



引文格式: 杨永锋, 姜亚国, 唐静, 等. 西藏革吉县一带下白垩统则弄群火山岩地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 300–317. DOI: 10.12401/j.nwg.2024072

Citation: YANG Yongfeng, JIANG Yaguo, TANG Jing, et al. Geochemical Characteristics and Its Geological Significance of the Lower Cretaceous Zenong Group Volcanic Rocks of Geji Country, Tibet[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 300–317. DOI: 10.12401/j.nwg.2024072

西藏革吉县一带下白垩统则弄群火山岩 地球化学特征及其地质意义

杨永锋^{1,2}, 姜亚国¹, 唐静², 程犬¹

(1. 陕西地矿科技产业股份有限公司, 陕西 西安 710000; 2. 陕西地矿研究院有限公司, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 西藏革吉县一带则弄群(K_1Z)广泛发育, 自下而上由多爱组(K_1d)、拖称组(K_1t)和朗久组(K_1l)组成。笔者对则弄群(K_1Z)火山岩开展了详细的岩相学、地球化学和年代学研究, 研究发现这些火山岩存在明显火山喷发不整合, 指示火山活动具有脉动特点。主量元素组成显示多爱组(K_1d)和拖称组(K_1t)火山岩属碱性-钙碱性系列, 朗久组(K_1l)火山岩则为碱性系列。微量元素蛛网曲线、稀土配分图以及构造差别图解表明多爱组(K_1d)和拖称组(K_1t)火山岩形成于岛弧环境, 朗久组(K_1l)火山岩则形成于近活动大陆边缘岛弧环境。多爱组(K_1d)角闪安山岩锆石 U-Pb 加权平均年龄值为 (111.2 ± 2.1) Ma。结合前人资料和本研究, 笔者认为则弄群(K_1Z)火山岩是狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带所代表的 Slainajap 洋盆向南俯冲形成的陆缘弧。

关键词: 早白垩世; 则弄群; 冈底斯带; 地球化学; 火山岩

中图分类号: P56

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)06-0300-18

Geochemical Characteristics and Its Geological Significance of the Lower Cretaceous Zenong Group Volcanic Rocks of Geji Country, Tibet

YANG Yongfeng^{1,2}, JIANG Yaguo¹, TANG Jing², CHENG Quan¹

(1. Shaanxi Mining Technology Industry Co., Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China; 2. Regional Geological Survey Academe of Shaanxi Geology and Mining Group Co., Ltd., Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: The Zenong Group is exposed widely in the Geji area of Tibet and is composed of Duo'ai Formation, Tuo 'cheng Formation, and Langjiu Formation from bottom to top. This study carried petrography, geochemistry, and chronology on the Zenong Group volcanic rocks. It was found that these volcanic rocks show obvious eruption unconformity and pulsed magmatism. According to the major element composition, the igneous rocks of the Duo'ai, and Tuo 'cheng Formations belong to the alkaline-calc-alkaline series, while the rocks of the Langjiu Formation belong to the alkaline series. The trace elements, REE distribution, and tectonic discrimina-

收稿日期: 2022-09-05; 修回日期: 2024-03-08; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目“西藏革吉县尕尔穷地区4幅1:5万地质矿产调查”(12120113036800)资助。

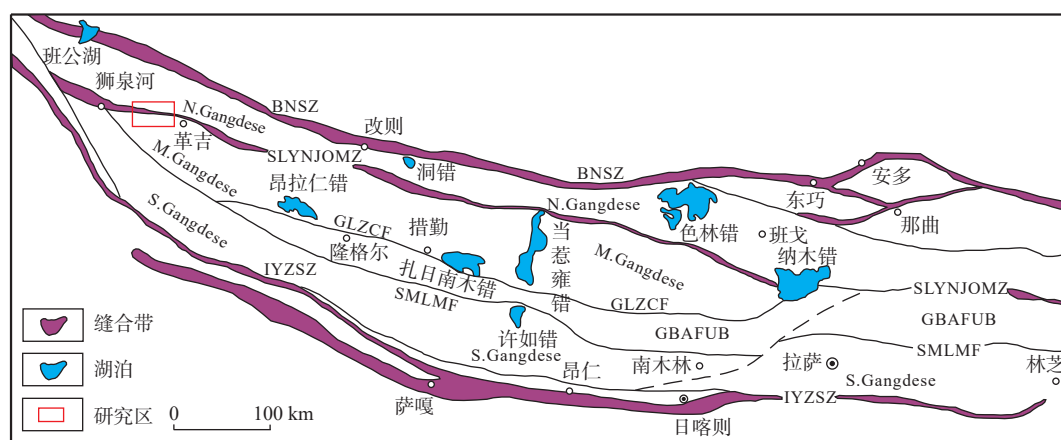
作者简介: 杨永锋(1983-), 男, 高级工程师, 从事区域地质矿产调查和沉积地层学研究。E-mail: yangyongfeng011031@163.com。

tion diagram show that the Duo'ai, and Tuocheng Formation formed in the island arc environment, while the Langjiu formed in the island arc environment near the active continental margin. The average weighted zircon U-Pb age of the hornblende andesite from the Duo'ai Formation is (111.2 ± 2.1) Ma. Combination with previous work and this study, we suggest the Zenong Group volcanic rocks are the marginal continental arc of the southward subduction of the Slainajap ocean basin represented by the Shiquanhe-Yongzhu-Namco-Jiali ophiolitic melange belt.

Keywords: early Cretaceous; Zenong Group; Gangdese belt; geochemistry; volcanic rocks

青藏高原中部的冈底斯带保存了丰富的特提斯演化记录,长期以来都是国内外学者研究的焦点。冈底斯构造-岩浆岩带是青藏高原白垩纪以来岩浆活动期次最多、规模最大、岩浆岩类型最复杂的构造-岩浆岩带,该带面积占整个青藏高原岩浆岩总面积的 83%,是青藏高原最重要的岩浆岩带(莫宣学, 2005)。前人对冈底斯构造-岩浆岩带上广泛分布的岩浆岩的研究主要集中在冈底斯带中南部地区,包括南部中生代冈底斯岩基、火山岩以及中部石炭纪—二叠纪火山岩(袁四化, 2009; 张彤等, 2020)。对冈底斯北部晚侏罗世—早白垩世地层中保存的大量火山活动记录缺乏足够的研究,尤其是革吉—狮泉河一带大面积出露的早白垩世岩浆岩关注、研究更少,认识也不尽相同。普遍认为新特提斯洋向北俯冲制约了冈底斯带的岩浆活动和沉积盆地演化(宋全友等, 1999; 周华, 2016; 张彤, 2020),也有学者认为上述火山活动应该受控于班公湖—怒江向南俯冲制约(莫宣学等, 2005; 潘桂棠等, 2006; 朱弟成等, 2006, 2008a)。前人的观点有: ①形成于班

公湖—怒江洋的向南俯冲(莫宣学等, 2005; 潘桂棠等, 2006; 朱弟成等, 2006)。^②与冈底斯和羌塘地块碰撞过程中增厚下地壳的重熔有关(Xu et al., 1985; Pearce et al., 1988)。^③形成于冈底斯和羌塘地块碰撞后软流圈上涌引起的地壳熔融过程(Harris et al., 1990)。^④与雅鲁藏布江洋壳向北俯冲有关(宋全友等, 1999)。造成这些争论的主要原因是缺乏较详细的岩石特征、地球化学特征分析和同位素年代学研究, 在晚侏罗世—早白垩世, 冈底斯带北部的火山活动到底受控于怎样的大地构造背景, 有待进一步研究、探讨。中冈底斯带下白垩统则弄群(K_1Z)火山—沉积地层中出露的火山岩是早白垩世岩浆岩的典型代表。笔者在 1:5 万区域地质调查资料的基础上, 结合有关综合研究成果, 选取西藏革吉县一带则弄群(K_1Z)火山岩(图 1)为研究对象, 通过岩石特征、地球化学、同位素年代学研究, 分析早白垩世火山岩的分布特点、性质、构造环境和相关的地球动力学环境, 约束火山活动时代, 为冈底斯构造—岩浆岩带的研究提供更多资料。



N.Gangdese.北冈底斯; M.Gangdese.中冈底斯; S.Gangdese.南冈底斯; GBAFUB.冈底斯弧背断隆带; GLZCF.噶尔-隆格尔-扎日南木错-措麦断裂带; SMLMF.沙莫尔-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂; BNSZ.班公湖-怒江缝合带; IYZSZ.印度河-雅鲁藏布缝合带; SLYNJOMZ.狮泉河-拉果错-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带

图1 冈底斯带构造单元

Fig. 1 Tectonic units of the Gangdese Belt

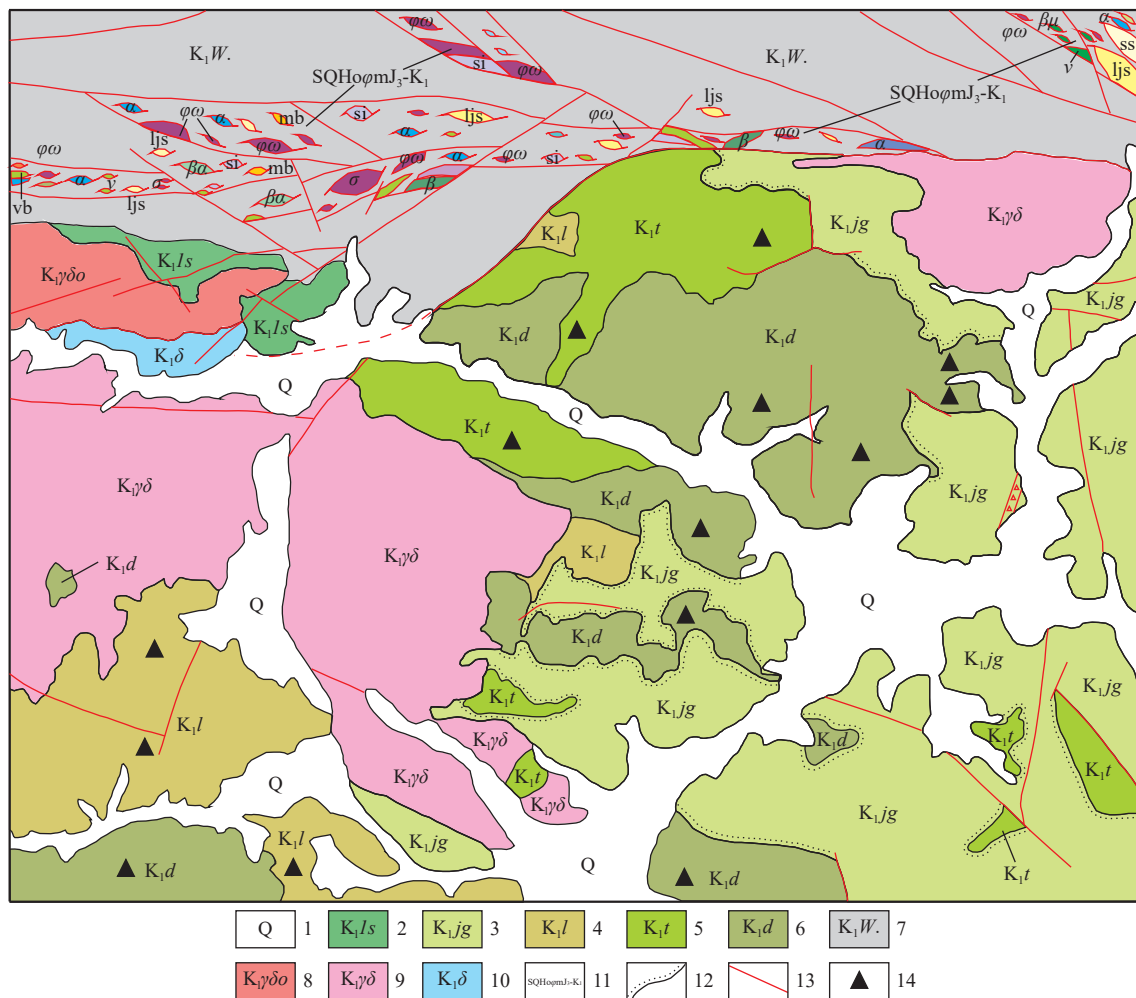
1 地质概况

西藏冈底斯构造-岩浆岩带呈 EW 向分布于西藏南部的印度河-雅鲁藏布江缝合带和北部的班公湖-怒江缝合带之间(潘桂棠等, 2004; 朱弟成等, 2006), 东西长约为 2 500 km, 南北宽为 150~300 km, 面积达 $4.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。以沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂(SMLMF)、噶尔-隆格尔-扎日南木错-措麦断裂带(GLZCF)和狮泉河-拉果错-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带(SLYNJOMZ)为界, 由南向北将冈底斯带划分为南冈底斯(即传统上认为的冈底斯)、冈底斯弧背断隆带(即隆格尔-念青唐古拉山复合古岛弧带)(潘桂棠等, 2004, 2006、中冈底斯和北冈底斯。研究区位于

于中冈底斯, 为措勤-申扎岩浆弧组成部分。

则弄群(K_1Z)从东到西呈面状大面积分布于中冈底斯带, 东西延伸达 1 000 km, 南北宽数千米到数十千米。则弄群(K_1Z)火山岩厚度和岩性在空间和时间上变化较大, 捷嘎组(K_1jg)灰岩盖在则弄群(K_1Z)不同阶段形成的火山沉积之上(图 2), 在一些地带发现大套灰岩底部具有上超现象, 从而指示二者之间存在沉积间断, 局部地带见到二者呈微角度不整合接触; 区域上, 则弄群(K_1Z)与下伏的下拉组灰岩呈角度不整合接触, 反映则弄群(K_1Z)沉积时, 曾发生过海侵(许荣科等, 2004)。

根据研究区地层对比及岩石组合特征, 并结合前人在该区域取得的研究成果(许荣科等, 2004), 则弄群(K_1Z)火山岩内部存在明显火山喷发不整合, 由底



- 1.第四系; 2.郎山组; 3.捷嘎组; 4.朗久组; 5.拖称组; 6.多爱组; 7.乌木垄铅波岩组; 8.早白垩世英云闪长岩;
9.早白垩世花岗闪长岩; 10.早白垩世闪长岩; 11.狮泉河蛇绿构造混杂岩; 12.不整合界线; 13.断层; 14.采样点

图2 西藏革吉地区地质简图

Fig. 2 Simplified geological map of the Geji area in Tibet

部向顶部划分出中基性、酸性、碱性3套岩性组合,指示火山活动明显具有脉动特点,据此则弄群(K_1Z)自下而上划为3个组:多爱组(K_1d)、拖称组(K_1t)、朗久组(K_1l)。多爱组(K_1d)以中基性火山岩为主夹中酸性火山岩、火山碎屑岩和陆源碎屑岩;拖称组(K_1t)以酸性火山岩、火山碎屑岩为主;朗久组(K_1l)以钙碱性-碱性火山岩、火山碎屑岩为主。区域上多爱组(K_1d)、拖称组(K_1t)、朗久组(K_1l)不整合于中—晚侏罗世花岗质侵入岩之上。

多爱组(K_1d)主要分布于研究区中部。下部为中基性为主火山岩组合,主要岩性为深灰色、灰紫色安山

岩、角闪安山岩、灰绿色安山玢岩、深灰色玄武安山岩、灰紫色安山质角砾岩等,局部见少量灰色英安岩、流纹岩;上部为酸性为主火山岩组合及火山-沉积岩组合,岩性主要有灰绿色安山玢岩、石英安山岩、灰白、灰紫色流纹岩、灰白色流纹斑岩、灰色英安岩、灰白色凝灰岩、浅灰色石英砂岩、深灰色泥质粉砂岩、安山岩,局部见少量火山角砾岩。局部发育柱状节理、气孔和杏仁构造(图3a、图3b、图3g、图3h)。

拖称组(K_1t)主要分布于研究区中部和东南部,岩性主要为灰白、灰紫色流纹岩、浅灰色安山岩、角闪安山岩、英安岩、灰白、灰紫色流纹质火山角砾岩、灰



a.多爱组柱状节理;b.多爱组气孔、杏仁构造;c.多爱组安山(玢)岩宏观特征;d.多爱组安山(玢)岩斑晶特征;e.拖称组流纹岩特征;f.拖称组流纹构造;g.拖称组熔结角砾岩角砾;h.拖称组石泡流纹岩特征;i.朗久组粗面岩特征;j.朗久组粗面质熔结角砾岩特征

图3 则弄群(K_1Z)火山岩野外特征

Fig. 3 The field characteristics of the Zenong Group (K_1Z) volcanic rocks

白色流纹斑岩、浅灰色英安质火山角砾岩、石泡流纹岩、安山岩团块、火山集块岩、凝灰岩、凝灰质砂岩等。局部流纹构造发育(图 3c、图 3d、图 3i、图 3j)。

朗久组(K_1l)主要分布于研究区西南部,岩性为粗面岩、石英粗面岩、粗面安山岩、含角砾粗面岩、粗面玄武岩、粗面流纹岩、硅质岩、凝灰质砂岩,局部夹流纹岩、英安岩(图 3e、图 3f)。

2 分析方法

本次研究工作的样品采自左左乡-革吉县之间则弄群(K_1Z)火山岩之中,从中挑选具有代表性的 14 件新鲜样品进行全岩主量、微量、稀土元素分析,其中,从多爱组(K_1d)、拖称组(K_1t)、朗久组(K_1l)分别选取 8 件、3 件、3 件样品。样品分析测试工作由核工业北京地质研究院分析测试研究所完成。

样品的主量元素使用 X 射线荧光光谱仪(AB104-L, AL104, PW2404)测定,分析误差优于 5%。稀土元素和微量元素含量分析使用仪器为 PerkinElmer 的 Elan DCR-e 型等离子体质谱分析仪,分析精度:当元素含量大于 10×10^{-6} 时,精度优于 5%,当含量小于 10×10^{-6} 时,精度优于 10%。化学分析测试流程参考 Chen 等介绍的方法(Chen et al., 2000, 2002)。

从多爱组(K_1d)8 件样品中挑选一件角闪安山岩样品(D531/14)进行 U-Pb 同位素测试分析,碎样和锆石挑选由河北省区域地质矿产调查研究所完成,将选取锆石置于环氧树脂中,凝固后把锆石打磨、抛光,让锆石内部结构充分暴露,然后进行锆石光学、CL 显微

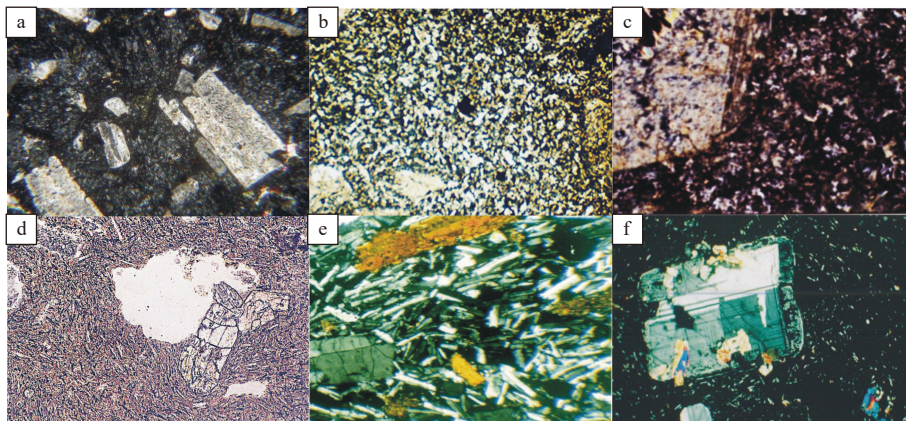
图像(阴极发光)和激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)分析测试。锆石 CL 图像和激光剥蚀等离子体质谱(LA-ICP-MS)锆石微区原位定年均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。LA-ICP-MS 测试仪器为 Agilent7500 型 ICP-MS、德国 Lambda Physik 公司的 Compex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)和 MicroLas 公司的 GeoLas 200M 光学系统的联机系统。激光束斑直接为 $30 \mu\text{m}$, 激光剥蚀样品的深度为 $20 \sim 40 \mu\text{m}$ 。实验中采用氦气为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化,采样方式为单点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成 5 个测点的样品测试,加测标样 1 次。在所测锆石样品分析 10 个点前后各测 1 次 NIST SRM610。锆石年龄采用标准锆石 91500 作为外标准物质,元素含量采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标。

3 分析结果

3.1 岩石学特征

3.1.1 多爱组(K_1d)

安山(玢)岩(PM16/1、D155/1、D2316/1、D542/4): 岩石呈灰、绿灰色,斑状结构,块状构造。斑晶含量为 35%~40%,主要为斜长石(30%~35%),均为半自形板状,呈连续不等粒状、碎屑状,粒径以 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 为主,其次为少量角闪石、黑云母,暗色矿物见绿泥石化蚀变。基质含量为 60%~65%,由隐晶质组成(图 4a、



a.多爱组安山岩显微特征(单偏光 $\times 40$); b.多爱组玄武安山岩显微特征(单偏光 $\times 30$); c.多爱组安山(玢)岩显微特征(单偏光 $\times 40$); d.拖称组安山岩显微特征(单偏光 $\times 40$); e.朗久组粗面岩显微特征(正交偏光 $\times 40$); f.朗久组粗面安山岩显微特征(正交偏光 $\times 40$)

图4 则弄群(K_1Z)火山岩显微特征

Fig. 4 The microscopic features of the Zenong Group (K_1Z) volcanic rocks

图4b、图4c)。

角闪安山岩(D531/14、D542/1): 岩石呈灰色, 斑状结构, 块状构造。斑晶含量为40%~45%, 主要为斜长石(25%±)、角闪石(15%~20%)。斜长石斑晶多为半自形板状, 粒径以1~2 mm为主, 发育环带结构; 角闪石斑晶呈半自形柱状, 粒径以0.5~2 mm为主; 暗色矿物见绿泥石化蚀变。基质含量为55%~60%, 主要由隐晶质、显微晶质组成。

石英安山岩(D531/53、D544/1): 岩石呈紫灰色, 斑状结构, 块状构造。斑晶含量为50%~55%, 主要为斜长石(25%~30%), 其次少量为角闪石(5%±)。斜长石斑晶多为半自形板状, 部分晶形不完整, 粒径以1~1.5 mm为主, 发育环带结构; 角闪石斑晶多呈半自形柱状假象, 粒径以0.5~1.5 mm为主, 氧化均匀, 边圈多不平整。基质含量为45%~50%, 主要由斜长石(25%±)、石英(5%~8%)、隐晶质(15%±)组成。基质中斜长石呈细小半自形板条状、针状, 粒径多小于0.03 mm, 密集状平行或半平行展布, 其间充填隐晶质; 石英呈细小他形碎屑状, 粒径小于0.05 mm, 发育裂纹, 见波状消光。岩石中见少量不规则状气孔, 气孔内充填次生方解石和(或)石英。

3.1.2 拖称组(K_1t)

角闪安山岩(D522/12): 岩石呈深灰色, 斑状结构, 块状构造。斑晶含量为55%~60%, 主要为斜长石(50%~55%), 其次为角闪石(5%~10%)。斜长石斑晶自形良好, 粒径以0.2~1 mm为主, 定向—半定向排列, 双晶发育, 见绢云母化蚀变; 角闪石斑晶呈六边形柱状, 粒径以0.2~1 mm为主, 见绿泥石化、碳酸盐化蚀变, 边缘发育暗化边。基质含量为40%~45%, 主要由隐晶质组成。可见微量次生方解石、绢云母。

安山岩(PM17/1、PM14/31): 岩石深灰色, 斑状结构, 块状构造。斑晶含量小于5%, 主要为斜长石, 呈半自形粒状—长板状, 粒径以0.2~0.5 mm为主, 大致平行基质散布, 晶面不完整, 发育裂纹, 可见环带结构和绿泥石化蚀变。基质含量大于95%, 主要由斜长石(75%~80%)及玻璃质、隐晶质(15%~20%)组成, 基质中斜长石呈半自形板条状, 粒径以0.01~0.05 mm为主, 大致平行分布, 其中充填玻璃质、隐晶质(图4d)。

3.1.3 朗久组(K_1l)

粗面岩(D0293/2、D0298/1): 岩石呈浅褐灰色, 粗面结构, 块状构造。斑晶含量为25%±, 主要为钾长石(15%~20%), 其次少量为黑云母(5%±)、角闪石假象

(2%)。钾长石斑晶呈半自形-他形粒状, 粒径0.5~1.5 mm为主, 洁净透亮, 发育裂纹, 伴有波状消光; 黑云母斑晶呈鳞片状, 以0.2~0.5 mm为主, 局部见暗色边、破碎及挠曲变形; 角闪石假象呈半自形柱状及六边形切面, 以0.5~1.2 mm为主, 均已蚀变为方解石集合体。基质含量75%±, 主要由隐晶质长英质组成, 其间散布大致平行细小板条状、纤状钾长石, 粒径小于0.005 mm×0.05 mm。岩石中见少量不规则状杏仁体, 大小为0.5~1.5 mm, 充填次生碳酸盐(图4e、图4f)。

石英粗面岩(D0301/1): 岩石呈浅灰—浅褐灰色, 粗面结构, 块状构造。斑晶含量为35%~40%, 主要为钾长石(25%~30%), 其次少量为黑云母(5%±)、角闪石(<5%)。钾长石斑晶呈半自形板状, 粒径以2~5 mm为主, 发育卡氏双晶, 表面略显污浊, 见弱泥化蚀变; 黑云母斑晶呈半自形鳞片状, 以0.5~1.2 mm为主; 角闪石斑晶呈半自形柱状, 以0.3~1.5 mm为主, 普遍次闪石化蚀变。基质含量为60%~65%, 主要由钾长石(30%~40%)、石英(10%~20%), 其次少量为黑云母(5%±), 基质中钾长石杂乱分布, 以0.2 mm×0.05 mm~0.5 mm×0.15 mm为主, 间隙中充填文象状交生分布的石英与钾长石; 石英呈他形粒状散布, 粒径<0.05 mm。

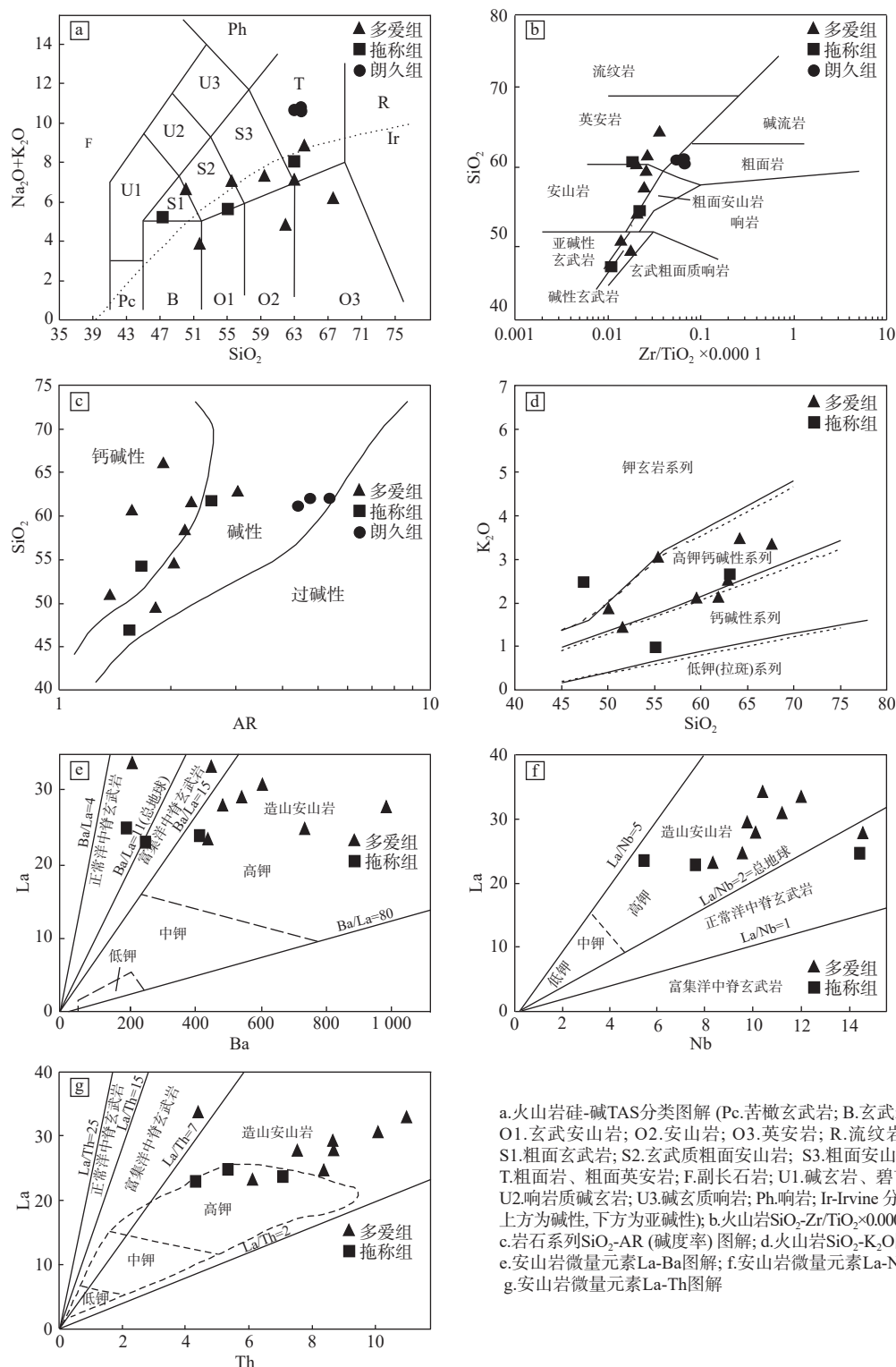
3.2 主量元素

同中国玄武岩(黎彤等, 1997, 1984)相比较, 多爱组(K_1d)火山岩 FeO、TiO₂、MgO、MnO、CaO、K₂O、P₂O₅ 含量略低, SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、Na₂O 含量略为偏高, 显示中酸性岩类的化学特征(表1)。碱度率AR值较低, 平均值为2.03; Na₂O/K₂O为0.85~2.58, 平均值为1.69%, 岩石具有富钠贫钾的特征; 里特曼指数δ为1.26~6.34, 平均值为3.05, 属钙碱性系列。固结指数(SI)为2.11~21.6, 平均值为11.03, 相当行广松久“不同类型火山岩固结指数对比表”中的安山岩(Mat-suhisa, et al., 1979), 显示岩石基性程度较低; 分异指数(DI)48.07~74.35, 平均值为65.64, 反映岩浆分异程度较好。在TAS分类图解中(Le et al., 1986)(图5a), 投影点分别落入玄武岩、粗面安山岩、粗面岩和安山岩中, 位于Ir线的两侧均有, 岩石包括碱性和亚碱性岩类; 在火山岩SiO₂-Zr/TiO₂×0.0001图解(Winchester, et al., 1976)(图5b)中, 投影点落入亚碱性玄武岩、玄武岩、安山岩、粗面安山岩和英安岩区; 在火山岩系列SiO₂-AR判别图解(Wright, 1969)(图5c)中, 投影点分别落入碱性和钙碱性系列岩区; 在火山岩系列SiO₂-K₂O判别图解(Middlemost, 1985)(图5d)中, 投影点多

表 1 则弄群(K₁Z)火山岩主量元素特征

Tab. 1 Major element composition of the Zenong Group(K₁Z) volcanic rocks

组名	样品号	岩性	主量元素特征 (%)														CIPW标准矿物组合特征值											特征参数值							
			SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Q	An	Ab	Or	C	Di	Hy	Il	Mt	Ap	R1	R2	σ	ACNK	AR	SI	DI	AMF	CMF	Na ₂ O/ K ₂ O
多爱组	PM16/1	安山岩	59.5	0.77	15.6	5.19	3.05	0.083	2.84	3.79	5.07	2.11	0.23	4.8	103.03	15.32	1.77	42.66	12.4	4.26	/	10.46	1.46	5.59	0.52	1429	847	3.15	0.89	2.18	15.67	70.38	0.86	0.38	2.4
	D155/1	安山岩	50.1	1.15	14.1	8.27	2.36	0.146	1.94	8.77	4.79	1.86	0.52	8.3	102.31	12.57	/	36.16	10.95	5.05	/	10.34	2.18	6.31	1.2	896	1307	6.34	0.59	1.82	10.3	59.68	0.75	0.85	2.58
	D2316/1	安山岩	61.9	0.74	15.8	6.59	3.14	0.106	2.21	6.05	2.71	2.12	0.14	1.59	103.10	20.89	24.18	22.56	12.33	/	1.77	9.83	1.38	5.91	0.32	2357	1049	1.26	0.89	1.57	13.37	55.78	0.85	0.6	1.28
	D531/14	角闪安山岩	55.44	0.72	15.87	7.05	4.18	0.159	2.89	4.64	3.99	3.04	0.29	5.77	104.04	13.96	/	32.44	17.7	6.09	/	12.93	1.35	7.21	0.67	1236	937	4.13	0.87	2.04	13.8	64.1	0.71	0.38	1.31
	D531/53	石英安山岩	51.5	1.07	15.4	7.24	3.36	0.128	3.89	8.64	2.44	1.42	0.29	7.79	103.17	19.1	8.62	20.6	8.37	6.69	/	16.81	2.03	5.51	0.68	1929	1417	1.76	0.72	1.38	21.6	48.07	0.65	0.66	1.72
拖称组	D542/1	角闪安山岩	67.66	0.438	15.44	3.52	2.3	0.061	0.855	4.13	2.84	3.34	0.201	1.48	102.27	27.59	18.78	23.85	19.59	0.22	/	4.54	0.83	4.06	0.46	2534	781	1.56	0.98	1.92	6.69	71.03	1.56	0.76	0.85
	D542/4	安山岩	64.21	0.525	15.76	6.77	1.04	0.07	0.354	1.81	5.41	3.47	0.213	1.36	100.99	15.09	6.61	46	20.61	0.7	/	3.26	1	5.87	0.5	1339	523	3.7	0.99	3.04	2.11	81.7	1.43	0.3	1.56
	D544/1	石英安山岩	62.91	0.708	15.16	7.52	0.32	0.071	0.717	3.02	4.59	2.52	0.24	2.42	100.20	19.26	12.78	39.82	15.27	0.32	/	4.82	1.38	5.44	0.57	1800	673	2.47	0.96	2.28	4.69	74.35	1.28	0.46	1.82
	平均值		59.15	0.77	15.39	6.52	2.47	0.1	1.96	5.11	3.98	2.49	0.27	4.19	102.39	17.97	12.12	33.01	14.65	/	/	9.12	1.45	5.74	0.62	1690	941.75	3.05	0.86	2.03	11.03	65.64	1.01	0.55	1.69
朗久组	D522/12	角闪安山岩	63.1	0.67	14.7	5.15	0.52	0.05	0.82	3.46	5.35	2.66	0.27	3.73	100.48	18.96	2.77	45.96	15.96	2.03	/	3.67	1.29	4.09	0.62	1543	710	3.14	0.82	2.58	5.77	80.88	1.56	0.67	2.01
	PM17/1	安山岩	55.1	1.1	15.1	7.11	3.34	0.15	3.13	7.19	4.59	0.97	0.38	5.13	103.29	9.82	17.53	38.71	5.74	/	0.07	13.38	2.08	6.23	0.87	1511	1216	2.57	0.69	1.67	16.59	54.27	0.69	0.6	4.71
	PM14/31	安山岩	47.4	1.18	16.4	8.94	5.17	0.13	5.24	7.79	2.7	2.5	0.35	7.4	105.2	6.2	8.28	22.45	14.52	6.01	/	22.17	2.2	7.51	0.79	1193	1390	7.37	0.77	1.55	21.67	43.17	0.51	0.44	1.08
	平均值		55.2	0.98	15.4	7.07	3.01	0.11	3.06	6.15	4.21	2.04	0.33	5.42	102.99	11.66	9.53	35.7	12.1	/	/	13.1	1.86	5.94	0.76	1415.7	1105.3	4.36	0.76	1.93	14.68	59.44	0.92	0.57	2.6
	D0293/2	粗面岩	63.0	1.18	13.8	4.03	1.24	0.09	2.45	3.09	2.66	7.97	0.57	0.61	100.69	10.52	2.15	22.49	47.07	/	7.04	2.83	2.24	4.05	1.33	1226	722	5.64	0.74	4.4	13.43	80.08	1.05	0.43	0.33
朗久组	D0298/1	粗面岩	63.9	1.11	14.0	4	1.24	0.06	1.93	2.49	2.68	8.04	0.55	0.75	100.75	12.54	2.31	22.66	47.48	/	4.01	2.95	2.11	4.03	1.26	1262	636	5.5	0.79	4.74	10.85	82.68	1.19	0.39	0.33
	D0301/1	石英粗面岩	63.9	1.06	13.4	3.83	0.55	0.06	1.71	2.06	2.62	7.96	0.59	2.31	100.05	19.58	0	16.86	47.52	1.51	/	4.3	2.03	3.01	1.37	1339	573	5.31	0.8	5.37	10.35	83.96	1.34	0.37	0.33
	平均值		63.6	1.17	13.73	3.95	1.01	0.07	2.03	2.55	2.65	7.99	0.57	1.22	100.5	14.21	1.49	20.67	47.36	/	/	3.36	2.13	3.7	1.32	1275.7	643.7	5.48	0.78	4.84	11.54	82.24	1.19	0.4	0.33

图5 则弄群(K_1Z)火山岩岩石系列图解Fig. 5 Compositional discrimination diagrams for the rock series of the Zenong Group(K_1Z) volcanic rocks

数落入高钾钙碱性系列和钙碱性系列; 在安山岩微量元素La-Ba图解(图5e)、La-Nb图解(图5f)、La-Th图解(图5g)中, 投影点绝大多数落入造山安山岩区。结合标准矿物以及各图解特征, 多爱组(K_1d)火山岩属

碱性-钙碱性系列岩石。根据各种环境玄武岩特征划分, 该组岩石环境符合岛弧环境。

拖称组(K_1t)火山岩 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 K_2O 、 Na_2O 含量略高, SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 CaO 、 MgO 、 MnO 、 P_2O_5 含量

略为偏低,显示中酸性岩类的化学特征(表1)。碱度率 AR 值较低,平均值为1.93;里特曼指数 δ 为2.57~7.37,平均值为4.36,属钙碱性-碱性系列。固结指数 SI 为5.77~21.67,平均值为14.68,显示岩石基性程度较低;分异指数(DI)43.17~80.88,平均值为59.44,反映岩浆分异程度较好。在TAS分类图解中(Le et al., 1986)(图5a),投影点分别落入粗面玄武岩、玄武安山岩和粗面英安岩中,两个样品位于Ir线的下方,岩石属亚碱性岩类;在火山岩 SiO_2 -Zr/TiO₂×0.0001图解(Winchester et al., 1976)(图5b)中,投影点落入碱性玄武岩、粗面安山岩和英安岩区;在火山岩系列 SiO_2 - AR 判别图解(Wright, 1969)(图5c)中,投影点落入钙碱性系列-碱性系列岩区;在火山岩系列 SiO_2 - K_2O 判别图解(Middlemost, 1985)(图5d)中,投影点落入钙碱性系列-钾玄岩系列岩区;在安山岩微量元素La-Ba图解(图5e)、La-Nb图解(图5f)、La-Th图解(图5g)中,投影点绝大多数落入造山安山岩区。结合标准矿物以及各图解特征,拖称组(K_tI)火山岩应属碱性-钙碱性系列岩石。

朗久组(K_lI)火山岩 FeO 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 、 Na_2O 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量略低, SiO_2 、 K_2O 含量略为偏高,显示酸性岩类化学特征(表1)。碱度率 AR 值较低,为3.91~5.37,平均值为4.84;里特曼指数 σ 值都大于5,属碱性系列。固结指数(SI)值10.35~13.43,相当于安山岩,基性程度较低(Matsuhisa et al., 1979)。分异指数(DI)80.08~83.96,平均值为82.24,反映岩浆分异程度极好。在TAS分类图解中(Le et al., 1986)(图5a),投影点落入粗面岩、粗面英安岩区域,位于Ir线的上方,属碱性岩类;在火山岩 SiO_2 -Zr/TiO₂×0.0001图解(Winchester et al., 1976)(图5b)中,投影点落入粗面岩区域;在岩石系列 SiO_2 - AR (碱度率)图解(Wright, 1969)(图5c)中,投影点落入碱性系列岩区。结合标准矿物以及各图解特征,朗久组(K_lI)火山岩属于碱性系列岩石,具有富钾贫钠的特点。

3.3 微量元素

与中国大陆岩石圈化学元素丰度值(黎彤等, 1997, 1984)相比,多爱组(K_dI)火山岩微量元素中Pb、Cr、Rb、Ga、W、Sb、Sr、Zr、Ba、V、Sc、U、Th皆较高,其中Cr、U丰度值高出4~5倍,其他元素平均含量则低于中国大陆岩石圈化学元素丰度值(表2)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(Sun et al., 1989)(图6)中,总体表现出富集大离子亲石元素Rb、Ba、Th,亏损高

场强元素Nb、Ta、Ti等。曲线特征与火山弧型玄武岩标准化曲线较相似,表现出岛弧特征(张本仁, 2001)。

拖称组(K_tI)火山岩微量元素中Pb、Cr、Cs、Ga、Sb、Bi、Sr、Ba、V、Sc、Zr、Hf皆高于中国大陆岩石圈化学元素丰度值,其中Cs、Cr丰度值高出5~6倍,Pb、V、Zr、Hf高出2~3倍,其他元素平均含量则低于中国大陆岩石圈化学元素丰度值(表2)。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(Sun et al., 1989)(图6)中,总体表现出富集大离子亲石元素K、Rb、Ba、Th,其形态特征与火山弧型玄武岩(Pearce, 1983, 1984)特征相似。Ti、Nb、Ta亏损也表现出岛弧火山岩的特征(张本仁, 2001)。

朗久组(K_lI)火山岩微量元素中Pb、Rb、Cs、W、Ga、Sb、Bi、Sr、Ba、V、Nb、Ta、Zr、Hf、U、Th皆高于中国大陆岩石圈化学元素丰度值,其中Pb、Th高出14~16倍,Rb、Cs、W、Ba、Zr、U高出6~8倍,其他元素平均含量则低于中国大陆岩石圈化学元素丰度值(表2)。朗久组(K_lI)火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(Sun et al., 1989)(图6)总体表现出富集大离子亲石元素Rb、Ba、Th。随着元素不相容性增加其富集程度也明显增加,表现出较强Rb、Ba、Th正异常和Nb、Ti负异常,表现出岛弧型玄武岩的特征(张本仁, 2001)。

3.4 稀土元素

多爱组(K_dI)火山岩稀土元素含量(ΣREE)为 $113.20 \times 10^{-6} \sim 172.53 \times 10^{-6}$,平均值为 113.31×10^{-6} ;轻稀土元素含量($\Sigma LREE$)为 $99.29 \times 10^{-6} \sim 153.00 \times 10^{-6}$,平均值为 119.12×10^{-6} ;重稀土元素含量($\Sigma HREE$)为 $8.37 \times 10^{-6} \sim 21.26 \times 10^{-6}$,平均值为 14.19×10^{-6} ; $\Sigma LREE/HREE$ 为6.54~13.97,平均值为9.09。 $(La/Yb)_N$ 为6.63~21.66,平均值为11.04,表明轻重稀土分馏明显。 δEu 为0.72~1.07,平均值为0.86,小于1,显示出微弱的负Eu异常(表3)。在稀土元素球粒陨石标准化分配型式曲线图(Sun et al., 1989)(图7)中,稀土元素配分型式曲线略向右倾斜的曲线。

拖称组(K_tI)火山岩稀土元素含量(ΣREE)为 $93.57 \times 10^{-6} \sim 132.98 \times 10^{-6}$,平均值为 116.92×10^{-6} ;轻稀土元素含量($\Sigma LREE$)为 $86.31 \times 10^{-6} \sim 115.03 \times 10^{-6}$,平均值为 102.83×10^{-6} ;重稀土元素含量($\Sigma HREE$)为 $7.26 \times 10^{-6} \sim 17.95 \times 10^{-6}$,平均值为 14.09×10^{-6} ; $\Sigma LREE/HREE$ 为6.28~11.90,平均值为8.20。 $(La/Yb)_N$ 为5.78~

表 2 则弄群(K₁Z)火山岩微量元素特征(10⁻⁶)
Tab. 2 The trace element composition of the Zenong Group (K₁Z) volcanic rocks (10⁻⁶)

组名	样品号	岩性	微量元素特征																					
			Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Co	Rb	Cs	W	Ga	Sb	Bi	Sr	Ba	V	Sc	Nb	Ta	Zr	Hf	U	Th
多爱组	PM16/1	安山岩	42.4	11.7	69.9	74.6	49.7	18.2	54.7	0.997	1.01	16.9	2.59	0.079	394	496	97.6	11.9	14.6	0.962	187	5.33	14.6	7.55
	D155/1	安山岩	39.7	8.86	95.2	41.8	16.5	22	60.7	14.9	1.05	14.3	0.528	0.022	291	225	133	20.3	10.4	0.524	199	5.1	10.4	4.42
	D2316/1	安山岩	11.9	19.5	64.1	22	5.06	12.4	85.3	6.42	1.35	19.6	1.47	0.175	294	462	128	21.2	12	0.889	189	6.06	12	11
	D531/14	角闪安山岩	14	12.2	102	45.1	12.8	14.9	86.2	6.98	1.61	18.4	0.896	0.026	294	554	114	9.11	9.75	0.688	150	4.42	9.75	8.65
	D531/53	石英安山岩	36.4	7.81	75.9	172	69.4	32.1	31.6	1.23	0.335	16	0.79	0.038	459	450	161	13.9	8.31	0.448	148	4.16	8.31	6.12
	D542/1	角闪安山岩	6.31	14	67.3	64.5	4.12	5.12	101	4.11	3.35	16.3	0.182	0.011	626	614	30.7	4.12	11.2	0.808	156	4.21	11.2	10.1
	D542/4	安山岩	15.2	13.8	35.3	60.1	3.55	5.02	68.4	1.98	2.37	11.7	0.36	0.135	578	987	81.9	4.45	10.1	0.681	140	4.03	10.1	8.69
	D544/1	石英安山岩	11.3	9.63	43.5	42.3	4.88	8.83	42.6	2.95	1.63	12.4	0.275	0.065	699	742	55.9	9.26	9.54	0.629	142	4.07	9.54	8.4
	平均值		22.15	12.19	69.15	65.3	20.75	14.82	66.31	4.95	1.59	15.7	0.89	0.069	454.38	566.25	100.26	11.78	10.74	0.704	163.88	4.67	10.74	8.12
拖称组	D522/12	角闪安山岩	32	14.4	32.5	22.3	9.16	11.9	50.1	0.796	1.26	15.6	0.266	0.153	380	425	138	9.46	5.44	0.348	137	4.36	2.02	7.09
	PM17/1	安山岩	41.2	11.9	79.5	117	60	26	27.2	6.49	0.863	16.4	0.606	0.052	327	207	134	18.9	14.5	0.95	178	4.88	1.48	5.34
	PM14/31	安山岩	26.7	11.6	84.1	124	78	31.3	101	67.5	0.075	17.1	1.28	0.054	302	264	165	22.2	7.53	0.253	160	4.52	1.15	4.31
		平均值		33.3	12.63	65.37	87.77	49.05	23.07	59.43	24.93	0.73	16.37	0.72	0.09	336.3	298.7	145.7	16.85	9.16	0.52	158.3	4.59	1.55
朗久组	D0293/2	粗面岩	47.6	138	84.2	86	43.2	11.8	543	52.1	7.78	49.1	0.295	0.297	832	2625	82.9	13.6	42	2.35	719	22.4	22.1	122
	D0298/1	粗面岩	37.5	128	79.2	83.5	30	10.5	549	52.8	11.4	47.8	0.248	1	807	2510	81.7	12.5	47	2.87	633	20.3	22.4	128
	D0301/1	石英粗面岩	27.4	135	76.2	118	52.4	10.1	613	63.3	8.99	50.4	0.293	0.31	793	2301	72.8	11.8	44.8	2.83	626	20.1	12.4	137
		平均值		37.5	133.67	79.87	95.83	41.87	10.8	568.33	56.07	9.39	49.1	0.279	0.536	810.67	2478.67	79.13	12.63	44.6	2.68	659.33	20.93	18.97
										</														

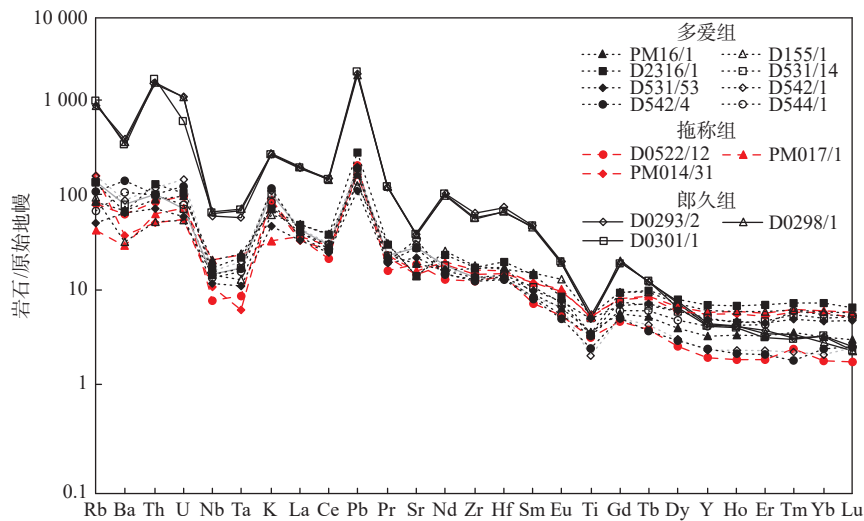


图6 则弄群(K_1Z)火山岩微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 6 Primitive mantle-normalized spider diagram of the Zenong Group(K_1Z) volcanic rocks

19.77, 平均值为 10.54, 表明轻重稀土分馏明显。 δEu 为 0.9~1.02, 平均值为 0.96, 略小于 1 几乎无 Eu 异常(表 3)。在稀土元素球粒陨石标准化分配型式曲线图(Sun et al., 1989)(图 7)中, 稀土元素配分型式曲线明显向右倾斜的曲线。

郎久组(K_1J)火山岩稀土元素含量(ΣREE)为 $592.54 \times 10^{-6} \sim 603.09 \times 10^{-6}$, 平均值为 597.19×10^{-6} ; 轻稀土元素含量($\Sigma LREE$)为 $571.18 \times 10^{-6} \sim 580.43 \times 10^{-6}$, 平均值为 574.86×10^{-6} ; 重稀土元素含量($\Sigma HREE$)为 $21.36 \times 10^{-6} \sim 22.97 \times 10^{-6}$, 平均值为 22.33×10^{-6} ; $\Sigma LREE/HREE$ 为 24.94~26.74, 平均值为 25.76。(La/Yb)_N 为 58.11~70.68, 平均值为 62.42, 表明轻重稀土分馏明显。 δEu 为 0.59~0.6, 显示出较弱的负 Eu 异常(表 3)。在稀土元素球粒陨石标准化分配型式曲线图(Sun et al., 1989)(图 7)中, 稀土元素配分型式曲线呈向右陡倾的曲线。

3.5 锆石 U-Pb 定年

本次研究工作在革吉县丁色一带多爱组(K_1d)角闪安山岩(U-Pb 法)中获得锆石 U-Pb 年龄, 样品(D531/14)U-Pb 同位素测试分析结果见表 4。从阴极发光照片来看(图 8a), 大多数锆石具有较好的自形形态, 呈菱柱状, CL 图像明亮, 震荡环带清晰, 个别锆石内部或边缘有溶蚀现象(如 13、15 和 16 号锆石); 部分锆石可能受热液影响, CL 图像比较黑, 呈他形-自形, 部分可见海绵状或者骨架状结构, 受到不同程度破坏, 部分锆石核部颜色与环带颜色差异较大, 呈似核状(如 10 号锆石), 年龄误差较大。因此选定具有岩浆

锆石特征的锆石为依据, 来指示岩体的结晶年龄。角闪安山岩锆石 U-Pb 分析结果表明, 校正后锆石有效数据点 7 个, 7 个分析点的 Th/U 值为 0.37~0.76, 为较为典型的岩浆锆石, 锆石 U-Pb 谐和图上可以看出(图 8b), 样品年龄较为集中, 从加权平均年龄图上获得的年龄平均值为 $(111.2 \pm 2.1) Ma$ (图 8c), 代表角闪安山岩的形成时代。

4 讨论

4.1 火山岩形成构造环境探讨

多爱组(K_1d)火山岩总体属于碱性-钙碱性岩系列。在里特曼-弋蒂里指数($\log \tau - \log \delta$)图解(赵玉琛, 1989; 刘德林, 1992)(图 9a)中, 大多数样品投影点落入造山带地区火山岩区; 在 Hf/3-Th-Nb/16 图解(Pearce et al., 1983, 1984)(图 9b)中, 投影点全部落入钙碱性岛弧玄武岩区域; 在 La/Yb-La 图解(李曙光, 1993)(图 9c)中, 投影点全部落入弧火山岩区域; 在 Th/Yb-Ta/Yb 图解(Pearce, 1982)(图 9d)中, 投影点几乎全部落入活动大陆边缘(陆缘弧)区域; 在 Ti/100-Zr-Sr/2 图解(Wood, 1980)(图 9e)中, 投影点几乎全部落入钙碱性岛弧玄武岩区域; 在 Th-Ta 图解(Pearce, et al., 1983, 1984)(图 9f)中, 投影点落入火山弧玄武岩区域; 在 La/Yb-Sc/Ni、La/Yb-Th/Yb 图解(图 9g、图 9h)中, 投影点大部分落入大陆边缘弧和安山弧区域及附近。结合其岩石组合、岩石化学及地球化学特征, 认为多爱组(K_1d)形成环境为岛弧环境。

表 3 则弄群(K₁Z)火山岩稀土元素特征(10⁻⁶)
Tab. 3 Rare earth element composition of the Zenong Group (K₁Z) volcanic rocks (10⁻⁶)

组名	样品号	岩性	稀土元素														特征参数						
			La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	δEu	δCe	(La/Yb) _N
多爱组	PM16/1	安山岩	27.6	52.6	6.27	21.8	3.95	1.07	3.37	0.56	2.9	0.544	1.57	0.259	1.58	0.221	124.30	113.29	11.01	10.29	0.87	0.94	12.53
	D155/1	安山岩	33.6	66.9	8.43	35.1	6.76	2.21	5.61	1.01	5.27	0.998	2.82	0.457	2.93	0.431	172.53	153.00	19.53	7.84	1.07	0.95	8.23
	D2316/1	安山岩	32.8	65.9	8.02	31.2	6.23	1.41	5.56	1.05	5.74	1.1	3.29	0.525	3.52	0.475	166.82	145.56	21.26	6.85	0.72	0.97	6.68
	D531/14	角闪安山岩	28.9	52.6	6.21	24.1	4.62	1.24	4.48	0.73	4.35	0.734	2.22	0.4	2.46	0.382	133.43	117.67	15.76	7.47	0.82	0.92	8.43
	D531/53	石英安山岩	23	43.7	5.26	21.7	4.36	1.27	4.06	0.77	4.42	0.763	2.14	0.357	2.32	0.352	114.47	99.29	15.18	6.54	0.91	0.94	7.11
	D542/1	角闪安山岩	30.5	54.9	6.02	22.4	3.7	1.11	2.99	0.461	2.21	0.378	1.1	0.163	1.01	0.179	127.12	118.63	8.49	13.97	0.99	0.93	21.66
	D542/4	安山岩	27.6	47	5.3	20.5	3.6	0.827	3.03	0.39	2.13	0.349	0.99	0.131	1.16	0.184	113.20	104.83	8.37	12.53	0.75	0.89	17.07
	D544/1	石英安山岩	24.5	46.1	5.29	20.2	3.69	0.916	3.61	0.65	3.48	0.68	2.06	0.441	2.65	0.382	114.65	100.70	13.95	7.22	0.76	0.95	6.63
	平均值		28.6	53.7	6.35	24.6	4.61	1.26	4.09	0.703	3.81	0.693	2.02	0.34	2.2	0.33	133.32	119.12	14.19	9.09	0.86	0.94	11.04
拖称组	D522/12	角闪安山岩	23.7	37.2	4.35	17	3.18	0.88	2.68	0.41	1.84	0.29	0.88	0.18	0.86	0.13	93.57	86.31	7.26	11.90	0.90	0.83	19.77
	PM17/1	安山岩	24.8	50.5	6.4	26.5	5.15	1.68	4.76	0.9	4.8	0.97	2.71	0.46	2.93	0.42	132.98	115.03	17.95	6.41	1.02	0.96	6.07
	PM14/31	安山岩	22.9	46	6.04	25.3	5.32	1.6	4.63	0.89	4.46	0.9	2.54	0.43	2.84	0.38	124.22	107.16	17.06	6.28	0.96	0.94	5.78
		平均值		23.8	44.57	5.6	22.93	4.55	1.39	4.02	0.73	3.7	0.72	2.04	0.36	2.21	0.31	116.92	102.83	14.09	8.20	0.96	0.91
朗久组	D0293/2	粗面岩	128	261	33.5	134	20.6	3.33	11.6	1.34	5.25	/	1.79	/	1.57	0.18	603.09	580.43	22.66	25.61	0.60	/	58.48
	D0298/1	粗面岩	134	251	33.5	131	20.2	3.28	12	1.33	5.55	/	1.65	/	1.36	0.17	595.95	572.98	22.97	24.94	0.59	/	70.68
	D0301/1	石英粗面岩	128	252	32.9	134	21	3.28	11.1	1.32	4.81	/	1.51	/	1.58	0.16	592.54	571.18	21.36	26.74	0.59	/	58.11
		平均值		130	254.67	33.3	133	20.6	3.3	11.57	1.33	5.2	/	1.65	/	1.5	0.17	597.19	574.86	22.33	25.76	0.59	/

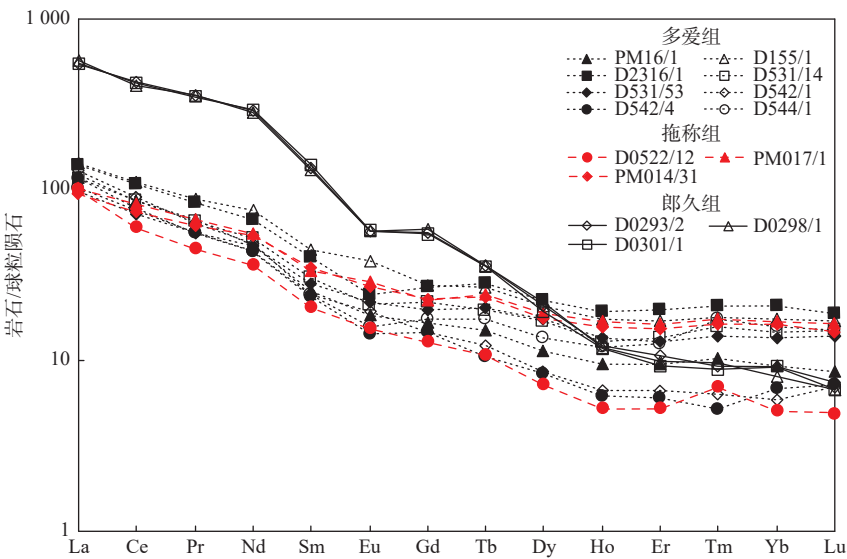


图7 则弄群(K_1Z)火山岩稀土元素球粒陨石标准化分布型式图

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns of the Zenong Group (K_1Z) volcanic rocks

表 4 多爱组(K_1d)角闪安山岩岩石 U-Pb 同位素测年分析结果表

Tab. 4 The U-Pb isotopic analysis result of the hornblende andesite of the Duo 'ai Formation

样号	D531/14						样品名称				角闪安山岩		
样品 情况	同位素原子比率									表面年龄			
点号	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²³² Th/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U
06	0.049 9	0.004 9	0.121 7	0.011 6	0.017 7	0.000 2	0.003 3	0.000 1	0.576 4	0.003 1	192	117	113
07	0.048 0	0.000 9	0.118 0	0.002 0	0.017 8	0.000 2	0.003 5	0.000 1	0.765 8	0.003 6	101	113	114
09	0.050 1	0.001 3	0.121 1	0.003 2	0.017 5	0.000 2	0.002 9	0.000 1	0.373 1	0.001 0	198	116	112
13	0.049 4	0.004 8	0.118 6	0.011 5	0.017 4	0.000 2	0.002 4	0.000 1	0.439 0	0.001 3	169	114	111
14	0.048 9	0.005 6	0.117 1	0.013 0	0.017 4	0.000 2	0.002 1	0.000 1	0.498 8	0.001 4	142	112	111
15	0.052 2	0.003 3	0.125 1	0.008 0	0.017 4	0.000 2	0.002 8	0.000 0	0.390 7	0.000 3	293	120	111
16	0.051 4	0.000 9	0.119 0	0.001 6	0.016 8	0.000 2	0.001 6	0.001 9	0.464 4	0.001 2	261	114	107

注：该样品根据频谱图选定111 Ma±作为岩体的年龄，选择点号与锆石特征图对应；测试单位为西北大学实验室(2020年)。

拖称组(K_1t)火山岩属于钙碱性系列。在里特曼-戈蒂里指数($\log\tau$ - $\log\delta$)图解(赵玉琛, 1989; 刘德林, 1992)(图 9a)中, 两个投影点落入造山带地区火山岩区; 在 $\text{Hf}/3\text{-Th-Nb}/16$ 图解(Pearce et al., 1983, 1984)(图 9b)中, 投影点全部落入钙碱性岛弧玄武岩区域; 在 $\text{La}/\text{Yb-La}$ 图解(李曙光, 1993)(图 9c)中, 投影点全部落入弧火山岩区域; 在 $\text{Th}/\text{Yb-Ta}/\text{Yb}$ 图解(Pearce, 1982)(图 9d)中, 投影点落在活动大陆边缘(陆缘弧)区域及附近; $\text{Ti}/100\text{-Zr-Sr}/2$ 图解(Wood, 1980)(图 9e)中, 样品投影点全部落入钙碱性岛弧玄武岩区域; 在 Th-Ta 图解(Pearce et al., 1983, 1984)(图 9f)中, 投影点落入火山弧玄武岩区域; 在 $\text{La}/\text{Yb-Sc}/\text{Ni}$ 、 $\text{La}/\text{Yb-Th}/\text{Yb}$ 图解(图 9g、图 9h)中, 投影点大部分落入大陆

边缘弧和安山弧区域及附近; 在 $\text{TFeO}/\text{MgO-TiO}_2$ 图解(Wood, 1980; Pearce, et al., 1983, 1984; 赵玉琛, 1989; 刘德林, 1992)(图 9i)中, 投影点落入岛弧拉斑玄武岩区域。结合其岩石组合、岩石化学及地球化学特征, 认为拖称组(K_1t)火山岩形成于岛弧环境。

郎久组(K_1l)火山岩属于碱性岩系列。在里特曼-戈蒂里指数($\log\tau$ - $\log\delta$)图解(赵玉琛, 1989; 刘德林, 1992)(图 9a)中, 投影点落入 C 区(A 区、B 区派生的碱性、富碱岩); 在 $\text{Hf}/3\text{-Th-Nb}/16$ 图解(Pearce 1983, 1984)(图 9b)中, 投影点落入钙碱性岛弧玄武岩区域; 在 $\text{La}/\text{Yb-La}$ (李曙光, 1993)、 $\text{Th}/\text{Yb-Ta}/\text{Yb}$ 图解(Pearce, 1982)(图 9c、图 9d)中, 投影点全部落在弧火山岩之外; 在 $\text{TFeO}/\text{MgO-TiO}_2$ 图解(Wood, 1980; Pearce, 1983,

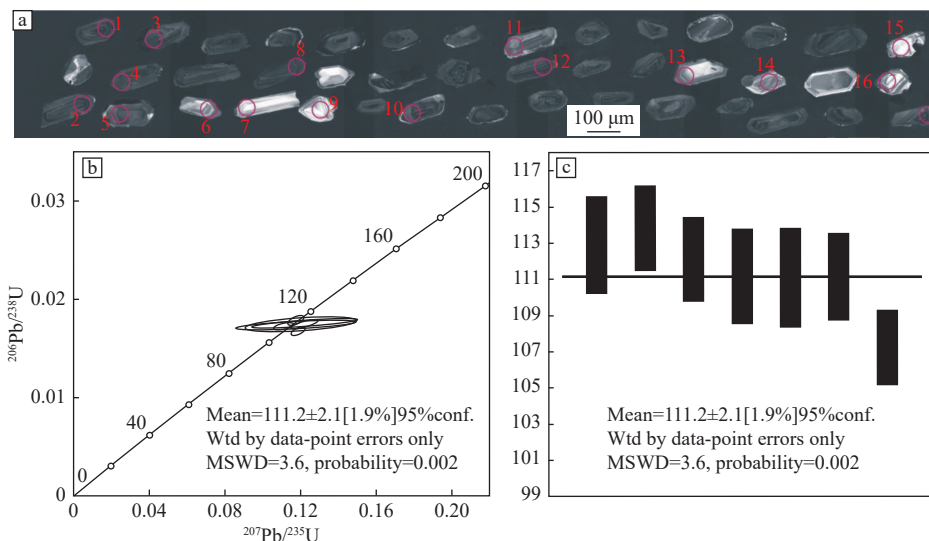


图8 D531-14 锆石阴极发光图像(a)、U-Pb 年龄谐和图(b)和加权平均年龄图(c)

Fig. 8 (a) The zircon CL images, (b) U-Pb concordia diagram and (c) weighted mean age of sample D531-14

1984; 赵玉琛, 1989; 刘德林, 1992)(图 9i)中, 投影点落入岛弧拉斑玄武岩区域; 在 $\text{FeO}^{\text{I}}\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 图解 (Pearce, 1977)(图 9j)中, 投影点全部落入岛弧及活动大陆边缘区域。结合其岩石组合、岩石化学及地球化学特征, 认为朗久组(K_1l)火山岩形成于近活动大陆边缘的岛弧环境。

根据前人完成的 1:25 万狮泉河幅等区域资料和研究成果, 措勤-申扎岩浆弧在中生代于活动边缘盆地中形成一套火山-沉积岩组合(许荣科等, 2004)。下白垩统多爱组(K_1d)、拖称组(K_1t)、朗久组(K_1l)和上白垩统捷嘎组(K_1jg)为一套巨厚的海陆交互相-滨浅海相的中酸性火山岩-碎屑岩和碳酸盐岩组合, 属于典型岛弧活动边缘盆地沉积建造。前人研究表明, 晚侏罗世—早白垩世是该带强烈的岛弧造山时期(朱弟成等, 2006, 2008a, 2008b; 康志强等, 2008), 形成的火山-沉积岩系累计厚度可能超过 10 000 m, 火山岩主体为碱性、钙碱性系列火山岩, 整体富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素, Ta、Nb 等高场强元素则表现为明显亏损, 曲线型式与成熟岛弧环境形成的火山岩相似, 暗示可能与上部陆壳物质重熔有关, 火山活动发生于成熟岛弧背景(朱弟成等, 2006, 2008a, 2008b)。

测区多爱组(K_1d)-拖称组(K_1t)-朗久组(K_1l)火山岩由早及晚地球化学性质的变化和相互之间呈火山喷发不整合接触, 指示了火山活动具有脉动的特点(朱弟成等, 2008a, 2008b; 格桑旺堆等, 2019), 分别构成 3 个不同部分熔融系列, 指示了一个俯冲角度变陡造成的弧壳加厚的过程。多爱组(K_1d)火山岩发育的柱状

节理、气孔构造和拖称组(K_1t)火山岩发育流纹构造(图 3)反映了这一时期曾有部分地带已露出水面。

朗久组(K_1l)具有碱性特征的火山岩喷出, 指示了存在由于俯冲诱发弧的拉裂(刘伟等, 2010; 周华等, 2016, 2018), 沉积物有由粗→细的特征, 而且越向上越偏碱性; 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 朗久组(K_1l)火山岩 Nb、Ta 负异常显著, 表明与来自俯冲带消减沉积物亏损高场强元素的流体交代地幔楔部分熔融有关, 指示该组火山岩为岛弧橄榄安粗岩系; 在稀土元素配分型式曲线图上, 朗久组(K_1l)火山岩稀土元素配分型式曲线明显向右陡倾, 轻稀土分异中等, 重稀土分异显著, 显示较弱的负 Eu 异常, 曲线与埃达克岩相似; 火山岩构造环境判别图解(图 9c, 图 9d)中, 朗久组(K_1l)火山岩也表现出与多爱组(K_1d)、拖称组(K_1t)不同的地球化学学习性。综上分析, 认为朗久组(K_1l)火山岩为典型岛弧橄榄玄粗岩系, 其大量发育标志冈底斯弧在这一时期已变为成熟大陆弧(李永飞等, 2005)。

4.2 时代分析

区域上多爱组(K_1d)角度不整合于中—晚侏罗世地层之上。狮泉河地区则弄群(K_1Z)火山岩(U-Pb 法)同位素年龄(145.9 ± 1.9) Ma ~ (148.5 ± 1.5) Ma(格桑旺堆等, 2019), 措勤地区则弄群(K_1Z)火山岩(U-Pb 法)同位素年龄(112.7 ± 0.1) Ma、111~118 Ma(刘伟等, 2010; 周华等, 2016, 2018), 拉萨、来多地区则弄群(K_1Z)火山岩(U-Pb 法)同位素年龄分别为(113.6 ± 1.0) Ma、114.7~124.0 Ma(康志强等, 2008; 贺娟等, 2020;

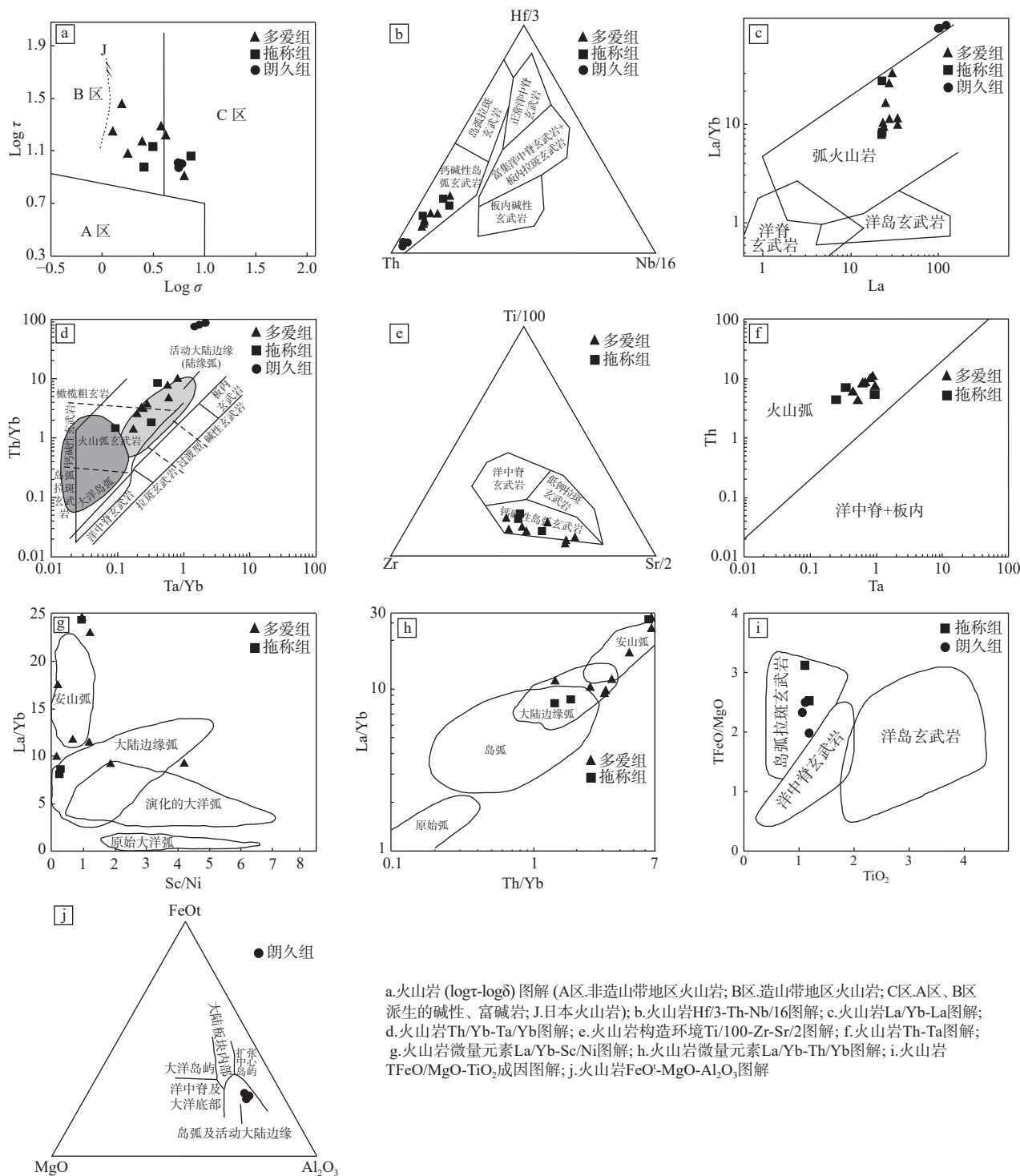


图9 则弄群(K₁Z)火山岩构造环境判别图解

Fig. 9 Discrimination diagrams for tectonic setting of the Zenong Group (K₁Z) volcanic rocks

张彤等, 2020)。

研究区内捷嘎组(K₁jg)角度不整合于多爱组(K₁d)之上, 罗布隆仁波一带, 多爱组(K₁d)火山岩不整合于晚侏罗世花岗闪长岩(U-Pb 同位素年龄 154.51±0.6 Ma)之上。结合本次研究在多爱组(K₁d)角闪安山

岩(U-Pb 法)中获得锆石 U-Pb 年龄(111.2±2.1)Ma, 表明则弄群(K₁Z)火山岩形成时代为早白垩世。

结合本次工作取得的研究数据, 则弄群(K₁Z)为大陆边缘滨浅海相环境下的产物, 其火山岩具线状裂隙式兼中心式喷发的特点, 为白垩纪经板块俯冲后在

大陆一侧形成的陆缘弧环境, 所夹的灰岩及碎屑岩反映了滨浅海相沉积的特点(贺娟等, 2020; 张彤等, 2020)。

根据前人公开发表的年代学、地球化学研究成果, 在晚三叠世到中侏罗世, 在班公湖-怒江带和新特提斯洋之间存在一个在弧间裂谷基础上发展起来的洋盆-Slainajap 洋盆(李永飞等, 2005; 朱弟成等, 2006, 2008a, 2008b; 王辉等, 2009; 张志平等, 2016), 即狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带所代表的洋盆。

根据本次研究工作取得的结果, 并结合前人的认识, 则弄群(K_1Z)火山岩形成大地构造背景为 Slainajap 洋盆向南俯冲。

5 结论

(1) 则弄群(K_1Z)火山岩由早及晚构成 3 个不同部分熔融系列, 自下而上划为 3 个组: 多爱组(K_1d)、拖称组(K_1t)、朗久组(K_1l)。多爱组(K_1d)以中性火山岩为主, 属碱性-钙碱性系列岩石; 拖称组(K_1t)以酸性火山岩为主, 属碱性-钙碱性系列岩石; 朗久组(K_1l)以碱性火山岩为主, 属碱性系列岩石, 具有富钾贫钠的特点。

(2) 则弄群(K_1Z)火山岩整体富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素, 明显亏损 Ta、Nb 等高场强元素, 曲线型式与成熟岛弧环境形成火山岩相似; 轻重稀土分异显著, 轻稀土分异较重稀土分异显著, 稀土配分曲线总体显示岛弧火山岩稀土分配形式, 朗久组(K_1l)火山岩稀土配分曲线与埃达克岩相似。

(3) 多爱组(K_1d)、拖称组(K_1t)、朗久组(K_1l)地球化学性质的变化和火山喷发不整合接触表明火山活动具有脉动特点, 指示了俯冲角度变陡造成弧壳加厚的过程。朗久组(K_1l)碱性火山岩喷出指示存在俯冲诱发弧的拉裂。

(4) 则弄群(K_1Z)火山岩地球化学、年代学研究结果表明冈底斯弧在早白垩世晚期已变为成熟大陆弧, 是狮泉河-永珠-纳木错-嘉黎蛇绿混杂岩带所代表的洋盆(Slainajap 洋盆)向南俯冲的结果。

参考文献(References):

格桑旺堆, 顿都, 尼玛次仁, 等. 狮泉河地区晚侏罗世-早白垩世火山岩锆石 U-Pb 年龄及成因[J]. 四川有色金属, 2019(04):

11-18.

ESANG Wangdui, DUN Du, NINA Ciren, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Petrogenesis of the Late Jurassic to Early Cretaceous Volcanic Rocks in Shuquan River Area, Western Tibet[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2019(04): 11-18.

贺娟, 王启宇, 王保弟, 等. 西藏拉萨地体狮泉河则弄群凝灰岩的年代学及动力学背景[J]. 地球科学, 2020, 45(08): 2857-2867.

HE Juan, WANG Qiyu, WANG Baodi, et al. Geochronology and Geodynamic Settings of Zenong Group Tuff from Shiquanhe of Middle Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Earth Science*, 2020, 45(08): 2857-2867.

康志强, 许继峰, 董彦辉, 等. 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?[J]. 岩石学报, 2008, 24(2): 303-314.

KANG Zhiqiang, XU Jifeng, DONG Yanhui, et al. Cretaceous volcanic rocks of Zenong Group in north-middle Lhasa block: products of southward subducting of the Slainajap ocean?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 303-314.

李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J]. 岩石学报, 1993, 9(2): 146-157.

LI Shuguang. Ba-Nb-Th-La Diagrams used to identify tectonic environments of Ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1993, 9(2): 146-157.

黎彤. 大洋地壳和大陆地壳的元素丰度[J]. 大地构造与成矿学, 1984, 8(1): 19-27.

LI Tong. Abundance of Chemical elements in oceanic and Continental Crust[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1984, 8(1): 19-27.

黎彤, 倪守斌. 中国大陆岩石圈的元素丰度[J]. 地质与勘探, 1997, 33(1): 31-37.

LI Tong, NI Shoubin. Element Abundances of the Continental Lithosphere in China[J]. *Geology and Prospecting*, 1997, 33(1): 31-37.

李永飞, 王娟. 羌塘地块南界班公湖-丁青断裂构造带火山岩地球化学及其形成构造环境[J]. 西北地质, 2005, 38(1): 15-25.

LI Yongfei, WANG Juan. Geochemistry of the volcanic rock association from Bangong lake-Dingqing suture zone of the south boundary in Qiangtang block and its tectonic setting[J]. *North-western Geology*, 2005, 38(1): 15-25.

刘德林. 里特曼标准矿物换算因数算法及评估[J]. 岩石矿物学杂志, 1992, 11(3): 277-283.

LIU Delin. Calculation and Evaluation of Conversion Factors of Rittmann Normative Minerals[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1992, 11(3): 277-283.

刘伟, 李奋其, 袁四化, 等. 西藏措勤地区则弄群火山岩源区-地球化学及 Sr-Nd 同位素制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(4): 367-376.

- LIU Wei, LI Fenqi, YUAN Sihua, et al. Volcanic rock provenance of Zenong Group in Coqen area of Tibet: geochemistry and Sr-Nd isotopic constraint[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2010, 29(4): 367–376.
- 莫宣学, 董国臣, 赵志丹, 等. 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[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(3): 281–290.
- MO Xuanxue, DONG Guochen, ZHAO Zhidan, et al. Spatial and temporal Distribution and Characteristics of Granitoids in the Gangdese, Tibet and Implication for Crustal Growth and Evolution[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(3): 281–290.
- 潘桂棠, 王立全, 朱弟成. 青藏高原区域地质调查中几个重大科学问题的思考[J]. *地质通报*, 2004, 23(1): 12–19.
- PAN Guitang, WANG Liqun, ZHU Dicheng. Thoughts on some important scientific problems in regional geological survey of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(1): 12–19.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 521–533.
- PAN Guitang, MO Xuanxue, HOU Zengqian, et al. Spatial-temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 521–533.
- 宋全友, 陈清华. 青藏措勤盆地白垩统则弄群火山岩岩石地球化学特征[J]. *石油大学学报(自然科学版)*, 1999, 23(5): 17–19.
- SONG Quanyou, CHEN Qinghua. Litho Geochemical Characteristics of the Volcanic rocks in the early Cretaceous of Zenong Group in Cuoqin Basin of Qinghai-Tibet Area[J]. *Journal of the University of Petroleum China(Edition of Natural Science)*, 1999, 23(5): 17–19.
- 王辉, 张峰, 王冰洁, 等. 羌塘盆地晚三叠世构造属性与层序地层格架下聚煤特征[J]. *西北地质*, 2009, 42(4): 92–101.
- WANG Hui, ZHANG Feng, WANG Bingjie, et al. The Structure Characteristics and Coal-Accumulating Features Under Sequence Framework in the Late Triassic of Qiangtang Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2009, 42(4): 92–101.
- 许荣科, 茨邛, 庞振甲, 等. 中华人民共和国狮泉河幅(144C004002)1/25 万区域地质调查报告[R]. 拉萨: 西藏自治区地质调查院, 2004.
- 袁四化. 冈底斯带中段北部早白垩世火山岩及其大地构造意义[D]. 北京: 中国地质科学院, 2009.
- YUAN Sihua. The Early Cretaceous volcanic rocks in north part of central segment of the Gangdese in the Tibet and its tectonic implications[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2009.
- 张本仁. 大陆造山带地球化学研究: I 岩石构造环境地球化学判别的改进[J]. *西北地质*, 2001, 34(3): 1–17.
- ZHANG Benren. Geochemical study of continental orogenic belts: on improvement of geochemical discrimination of tectonic settings of rocks[J]. *Northwestern Geology*, 2001, 34(3): 1–17.
- 张彤, 黄波, 罗改, 等. 西藏中冈底斯带北部早白垩世构造属性: 来自则弄群火山岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学的制约[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(02): 75–90.
- ZHANG Tong, HUANG Bo, LUO Gai, et al. Tectonic attributes of the Northern part of the Middle Gangdise Belt in the Early Cretaceous: evidences of zircon U-Pb dating and lithogeochemistry of volcanic rocks from the Zenong Group[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2020, 40(02): 75–90.
- 张志平, 董瀚, 吴勇, 等. 西藏改则县错果错地区则弄群火山岩岩石地球化学特征及其构造意义[J]. *甘肃地质*, 2016, 25(04): 22–29.
- ZHANG Zhiping, DONG Han, WU Yong, et al. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Zenong Group Volcanic Rocks in Cuogucuo Area of Gaize, Tibet[J]. *Gansu Geology*, 2016, 25(04): 22–29.
- 赵玉琛. 对里特曼岩石化学换算法的一些改进和补充[J]. *岩石学报*, 1989, 5(1): 84–96.
- ZHAO Yuchen. Improvements for the Method of a. rittmann on petrochemical Conversion[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1989, 5(1): 84–96.
- 周华. 西藏措勤火山-侵入杂岩成因及其构造意义[D]. 南京: 南京大学, 2018.
- ZHOU Hua. Petrogenesis of Volcanic-Intrusive Complex in Coque, Tibet, and Their Tectonic Implications[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018.
- 周华, 邱检生, 喻思斌, 等. 西藏措勤地区火山岩的年代学与地球化学及其对岩石成因的制约[J]. *地质学报*, 2016, 90(11): 3173–3191.
- ZHOU Hua, QIU Jiansheng, YU Sibin, et al. Geochronology and Geochemistry of Volcanic Rocks from Coqen District of Tibet and Their Implications for Petrogenesis[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(11): 3173–3191.
- 朱弟成, 莫宣学, 赵志丹, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2008, 24(3): 401–412.
- ZHU Dicheng, MO Xuanxue, ZHAO Zhidan, et al. Zircon U-Pb geochronology of Zenong Group volcanic rocks in Coqen area of the Gangdese, Tibet and tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(3): 401–412.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 等. 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[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 534–546.
- ZHU Dicheng, PAN Guitang, MO Xuanxue, et al. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*,

- 2006, 22(3): 534–546.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. *地质通报*, 2008, 27(9): 1535–1550.
- ZHU Dicheng, PAN Guitang, WANG Liquan, et al. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, with a discussion of geodynamic setting-related issues [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(9): 1535–1550.
- Chen F K, Hegner E, Todt W. Zircon ages, Nd isotopic and chemical composition of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc[J]. *Earth Science*, 2000, 88: 791–802.
- Chen F K, Sibel W, Satir M, et al. Geochronology of the Karadere basement(NW Turkey)and implications for the geological evolution of the Istanbul zone[J]. *Earth Science*, 2002, 91: 469–481.
- Harris N B W, Inger S, Xu R. Cretaceous plutonism in central Tibet: An example of post-collision magmatism?[J]. *Journal of volcanology and Geothermal Research*, 1990, 44: 21–32.
- Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalisilica diagram[J]. *Journal of Petrology*, 1986, 27: 745–750.
- Matsuhisa, Yukihiro. Oxygen isotopic compositions of volcanic rocks from the east Japan island arcs and their bearing on petrogenesis[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 1979, 5(3): 271–296.
- Middlemost E A K. M. Magmas and Magmatic Rocks[M]. Longman, London, 1985.
- Pearce J A, Gale G H. Identification of ore-deposition environment from trace-element geochemistry of associated igneous host rocks[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1977, 7(1): 14–24.
- Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[J]. *Orogenic Andesties and Related Rocks*, 1982, 525–548.
- Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins In: Hawkesworth C J and Norry M J (eds.), *Continental basalts and mantle xenoliths* [J]. Nantwich: Shiva, 1983, 230–249.
- Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[J]. *Geological Society*, 1984, 16: 77–94.
- Pearce J A, Mei H. Volcanic rocks of the 1985 Tibet Geotraverse Lhasa to Golmud[J]. *Royal Society of London Philosophical Transactions, Series A*, 1988, 327: 169–201.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts, implication for mantle composition and processes, in "Magmatism in the Oceanic Basin" edited by Saunders A D. Norry M J [J]. *Geol. Soc. Special Publ*, 1989, 42: 313–345.
- Winchester J A, Flod P A. Geochemical magma type discrimination: application to altered and metamorphosed basic igneous rocks[J]. *Earth Planet. Science Lett.*, 1976, 28: 459–469.
- Wood D A. The application of a Th-Hf-Tadiagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British tertiary volcanic province[J]. *Earth Planet. Sci. Lett*, 1980, 42: 77–97.
- Wright J B. A simple alkalinity ratio and its application to question of non-orogenic granite genesis[J]. *Geol. Mag.*, 1969, 106(4): 370–384.
- Xu R H, Schärer U, Allègre C J. Magmatism and metamorphism in the Lhasa block(Tibet): A geochronological study[J]. *Journal of Geology*, 1985, 93: 41–57.