

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.147>



西藏甲鲁朗地区叶巴组火山岩成因及其 对新特提斯洋俯冲的约束

宋宇航¹, 解超明^{1,2*}, 范建军^{1,2}, 曾孝文¹, 郝宇杰^{1,2}, 李晓波¹

1. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

2. 东北亚矿产资源评价自然资源部重点实验室, 吉林长春 130061

摘要: 西藏冈底斯岩浆弧叶巴组火山岩对于新特提斯洋俯冲时限的制约存在着重要的意义。通过对甲鲁朗地区叶巴组凝灰岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学组成的研究, 锆石测年获得 3 件凝灰岩样品 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为 207.8 ± 1.6 Ma、 204.8 ± 1.7 Ma 和 209.3 ± 3.4 Ma, 结合古生物化石证据, 表明其形成于晚三叠世; 凝灰岩样品富集轻稀土元素和大离子亲石元素 (Rb、K、Th、U、Pb), 亏损重稀土元素和高场强元素 (Nb、Ta、Ti、P), 同时亏损 Sr 元素, Eu 负异常较明显。岩石地球化学特征表明叶巴组中酸性岩可能为壳幔混染成因。综合前人研究成果, 认为叶巴组形成于新特提斯洋俯冲环境下的大陆边缘弧, 新特提斯洋的俯冲从晚三叠世就已经开始。本研究为叶巴组的形成时代以及动力学背景提供了新的制约。

关键词: 叶巴组; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 岩石成因; 新特提斯洋。

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2019)07-2319-20

收稿日期: 2019-04-13

Petrogenesis of Volcanic Rocks from the Yeba Formation in Jialulang Area, Tibet and Its Constraints on the Subduction of Neo-Tethyan Oceanic Slab

Song Yuhang¹, Xie Chaoming^{1,2*}, Fan Jianjun^{1,2}, Zeng Xiaowen¹, Hao Yujie^{1,2}, Li Xiaobo¹

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Key Laboratory of Mineral Resources Evaluation in Northeast Asia, Ministry of Natural Resources, Changchun 130061, China

Abstract: The volcanic rocks of the Yeba Formation on the Gangdese magmatic arc, Tibet are of importance for limiting the initiation of the Neo-Tethyan oceanic slab subduction. This paper reports LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and whole-rock geochemistry compositions of the tuffs from the Yeba Formation in Jialulang area. LA-ICP-MS U-Pb isotopic dating of the tuffs obtained $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age weighted average values are 207.8 ± 1.6 Ma, 204.8 ± 1.7 Ma and 209.3 ± 3.4 Ma, based on this analysis above and the evidence of fossil organism as well, the tuffs of the Yeba Formation were formed in the Late Triassic. The tuffs exhibit LREE and LILE (Rb, K, Th, U, Pb) enrichment and HREE and HFSE (Nb, Ta, Ti, P) depletion, depletion of Sr as well, with negative Eu anomaly. Combining with geochemical characteristics, it has been suggested a mixing source from crust and depleted mantle for the intermediate-acid rocks from the Yeba Formation. Based on the previous studies, it is indicated that the volcanic rocks of the Yeba Formation were formed in the active continental margin arc setting with the subduction of the Neo-Tethyan oceanic slab, the initiation of the subduction occurred at Late Triassic. This study provides new constraints for the ages

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41872231, 41602230); 中国地质调查局项目 (Nos. DD20160015, DD20160026); 自然资源部东北亚矿产资源评价重点实验室自主课题基金项目 (No. DBY-ZZ-18-06)。

作者简介: 宋宇航 (1995—), 男, 硕士研究生, 构造地质学专业, ORCID: 0000-0001-7953-2103. E-mail: 463513780@qq.com

* 通讯作者: 解超明, E-mail: xcmxcm1983@126.com

引用格式: 宋宇航, 解超明, 范建军, 等, 2019. 西藏甲鲁朗地区叶巴组火山岩成因及其对新特提斯洋俯冲的约束. 地球科学, 44(7): 2319-2338.

and dynamic settings of the Yebe Formation.

Key words: Yebe Formation; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; geochemistry; petrogenesis; Neo-Tethyan oceanic slab.

0 引言

青藏高原由诸多块体组成,经历了特提斯洋盆演化以及多块体、多岛弧拼合,俯冲、碰撞、造山等长期动力学过程(许志琴等,2007;Ma *et al.*, 2017).由于雅鲁藏布蛇绿岩所代表的新特提斯洋的消失导致印度—亚欧大陆碰撞,最终形成了青藏高原(Yin and Harrison, 2000).西藏南部冈底斯岩浆弧位于雅鲁藏布江缝合带与北部的班公湖—怒江缝合带之间,在晚古生代以来存在着强烈的火山岩浆活动,是研究特提斯构造演化的绝佳场所.一般认为,冈底斯岩浆弧形成于中生代新特提斯洋向北部的拉萨地块之下的长期俯冲过程中,并在印度与亚洲大陆的碰撞过程中叠加了后期的新生代岩浆作用(Chu *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2010, 2017; Guo *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; Pan *et al.*, 2016).其上发育的叶巴组火山岩被认为记录了特提斯洋在早期俯冲消减的过程(董彦辉等, 2006; 朱弟成等, 2008a, 2008b).因此对叶巴组形成时代、岩石成因及形成环境等问题的研究,对确定特提斯构造演化过程及时代有重要的意义.

近年来众多学者从年代学、岩石地球化学、地层学、构造环境以及动力学机制等方面对叶巴组进行了较为全面的研究.研究者认为叶巴组火山岩是大洋板块俯冲形成的火山弧产物,但对具体的形成环境及动力学来源有着不同的看法,关于其形成环境的观点包括弧后盆地环境(耿全如等, 2005, 2006; Wei *et al.*, 2017)以及岛弧环境(董彦辉等, 2006; 曾忠诚等, 2009; 陈炜等, 2009).对于动力学机制的观点包括新特提斯洋的北向俯冲(董彦辉等, 2006; 曾忠诚等, 2009; 陈炜等, 2009; Guo *et al.*, 2013; Wei *et al.*, 2017);班公湖—怒江洋南向俯冲导致拉萨地块南缘发生弧后扩张(耿全如等, 2005, 2006; Zhu *et al.*, 2008;)以及松多古特提斯洋俯冲至南拉萨地块之下引起的板片断离或回转(董昕和张泽明, 2013).此外对于叶巴组的形成时代在前人研究中也存在着不同的认识,最初西藏地质局综合队根据叶巴组内所取得珊瑚化石 *Thecosmilia* sp. 将其时代定为晚三叠世;阴家润等(2006)在墨竹工卡县下波朗剖面中获得晚三叠世瑞替阶 *Gervillari Iso-*

cyprina. 双壳类组合,佐证了上述观点.近年来前人对达孜县地区及得明顶地区叶巴组火山岩进行了大量的锆石年代学研究,结果显示其形成时代为早—中侏罗世,因此他们认为形成叶巴组的大洋板块开始俯冲的时间应不晚于该时期(耿全如等, 2005, 2006; 陈炜等, 2009; Wei *et al.*, 2017).不过也有研究表明俯冲开始于晚三叠世甚至更早(莫宣学等, 2005; Wang *et al.*, 2016).因此,对于叶巴组形成的环境与动力学机制以及大洋板块开始俯冲的时限仍需进一步的探讨.

本文在总结前人研究的基础上,对研究区内所获得的叶巴组凝灰岩进行了锆石年代学及主微量地球化学分析研究,结合所采得的化石样品,以及区域上叶巴组火山岩地球化学数据,对叶巴组的形成时代、成因及构造环境进行分析,为区域演化过程提供新的约束条件.

1 地质背景及岩性特征

西藏南部拉萨地块由前寒武纪的结晶基底、古生代—中生代的沉积岩和古生代—新生代的岩浆岩组成(潘桂棠等, 2006; Zhu *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2018).冈底斯岩浆弧位于拉萨地块南部,发育有大量中生代以来的岩浆活动(Chu *et al.*, 2006; Guo *et al.*, 2013).

研究区位于拉萨东侧松多地区(图 1a 红框区域),大地构造位置处于拉萨地块中部,印度河—雅鲁藏布江缝合带以北,狮泉河—申扎缝合带以南,地处中拉萨地块与南拉萨地块结合处,在沙莫勒—米拉山断裂带之上.区域上叶巴组主要分布于拉萨市与工布江达县之间(图 1a),呈长条带状东西向展布,该带东西长约 250 km,宽 3~15 km.岩性复杂,火山岩类主要包括浅变质玄武岩、英安岩、流纹岩、酸性凝灰岩及火山角砾岩等,其中以中酸性岩占绝大多数.组内也发育变质沉积岩类,如变质砂岩、硅质岩、板岩等.根据岩石组合,由下到上,由老到新可划分为 3 个岩性段.叶巴组一段主要包括玄武岩和中酸性晶屑凝灰岩,以及层间火山角砾岩、火山集块岩等;叶巴组二段以英安岩、流纹岩、晶屑凝灰岩和砂岩为主;叶巴组三段由绢云母石英片岩、石

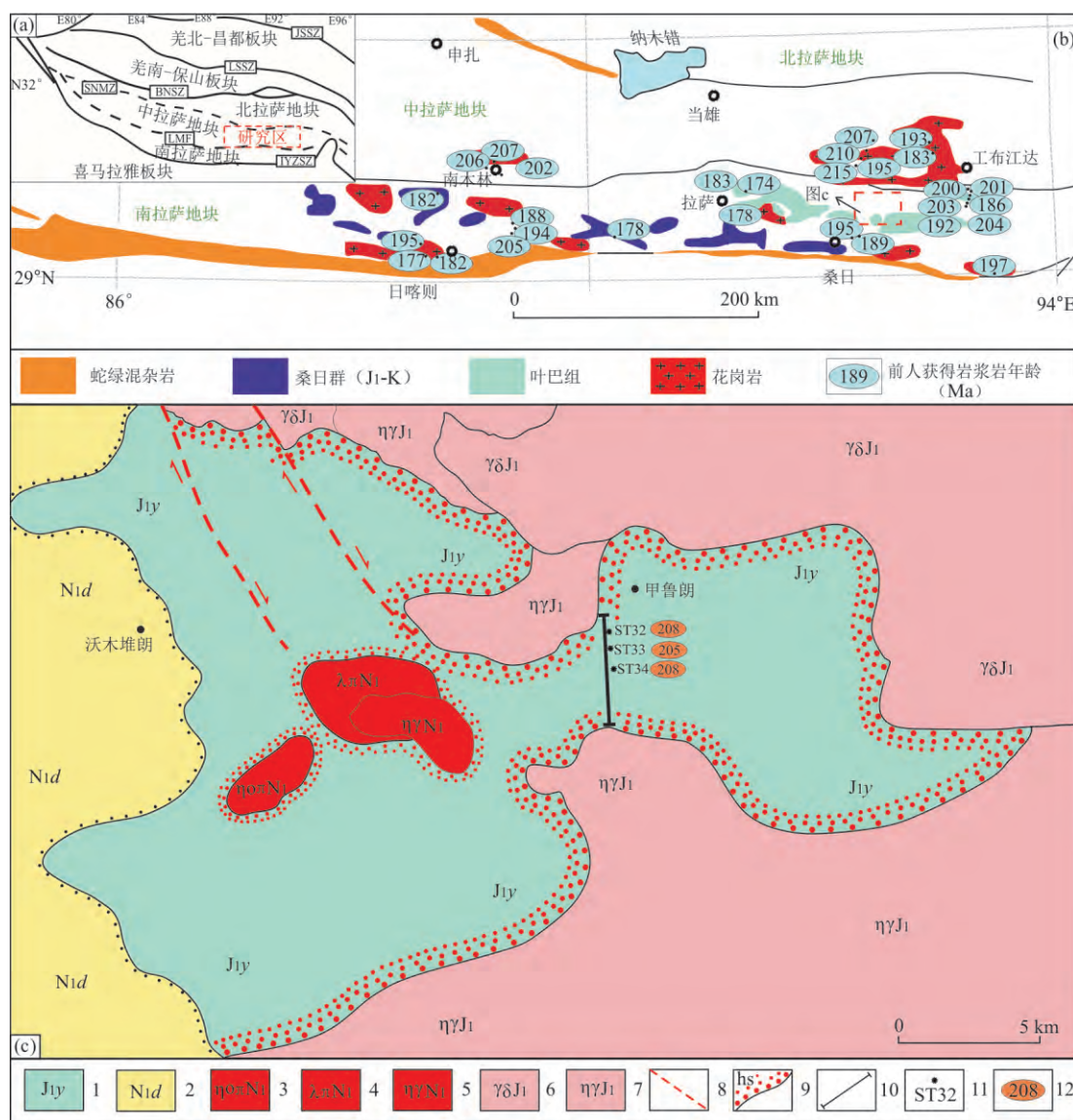


图 1 西藏冈底斯岩浆岩分布简图及研究区叶巴组火山岩地质简图

Fig.1 The simplified distribution map of magmatic rocks on Gangdese and simplified geological map of volcanic rocks of Yebo Formation in researched area, Tibet

图据黄丰等(2015)修改;图a中:JSSZ. 西金乌兰—金沙江板块缝合带;LSSZ. 龙木措—双湖—澜沧江板块缝合带;BNSZ. 班公湖—怒江板块缝合带;SNMZ. 狮泉河—纳木错蛇绿混杂岩带;IYZSZ. 印度河—雅鲁藏布江板块缝合带;图b中:1. 早侏罗世叶巴组;2. 中新世达弄多组;3. 中新世石英二长斑岩;4. 中新世石英斑岩;5. 中新世二长花岗岩;6. 早侏罗世花岗闪长岩;7. 早侏罗世二长花岗岩;8. 推测断层;9. 角岩化带;10. 剖面位置;11 采样位置及编号;12. 本文获得年龄

英片岩、凝灰岩、流纹岩、砂岩、粉砂岩、硅质岩、板岩和灰岩等组成(耿全如等, 2005;董彦辉等, 2006),同时叶巴组内可见少量基性岩脉侵入(Zhu *et al.*, 2008).研究区内叶巴组分布较广,下覆中新统达弄多组火山岩,二者呈角度不整合关系接触,同时发育有大量中—新生代侵入岩(图1c).研究区内叶巴组主要岩石类型包括英安质凝灰岩、安山质凝灰岩,另有少量英安岩、板岩、泥质板岩等(图2).

本次研究所获得样品可分为3种类型,其中代

表性岩石岩相学特征如下:

(1)安山质含角砾晶屑凝灰熔岩(ST32),出露情况良好,风化破碎程度较弱,风化面颜色为灰黑色,新鲜面颜色为灰绿色,角砾凝灰结构,块状构造.主要由晶屑组成,含量大于90%;火山碎屑粒度以角砾为主,分选较差.晶屑成分主要为石英,含量约为55%,呈次棱角状,部分因熔蚀呈次圆状和不规则状密集分布,斜长石呈半自形板柱状,含量约为25%,可见双晶发育(图3a、3d).

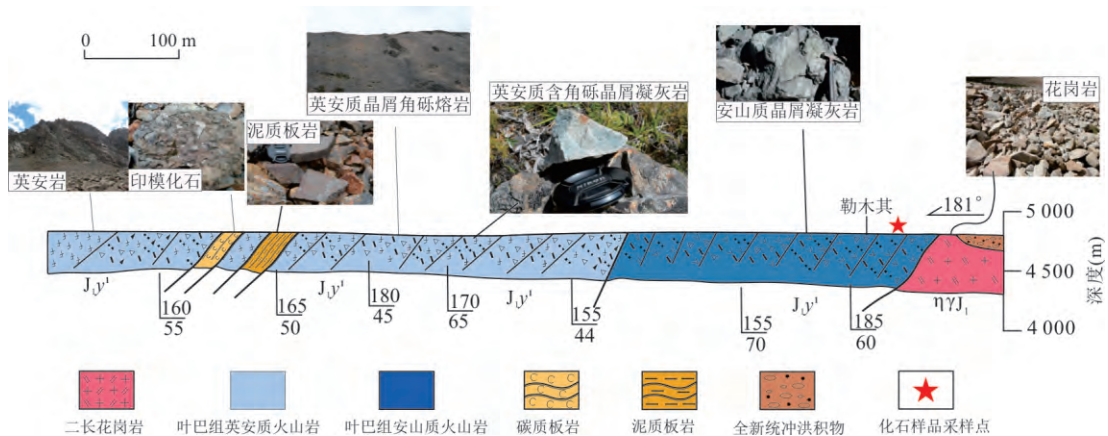


图2 叶巴组实测剖面

Fig.2 A measured sectional view for the Yebe Formation

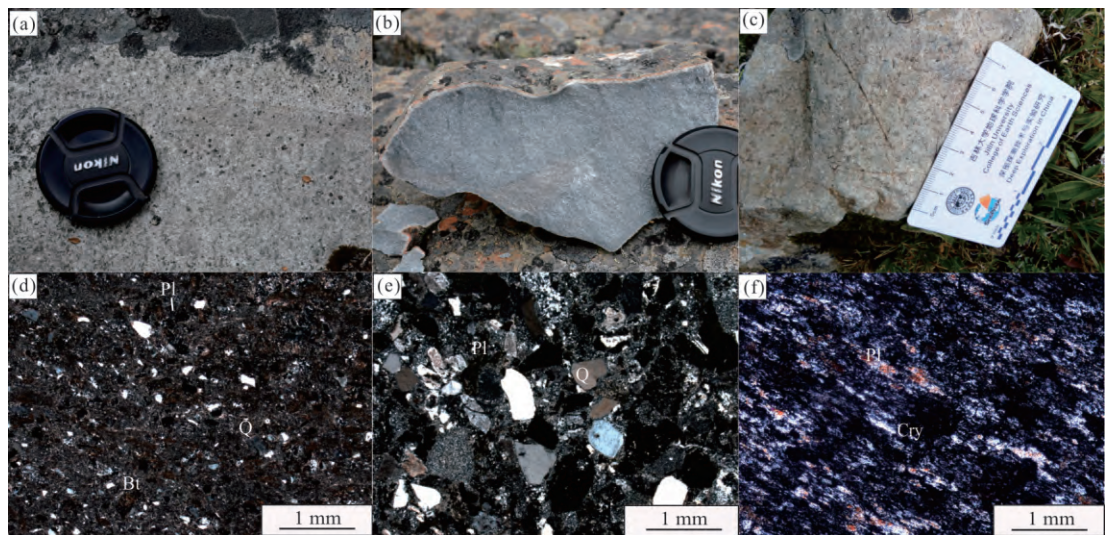


图3 甲鲁朗地区叶巴组火山岩样品野外及镜下照片

Fig.3 Outcrop photos and microscopic pictures of typical rock assemblage of volcanic rocks from Yebe Formation in Jialulang area

Pl. 斜长石; Cry. 晶屑; Q. 石英

(2)英安质晶屑凝灰岩(ST33),在研究区内分布较广,具火山凝灰结构,块状构造,层理构造.上部与安山质凝灰岩整合接触,下部发育有板岩.火山碎屑粒度以火山灰为主,主要成分为晶屑,晶屑成分主要为石英、斜长石.石英含量为45%~50%,多呈蚀湾状、尖角状,具波状消光.斜长石晶屑含量在15%~25%之间,呈半自形板柱状,发育聚片双晶(图3b、3e).

(3)流纹质晶屑凝灰岩(ST34),在研究区内分布较少,岩石具有火山碎屑结构,层理构造.由塑性岩屑,塑性玻屑及少量石英、长石晶屑组成,塑性玻屑含量在60%左右,呈细条纹状.细火山灰含量约为15%.晶屑含量约为20%,其中长石含量约占

30%,存在不同程度的蚀变现象,多数岩屑晶屑被拉长,略呈定向分布,具有假流动构造(图3c、3f)

2 分析方法

2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

本次测试的样品均采自新鲜露头,之后送往河北省区域地质调查研究院完成锆石挑选工作,样品经过破碎、淘洗、电磁分选步骤后,于双目镜下挑选出晶形符合条件的锆石颗粒,之后进行样品制靶工作.样品靶的制备在中国地质科学院地质研究所完成,样品靶直径为25 mm,对其进行打磨、抛光处理后,暴露出多数锆石的中心位置,之后在中国地质

大学(北京)进行锆石反射光和透射光显微照像工作. 锆石阴极发光(CL)图像的拍摄则在北京大学物理学院进行,用以确定锆石的成因类型和内部结构. 锆石 U-Pb 同位素测年工作在中国地质大学(北京)地学实验中心元素化学研究室完成,使用的激光器为美国 NewWave 贸易有限公司生产的 UP193SS 型固体激光器,激光波长为 193 nm;载气为 He,流速 0.6 L/min;束斑直径为 30~36 μm ;激光频率为 10 Hz;预剥蚀时间与剥蚀时间分别为 5 s 和 45 s;计算年龄时以标准锆石 91500 为外标进行同位素比值校正,选用澳大利亚的标准锆石 TEMORA (417 Ma) 和来自斯里兰卡伟晶岩中的标准锆石 SL13 ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}=0.092\ 8$; 572 Ma) 为监控盲样. 锆石稀土元素含量测试(ICP-LMS)所使用质谱仪为德国 Jena 公司,Elite 型 PQ-ICP-MS;辅助气为 Ar,流速为 1.11 L/min,元素含量以国际标样 NIST610 为外标,Si 为内标计算,NIST612 和 NIST614 为监控盲样. 测试完毕,使用 Glitter4.4 软件对同位素比值及元素含量进行处理,最后采用 Isoplot 软件绘制 U-Pb 谐和图和计算加权平均值. 所有锆石 U-Pb 比值均进行了普通铅校正(Andersen, 2002),详细测试方法见 Song *et al.* (2010).

2.2 岩石地球化学测试

本次共采集叶巴组火山岩地球化学样品 6 件,首先于室内进行简单的碎样处理,去除风化面,保留新鲜面,之后在河北省区域地质调查研究院实验室进行无污染处理,粉碎至 200 目,最后将处理完的样品送到中国地质大学(北京)地学实验中心完成全岩主量及微量元素分析. 主量元素分析测试在中国地质大学(北京)科学研究院实验中心“元素地球化学实验室”完成,使用美国利曼公司(LEEMAN LABS. INC) Prodigy 型等离子发射光谱仪(ICP-OES)完成测试,部分元素在含量低于 0.01% 时,采用酸溶溶液,利用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 进行元素含量验证性测定. 微量元素分析采用两酸(HNO_3+HF)高压反应釜(Bomb)溶样方法进行样品的化学预处理. 样品分析仪器使用美国安捷伦公司生产的 Agilent 7500 a 型等离子质谱仪进行测试,实验过程中的参考样品均采用国际标准 AGV-2 和 GSR-3 进行校对. 样品中 Cr、Sc、Sr 等元素分析误差 <10%,其他元素分析误差 <5%.

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 定年

本文对西藏甲鲁朗地区叶巴组中的凝灰岩进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年以及锆石稀土元素测试,分析结果见图 4 和表 1、表 2. 安山质含角砾晶屑凝灰熔岩样品 ST32 中锆石呈长柱状、近六边形和椭圆状,主要发育岩浆振荡生长环带、次环带结构(图 4a),锆石粒径在 160~20 μm 之间,Th/U 比值在 0.53~1.04 之间,均大于 0.1,具有典型的岩浆锆石成因特征. 在锆石球粒陨石标准化图解中,锆石稀土元素配分曲线呈现较明显的左倾,轻、重稀土元素分异明显(图 4b),同样显示典型的岩浆锆石稀土元素特征;英安质晶屑凝灰岩样品 ST33 中锆石呈长柱状、楔状和椭圆状,主要发育岩浆振荡生长环带、次环带结构(图 4c),锆石粒径在 250~40 μm 之间,Th/U 比值在 0.47~1.39 之间,均大于 0.1,在锆石球粒陨石标准化图解中,锆石稀土元素配分曲线呈现明显的左倾,轻、重稀土元素分异明显(图 4d),显示典型的岩浆锆石稀土元素特征. 流纹质晶屑凝灰岩样品 ST34 锆石多呈不规则状、椭圆状、六边形状,主要发育岩浆环带结构,部分锆石表面未见环带(图 4e). 锆石整体粒径在 120~10 μm 之间,Th/U 比值在 0.65~1.08 之间,均大于 0.1,在锆石球粒陨石标准化图解中(图 4f),锆石稀土元素配分曲线呈现明显的左倾,轻、重稀土元素分异明显,具有典型的岩浆锆石稀土元素特征.

样品 ST32 中 13 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 206~210 Ma 之间,加权平均年龄为 207.8 ± 1.6 Ma. 样品 ST33 中 13 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 203~207 Ma 之间,加权平均年龄为 204.8 ± 1.7 Ma. 样品 ST34 中 3 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分布在 208~211 Ma 之间,加权平均年龄为 209.3 ± 3.4 Ma. 以上样品均具有谐和的 U-Pb 年龄,加权平均年龄可代表岩石的岩浆结晶年龄,为晚三叠世.

3.2 岩石地球化学

3.2.1 主量元素 对本研究所获得样品进行主微量元素分析,测试结果见表 3. 安山质含角砾晶屑凝灰熔岩(ST32)样品 SiO_2 含量分别为 61.13% 和 62.97% (均值 62.05%), Al_2O_3 含量分别为 21.96% 和 21.08% (均值 21.52%), Na_2O 含量分别为 1.25% 和 1.64% (均值 1.45%), MgO 含量分别为 0.8% 和 0.79% (均值 0.79%), CaO 含量分别为 2.43% 和

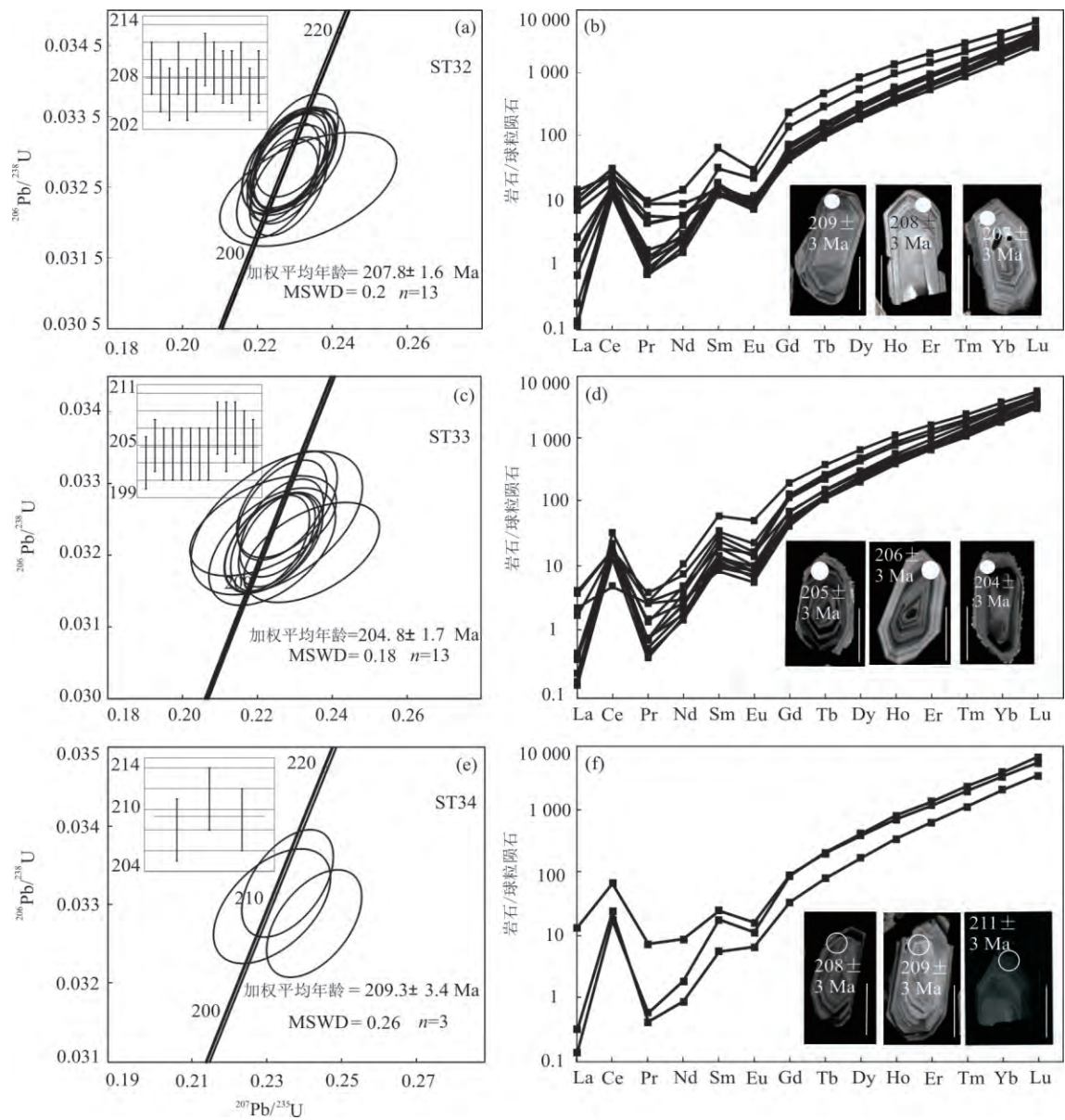


图 4 甲鲁朗地区叶巴组火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图、CL 图像及稀土元素球粒陨石标准化配分图

Fig.4 Zircon U-Pb concordia diagrams and CL images and chondrite-normalized REE patterns of zircons for the Yeba Formation volcanic rocks in Jialulang area

图中比例尺为 100 μm ; 标准化数据引自 Sun and McDonough (1989).

3.22% (均值 2.82%), K_2O 含量分别为 7.15% 和 5.31% (均值 6.23%), FeO^{T} 含量分别为 2.2% 和 1.95% (均值 2.07%).

英安质晶屑凝灰岩 (ST33) 样品 SiO_2 含量分别为 67.19% 和 68.87% (均值 68.03%), Al_2O_3 含量分别为 17.42% 和 18.49% (均值 17.95%), Na_2O 含量分别为 0.54% 和 0.88% (均值 0.71%), MgO 含量分别为 0.79%~0.91% (均值 0.85%), CaO 含量分别为 0.56% 和 1.32% (均值 0.94%), FeO^{T} 含量分别为 2.32% 和 2.57% (均值 2.44%).

流纹质晶屑凝灰岩 (ST34) 样品 SiO_2 含量分别为 76.61% 和 77.19% (均值 76.9%), Al_2O_3 含量分别为 13.08% 和 12.45% (均值 12.77%), Na_2O 含量分别为 3.8% 和 4.97% (均值 4.39%), MgO 含量分别为 0.11% 和 0.51% (均值 0.31%), CaO 含量分别为 0.23% 和 0.81% (均值 0.52%), K_2O 含量分别为 2.57% 和 2.19% (均值 2.38%), FeO^{T} 含量分别为 0.68% 和 0.71% (均值 0.7%). 在 TAS 图解中上述 3 类岩石样品点分别落于粗面安山岩、英安岩及流纹岩区域 (图 5a). 所有样品 A/CNK 比值在 1.15~

2.24 之间, A/NK 比值在 1.19~2.57 之间, 属于过铝质岩石(图 5b). 在 AFM 图解中, 所有样品点均落于钙碱性系列岩石区域(图 5c), 岩石主量元素整体特征与前人所获得的结果较为相似.

3.2.2 微量元素 安山质含角砾晶屑凝灰熔岩稀土元素总量(Σ REE)分别为 169.77×10^{-6} 和 187.82×10^{-6} , 平均值为 178.79×10^{-6} , 整体含量较低. Eu* 的值分别为 0.68 和 0.73, 表现出较明显的 Eu 负异常. 在球粒陨石标准化的稀土元素配分图上,

呈现轻稀土富集, 亏损重稀土元素的现象, $(La/Yb)_N$ 的值分别为 8.06 和 8.16, 轻重稀土分离较为明显, 呈现出凹形右倾趋势(图 6a). 原始地幔微量元素标准化蛛网图显示, 样品普遍富集轻稀土元素和大离子亲石元素 Rb、K、Th、U、Pb, 相对亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素, 同时亏损 Sr 元素(图 6b). Yb_N 值相对较高(13.5~21.5), Sr/Y 的值较低, Y 含量相对较高, 这种特征与平均大陆弧安山岩相似(Kelemen *et al.*, 2007).

表 1 叶巴组凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the Yeba Formation tuffs

样品号	含量(10^{-6})		Th/U	同位素比值				年龄值(Ma)			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
ST32											
2	177	266	0.66	0.206 27	0.006 40	0.029 66	0.000 42	190	5	188	3
3	214	321	0.67	0.228 28	0.007 25	0.032 89	0.000 48	209	6	209	3
4	224	340	0.66	0.228 51	0.006 83	0.032 68	0.000 46	209	6	207	3
5	148	258	0.57	0.233 56	0.015 58	0.032 47	0.000 53	213	13	206	3
6	288	330	0.87	0.230 00	0.007 43	0.032 88	0.000 47	210	6	209	3
7	189	303	0.62	0.228 31	0.006 83	0.032 51	0.000 46	209	6	206	3
8	138	232	0.59	0.226 99	0.006 41	0.032 71	0.000 46	208	5	207	3
12	158	221	0.71	0.230 11	0.011 67	0.033 05	0.000 56	210	10	210	3
13	414	427	0.97	0.229 41	0.007 38	0.032 92	0.000 47	210	6	209	3
14	166	241	0.69	0.228 23	0.006 74	0.032 84	0.000 46	209	6	208	3
17	285	274	1.04	0.228 68	0.011 90	0.032 63	0.000 58	209	10	207	4
19	339	418	0.81	0.230 01	0.007 26	0.032 88	0.000 46	210	6	209	3
20	108	164	0.66	0.225 35	0.007 17	0.032 48	0.000 46	206	6	206	3
ST33											
1	218	338	0.65	0.234 57	0.011 97	0.032 04	0.000 46	214	10	203	3
2	317	370	0.86	0.226 55	0.007 40	0.032 38	0.000 45	207	6	205	3
4	176	269	0.65	0.223 43	0.006 97	0.032 17	0.000 44	205	6	204	3
5	285	357	0.80	0.225 26	0.006 77	0.032 21	0.000 43	206	6	204	3
6	217	155	1.40	0.223 91	0.008 41	0.032 17	0.000 46	205	7	204	3
7	376	431	0.87	0.230 13	0.006 44	0.030 52	0.000 41	210	5	194	3
8	281	329	0.86	0.215 42	0.007 04	0.030 83	0.000 43	198	6	196	3
9	133	226	0.59	0.224 41	0.008 64	0.032 18	0.000 46	206	7	204	3
10	242	295	0.82	0.224 01	0.011 19	0.032 12	0.000 54	205	9	204	3
14	182	266	0.69	0.226 72	0.007 87	0.032 63	0.000 46	207	7	207	3
15	178	292	0.61	0.225 23	0.015 14	0.032 45	0.000 66	206	13	206	4
17	167	220	0.76	0.227 96	0.008 88	0.032 71	0.000 49	209	7	207	3
18	187	284	0.66	0.221 58	0.012 93	0.032 41	0.000 46	203	11	206	3
ST34											
7	195	299	0.65	0.239 25	0.007 50	0.032 76	0.000 45	218	6	208	3
10	515	478	1.08	0.232 89	0.007 22	0.033 27	0.000 45	213	6	211	3
16	153	204	0.75	0.229 18	0.009 22	0.032 98	0.000 48	210	8	209	3

表 2 叶巴组凝灰岩锆石稀土元素(10^{-6})分析结果

Table 2 Analytical results of the zircon REE elements(10^{-6})of the tuffs from the Yeba Formation

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
ST32														
2	0.2	9.1	0.1	1.1	1.9	0.4	10.3	4.1	53.6	22.6	112.0	29.6	334.6	87.7
3	0.3	10.9	0.1	1.1	2.0	0.5	11.9	4.3	58.2	23.9	117.0	29.8	334.1	86.4
4	0.4	11.0	0.1	1.4	2.5	0.6	11.7	4.8	69.5	29.2	147.2	37.5	412.9	118.5
5	0.1	8.3	0.1	1.3	2.9	0.5	15.6	6.0	78.8	32.2	152.0	37.3	399.3	94.5
6	2.2	16.3	0.5	2.5	1.9	0.5	9.0	3.7	49.6	21.0	103.8	27.8	309.9	80.2
7	1.7	11.2	0.4	2.7	2.7	0.5	14.6	6.1	81.7	33.6	160.5	40.9	446.5	107.8
8	3.4	15.9	0.8	4.1	2.4	0.5	10.2	3.9	50.6	21.3	103.9	27.1	313.9	78.5
12	0.0	11.5	0.1	0.9	2.6	0.6	13.9	5.6	71.0	29.1	145.3	37.8	429.1	106.0
13	2.2	16.0	0.4	2.7	2.0	0.7	10.1	4.1	55.9	23.6	117.7	31.5	370.8	97.6
14	0.6	10.2	0.2	1.2	2.0	0.4	10.1	4.0	55.1	23.2	116.3	28.8	309.3	82.0
17	0.0	14.4	0.1	1.9	4.9	1.3	30.0	11.2	143.0	56.3	245.2	56.3	555.6	126.1
19	2.7	19.4	0.9	7.0	10.3	1.8	50.2	18.1	220.0	80.0	347.2	76.3	734.6	168.9
20	0.0	7.0	0.1	0.7	2.0	0.5	10.5	3.8	48.9	19.7	92.4	23.1	262.4	65.9
ST33														
1	0.4	11.8	0.2	1.4	2.3	0.5	12.9	5.2	70.4	29.3	144.3	36.5	411.1	101.6
2	18.5	47.0	4.7	19.6	4.6	0.5	11.5	3.9	49.9	20.6	97.8	23.9	249.8	60.0
4	1.0	12.3	0.3	2.4	3.3	0.7	16.3	6.2	78.1	31.2	144.4	35.8	382.9	89.7
5	0.0	14.9	0.0	0.8	1.8	0.6	11.9	4.6	64.5	27.7	143.6	38.9	452.2	115.3
6	0.0	22.9	0.3	5.6	10.2	3.3	44.7	15.7	181.1	67.0	286.1	64.9	659.3	145.3
7	0.1	11.0	0.1	1.0	1.6	0.5	10.8	4.5	59.7	24.7	118.0	30.9	339.1	82.3
8	0.1	13.9	0.1	2.6	5.3	1.1	29.9	11.0	134.9	52.9	234.6	54.6	548.9	127.7
9	0.0	8.7	0.0	0.8	2.1	0.4	11.2	4.5	57.9	24.4	117.5	29.3	323.7	79.4
10	0.1	15.3	0.1	1.4	3.3	1.0	15.7	6.4	84.1	34.8	172.7	45.3	516.2	131.6
14	1.1	12.2	0.4	3.9	5.9	1.5	28.0	10.2	125.2	47.2	211.8	51.6	552.0	118.3
15	0.6	3.4	0.3	1.6	1.5	0.4	9.6	4.7	60.5	26.3	134.8	34.4	376.8	93.4
17	0.1	10.0	0.1	1.3	2.5	0.5	12.8	4.9	65.7	27.0	127.7	33.0	371.4	94.6
18	0.0	9.6	0.1	2.0	4.2	0.9	26.0	9.4	120.3	47.6	209.8	48.5	499.6	117.4
ST34														
7	0.1	14.7	0.0	0.4	0.9	0.4	6.9	3.0	43.0	19.2	102.4	28.1	346.1	87.8
10	3.2	40.9	0.7	4.1	3.8	0.9	18.8	7.4	96.9	39.4	192.1	49.7	562.0	138.2
16	0.0	10.7	0.1	0.9	2.7	0.6	18.1	7.7	105.0	45.3	221.6	58.9	661.2	170.6

英安质晶屑凝灰岩稀土元素总量(ΣREE)分别为 184.28×10^{-6} 和 193.67×10^{-6} ,平均值为 188.98×10^{-6} .Eu*的值分别为 0.44 和 0.52,均值为 0.48,表现出明显的 Eu 负异常.(La/Yb)_N 的值分别为 7.51 和 9.23,轻重稀土分离较为明显.在球粒陨石标准化的稀土元素配分图上,呈现轻稀土富集,亏损重稀土元素的现象,呈现出凹形右倾趋势(图 6c).原始地幔微量元素标准化蛛网图显示,样品岩石较为富集 Rb、K、Th、U、Pb 等大离子亲石元素元素,亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(图 6d).

流纹质晶屑凝灰岩稀土元素总量(ΣREE)分别

为 45.59×10^{-6} 和 74.93×10^{-6} ,平均值为 60.26×10^{-6} ,Eu*的值分别为 0.67 和 0.58,均值为 0.63,表现出明显的 Eu 负异常.在球粒陨石标准化的稀土元素配分图上(图 6e),呈现轻稀土富集,亏损重稀土元素的现象,(La/Yb)_N 的值分别为 4.89 和 5.98,轻重稀土分离较为明显,呈现出凹形右倾趋势.原始地幔微量元素标准化蛛网图显示,样品富集轻稀土元素和大离子亲石元素 Rb、K、Th、U、Pb,相对亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素以及 Sr 元素(图 6f).综上所述,样品的稀土元素以及微量元素特征较为一致,可能暗示着它们的成因有一定的相似性.

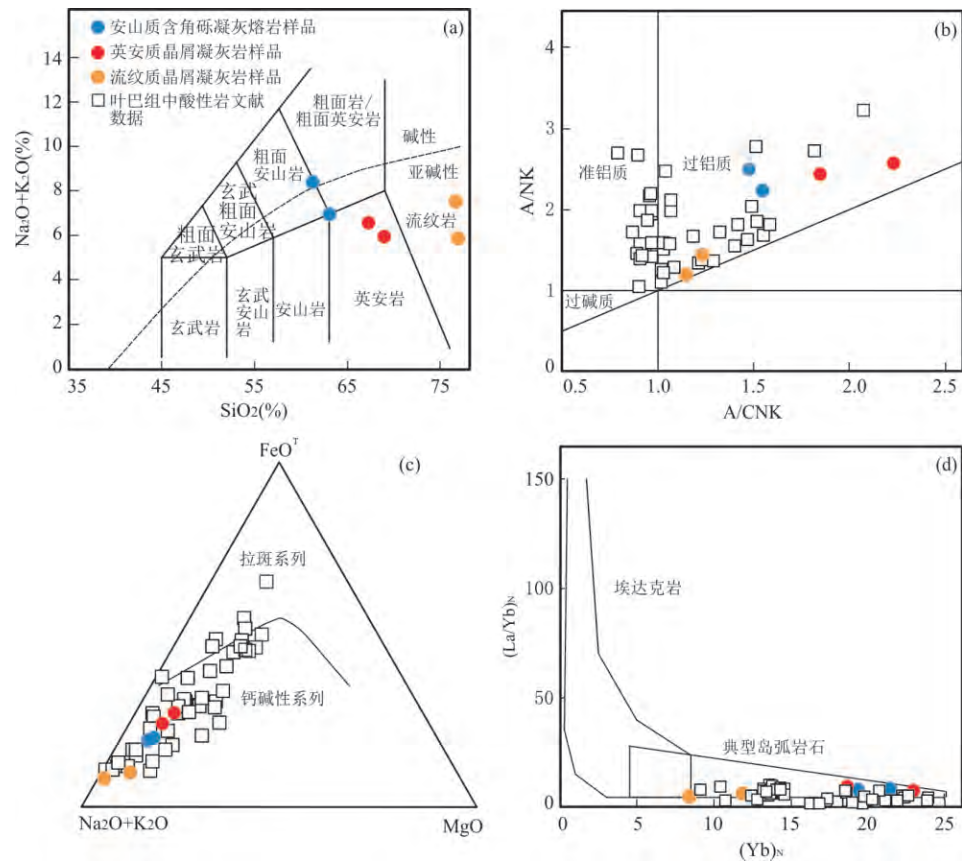


图 5 叶巴组火山岩分类图

Fig.5 Classification diagram for the Yeba Formation volcanic rocks

a. TAS 图解; b. A/CNK-A/NK 图解; c. AFM 图解; d. $(La/Yb)_N$ -(Yb) $_N$ 图解; 文献数据引自耿全如等(2005)、董彦辉等(2006)、Zhu *et al.* (2008)、曾忠诚等(2009)、陈炜等(2009)、熊秋伟等(2015)、Wei *et al.* (2017)

表 3 叶巴组凝灰岩主量元素(%)及微量元素(10^{-6})分析结果Table 3 Analytical results of major (%) and trace elements (10^{-6}) of the tuffs from the Yeba Formation

样品号	ST32H2	ST32H4	ST33H3	ST33H4	ST35H2	ST35H3
SiO ₂	61.13	62.97	67.19	68.87	76.61	77.19
Al ₂ O ₃	21.96	21.08	18.49	17.42	13.08	12.45
Fe ₂ O ₃ ^T	2.44	2.16	2.58	2.85	0.76	0.79
FeO ^T	2.2	1.95	2.32	2.57	0.68	0.71
FeO	1.87	1.66	1.97	2.18	0.58	0.61
MgO	0.8	0.79	0.79	0.91	0.11	0.51
CaO	2.43	3.22	1.32	0.56	0.23	0.81
Na ₂ O	1.25	1.64	0.88	0.54	4.97	3.8
K ₂ O	7.15	5.31	5.68	5.43	2.57	2.19
P ₂ O ₅	0.02	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04
MnO	0.07	0.06	0.05	0.05	0.02	0.02
TiO ₂	0.56	0.53	0.37	0.33	0.12	0.15
LOI	1.76	1.83	2.1	2.46	0.79	1.32
Total	99.57	99.59	99.47	99.44	99.3	99.27
Li	11.51	10.95	14.98	15.2	5.66	3.95
P	89.32	95.62	121.4	56.9	107.72	133.6
K	44 620	36 440	42 720	37 800	17 340	14 520
Sc	9.12	9.3	8.84	7.68	1.87	1.96

续表3

样品号	ST32H2	ST32H4	ST33H3	ST33H4	ST35H2	ST35H3
Ti	2756	2864	2208	1958.6	631.4	802
Cr	7.86	7.71	7.63	6.43	1.97	2.82
Co	5.78	4.14	3.78	6.97	1.02	0.86
Ni	2.2	1.73	2.89	2.96	0.67	0.94
Rb	199.9	163.98	208	220.4	66.92	76.32
Sr	180.05	266.7	130.12	61.76	94.42	204.5
Y	28.84	31.62	31.04	33.34	11.27	15.32
Zr	217.8	222.2	159.26	145.28	50.58	70.79
Nb	18.84	20.1	16.65	15.76	8.03	10.48
Ba	1 045.44	997.04	933.24	827.2	296.78	581.46
La	36.96	41.52	40.74	40.82	9.72	16.8
Ce	69.2	78.44	77.38	79.2	18.93	31.2
Pr	7.89	8.58	8.63	9.01	2.01	3.24
Nd	28.56	30.36	30.22	32.64	6.58	10.85
Sm	5.69	5.88	5.84	6.65	1.38	2.23
Eu	1.33	1.28	1.26	1.26	0.2	0.38
Gd	5.5	5.7	5.65	6.61	1.4	2.29
Tb	0.82	0.86	0.83	0.98	0.24	0.38
Dy	5.29	5.73	5.35	6.33	1.72	2.63
Ho	1.1	1.21	1.11	1.32	0.38	0.58
Er	3.12	3.49	3.12	3.75	1.17	1.74
Tm	0.49	0.54	0.48	0.58	0.2	0.29
Yb	3.29	3.65	3.17	3.9	1.43	2.02
Lu	0.52	0.57	0.5	0.63	0.23	0.33
Hf	5.26	5.58	3.99	3.72	1.3	1.88
Ta	1.07	1.17	1.04	0.98	0.58	0.67
Th	19.93	21.06	19.38	20.83	9.15	16
U	5.68	5.82	4.57	5.06	3.24	5.26
Pb	38.76	45.1	22.47	13.39	4.79	13.63
Eu*	0.73	0.68	0.67	0.58	0.44	0.52
Mg [#]	43.2	45.9	41.7	42.6	25.9	59.9
A/CNK	1.54	1.48	1.85	2.24	1.15	1.23
A/NK	2.24	2.5	2.43	2.57	1.19	1.44
(La/Yb) _N	8.06	8.16	9.23	7.51	4.89	5.98
(Yb) _N	19.4	21.5	18.62	22.93	8.38	11.86

注: $\text{FeO}^{\text{T}} = \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} \times 0.89$; $\text{A/CNK} = (\text{Al}_2\text{O}_3/102) / ((\text{CaO}/56.1) + (\text{Na}_2\text{O}/62.0) + (\text{K}_2\text{O}/94.2))$; $\text{A/NK} = (\text{Al}_2\text{O}_3/102) / ((\text{Na}_2\text{O}/62.0) + (\text{K}_2\text{O}/94.2))$; $\text{Mg}^{\#} = (\text{MgO}/40.3) / (\text{MgO}/40.3 + \text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} \times 0.89/71.9 \times 0.85) \times 100$; $\text{Eu}^* = \text{Eu}/\text{SQRT}(\text{Sm} \times \text{Gd})$.

4 讨论

4.1 甲鲁朗地区叶巴组形成时代

关于叶巴组的形成时代问题一直存在着较多的争议,从最初发现时,研究者多采用化石对其时代进行限定(表4).前人在叶巴组下段底部发现有 *Isocyprina lhasaensis* sp., *Gervillaria lhasaensis* sp., *Unionites* cf. *brevis* Schaueroth, *Trigonodus xiabolanensis* sp. 等化石,指示时代为晚三叠世.在得中地

区发现的双壳类化石 *Grammatodon* sp., *Kobayashites hayamii* Yin, *Limatula* sp., *Aguilerella* sp. 等,时代为早侏罗世(Yin and Grant-Mackie., 2005). 本文在研究区内取得了大量化石样品,经初步鉴定对比,该批化石与上文 Yin and Grant-Mackie (2005) 所报道的西藏地区下波郎剖面叶巴组双壳类动物群极为相似.可鉴定出的属种包括:拼第嵎前凸蛤 *Pronoella pindiroensis* Cox 1965, 古栗蛤 *Palaeonucula* sp., 花蛤未定种 *Astarte* sp., 速水小林蛤 *Ko-*

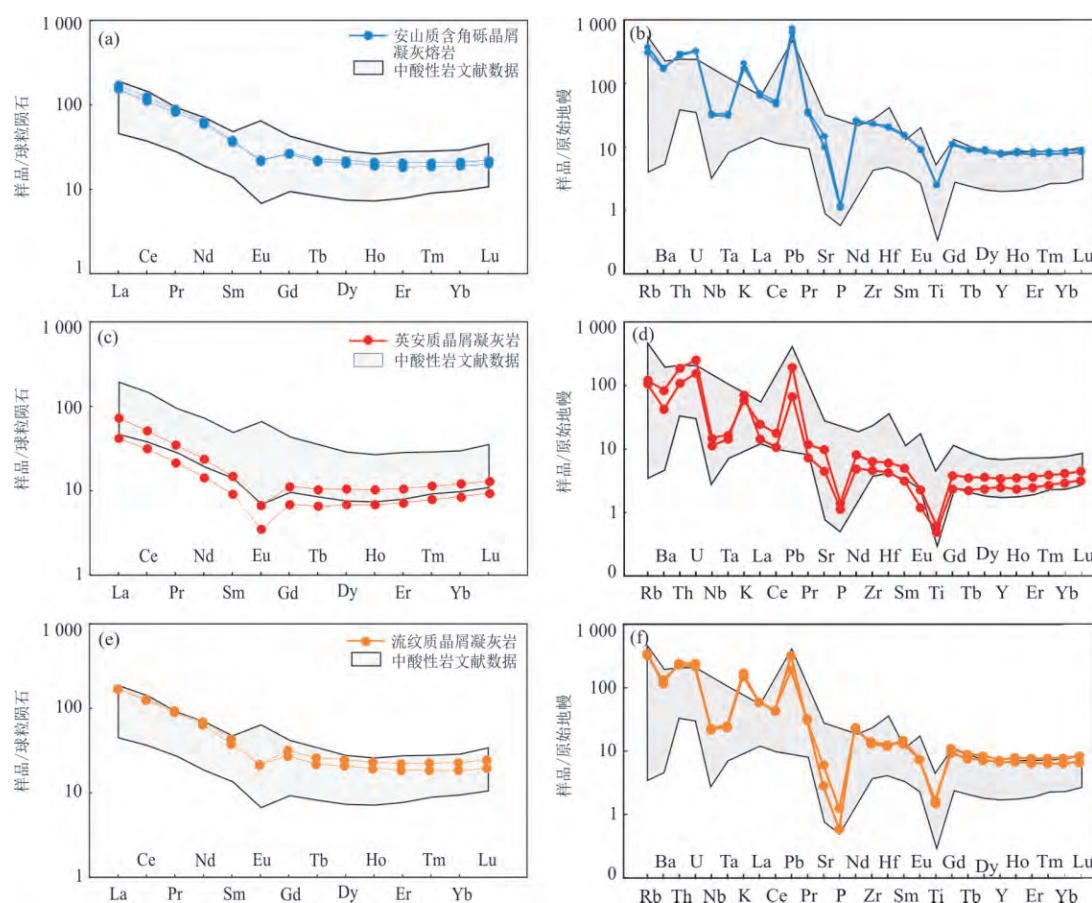


图6 叶巴组火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a、c、e)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b、d、f)

Fig.6 Chondrite-normalized REE diagram (a, c, e) and primitive mantle-normalized spider diagram (b, d, f) for the volcanic rocks from the Yeba Formation

文献数据同图5;标准化值据 Sun and McDonough (1989)

bayashites hemicylindricus Hayami 1959(图7). 叶巴组双壳类具备早—中侏罗世特提斯南北动物群混生的特点,笔者综合地层同位素年龄等分析结果,认为其时代为晚三叠世—早侏罗世.

此外前人分别在得明顶地区、达孜附近地区以及驱龙—甲马等地区,对叶巴组火山岩进行同位素测年工作,得到的年龄在162~192 Ma之间(表5),整体显示形成时代为中—早侏罗世.但本文所获取的3件叶巴组凝灰岩样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 207.8 ± 1.6 Ma、 204.8 ± 1.7 Ma和 209.3 ± 3.4 Ma,时代为晚三叠世,与之前叶巴组属于早侏罗世的结论有所不同.有研究表明,冈底斯岩浆弧的岩浆活动最早可追溯至晚三叠世早期(Wang *et al.*, 2016),结合化石依据,笔者认为叶巴组火山岩形成时代最早可能为晚三叠世.综合区域上的年代学数据及分布特征,大致可以推断叶巴组火山岩的形成时间可持续到30~40 Ma左右,从晚三叠

世一直到早—中侏罗世时期.

4.2 叶巴组火山岩成因

研究区内叶巴组整体以中酸性岩为主,少见基性岩出露,侵入岩为二长花岗岩、花岗闪长岩等.本文结合区域上搜集的数据对叶巴组中酸性火山岩进行岩石成因及源区性质研究.前文提到叶巴组为大洋板块俯冲形成的火山弧产物,一般认为与弧相关的中酸性火山岩的成因有两种可能:(1)由伴生玄武质岩浆的分离结晶作用形成,在该情况下形成的岩石与玄武质岩浆具有相似的幔源地球化学特征(Bacon and Druitt, 1988);(2)由幔源基性岩浆上涌引起地壳物质部分熔融形成的壳幔混源岩浆生成(Tepper *et al.*, 1993).玄武质岩浆只有经过强烈的分离结晶作用才能产生酸性熔体(Wilson, 1993),所以在上述第一种条件下产生的多数是中小规模的中酸性熔体(Shinjo and Kato, 2000),而研究区内叶巴组中酸性岩分布广泛,缺少基性火山岩,难以

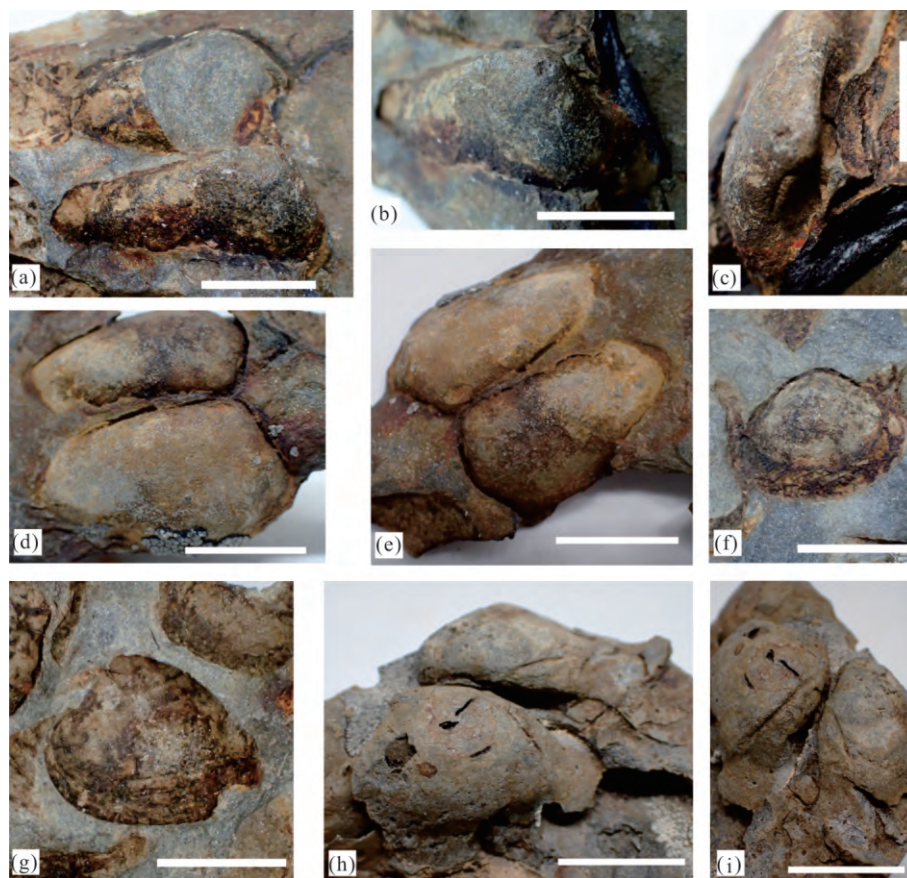


图 7 叶巴组双壳类化石

Fig.7 Bivalve fossils from the Yeba Formation

a~e. 拼第嶧前凸蛤 *Pronoella pindiroensis* Cox 1965; f. 古栗蛤 *Palaeonucula* sp.; g. 花蛤未定种 *Astarte* sp.; h, i. 速水小林蛤 *Kobayashites hemicylindricus* Hayami 1959; 图中比例尺为 1 cm

用玄武质岩浆的分离结晶来解释中酸性岩的成因。同时在 Th/Sm-Th 图解与 Th/Hf-Th 图解中, 叶巴组中酸性岩石显示出了部分熔融的趋势(图 8), 因此第二种成因机制显得较为合理。

本文获得叶巴组火山凝灰岩样品 Ti/Zr 比值在 11.3~13.9 之间, 这与地壳 (Ti/Zr < 20) 特征相似 (Plank, 2005), 同时其较高的 Th/Ce (均值为 0.21) 与 Th/La (均值为 0.4) 比值说明地壳混染可能在岩浆演化过程中起着较为重要的作用, 因为地壳的 Th/Ce (均值 0.15) (Taylor and McLennan, 1995) 与 Th/La (均值 0.3) 比值较高, 而幔源岩浆的 Th/Ce (0.02~0.05) 与 Th/La (均值 0.12) 比值则较低 (Sun and McDonough, 1989); 通常受地壳混染的岩石 La/Ta 约为 22, La/Nb < 1 (Fitton *et al.*, 1988; Leat *et al.*, 1988), 本文样品 La/Ta 均值为 32.08, La/Nb 均值为 1.98, 远大于上述特征值, 也说明岩浆源区存在地壳物质; 前人研究表明地壳部分熔融形成的岩浆产物的 Mg[#] 值一般小于 40 (Atherton *et*

al., 1993), 而直接起源于亏损地幔楔橄榄岩部分熔融形成的岩浆的 Mg[#] 值则大于 60 (McCarron and Smellie, 1998), 叶巴组中酸性岩的 Mg[#] 值平均为 47.6 (含文献数据, 文献数据同图 5), 反映其岩浆并非全部为壳源物质, 存在幔源物质的加入, 在 FeO^T-MgO 图解中也显示出岩浆混合的趋势 (图 9a), 在 Yb-Ta-Y/Nb 图解中, 可见研究区内火山岩均位于平均大陆地壳和亏损地幔混合线区域, 各岩性之间可能存在一定差异 (图 9b), 表示壳幔混合比例不同。而区域上的叶巴组火山岩则分别落入平均大陆地壳和亏损地幔混合线区域及下地壳与亏损地幔混合线区域, 同时在该图解中显示地壳物质的参与起到了更重要的作用 (>80%)。此外, 甲鲁朗地区叶巴组火山岩以酸性岩为主, 存在少量安山岩, 岩石矿物中未见石榴子石, 同时具有弧岩浆岩的地球化学特征, Sr 含量较低, Nb/Ta 比值在 13.84~17.57 之间, 整体低于球粒陨石 Nb/Ta 比值 (~17.6), 上述特征具有与角闪岩相俯冲大洋板片脱水熔融形成的岩

表 4 叶巴组化石统计表

Table 4 Statistical table of the Yeba Formation fossils

地区	层位	主要化石种类	代表时代	资料来源
叶巴沟	/	珊瑚化石 <i>Theosmilia</i> sp.	晚三叠世	西藏地质局,1974,内部资料
却桑温泉	/	菊石化石	早—中三叠世	西藏综合队,1976,内部资料
甲马沟	/	水螅化石	晚三叠世—早侏罗世	成都地震大队,1976,内部资料
白堆乡	杂砂岩夹千枚岩	双壳类化石 <i>Prionoella</i> (<i>Gythemon</i>) sp 等	中侏罗世巴柔期	苟金,1994
白堆乡	板岩	双壳类化石 <i>Protocardia stricldandi</i> 等	中侏罗世巴柔—巴通期	苟金,1994
白堆乡	千枚岩夹凝灰岩	虫迹化石 <i>Pelecypodichnus</i> sp.	侏罗世	苟金,1994
得中剖面	浅变质泥岩	双壳类化石 <i>Palaeonucula</i> sp., <i>Grammatodon</i> sp. <i>Propeamussium</i> (<i>P.</i>) <i>laeviradiatum</i> (Waagen)等	早—中侏罗世托尔—巴柔期	裴树文,1999
加兴乡	灰白色细砂岩	双壳类化石 <i>Trigonodus xiabolangensis</i> sp., <i>Isocyprina lhasaensis</i> sp.,等	中—晚三叠世	Yin and Grant-Mackie, 2005
得中地区	泥岩	双壳类化石 <i>Grammatodon</i> sp., <i>Kobayashites hayamii</i> Yin, <i>Limatula</i> sp., <i>Aguilerella</i> sp.,等	早侏罗世	Yin and Grant-Mackie, 2005
甲鲁朗	凝灰岩	双壳类化石 <i>Prionoella pindiroensis</i> Cox 1965, <i>Palaeonucula</i> sp., <i>Kobayashites hemicylindricus</i>	晚三叠世—早侏罗世	本文

表 5 叶巴组火山岩及冈底斯岩浆弧岩浆岩形成时代

Table 5 Ages of Miocene magmatic rocks of Gangdese metallogenic belt

地区	岩性	测试方法	测试对象	年龄(Ma)	资料来源
达孜	英安岩	SHRIMP U-Pb	锆石	181.7±5.2	耿全如等,2006
甲马沟	流纹岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	174.4±1.7	董彦辉等,2006
达孜	英安岩	SHRIMP U-Pb	锆石	174.2±3.6	Zhu <i>et al.</i> , 2008
得明顶	英安岩	SHRIMP U-Pb	锆石	192.7±1.3	陈炜等,2009
驱龙	玄武岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	188±2	黄丰等,2015
甲马	安山岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	175±2	黄丰等,2015
得明顶	安山岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	188.8±1.8	熊秋伟等,2015
达孜	玄武岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	178±1.3	Wei <i>et al.</i> , 2017
达孜	英安岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	174~183	Wei <i>et al.</i> , 2017
达孜	流纹岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	177.9±1.7	Wei <i>et al.</i> , 2017
达孜	安山岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	174~178	Liu <i>et al.</i> , 2018
达孜	英安岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	182	Liu <i>et al.</i> , 2018
达孜	流纹岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	171~176	Liu <i>et al.</i> , 2018
达孜	玄武岩	LA-ICP-MS U-Pb	锆石	168~174	Liu <i>et al.</i> , 2018

浆岩相似的特点(Mo *et al.*, 2008),可能表明甲鲁朗地区叶巴组火山岩的形成与洋壳的俯冲板片脱水熔融有关.在原始地幔微量元素标准化蛛网图上,研究区叶巴组火山岩亏损 Ba、Sr 元素,在球粒陨石标准化稀土元素配分曲线上显示出 Eu 的负异常,表明岩浆源区残留斜长石和钾长石(Patiño Douce *et*

al., 1991),同时亏损 Nb、Ta 元素,Y/Yb 比值在 7.6~9.8 之间,表明源区主要残留角闪石(Pearce and Mei, 1988; Sisson, 1994).

综上所述,笔者认为甲鲁朗地区叶巴组火山岩为洋壳俯冲板片在一定深度脱水熔融,导致上覆地幔楔部分熔融,形成富集轻稀土元素与大离子亲石

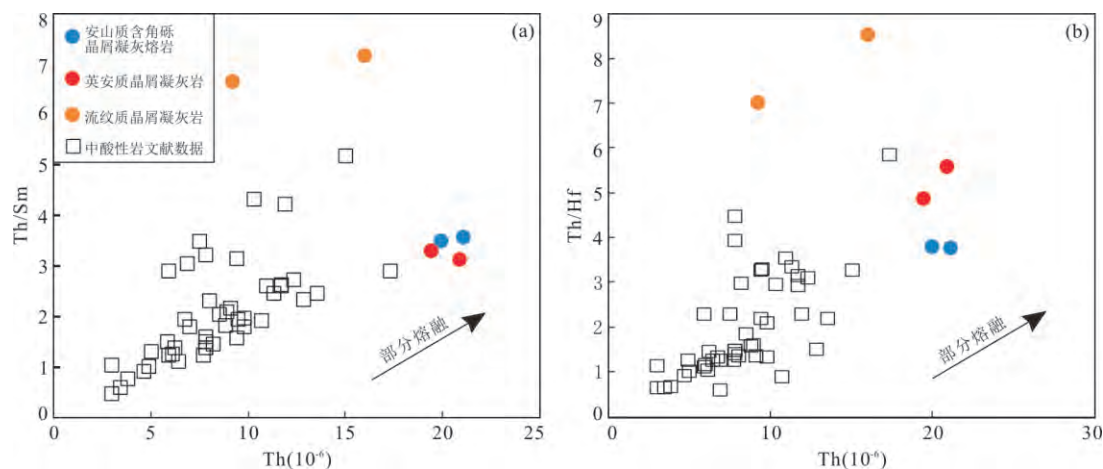
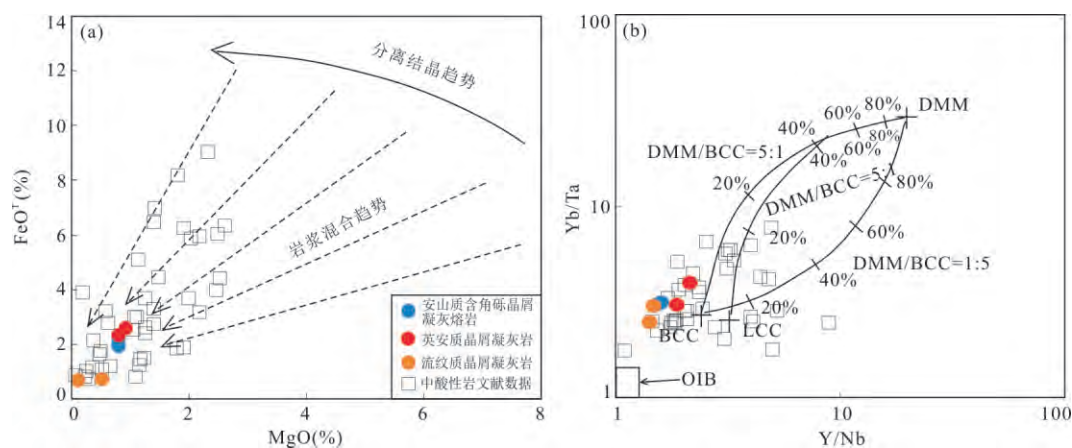


图 8 叶巴组中酸性火山岩部分熔融图解

Fig. 8 Partial melting diagram for intermediate acid volcanic rocks from the Yeba Formation

据 Schiano *et al.* (2010); a. Th/Sr-Th 图解; b. Th/Hf-Th 图解图 9 叶巴组火山岩 FeO^{T} -MgO 图解 (a) 和 Yb-Ta-Y/Nb 图解 (b)Fig. 9 Diagrams of FeO^{T} -MgO (a) and Yb-Ta-Y/Nb (b) for volcanic rocks from the Yeba Formation图 a 底图据 Zorpi *et al.* (1991); 图 b 数据来源: BBC. 平均大陆地壳, 据 Rudnick and Gao (2003); LCC. 大陆下地壳, 据 Rudnick and Gao (2003); DMM. 亏损地幔, 据 Salters and Stracke (2004)

元素, 亏损重稀土元素与高场强元素的岩浆, 而后岩浆上涌导致地壳物质发生部分熔融形成酸性岩浆, 其中以地壳物质为主要成分 ($>80\%$), 这些酸性岩浆在上升过程中以不同比例混合地壳物质, 形成中性和酸性岩浆, 最终岩浆喷出地表形成火山岩。

4.3 构造环境

研究区叶巴组火山岩样品具有高 Al_2O_3 (均值 17.41%)、低 MgO (均值 0.65%) 和低 TiO_2 (均值 0.34%) 的特征, 具有较高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值 (均值 4.4)。同时富集轻稀土元素和大离子亲石元素, 亏损重稀土元素和高场强元素, 与岛弧岩浆岩的总体特征相似。样品 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在 $4.89\sim9.23$ 之间, $(\text{Yb})_{\text{N}}$ 值在 $8.38\sim22.9$ 之间, 在 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}-(\text{Yb})_{\text{N}}$ 图解中均落于岛弧岩石区域 (图 5d), 同时样品具有较低的

Sr/Y 比值 ($1.85\sim13.34$), 同样具有岛弧岩石的特征。样品亏损 Ba、Sr、Nb、Ta、P、Ti, 与经典岛弧岩浆岩存在一定差异, 而与大陆边缘弧岩浆岩特征相似 (Pearce *et al.*, 1984)。通常活动大陆边缘弧火山岩以高钾钙碱性系列安山岩、英安岩、流纹岩为主, 侵入岩主要以二长花岗岩、花岗闪长岩为主 (Miyashiro, 1974; Maniar and Piccoli, 1989), 以上特征也与甲鲁朗地区分布的岩浆岩类型相似。在 $\text{Zr}\times 3-\text{Nb}\times 50-\text{Ce}/\text{P}_2\text{O}_5$ 图解中, 本文样品均落于大陆弧区域 (图 10a); 在 $\text{Th}/\text{Ta}-\text{Yb}$ 图解中, 多数样品点落于活动大陆边缘区域 (图 10b)。作为不活动元素, 在部分熔融和分离结晶过程中, Th/Yb 及 Ta/Yb 的比值不变, 可用来判断岩浆岩的形成环境。在 $\text{La}/\text{Yb}-\text{Sc}/\text{Ni}$ 图解中, 叶巴组中酸性岩主要落于大陆岛弧

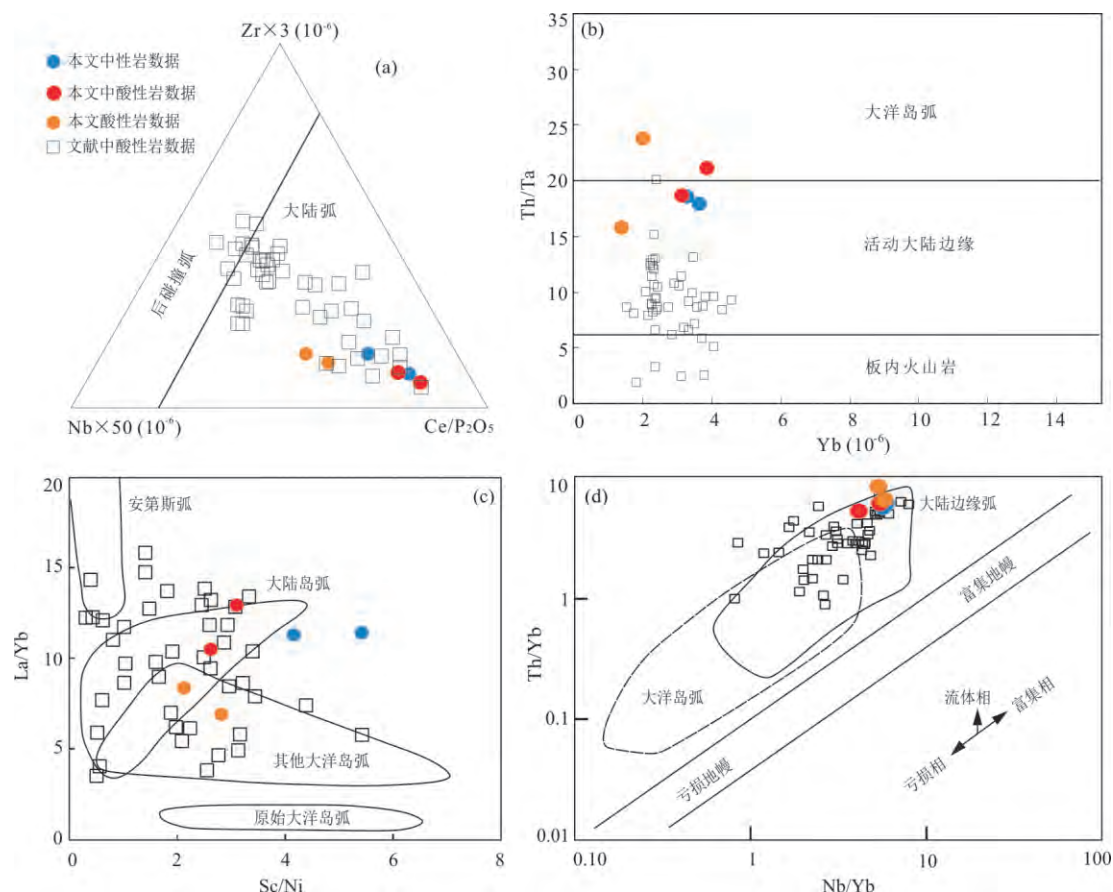


图10 叶巴组火山岩构造判别图解

Fig. 10 Structure discriminant diagrams of the Yeba Formation

a. $Zr \times 3 - Nb \times 50 - Ce / P_2O_5$ 图解, 据 Müller *et al.* (1992); b. $Th/Ta - Yb$ 图解, 据 Gorton and Schandl (2000); c. $La/Yb - Sc/Ni$ 图解, 据 Pearce (1982); d. $Th/Yb - Nb/Yb$ 图解, 据 Condie *et al.* (1986)

区域附近(图 10c); 在 $Th/Yb - Nb/Yb$ 图解中也主要落于大陆边缘弧区域内(图 10d). 同时根据所获得的化石样品, 表明甲鲁朗地区叶巴组火山岩处于滨—浅海环境, 这也符合大陆边缘弧环境的特点. 综上所述笔者认为, 叶巴组中酸性岩形成于活动大陆边缘弧环境, 为大洋俯冲阶段岩浆作用的产物.

4.4 对新特提斯洋俯冲的指示

前人研究认为, 叶巴组最有可能为新特提斯洋北向俯冲的产物(耿全如等, 2005; 董彦辉等, 2006; 曾忠诚等, 2009; 陈炜等, 2009; Wei *et al.*, 2017; Liu *et al.*, 2018). 不过也有学者提出叶巴组可能为班公湖—怒江洋南向俯冲导致拉萨地块南缘发生弧后扩张的产物(Zhu *et al.*, 2011), 这一观点难以解释以下问题: 首先冈底斯岩弧岩浆活动主要集中在南缘, 而非更靠近班怒洋的北侧. 此外, Murphy *et al.* (1997) 指出, 拉萨地块经历了南北向收缩, 这种收缩一直持续到晚白垩世早期. 前人研究表

明, 雄村铜金矿床 TSF-2 逆冲断层形成于 178~174 Ma 之间(Tafti *et al.*, 2014). 这一年龄限制指示拉萨地块的收缩在侏罗纪早期就已经开始, 叶巴组现今距班公—怒江缝合带 300 km, 在早侏罗世二者距离可能大于 500 km, 而且在地壳缩短过程中形成的火山岩具有类似埃达克岩的特征, 例如 Sr 元素含量较高($>400 \times 10^{-6}$)(Gutscher *et al.*, 2000), 叶巴组火山岩不具备这种现象. 另外前人对狮泉河—纳木错 MORB 型蛇绿岩的研究表明, 侏罗纪之前俯冲的班公湖—怒江洋并未穿过中拉萨地块(武勇等, 2018; Zeng *et al.*, 2018), 也说明上述观点存在难以解释的问题. 此外, 董昕和张泽明(2013)认为叶巴组火山岩的形成与松多古特提斯洋俯冲到南拉萨地块之下所引起的板片断离或回转有关. 不过研究表明松多古特提斯洋在 220~240 Ma 之前已经闭合(杨经绥等, 2006; 李化启等, 2011), 不会形成晚三叠世晚期至早侏罗世的火山岩. 因此笔者推断叶巴组形成于新特提斯洋北向俯冲的构造背景. 关于新

特提斯洋开始俯冲时间的认识,部分研究者认为新特提斯洋发生俯冲消减作用开始的时间至少应不晚于早侏罗世,还有人认为在晚二叠世或者更早新特提斯洋就已经开始俯冲(Wang *et al.*, 2016).前人在雅鲁藏布江中段硅质岩中发现了中—晚三叠放射虫(朱杰等, 2005),并在冈底斯岩浆弧附近报道了一系列花岗岩年龄,包括测得日喀则东嘎辉长岩—花岗岩复合杂岩体成岩年龄为 177~180 Ma(邱检生等, 2015);在墨脱雅鲁藏布超镁铁质岩中取得 200 ± 4 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) 的辉石冷却年龄(周肃, 2002);冈底斯南缘获得变形花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为 178 ± 1 Ma(张宏飞等, 2007);门巴花岗岩的年龄为 207 Ma 和 215 Ma(和钟铎等, 2006),时代为晚三叠世—早侏罗世. 同时在冈底斯岩浆弧上存在的大量晚三叠世—早侏罗世花岗岩体均表现出典型的岛弧特征(朱弟成等, 2008a, 2008b),这些花岗岩与叶巴组火山岩应为同一构造背景下的产物. 以上化石数据以及花岗岩的年龄数据与雅鲁藏布江新特提斯洋开始俯冲的时间有所关联,证明其俯冲开始的时间不晚于晚三叠世. 结合本文中所得到的年龄数据及叶巴组形成的构造环境,笔者认为叶巴组是新特提斯洋北向俯冲的产物,并且新特提斯洋板片俯冲开始的时间应不晚于晚三叠世,大洋的打开应在晚三叠世之前.

5 结论

(1) 对冈底斯中部甲鲁朗地区叶巴组凝灰岩进行年代学研究,获得 3 件样品锆石 U-Pb 年龄分别为 207.8 ± 1.6 Ma, 204.8 ± 1.7 Ma 以及 209.3 ± 3.4 Ma, 结合所获得化石样品和区域数据,笔者认为叶巴组在晚三叠世就已经形成.

(2) 甲鲁朗地区叶巴组凝灰岩的岩石地球化学特征显示,其岩浆应为壳幔混染形成,其中地壳物质的参与在形成过程中起更重要的作用,并且源区可能存在角闪石、斜长石和钾长石残留.

(3) 甲鲁朗地区叶巴组凝灰岩以中酸性岩为主,属钙碱性系列岩石. 富集轻稀土元素与大离子亲石元素,亏损重稀土元素与高场强元素,整体显示出大陆边缘弧岩浆岩的特征,综合分析认为该地区火山岩形成于新特提斯洋俯冲环境下的陆缘弧环境,同时结合年代学数据,揭示了新特提斯洋俯冲的时限,应不晚于晚三叠世.

致谢:感谢吉林大学王明副教授、董宇超、于云

鹏博士、高忠维硕士在文章写作过程中的帮助. 同时对于中国地质大学(北京)科学研究院实验室苏犁研究员在岩石测试方面的帮助,以及匿名审稿专家在文章修改方面的建议和帮助致以诚挚的谢意!

References

- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(02\)00195-x](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(02)00195-x)
- Atherton, M. P., Petford, N., 1993. Generation of Sodium-Rich Magmas from Newly Underplated Basaltic Crust. *Nature*, 362(6416): 144–146. <https://doi.org/10.1038/362144a0>
- Bacon, C. R., Druitt, T. H., 1988. Compositional Evolution of the Zoned Cal-Calkaline Magma Chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 98(2): 224–256. <https://doi.org/10.1007/bf00402114>
- Chen, W., Ma, C. Q., Bian, Q. J., et al., 2009. Evidences from Geochemistry and Zircon U-Pb Geochronology of Volcanic Rocks of Yeba Formation in Demingding Area, the East of Middle Gangdise, Tibet. *Geological Science and Technology Information*, 28(3): 31–40 (in Chinese with English abstract).
- Chu, M. F., Chung, S. L., Song, B., et al., 2006. Zircon U-Pb and Hf Isotope Constraints on the Mesozoic Tectonics and Crustal Evolution of Southern Tibet. *Geology*, 34(9): 745. <https://doi.org/10.1130/g22725.1>
- Condie, K. C., Bowling, G. P., Allen, P., 1986. Origin of Granites in an Archean High-Grade Terrane, Southern India. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(1): 93–103. <https://doi.org/10.1007/bf00373967>
- Dong, X., Zhang, Z. M., 2013. Genesis and Tectonic Significance of the Early Jurassic Magmatic Rocks from the Southern Lhasa Terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1933–1948 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. H., Xu, J. F., Zeng, Q. G., et al., 2006. Is there a Neo-Tethys' Subduction Record Earlier than Arc Volcanic Rocks in the Sangri Group?. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 661–668 (in Chinese with English abstract).
- Fitton, J. G., James, D., Kempton, P. D., et al., 1988. The Role of Lithospheric Mantle in the Generation of Late Cenozoic Basic Magmas in the Western United States. *Journal of Petrology, Special Volume*, (1): 331–349. https://doi.org/10.1093/petrology/special_volume.1.331
- Geng, Q. R., Pan, G. T., Jin, Z. M., et al., 2005. Geochem-

- istry and Genesis of the Yeba Volcanic Rocks in the Gangdise Magmatic Arc, Tibet. *Earth Science*, 30(6): 747—760 (in Chinese with English abstract).
- Geng, Q. R., Pan, G. T., Wang, L. Q., et al., 2006. Isotopic Geochronology of the Volcanic Rocks from the Yeba Formation in the Gangdise Zone, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Gorton, M. P., Schandl, E. S., 2000. From Continents to Island Arcs: A Geochemical Index of Tectonic Setting for Arc-Related and Within-Plate Felsic to Intermediate Volcanic Rocks. *The Canadian Mineralogist*, 38(5): 1065—1073. <https://doi.org/10.2113/gscanmin.38.5.1065>
- Gou, J., 1994. A New Knowledge on the Attributes of Yeba Formation in Lhasa Area. *Tibetan Geology*, (11): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Guo, L., Zhang, H. F., Harris, N., et al., 2013. Late Cretaceous (~81 Ma) High-Temperature Metamorphism in the Southeastern Lhasa Terrane: Implication for the Neo-Tethys Ocean Ridge Subduction. *Tectonophysics*, 608: 112—126. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.10.007>
- Gutscher, M. A., Maury, R., Eissen, J. P., et al., 2000. Can Slab Melting be Caused by Flat Subduction?. *Geology*, 28(6): 535—538. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<535:csmbcb>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<535:csmbcb>2.0.co;2)
- He, Z. H., Yang, D. M., Zheng, C. Q., et al., 2006. Isotopic Dating of the Mamba Granitoid in the Gangdise Tectonic Belt and Its Constraint on the Subduction Time of the Neotethys. *Geological Review*, 52(1): 100—106 (in Chinese with English abstract).
- Hu, P. Y., Zhai, Q. G., Wang, J., et al., 2018. Precambrian Origin of the North Lhasa Terrane, Tibetan Plateau: Constraint from Early Cryogenian Back-Arc Magmatism. *Precambrian Research*, 313: 51—67. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2018.05.014>
- Huang, F., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2015. Early Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation and Sangri Group: Products of Continental Marginal Arc and Intra-Oceanic Arc during the Subduction of Neo-Tethys Ocean?. *Acta Petrologica Sinica*, 31(7): 2089—2098 (in Chinese with English abstract).
- Kelemen, P. B., Hanghøj, K., Greene, A. R., 2007. One View of the Geochemistry of Subduction-Related Magmatic Arcs, with an Emphasis on Primitive Andesite and Lower Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 593—660. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03035-8>
- Leat, P. T., Thompson, R. N., Morrison, M. A., et al., 1988. Compositionally-Diverse Miocene-Recent Rift-Related Magmatism in Northwest Colorado: Partial Melting, and Mixing of Mafic Magmas from 3 Different Asthenospheric and Lithospheric Mantle Sources. *Journal of Petrology*, Special Volume (1): 351—377. https://doi.org/10.1093/petrology/special_volume.1.351
- Li, H. Q., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2011. Syn-Collisional Exhumation of Sumdo Eclogite in the Lhasa Terrane, Tibet: Evidences from Structural Deformation and ^{40}Ar - ^{39}Ar Geochronology. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 66—78 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. C., Ding, L., Zhang, L. Y., et al., 2018. Sequence and Petrogenesis of the Jurassic Volcanic Rocks (Yeba Formation) in the Gangdese Arc, Southern Tibet: Implications for the Neo-Tethyan Subduction. *Lithos*, 312—313: 72—88. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.04.026>
- Ma, X. X., Xu, Z. Q., Chen, X. J., et al., 2017. The Origin and Tectonic Significance of the Volcanic Rocks of the Yeba Formation in the Gangdese Magmatic Belt, South Tibet. *Journal of Earth Science*, 28(2): 265—282. <https://doi.org/10.1007/s12583-016-0925-8>
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101<0635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<0635:tdog>2.3.co;2)
- McCarron, J. J., Smellie, J. L., 1998. Tectonic Implications of Fore-Arc Magmatism and Generation of High-Magnesian Andesites: Alexander Island, Antarctica. *Journal of the Geological Society*, 155(2): 269—280. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.155.2.0269>
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins. *American Journal of Science*, 274(4): 321—355. <https://doi.org/10.2475/ajs.274.4.321>
- 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., Niu, Y. L., Dong, G. C., et al., 2008. Contribution of Syncollisional Felsic Magmatism to Continental Crust Growth: A Case Study of the Paleogene Linzizong Volcanic Succession in Southern Tibet. *Chemical Geology*, 250(1—4): 49—67. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.02.003>
- Murphy, M. A., Yin, A., Harrison, T. M., et al., 1997. Did the Indo-Asian Collision Alone Create the Tibetan Plateau?. *Geology*, 25(8): 719. <https://doi.org/10.1130/>

- 0091-7613(1997)025<0719:dtiaca>2.3.co;2
- Müller, D., Rock, N. M. S., Groves, D. I., 1992. Geochemical Discrimination between Shoshonitic and Potassic Volcanic Rocks in Different Tectonic Settings: A Pilot Study. *Mineralogy and Petrology*, 46(4): 259–289. <https://doi.org/10.1007/bf01173568>
- Pan, F. B., Zhang, H. F., Xu, W. C., et al., 2016. U–Pb Zircon Dating, Geochemical and Sr–Nd–Hf Isotopic Compositions of Mafic Intrusive Rocks in the Motuo, SE Tibet Constrain on Their Petrogenesis and Tectonic Implication. *Lithos*, 245: 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.05.011>
- 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).
- Patino Douce, A. E., Johnston, A. D., 1991. Phase Equilibria and Melt Productivity in the Pelitic System: Implications for the Origin of Peraluminous Granitoids and Aluminous Granulites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 107(2): 202–218. <https://doi.org/10.1007/bf00310707>
- Pearce, J. A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. John Wiley and Sons, New York, 525–548.
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. <https://doi.org/10.1093/petrology/25.4.956>
- Pearce, J. A., Mei, H. J., 1988. Volcanic Rocks of the 1985 Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 327(1594): 169–201. <https://doi.org/10.1098/rsta.1988.0125>
- Pei, S. W., 1999. Early and Middle Jurassic Bivalve Fauna in Volcanic Rocks of Tibetan Lhasa Block and Its Paleobiogeography. *Geoscience*, 13(3): 291–297 (in Chinese with English abstract).
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46(5): 921–944. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi005>
- Qiu, J. S., Wang, R. Q., Zhao, J. L., et al., 2015. Petrogenesis of the Early Jurassic Gabbro–Granite Complex in the Middle Segment of the Gangdese Belt and Its Implications for Tectonic Evolution of Neo–Tethys: A Case Study of the Dongga Pluton in Xi'gaze. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12): 3569–3580 (in Chinese with English abstract).
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1–64
- Salters, V. J. M., Stracke, A., 2004. Composition of the Depleted Mantle. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 5(5): 1–27. <https://doi.org/10.1029/2003gc000597>
- Schiano, P., Monzier, M., Eissen, J. P., et al., 2010. Simple Mixing as the Major Control of the Evolution of Volcanic Suites in the Ecuadorian Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 160(2): 297–312. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0478-2>
- Shinjo, R., Kato, Y., 2000. Geochemical Constraints on the Origin of Bimodal Magmatism at the Okinawa Trough, an Incipient Back–Arc Basin. *Lithos*, 54(3–4): 117–137. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(00)00034-7)
- Sisson, T. W., 1994. Hornblende–Melt Trace–Element Partitioning Measured by Ion Microprobe. *Chemical Geology*, 117(1–4): 331–344. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90135-x](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90135-x)
- Song, S. G., Niu, Y. L., Wei, C. J., et al., 2010. Metamorphism, Anatexis, Zircon Ages and Tectonic Evolution of the Gongshan Block in the Northern Indochina Continent—An Eastern Extension of the Lhasa Block. *Lithos*, 120(3–4): 327–346. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.08.021>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tafti, R., Lang, J. R., Mortensen, J. K., et al., 2014. Geology and Geochronology of the Xietongmen (Xiongcu) Cu–Au Porphyry District, Southern Tibet, China. *Economic Geology*, 109(7): 1967–2001. <https://doi.org/10.2113/econgeo.109.7.1967>
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241–265. <https://doi.org/10.1029/95rg00262>
- Tepper, J. H., Nelson, B. K., Bergantz, G. W., et al., 1993. Petrology of the Chilliwack Batholith, North Cascades, Washington: Generation of Calc–Alkaline Granitoids by Melting of Mafic Lower Crust with Variable Water Fugacity. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(3): 333–351. <https://doi.org/10.1007/bf00286926>
- Wang, C., Ding, L., Zhang, L. Y., et al., 2016. Petrogenesis of Middle–Late Triassic Volcanic Rocks from the Gangdese Belt, Southern Lhasa Terrane: Implications for Early Subduction of Neo–Tethyan Oceanic Lithosphere.

- Lithos*, 262: 320—333. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.07.021>
- Wang, Q., Zhu, D. C., Cawood, P. A., et al., 2015. Eocene Magmatic Processes and Crustal Thickening in Southern Tibet: Insights from Strongly Fractionated Ca. 43 Ma Granites in the Western Gangdese Batholith. *Lithos*, 239: 128—141. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.10.003>
- Wei, Y. Q., Zhao, Z. D., Niu, Y. L., et al., 2017. Geochronology and Geochemistry of the Early Jurassic Yeba Formation Volcanic Rocks in Southern Tibet: Initiation of Back-Arc Rifting and Crustal Accretion in the Southern Lhasa Terrane. *Lithos*, 278—281: 477—490. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.02.013>
- Wilson, M., 1993. Magmatism and the Geodynamics of Basin Formation. *Sedimentary Geology*, 86(1—2): 5—29. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(93\)90131-n](https://doi.org/10.1016/0037-0738(93)90131-n)
- Wu, F. Y., Ji, W. Q., Liu, C. Z., et al., 2010. Detrital Zircon U-Pb and Hf Isotopic Data from the Xigaze Fore-Arc Basin: Constraints on Transhimalayan Magmatic Evolution in Southern Tibet. *Chemical Geology*, 271(1—2): 13—25. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.12.007>
- Wu, Y., Chen, S. Y., Qin, M. K., et al., 2018. Zircon U-Pb Ages of Dongcuo Ophiolite in Western Bangonghu-Nujiang Suture Zone and Their Geological Significance. *Earth Science*, 43(4): 1070—1084 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.710>
- Wu, Y. W., Li, C., Xu, M. J., et al., 2017. Zircon U-Pb Age, Geochemical Data: Constraints on the Origin and Tectonic Evolution of the Metamafic Rocks from Longmuco-Shuanghu-Lancang Suture Zone, Tibet. *Journal of Earth Science*, 28(3): 422—432. <https://doi.org/10.1007/s12583-017-0730-z>
- Xiong, Q. W., Chen, J. L., Xu, J. F., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Geochronology, Geochemical Characteristics and Genetic Study of Yeba Formation Lavas in Demingding Area, Southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 34(9): 1645—1655 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Yang, J. S., Li, H. B., et al., 2007. The Tibetan Plateau: Formed by Orogeny. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yang, J. S., Xu, Z. Q., Geng, Q. R., et al., 2006. A Possible New HP/UHP(?) Metamorphic Belt in China: Discovery of Eclogite in the Lasha Terrane, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(12): 1787—1792 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T. M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.211>
- Yin, J. R., Cai, H. W., Zhou, Z. G., 2006. Study of Marine Triassic/Jurassic Boundary Stratigraphy and the Latest Triassic Mass Extinction in Tibet. *Earth Science Frontiers*, 13(4): 244—254 (in Chinese with English abstract).
- Yin, J. R., Grant-Mackie, J. A., 2005. Late Triassic-Jurassic Bivalves from Volcanic Sediments of the Lhasa Block, Tibet. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 48(3): 555—577. <https://doi.org/10.1080/00288306.2005.9515133>
- Zeng, Y. C., Xu, J. F., Chen, J. L., et al., 2018. Geochronological and Geochemical Constraints on the Origin of the Yunzhug Ophiolite in the Shiquanhe-Yunzhug-Namu Tso Ophiolite Belt, Lhasa Terrane, Tibetan Plateau. *Lithos*, 300—301: 250—260. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.11.025>
- Zeng, Z. C., Liu, D. M., Zeren, Z. X., et al., 2009. Geochemistry and Tectonic Setting of Lavas in the Yeba Formation in the Eastern Part of the Gangdise Belt. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 39(3): 435—445 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. F., Xu, W. C., Guo, J. Q., et al., 2007. Zircon U-Pb and Hf Isotopic Composition of Deformed Granite in the Southern Margin of the Gangdise Belt, Tibet: Evidence for Early Jurassic Subduction of Neo-Tethyan Oceanic Slab. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1347—1353 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, S., 2002. Study on the Geochronology of Several Key Regions of Gangdese Magmatic and Yarlung Zangpo Ophiolite Belts, Tibet (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Chung, S. L., et al., 2008. SHRIMP Zircon Age and Geochemical Constraints on the Origin of Lower Jurassic Volcanic Rocks from the Yeba Formation, Southern Gangdese, South Tibet. *International Geology Review*, 50(5): 442—471. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.50.5.442>
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Wang, L. Q., et al., 2008a. Spatial-Temporal Distribution and Tectonic Setting of Jurassic Magmatism in the Gangdise Belt, Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 458—468 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, D. C., Pan, G. T., Wang, L. Q., et al., 2008b. Temporal-Spatial Variations of Mesozoic Magmatic Rocks in the Gangdise Belt, Tibet, China, with a Discussion of Geody-

- namic Setting-Related Issues. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1535—1550 (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. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.11.005>
- Zhu, J., Du, Y. S., Liu, Z. X., et al., 2005. Mesozoic Radiolarian Chert from the Middle Sector of the Yarlung-Zangbo Suture Zone, Tibet and Its Tectonic Implications. *Science in China (Series D)*, 35(12): 1131–1139 (in Chinese).
- Zorpi, M. J., Coulon, C., Orsini, J. B., 1991. Hybridization between Felsic and Mafic Magmas in Calc-Alkaline Granitoids—A Case Study in Northern Sardinia, Italy. *Chemical Geology*, 92(1–3): 45–86. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(91\)90049-w](https://doi.org/10.1016/0009-2541(91)90049-w)
- ### 附中文参考文献
- 陈炜, 马昌前, 边秋娟, 等, 2009. 西藏得明顶地区叶巴组火山岩地球化学特征和同位素 U-Pb 年龄证据. 地质科技情报, 28(3): 31–40.
- 董昕, 张泽明, 2013. 拉萨地体南部早侏罗世岩浆岩的成因和构造意义. 岩石学报, 29(6): 1933–1948.
- 董彦辉, 许继峰, 曾庆高, 等, 2006. 存在比桑日群弧火山岩更早的新特提斯洋俯冲记录么?. 岩石学报, 22(3): 661–668.
- 耿全如, 潘桂棠, 金振民, 等, 2005. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩地球化学及成因. 地球科学, 30(6): 747–760.
- 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等, 2006. 西藏冈底斯带叶巴组火山岩同位素地质年代. 沉积与特提斯地质, 26(1): 1–7.
- 苟金, 1994. 对拉萨地区叶巴组时代归属的新认识. 西藏地质, (11): 1–6.
- 和钟铎, 杨德明, 郑常青, 等, 2006. 冈底斯带门巴花岗岩同位素测年及其对新特提斯洋俯冲时代的约束. 地质评论, 52(1): 100–106.
- 黄丰, 许继峰, 陈建林, 等, 2015. 早侏罗世叶巴组与桑日群火山岩: 特提斯洋俯冲过程中的陆缘弧与洋内弧?. 岩石学报, 31(7): 2089–2098.
- 李化启, 许志琴, 杨经绥, 等, 2011. 拉萨地体内松多榴辉岩的同碰撞折返: 来自构造变形和 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学的证据. 地质前缘, 18(3): 66–78.
- 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.
- 潘桂棠, 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.
- 裴树文, 1999. 拉萨地块火山岩系内早—中侏罗世双壳类动物群及其古生物地理. 现代地质, 13(3): 291–297.
- 邱检生, 王睿强, 赵蛟龙, 等, 2015. 冈底斯中段早侏罗世辉长岩—花岗岩杂岩体成因及其对新特提斯构造演化的启示: 以日喀则东嘎岩体为例. 岩石学报, 31(12): 3569–3580.
- 武勇, 陈松永, 秦明宽, 等, 2018. 西藏班公湖—怒江缝合带西段洞错蛇绿岩中的辉长岩锆石 U-Pb 年代学及地质意义. 地球科学, 43(4): 1070–1084.
- 熊秋伟, 陈建林, 许继峰, 等, 2015. 拉萨地块南部得明顶地区叶巴组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄. 地球化学特征及其成因. 地质通报, 34(9): 1645–1655.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2007. 造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及升降机制. 北京: 地质出版社.
- 杨经绥, 许志琴, 耿全如, 等, 2006. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带. 地质学报, 80(12): 1787–1792.
- 阴家润, 蔡华伟, 周志广, 等, 2006. 西藏海相三叠系—侏罗系界线及晚三叠世生物绝灭事件研究. 地质前缘, 13(4): 244–254.
- 曾忠诚, 刘德民, 泽仁扎西, 等, 2009. 西藏冈底斯东段叶巴组火山岩地球化学特征及其地质构造意义. 吉林大学学报(地球科学版), 39(3): 435–445.
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等, 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据. 岩石学报, 23(6): 1347–1353.
- 周肃, 2002. 西藏冈底斯岩浆岩带及雅鲁藏布蛇绿岩带关键地段同位素年代学研究(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等, 2008a. 西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境. 地质通报, 27(4): 458–468.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等, 2008b. 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. 地质通报, 27(9): 1535–1550.
- 朱杰, 杜远生, 刘早学, 等, 2005. 西藏雅鲁藏布江缝合带中段中生代放射虫硅质岩成因及其大地构造意义. 中国科学(D辑), 35(12): 1131–1139.