,高山,等,2003.东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析.科学通报,48(14):1511—1520.
- 张亮亮,朱弟成,赵志丹,等,2011.西藏申扎县早白垩世花岗岩类:板片断离的证据.岩石学报,27(7):1938—1948.
- 张硕,史洪峰,郝海健,等,2014.青藏高原班公湖地区晚白垩世埃达克岩年代学、地球化学及构造意义.地球科学——中国地质大学学报,39(5):509—524.
- 张志,唐菊兴,李志军,等,2013a.西藏尕尔穷—嘎拉勒铜金矿集区侵入岩岩石地球化学特征及其地质意义.地质与勘探,49(4):676—688.
- 张志,唐菊兴,陈毓川,等,2013b.西藏班—怒结合带尕尔穷铜金矿床矽卡岩矿物学特征及其地质意义.岩石矿物学杂志,32(3):305—317.
- 张志,陈毓川,唐菊兴,等,2013c.西藏嘎拉勒铜金矿床地质特征及矽卡岩矿物学特征研究.矿床地质,32(5):915—931.
- 张志,唐菊兴,杨毅,等,2012.西藏尕尔穷铜金矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型.地球学报,33(4):663—672.
- 赵元艺,崔玉斌,吕立娜,等,2011.西藏舍索矽卡岩型铜多金属矿床年代学与地球化学特征及意义.岩石学报,27(7):2132—2142.
- 周涛,陈超,梁桑,等,2014.西藏班公湖蛇绿混杂岩中火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征.大地构造与成矿学,38(1):157—167.
- 朱弟成,莫宣学,赵志丹,等,2008.西藏冈底斯带措勤地区则弄群火山岩锆石 U-Pb 年代学格架及构造意义.岩石学报,24(3):401—412.
- 朱弟成,潘桂堂,莫宣学,等,2006.冈底斯中北部晚侏罗世—早白垩世地球动力学环境:火山岩约束.岩石学报,22(3):534—546.