

西藏新嘎果地区典中组火山岩年代学、Hf 同位素及地球化学特征

唐攀¹, 唐菊兴², 郑文宝², 冷秋锋³, 林彬², 唐晓倩⁴, 王豪¹

(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; 3. 西藏华钰矿业股份有限公司, 西藏拉萨 850000; 4. 中矿联资源储量评审咨询中心, 北京 100044)

摘要: 新嘎果地区位于西藏南冈底斯中段北部, 洛巴堆-米拉山断裂南侧, 区内发育的林子宗群典中组火山岩主要为流纹质岩屑晶屑凝灰岩, 出露面积小。该区典中组火山岩具有富硅($\text{SiO}_2 = 75.09\% \sim 78.10\%$)、贫碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.84 \sim 6.52\%$)、贫镁($\text{MgO} = 0.24 \sim 0.37\%$)、过铝质($\text{A/CNK} = 1.02 \sim 1.75$)特征, 富集轻稀土元素, 轻重稀土元素分馏明显, $(\text{La/Yb})_N = 9.49 \sim 11.30$, Eu 异常从弱负异常到弱正异常($\delta\text{Eu} = 0.76 \sim 1.15$), 相对富集大离子亲石元素(Rb、Th、U、K), 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 并且明显亏损 Ba 和 Sr, 属于钙碱性过铝质系列, 具有陆源弧火山岩的特点。锆石 U-Pb 年龄为 70.89 ± 0.31 Ma, 是目前典中组火山岩最老的年龄, 锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值比较均一, 分布于 $0.282\,820 \sim 0.282\,939$ 之间, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $+3.2 \sim +7.4$, t_{DM} 模式年龄变化于 $662 \sim 930$ Ma 之间。地球化学研究表明, 新嘎果地区典中组火山岩形成于俯冲构造环境, 岩浆源区主要来源于地幔组分, 并在岩浆演化过程中混染古老地壳。

关键词: 典中组火山岩; 地球化学; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 冈底斯; 西藏

中图分类号: P588.14⁺1; P597

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)01-0047-14

Zircon U-Pb ages, Hf isotopes and geochemistry of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area, Tibet

TANG Pan¹, TANG Ju-xing², ZHENG Wen-bao², LENG Qiu-feng³, LIN Bin², TANG Xiao-qian⁴
and WANG Hao¹

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Tibet Huayu Mining Development Co., Ltd., Lhasa 850000, China; 4. China Mining Association, Beijing 100044, China)

Abstract: The volcanic rocks in Linzizong Group are developed in the Gangdise belt of Tibet, and can reflect the important information of Neo-Tethys from its subduction to the India-Asia collision. The Xingaguo area is located in the northern middle part of south Gangdise, Tibet, lying to the south of Luobadui-Milashan Fault. The volcanic rocks in Dianzhong Formation consist of rhyolitic detritus crystal tuff, and are distributed in a limited area in the north of the ore district. The volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo are

收稿日期: 2017-02-13; 接受日期: 2017-06-20

基金项目: 公益性行业专项(201511022-05, 201511017); 国家自然科学基金项目(41302060); 中国地质科学院基本科研业务费(YYW201608)

作者简介: 唐攀(1989-), 男, 博士研究生, 现从事矿床勘查与评价工作, E-mail: tangpan168@163.com; 通讯作者: 唐菊兴(1964-), 男, 博士生导师, 研究员, 主要从事矿床学和固体矿产勘查与评价研究工作, E-mail: tangjuxing@126.com。

composed of rhyolitic detritus crystal tuff and are distributed in the northern area, with the exposed area being small. Chemical analyses show that the volcanic rocks in Dianzhong Formation have high SiO_2 ($\text{SiO}_2 = 75.09\% \sim 78.10\%$), low alkali ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.84\% \sim 6.52\%$), and low Mg ($\text{MgO} = 0.24\% \sim 0.37\%$), with peraluminous nature ($\text{A/CNK} = 1.02 \sim 1.75$); they are characterized by LREE enrichment and obvious REE differentiation [$(\text{La/Yb})_{\text{N}} = 9.49 \sim 11.30$], with weak positive and negative Eu anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.76 \sim 1.15$); they are enriched in LILEs (Rb, Th, U and K), depleted in HFSEs (Nb, Ta, P and Ti), and obviously depleted in Ba and Sr, thus belonging to calc-alkalic and peraluminous series and having the characteristics of continental margin arc volcanic rocks. The LA-MC-ICP-MS zircon U-Pb chronology indicates that the volcanic rocks in Dianzhong Formation were emplaced at 70.89 ± 0.31 Ma, which is the oldest age for the volcanic rocks in Dianzhong Formation, and has $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ values in the range of $0.282\,820 \sim 0.282\,939$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ values in the range of $+3.2 \sim +7.4$ and single-stage model ages (t_{DM}) between 662 and 930 Ma. The volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area were formed in a tectonic environment of ocean subduction, mainly derived their materials from the mantle components, and contaminated crustal material in the process of magma rising.

Key words: Dianzhong Formation volcanic rocks; geochemistry; LA-ICP-MS U-Pb zircon dating; Hf isotope; Gangdise; Tibet

Fund support: Public Science and Technology Research Funds Projects (201511022-05, 201511017); National Natural Science Foundation of China (41302060); The Basal Research Fund of Chinese Academy of Geological Sciences (YYWF201608)

西藏冈底斯巨型构造-岩浆带位于雅鲁藏布江缝合带与班公湖-怒江缝合带之间,总体上呈近东西向展布,由南向北又可划分为南冈底斯、冈底斯弧背断隆带(即隆格尔-念青唐古拉复合古岛弧带)、中冈底斯和北冈底斯(潘桂棠等, 2006; 朱弟成等, 2008)。林子宗群火山岩是冈底斯中重要的岩浆活动产物,广泛分布于该带南部,东起拉萨地区,西至狮泉河地区,东西延伸超过 1 200 km(图 1),角度不整合于上白垩统设兴组或更老地层之上,构成该带的主体岩系(莫宣学等, 2003, 2005; 于枫等, 2010; 谢冰晶等, 2013)。莫宣学等(2003, 2006, 2007, 2009)研究提出,林子宗群火山岩及其与下伏地层的区域不整合接触关系,反映了新特提斯洋俯冲消减末期过渡到印度与亚洲大陆碰撞的重要信息。近年来许多学者相继报道了以印度-亚洲大陆主碰撞为背景的一系列火山活动响应(Ding *et al.*, 2003; Mo *et al.*, 2008; 梁银平等, 2010; Zhu *et al.*, 2013; 谢冰晶等, 2013; 鲍春辉等, 2014),并且成岩成矿研究方面也取得了较大进展,在林子宗群火山岩中发现了一批多金属矿床,比如斯弄多浅成低温热液型 Ag-Pb-Zn 矿床(唐菊兴等, 2016)、纳如松多 Ag-Pb 矿床、德新 Pb-Zn 矿床、查藏错 Cu-Pb-Zn 矿床(姜军胜等, 2015)等。林子宗群火山岩厚度超过 5 km,自

下而上可分为典中组、年波组和帕那组 3 个旋回:早期典中组旋回为流纹质-英安质-安山质岩浆岩-基性、酸性脉岩;年波组旋回为流纹质(-英安质)岩浆岩-钾玄质和钾质基性岩浆岩;帕那组旋回为流纹质-钾玄质岩浆岩(刘鸿飞, 1993; 莫宣学等, 2003, 2007; 董国臣等, 2005)。近年来的精确定年获得典中组年龄为 69.97~60 Ma(周肃等, 2004; 胡新伟等, 2007; 李皓扬等, 2007; He *et al.*, 2007; 梁银平等, 2010; 王乔林等, 2011; 谢冰晶等, 2013; 杨辉等, 2013),年波组为 67~50 Ma(李皓扬等, 2007; 于枫等, 2010; 梁银平等, 2010; 刘安琳等, 2015),帕那组为 50~40 Ma(He *et al.*, 2007; 梁银平等 2010; 谢克家等, 2011; 付文春等, 2014)。目前对林子宗群火山岩锆石 Hf 同位素研究较少,仅有李皓扬等(2007)和刘安琳等(2015)做过相应研究,典中组火山岩的研究也主要集中于中酸性火山岩,缺少最底部酸性火山岩精确的年代学数据,无法限定典中组火山岩的喷发时间。本文对新嘎果地区不整合于上白垩统设兴组之上的典中组最底部酸性火山岩进行了精确定年,并利用锆石 Hf 同位素及地球化学特征,探讨其形成的时代、成因以及地球动力学背景,丰富和完善了林子宗群火山岩的年代学框架、成因及动力学背景等。

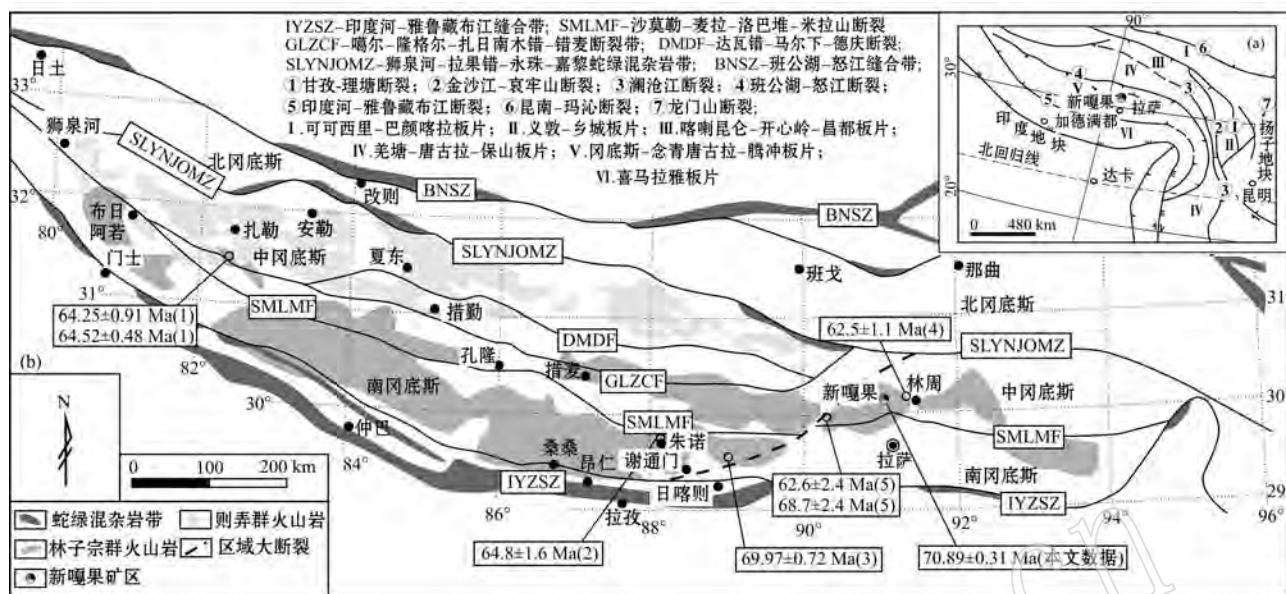


图1 青藏高原构造单元划分与典中组火山岩锆石 U-Pb 定年数据分布图[底图据朱弟成等(2006)、付文春等(2014)]

Fig. 1 Geological sketch map of tectonic framework of the Tibetan Plateau and distribution of the U-Pb dating data for the volcanic rocks in Dianzhong Formation (after Zhu Dicheng *et al.*, 2006; Fu Wenchun *et al.*, 2014)

图中年龄数据来源: ① 王乔林(2011); ② 梁银平等(2010); ③ 谢冰晶等(2013); ④ 李皓扬等(2007); ⑤ He 等(2007)

U-Pb dating data: (1) Wang Qiaolin(2011); (2) Liang Yiping *et al.* (2010); (3) Xie Bingjing *et al.* (2013); (4) Li Haoyang *et al.* (2007); (5) He *et al.* (2007)

1 地质概况

近年来,冈底斯矿产勘查评价工作取得了重大进展,南冈底斯中东段找矿效果突出,已发现了多个规模巨大的矿集区,成为中国重要的斑岩铜多金属成矿带(唐菊兴等,2012)。在该斑岩成矿带北缘还发现了多个以铁铅锌矿化为主的矿床,它们构成了一条与南缘的斑岩铜矿带平行分布的铁铅锌多金属成矿带。位于林周火山盆地的新嘎果铅锌铁矿是该成矿带典型矿床之一,但是对这类矿床的成矿背景等研究不多。

新嘎果地区大地构造位置处于西藏南冈底斯中段北部,洛巴堆-米拉山断裂南侧。研究区出露地层主要为下白垩统塔克那组(K_1t)、上白垩统设兴组(K_2sh)和第四系全新统(Qh)(图2)。研究区岩浆活动非常强烈,侵入岩、喷出岩均有出露。侵入岩类型主要为辉长闪长岩、黑云母花岗岩、花岗质岩脉和二长岩,喷出岩主要为发育于研究区北侧的典中组火山岩。研究区受冈底斯古近纪碰撞造山作用以及中新世东西向伸展作用的影响,区内断层和褶皱构造强烈发育。断层主要有北西向西逆冲断层、北东东向

逆冲断层和近南北向张扭性断层;褶皱主要为北西西向向斜、北东东向背斜和北东东向向斜。矽卡岩型矿体赋存于塔克拉组中,矿石矿物主要为闪锌矿、方铅矿、磁铁矿、镜铁矿、黄铜矿和少量磁黄铁矿等。

2 样品采集和分析方法

2.1 样品采集及岩石特征

新嘎果地区典中组火山岩分布于研究区北侧,喷发不整合于上白垩统设兴组(K_2sh)地层之上,仅呈残留顶盖,几米到十多米厚,出露面积小。岩性单一,为流纹质岩屑晶屑凝灰岩,并且在火山岩底部见砾岩。在研究区内,用于锆石 U-Pb 测年、锆石 Hf 同位素及岩石地球化学分析的样品均为流纹质岩屑晶屑凝灰岩,灰白色,呈斑状结构,块状构造;晶屑主要为石英(8%)、斜长石(6%),粒径 0.1~1 mm,其中石英和斜长石边部熔蚀结构发育;岩屑为设兴组紫红色泥岩、粉砂质泥岩和粉砂岩(3%),粒径 0.2~2 mm;副矿物为锆石、磷灰石等;基质成分主要为脱玻化晶出的少量半晶质微粒矿物(长石、石英)等(图3)。

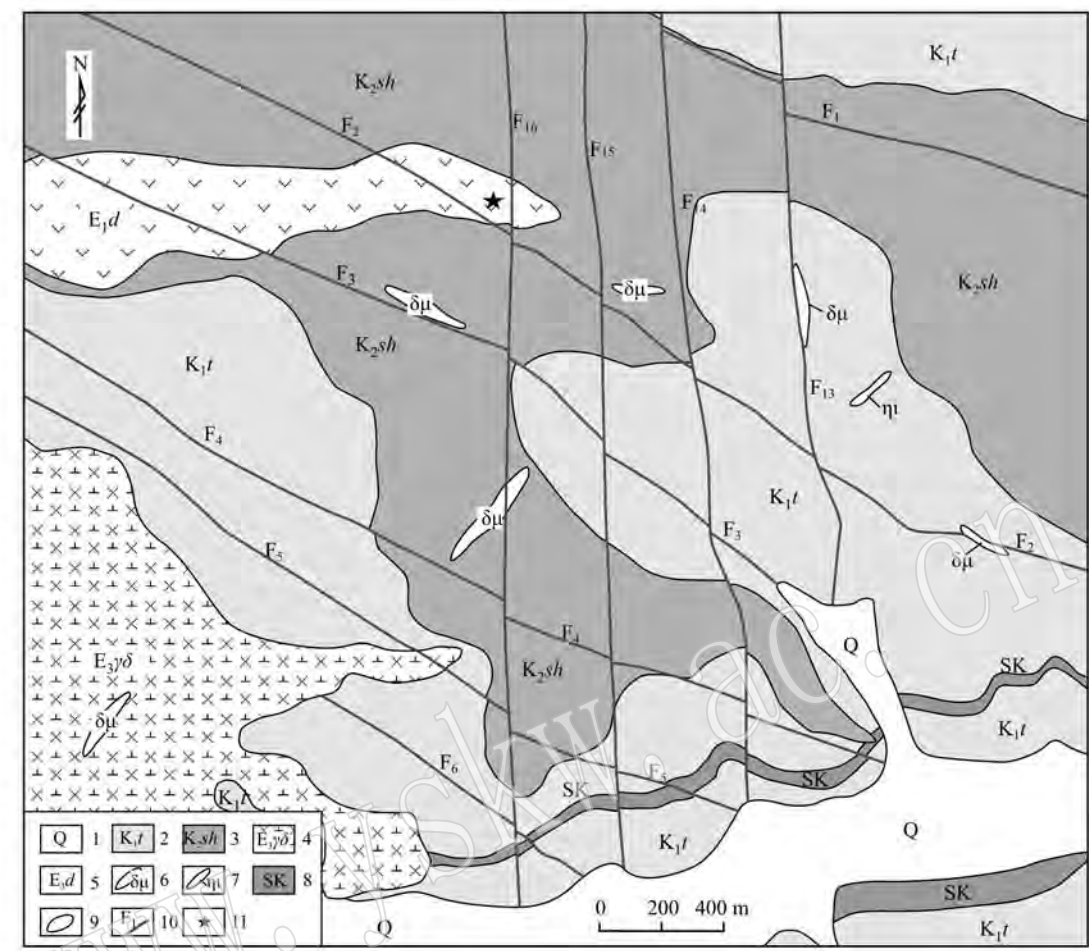


图 2 西藏新嘎果地区地质图

Fig. 2 Geological map of the Xingaguo deposit, Tibet

- 1—第四系; 2—下白垩统塔克那组; 3—上白垩统设兴组; 4—辉长闪长岩; 5—典中组; 6—闪长玢岩脉; 7—二长细晶岩脉; 8—砂卡岩;
9—地质界线; 10—断层及编号; 11—取样位置
- 1—Quaternary; 2—Lower Cretaceous Takena Formation; 3—Upper Cretaceous Shexing Formation; 4—gabbro-diorite; 5—Dianzhong Formation;
6—diorite-porphyrite vein; 7—monzonite-aplite vein; 8—skarn; 9—geological boundary; 10—fault and number; 11—sampling site

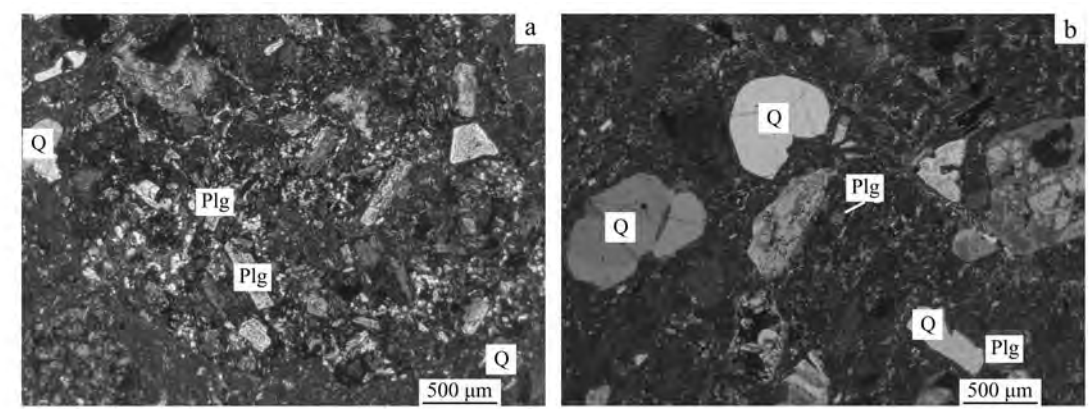


图 3 新嘎果地区典中组火山岩镜下照片(正交偏光)

Fig. 3 Microscopic photograph of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area (crossed nicols)

Q—石英; Plg—斜长石
Q—quartz; Plg—plagioclase

2.2 分析方法

锆石样品破碎和挑选在河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室完成。锆石 U-Pb 同位素定年在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室分析完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合。在等离子体中心气流(Ar+He)中加入了少量氮气,以提高仪器灵敏度、降低检出限和改善分析精密度(Hu *et al.*, 2008)。另外,激光剥蚀系统配置了一个信号平滑装置,即使激光脉冲频率低达 1 Hz,采用该装置后也能获得光滑的分析信号(Hu *et al.*, 2012)。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 91500 的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu *et al.*, 2010a)。锆石标准 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck 等(1995)。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄权重平均计算均采用 Isoplot/Ex-ver3 (Ludwig, 2012)完成。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICP-MS-Data Cal (Liu *et al.*, 2008, 2010a)完成。详细的仪器操作条件和数据处理方法同 Liu 等(2008, 2010a, 2010b)。

Lu-Hf 同位素分析在中国地质科学院矿产资源研究所 MC-ICP-MS 实验室完成,采用配有 193 nm 激光的 Neptune 多接收电感耦合等离子质谱仪进行分析,分析过程中采用 6~8 Hz 的激光频率、100 mJ 的激光强度和 50~60 μm 的激光束斑。实验中以 He 作为剥蚀物质的载气,采用 91500 作为外部标准,具体测试过程见 Wu 等(2006)。测试过程中,插入的 91500 标样的¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值变化于 0.282 310~0.282 319 之间,在仪器的正常测试范围内。

全岩主量、稀土及微量元素测试在西南冶金地质测试所完成。其中,主量元素分析测试使用 X 射线荧光光谱仪(XRF)完成,分析精度优于 5%;稀土和微量元素分析采用高分辨率等离子体质谱仪(ICP-MS)完成,当元素含量大于 10×10^{-6} 时,误差小于 5%;元素含量小于 10×10^{-6} 时,误差小于

10%。

3 分析结果

3.1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

对新嘎果地区典中组火山岩样品(XGG-7)25 粒锆石 25 点进行了 U-Pb 同位素分析,分析结果见表 1。图 4 为锆石 CL 图像、测点位置及²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值。锆石颗粒自形程度较好,多为长、短柱状,无继承锆石核,多数锆石具有明显的岩浆振荡环带,部分锆石显示核边结构(图 4)。锆石 Th/U 值为 0.65~2.51(>0.2),均值为 1.10,显示典型的岩浆锆石特征(Hoskin and Black, 2000)。除去由于包体或打穿引起的谐和度不好的数据点 4、6、8、12、17、19、22、24 外,其余年龄点均落在一致曲线上或附近(图 5),它们的加权平均年龄为 70.89 ± 0.31 Ma (MSWD = 1.4, $n = 17$),代表其结晶年龄。

3.2 锆石 Hf 同位素

新嘎果地区典中组火山岩锆石 Hf 同位素组成结果见表 2。锆石¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值比较均一,分布于 0.282 820~0.282 939 之间,平均值为 0.282 876 ($n = 15$), $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 +3.2~+7.4,平均值为 +5.2, t_{DM} 模式年龄变化于 930~662 Ma 之间,平均值 803 Ma。Hf 同位素组成具有正的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和相对年轻的地壳模式年龄(<1.1 Ga)。

3.2 全岩地球化学特征

5 件新嘎果地区典中组火山岩样品岩石地球化学分析结果见表 3。

流纹质岩屑晶屑凝灰岩 SiO₂ 含量为 75.09%~78.10%, TAS 图解上全部落入流纹岩区域(图 6a), K₂O/Na₂O 为 0.57~1.81, K₂O+Na₂O 值为 4.84%~6.52%, MgO 为 0.24%~0.37%, Al₂O₃ 含量 12.15%~12.86%, Mg[#] 为 30.83~37.61, A/CNK 为 1.02~1.75,总体上属于钙碱性过铝质(图 6b)。

流纹质岩屑晶屑凝灰岩 ΣREE 为 133.79×10^{-6} ~ 159.22×10^{-6} , LREE/HREE 为 7.74~9.36, (La/Yb)_N 为 9.49~11.30,富集轻稀土元素,轻、重稀土元素分馏明显; δEu 为 0.76~1.15, Eu 异常从弱负异常到弱正异常(图 7a)。由原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 7b)可得出,流纹质岩屑晶屑凝灰岩相对富集大离子亲石元素(Rb、Th、U、K),而亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素。Ba 和 Sr 出现较为明显的负异常。

表 1 新嘎果地区典中组火山岩锆石 U-Pb 年龄分析结果
Table 1 Zircon U-Pb ages of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area

测试点号	$\text{w}_\text{B}/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma							
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ				
XGG-7-01	1 007	884.5	1.1	0.047 1	0.000 5	0.071 5	0.001 1	0.011 0	0.000 1	53.8	8.3	70.1	1.1	70.6	0.9
XGG-7-02	164.1	163.0	1.0	0.053 1	0.005 9	0.082 9	0.011 4	0.011 2	0.000 3	331.5	236.1	80.9	10.7	71.8	1.7
XGG-7-03	222.9	218.3	1.0	0.047 4	0.000 9	0.073 0	0.001 7	0.011 2	0.000 2	77.9	44.4	71.5	1.6	71.6	1.2
XGG-7-04	174.9	165.6	1.1	0.047 7	0.001 1	0.076 3	0.002 3	0.011 6	0.000 3	83.4	61.1	74.7	2.2	74.5	1.7
XGG-7-05	400.1	357.5	1.1	0.047 5	0.000 8	0.072 7	0.001 5	0.011 1	0.000 2	72.3	44.4	71.2	1.5	71.2	1.2
XGG-7-06	793.8	576.4	1.4	0.063 8	0.011 3	0.097 2	0.020 8	0.010 8	0.000 3	744.5	374.5	94.1	19.3	68.9	1.8
XGG-7-07	137.2	137.5	1.0	0.047 9	0.001 2	0.075 3	0.002 5	0.011 4	0.000 3	94.5	75.0	73.7	2.4	73.0	1.6
XGG-7-08	534.9	213.1	2.5	0.060 8	0.001 9	0.173 6	0.019 1	0.020 4	0.001 7	631.5	66.7	162.5	16.5	130.3	10.7
XGG-7-09	321.7	301.4	1.1	0.046 4	0.002 6	0.073 3	0.002 2	0.011 5	0.000 2	16.8	133.3	71.8	2.1	73.5	1.5
XGG-7-10	356.3	544.1	0.7	0.057 1	0.009 2	0.088 1	0.017 7	0.010 9	0.000 3	494.5	355.5	85.8	16.5	70.0	2.1
XGG-7-11	351.1	483.6	0.7	0.047 6	0.000 8	0.071 3	0.001 7	0.010 9	0.000 2	76.0	52.8	70.0	1.6	69.7	1.3
XGG-7-12	260.1	295.0	0.9	0.047 2	0.000 8	0.075 0	0.001 6	0.011 5	0.000 2	57.5	44.4	73.4	1.5	73.9	1.2
XGG-7-13	297.4	305.8	1.0	0.047 7	0.000 8	0.074 7	0.001 7	0.011 4	0.000 2	83.4	30.6	73.1	1.6	72.8	1.4
XGG-7-14	222.6	244.8	0.9	0.050 4	0.003 7	0.075 7	0.006 8	0.010 8	0.000 2	213.0	250.0	74.1	6.4	69.5	1.3
XGG-7-15	394.1	386.9	1.0	0.048 3	0.002 8	0.072 9	0.005 4	0.010 9	0.000 2	122.3	152.8	71.5	5.1	70.1	1.2
XGG-7-16	782.9	593.9	1.3	0.047 3	0.000 6	0.074 0	0.001 6	0.011 3	0.000 2	61.2	27.8	72.4	1.5	72.7	1.4
XGG-7-17	620.7	555.3	1.1	0.047 2	0.000 6	0.075 2	0.001 6	0.011 6	0.000 2	57.5	33.3	73.7	1.5	74.1	1.3
XGG-7-18	199.6	194.6	1.0	0.047 9	0.001 1	0.071 2	0.002 3	0.010 8	0.000 2	94.5	63.9	69.9	2.2	69.1	1.5
XGG-7-19	277.5	221.6	1.3	0.071 9	0.008 0	0.109 4	0.015 0	0.010 8	0.000 3	983.3	227.8	105.4	13.7	69.4	2.1
XGG-7-20	293.6	326.6	0.9	0.047 9	0.000 9	0.073 7	0.002 3	0.011 2	0.000 2	100.1	44.4	72.2	2.2	71.5	1.6
XGG-7-21	180.2	193.5	0.9	0.049 0	0.003 0	0.076 6	0.004 4	0.011 3	0.000 3	150.1	138.9	74.9	4.1	72.7	1.9
XGG-7-22	384.4	378.9	1.0	0.047 3	0.000 7	0.075 7	0.002 1	0.011 6	0.000 3	64.9	38.9	74.1	2.0	74.3	1.8
XGG-7-23	357.8	238.0	1.5	0.049 6	0.001 0	0.073 3	0.001 7	0.010 7	0.000 2	176.0	36.1	71.8	1.6	68.7	1.0
XGG-7-24	213.3	210.7	1.0	0.047 9	0.000 8	0.076 7	0.001 8	0.011 6	0.000 2	100.1	38.9	75.1	1.7	74.5	1.5
XGG-7-25	310.6	344.5	0.9	0.056 1	0.004 9	0.088 5	0.009 3	0.011 3	0.000 2	453.8	188.9	86.1	8.6	72.6	1.5

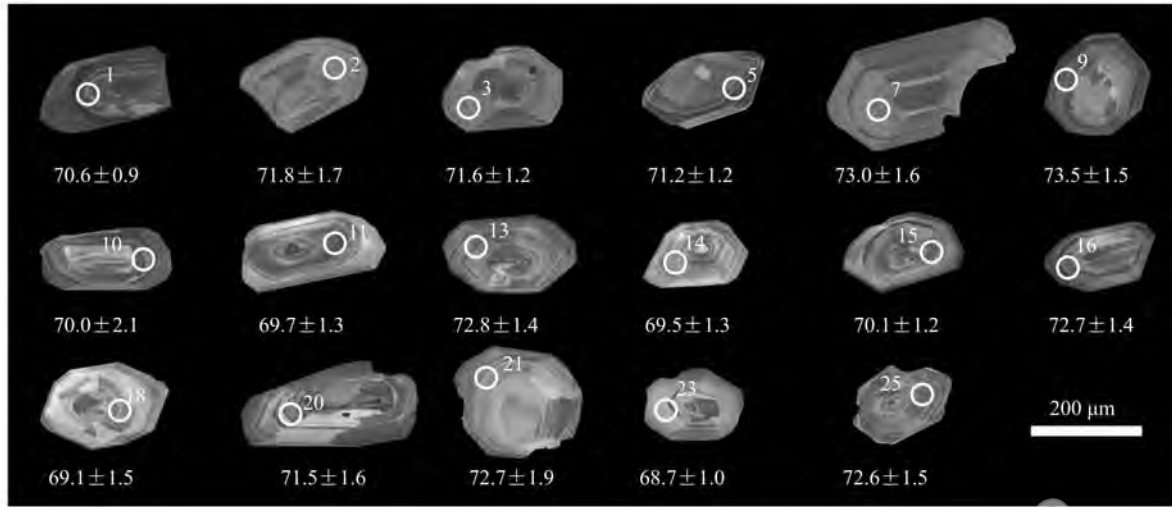


图 4 新嘎果地区典中组火山岩部分锆石 CL 图像

Fig. 4 Part of CL images of zircons of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area

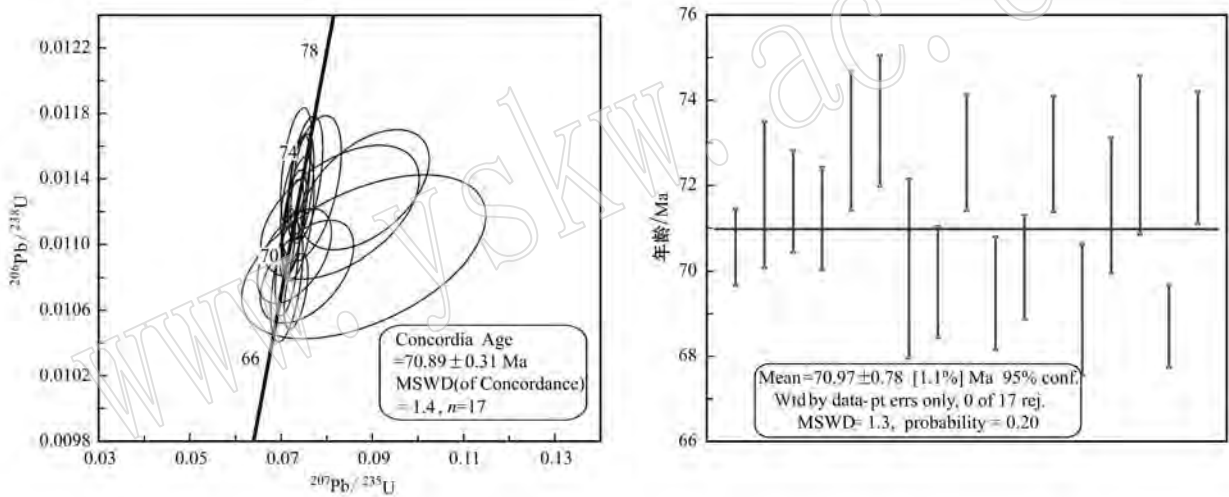


图 5 新嘎果地区典中组火山岩锆石 U-Pb 年龄

Fig. 5 Zircon U-Pb age of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area

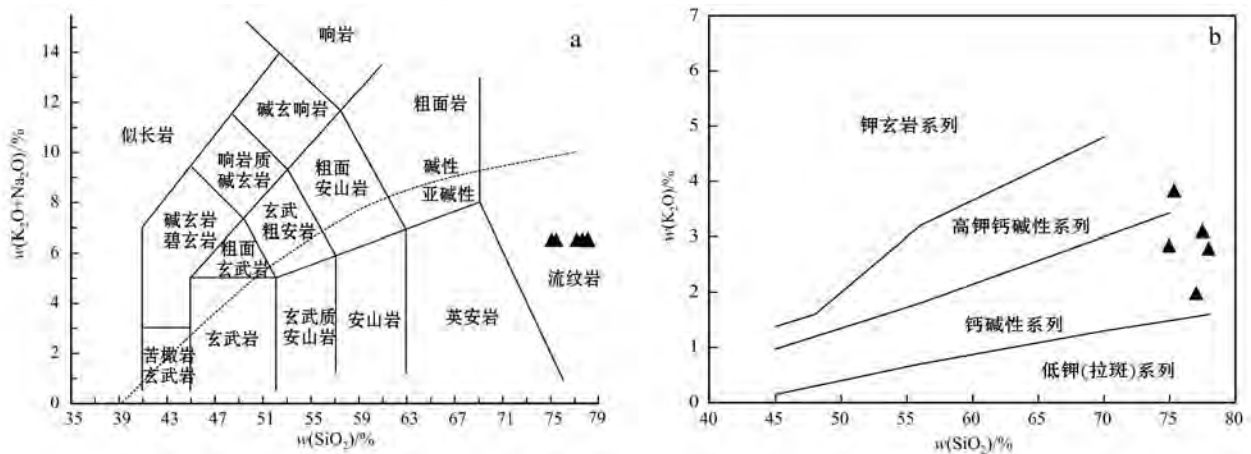
图 6 新嘎果地区典中组火山岩 TAS 分类图(a, 底图据 Middlemost, 1994)和 K_2O-SiO_2 图解(b, 据 Peccerillo 和 Taylor, 1976)Fig. 6 The TAS diagram(a, after Middlemost, 1994) and K_2O-SiO_2 classification diagram (b, after Peccerillo and Taylor, 1976) of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area

表 2 新嘎果地区典中组火山岩锆石 Hf 同位素组成
Table 2 Zircon Hf isotope compositions of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area

编号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(t)$	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	t_{DM}/Ma	$f_{\text{Lu-Hf}}$	t_{DM2}/Ma
XGG-7-01	70.6	0.070 00	0.002 100	0.282 837	0.000 022	0.282 834	2.3	3.8	605	-0.94	897
XGG-7-02	71.8	0.022 00	0.000 700	0.282 915	0.000 020	0.282 914	5.1	6.6	473	-0.98	717
XGG-7-03	71.6	0.028 50	0.000 848	0.282 843	0.000 021	0.282 842	2.5	4.0	577	-0.97	880
XGG-7-05	71.2	0.068 98	0.002 039	0.282 922	0.000 025	0.282 919	5.3	6.8	481	-0.94	705
XGG-7-07	73.0	0.032 58	0.000 929	0.282 903	0.000 022	0.282 902	4.6	6.2	494	-0.97	744
XGG-7-09	73.5	0.022 22	0.000 704	0.282 888	0.000 022	0.282 887	4.1	5.7	512	-0.98	777
XGG-7-10	70.0	0.051 33	0.001 502	0.282 864	0.000 021	0.282 862	3.3	4.7	557	-0.95	835
XGG-7-11	69.7	0.036 60	0.001 076	0.282 831	0.000 022	0.282 830	2.1	3.6	598	-0.97	909
XGG-7-13	72.8	0.033 81	0.001 041	0.282 845	0.000 020	0.282 844	2.6	4.1	578	-0.97	875
XGG-7-14	69.5	0.045 40	0.001 372	0.282 822	0.000 023	0.282 820	1.8	3.2	616	-0.96	930
XGG-7-15	70.1	0.026 09	0.000 782	0.282 940	0.000 016	0.282 939	5.9	7.4	440	-0.98	662
XGG-7-16	72.7	0.049 30	0.001 379	0.282 868	0.000 022	0.282 866	3.4	4.9	550	-0.96	824
XGG-7-18	69.1	0.072 83	0.002 163	0.282 894	0.000 020	0.282 891	4.3	5.7	524	-0.93	770
XGG-7-20	71.5	0.029 42	0.000 869	0.282 929	0.000 023	0.282 928	5.6	7.1	456	-0.97	686
XGG-7-23	68.7	0.042 21	0.001 204	0.282 861	0.000 023	0.282 859	3.1	4.6	557	-0.96	842

注: $\epsilon\text{Hf}(t) = \{[(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} \times (e^{\lambda t} - 1)] / [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} \times (e^{\lambda t} - 1)] - 1\} \times 10\,000$; $\epsilon\text{Hf}(0) = [(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1] \times 10\,000$, $T_{\text{Hf}} = 1/\lambda \times \ln[1 + (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}] / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}}$; $T_{\text{Hf2}} = T_{\text{Hf}} - (T_{\text{Hf}} - t)(f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}) / (f_{\text{CC}} - f_{\text{S}})$; $f_{\text{Lu/Hf}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{S}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.033\,2$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.282\,772$ (Blichert-Toft and Albarede, 1997), $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.038\,4$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.283\,25$ (Griffin *et al.*, 2000), $f_{\text{CC}} = [(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{mean crust}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}}] - 1$, $f_{\text{DM}} = (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} / (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} - 1$, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ (Soderlund *et al.*, 2004), t 为锆石结晶年龄, 2σ 为标准偏差。

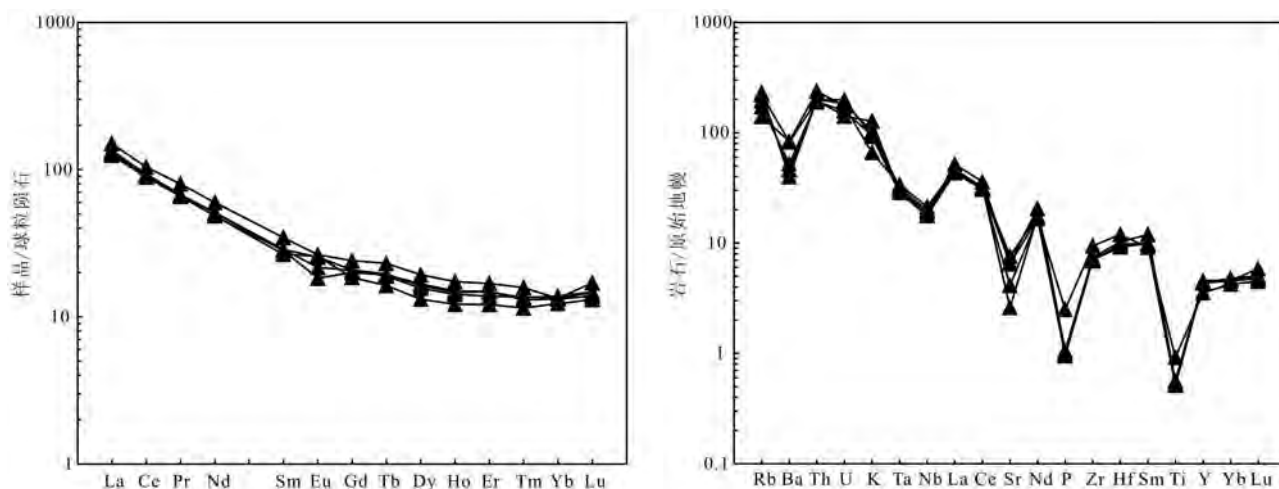


图7 新嘎果地区典中组火山岩稀土球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素地幔标准化蛛网图(b)(球粒陨石标准化值和地幔标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE distribution patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element patterns (b) of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area (chondrite and primitive mantle data from Sun and McDonough, 1989)

4 讨论

林子宗火山岩具有陆缘弧火山岩与陆内火山岩的双重特征,早期(典中组)主要显示陆缘弧的特点,随着时间的演化,弧火山岩的特征逐渐减少,而陆内火山岩的特征逐渐增强,到了晚期帕那旋回,已与其它地区典型的碰撞后火山岩具有类似的微量、稀土元素特征(莫宣学等,2003)。新嘎果地区典中组火山岩相对富集大离子亲石元素(Rb、Th、U、K),亏损Nb、Ta、P、Ti等高场强元素,与其他地区的典中组火山岩(莫宣学等,2003; 胡新伟等,2007; 杨辉等,2013)类似,反映其具有与俯冲作用有关的弧火山岩特征(Pearce *et al.*, 1984; Turner *et al.*, 1996; Condie, 2001)。在微量元素Rb-(Yb+Ta)判别图(图8)中,新嘎果地区典中组火山岩落在了弧火山岩区内,表明其形成于陆缘弧构造环境,与俯冲板片脱水产生的流体交代地幔楔有关。莫宣学等(2003)认为冈底斯林子宗群火山岩与下伏地层之间的不整合事件代表印度-亚洲大陆碰撞的开始,新嘎果地区典中组火山岩的形成年龄也是目前获得的最老年龄,因此它可代表印度-亚洲大陆碰撞的开始阶段,即俯冲向碰撞阶段转换。

冈底斯林子宗群中酸性火山岩的Sr和Nd同位素组成特征表明,火山岩源区主要为俯冲带上盘的岩石圈地幔(董国臣,2002; 莫宣学等,2003; 贾建称

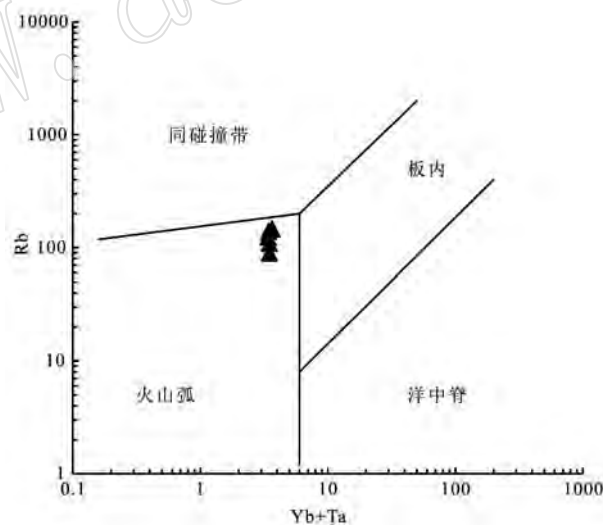


图8 新嘎果地区典中组火山岩Rb-(Yb+Ta)判别图解(据Pearce *et al.*, 1984)

Fig. 8 Rb-(Yb+Ta) diagram of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area (after Pearce *et al.*, 1984)

等,2005; Mo *et al.*, 2007, 2008; 谢克家等,2011)。李皓扬等(2007)的Hf同位素研究表明,林周盆地典中组最底部的英安质火山角砾岩和年波组下段的流纹质熔结凝灰岩岩浆源区主要来源于年轻地幔的组分,但在岩浆演化中遭受到拉萨陆块基底物质的混染。梁银平等(2010)研究了朱诺地区的林子宗群中酸性火山岩(典中组、年波组和帕那组)的岩石地球化学和Sr和Nd同位素特征,认为其物源为俯冲带

表 3 新嘎果地区典中组火山岩主量元素($w_B/\%$)、微量元素($w_B/10^{-6}$)分析结果

Table 3 Major and trace element contents of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from the Xingaguo area

样号	XGG-2	XGG-3	XGG-4	XGG-5	XGG-6
SiO ₂	75.48	78.10	77.64	75.09	77.17
Al ₂ O ₃	12.86	12.15	12.63	12.22	12.34
Fe ₂ O ₃	0.77	0.57	0.63	0.46	0.84
FeO	0.27	0.38	0.40	0.34	0.56
MgO	0.26	0.28	0.35	0.24	0.37
CaO	0.94	0.20	0.60	1.94	0.80
Na ₂ O	2.68	2.15	1.72	3.28	3.46
K ₂ O	3.84	2.80	3.11	2.85	1.99
TiO ₂	0.12	0.11	0.11	0.11	0.20
MnO	0.04	0.03	0.07	0.07	0.03
P ₂ O ₅	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05
LOI	2.28	2.93	2.54	2.96	2.08
Total	99.57	99.72	99.84	99.57	99.90
Mg [#]	30.83	34.50	37.61	35.06	32.06
A/NK	0.61	0.73	0.88	0.51	0.51
A/CNK	0.56	0.71	0.82	0.44	0.48
Li	7.82	16.73	11.48	7.27	9.20
V	9.43	8.30	7.54	10.89	20.63
Cr	4.92	4.39	2.70	3.19	6.29
Co	1.27	0.54	0.80	0.96	2.68
Ni	1.28	2.84	2.07	1.42	2.65
Cu	5.02	2.66	3.96	3.56	4.14
Zn	29.89	32.72	39.18	27.32	26.18
Rb	139.65	124.03	146.07	109.00	88.93
Sr	140.36	87.13	54.81	160.98	136.50
Y	20.57	19.76	19.96	20.73	16.14
Zr	82.63	79.34	77.35	78.58	105.49
Nb	12.80	12.64	14.22	13.76	15.25
Ba	575.74	322.45	279.39	365.04	584.06
La	35.56	29.64	31.34	30.46	32.13
Ce	63.78	54.56	57.21	55.77	56.56
Pr	7.59	6.24	6.41	6.40	6.28
Nd	27.90	22.67	23.92	23.74	22.64
Sm	5.29	4.32	4.39	4.38	4.06
Eu	1.53	1.06	1.47	1.26	1.50
Gd	4.94	4.11	4.27	4.25	3.80
Tb	0.86	0.72	0.73	0.71	0.61
Dy	4.90	4.25	4.13	3.97	3.34
Ho	0.98	0.85	0.83	0.81	0.69
Er	2.79	2.46	2.44	2.28	2.00
Tm	0.40	0.33	0.34	0.35	0.29
Yb	2.26	2.24	2.35	2.28	2.09
Lu	0.43	0.35	0.37	0.37	0.33
Hf	3.18	2.97	3.03	2.85	3.70
Ta	1.18	1.18	1.31	1.21	1.39
Pb	11.62	16.67	73.61	11.45	10.18
Th	16.72	16.92	17.13	16.20	20.19
U	2.97	4.16	3.84	3.31	3.64
Ga	13.62	14.11	15.92	12.48	14.48
ΣREE	159.22	133.79	140.22	137.02	136.33
LREE	141.65	118.48	124.74	122.00	123.17
HREE	17.57	15.31	15.47	15.01	13.16
LREE/HREE	8.06	7.74	8.06	8.13	9.36
δEu	0.90	0.76	1.03	0.88	1.15
δCe	0.91	0.93	0.94	0.93	0.92
(La/Yb) _N	11.30	9.49	9.56	9.58	11.02
SI	3.33	4.54	5.64	3.35	5.13
AR	2.79	2.34	2.15	2.53	2.42
DI	90.57	91.64	89.16	88.1	90.17
R1	3 236	3 880	3 906	3 256	3 478
R2	376	283	339	475	354
A/MF	6.35	6.16	5.58	7.33	4.41
C/MF	0.84	0.18	0.48	2.12	0.52

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + 0.9 \times Fe_2O_3^T / 80)$ 。

地幔源区基性分异岩浆和陆壳重熔的酸性岩浆按不同比例混合而成。王乔林等(2011)研究表明冈底斯西段林子宗群中酸性火山岩可能源于幔源岩浆与壳源物质间的相互作用。新嘎果地区典中组火山岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 $+3.2 \sim +7.4$, t_{DM} 模式年龄变化于 662~930 Ma 之间, 与李皓扬等(2007)和刘安琳等(2015)报道的典中组和年波组类似, 具有正的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和相对年轻的地壳模式年龄(<1.1 Ga), $\epsilon_{Hf}(t)$ 值介于壳、幔两端员组分之间(图 9), 同样表明岩浆源区主要来源于地幔组分, 并在岩浆演化过程中混染了古老地壳(李皓扬等, 2007)。于枫等(2010)通过对比冈底斯林子群火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成, 得出东部地区火山岩源区地幔贡献较多(Mo *et al.*, 2007, 2008), 而西部地区主要是地壳物质再循环。本研究和李皓扬等(2007)的锆石 Hf 同位素结论支持了于枫等(2010)的结论, 但还需要中西部林子宗群火山岩锆石 Hf 同位素的进一步佐证。另外, 由原始地幔标准化微量元素蛛网图可以看出, 新嘎果地区典中组火山岩出现明显的 Ba 和 Sr 负异常, 也说明岩浆源区中有地壳物质参与(赵志丹等, 2001; 鲍春辉等, 2014)。典中组旋回是由酸性向基性演化(莫宣学等, 2003; 董国臣等, 2005), 表明岩浆在岩

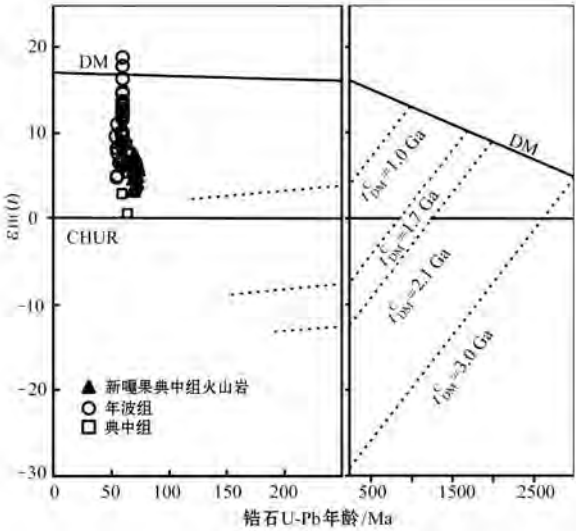


图 9 新嘎果地区典中组火山岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ -锆石 U-Pb 年龄图
Fig. 9 $\epsilon_{Hf}(t)$ -Zircon U-Pb ages diagram of the volcanic rocks in Dianzhong Formation from Xingaguo area
典中组火山岩数据来源于李皓扬等(2007); 年波组火山岩数据来源于李皓扬等(2007)和刘安琳等(2015)
volcanic rocks from Dianzhong Formation after Lee Haoyang *et al.*, 2007; volcanic rocks from Nianbo Formation after Lee Haoyang *et al.*, 2007 and Liu Anlin *et al.*, 2015

浆房中发生了一定程度的结晶分异(李皓扬等, 2007)。与新嘎果矿床成矿有关的辉长闪长岩锆石 U-Pb 年龄为 59.66 ± 0.52 Ma, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 $0.282\,901 \sim 0.283\,048$, $\epsilon\text{Hf}(t)$ 为 $+5.7 \sim +11.0$ (唐攀, 未刊资料), 比研究区的典中组火山岩形成稍晚, 两者 Hf 同位素特征类似, 表明它们可能为同一火山岩浆系统的产物。由上文可知新嘎果地区典中组火山岩经历过地壳混染作用, 与辉长闪长岩初始源区相似。林子宗群火山岩年龄与冈底斯北缘的铁铅锌多金属成矿带成岩成矿年龄(杨毅, 2015)相当。另外, 林子宗群火山岩中也发现了一批多金属矿床, 比如斯弄多浅成低温热液型 Ag-Pb-Zn 矿床(唐菊兴等, 2016)、纳如松多 Ag-Pb 矿床、德新 Pb-Zn 矿床、查藏错 Cu-Pb-Zn 矿床(姜军胜等, 2015)等。虽然林子宗群火山作用是否与冈底斯北缘的铁铅锌多金属成矿带具有某种程度的耦合关系还需要进一步研究, 但不可否认存在其与成矿岩体实为同源产物的巨大可能性。因此, 林子宗群火山岩或许是该成矿带的重要找矿标志。

5 结论

(1) 新嘎果地区典中组酸性火山岩位于林子群火山岩最底部, 形成于 70.89 ± 0.31 Ma, 为目前典中组火山岩最老的年龄。

(2) 新嘎果地区典中组酸性火山岩属于钙碱性过铝质系列, 富集轻稀土元素, 轻重稀土元素分馏明显, Eu 异常从弱负异常到弱正异常, 相对富集大离子亲石元素(Rb、Th、U、K), 亏损 Nb、Ta、P、Ti 等高场强元素, 并且明显亏损 Ba 和 Sr。锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值比较均一, 分布于 $0.282\,820 \sim 0.282\,939$ 之间(均值 $0.282\,876$, $n = 15$), $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值为 $+3.2 \sim +7.4$ (均值 $+5.2$), t_{DM} 模式年龄变化于 $662 \sim 930$ Ma 之间(均值 803 Ma)。

(3) 新嘎果地区典中组酸性火山岩形成于俯冲构造环境, 具有陆源弧火山岩特征, 岩浆源区主要来源于地幔组分, 并在岩浆演化过程中混染了古老地壳。

致谢 本文在编写过程中得到项目团队的帮助和指导, 主微量元素测试得到西南冶金测试所实验室工作人员的帮助, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素得到中国地质科学院矿产资源研究所

MC-ICP-MS 实验室侯可军助理研究员的帮助和指导, 审稿专家提出了宝贵的修改意见, 在此一并致谢。

References

- Bao Chunhui, Ding Feng, Wang Qian, *et al.* 2014. Lithochemical, geochemical, characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks in the Eocene Pana Formation, Linzizong Group, in the Xiongma area, Coqen County, Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 60 (2): 275~284 (in Chinese with English abstract).
- Blichert-Toft J and Albarède F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 148: 243~258.
- Condie K C. 2001. *Mantle Plume and Their Record in Earth History* [M]. London: Cambridge University Press.
- Defant M T and Drummond M S. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347 (6297): 662~665.
- Ding Lin, Kapp P, Zhong Dalai, *et al.* 2003. Cenozoic volcanism in Tibet: Evidence for a transition from oceanic to continental subduction [J]. *Journal of Petrology*, 44(10): 1833~1865.
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, *et al.* 2005. A new understanding of the stratigraphic successions of the Linzizong volcanic rocks in the Lhünzhub basin, northern Lhasa, Tibet, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 24 (6): 549~557 (in Chinese with English abstract).
- Fu Wenchun, Kang Zhiqiang and Pan Huibin. 2014. Geochemistry, zircon U-Pb age and implications of the Linzizong Group volcanic rocks in Shi-quan River area, western Gangdise belt, Tibet [J]. *Geological Bulletin of China*, 33(6): 850~859 (in Chinese with English abstract).
- He S D, Kapp P, DeCelles P G, *et al.* 2007. Cretaceous-Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet [J]. *Tectonophysics*, 433: 15~37.
- Hoskin P W O and Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Metamorphic Geology*, 18(4): 423~439.
- Hu Xinwei, Ma Runze, Tao Xiaofeng, *et al.* 2007. Lithogeochemical characteristics and tectonic setting of volcanic rocks of Dianzhong Formation in the Coqen area, Tibet, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 34(1):

- 15~22(in Chinese with English abstract).
- Hu Z, Liu Y, Gao S, *et al.* 2012. A "wire" signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part B. Atomic Spectroscopy*, 78: 50~57.
- Hu Z C, Gao S, Liu Y S, *et al.* 2008. Signal enhancement in laser ablation ICP-MS by addition of nitrogen in the central channel gas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 23: 1 093~1 101.
- Jiang Junsheng, Zheng Youye, Gao Shunbao, *et al.* 2015. Genesis of chazangcuo Cu-Pb-Zn deposit, Tibet: Constraints from C-H-O-S-Pb isotope geochemistry[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 40(6): 1 006~1 016(in Chinese with English abstract).
- Liang Yinping, Zhu Jie, Ci Qiong, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rock from Linzizong Group in Zhunuo area in middle Gangdise belt, Tibet Plateau[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 211~223(in Chinese with English abstract).
- Lee Haoyang, Chung Sunlin, Wang Yanbin, *et al.* 2007. Age, petrogenesis and geological significance of the Linzizong volcanic successions in the Linzhou basin, southern Tibet: evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 493~500(in Chinese with English abstract).
- Liu Anlin, Zhu Dicheng, Wang Qin, *et al.* 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and origin of the Linzizong volcanic rocks from Milashan, southern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(5): 826~833(in Chinese with English abstract).
- Liu Hongfei. 1993. Division of Linzizong volcanic rock system and belong to time in Lhasa area[J]. *Tibet Geology*, 2: 59~69(in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010a. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537~571.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1~2): 34~43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, *et al.* 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55: 1 535~1 546.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, *et al.* 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 96: 225~242.
- 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 Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 250: 49~67.
- Mo Xuanxue and Pan Guitang. 2006. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet plateau: Constrained by tectonic-magmatic events[J]. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 43~51(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, *et al.* 2003. Response of volcanism to the India-Asia collision[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135~148(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhou Su, *et al.* 2007. On the timing of India-Asia continental collision[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1 240~1 244(in Chinese with English abstract).
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, *et al.* 2009. On the lithosphere of Indo-Asia collision zone in southern Tibet: Petrological and geochemical constraints[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(1): 17~27(in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdese orogenic belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521~533(in Chinese with English abstract).
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956~983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58(1): 63~81.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [A]. Sanders A D and Norry M J. *Magmatism in Ocean Basins* [C]. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313~345.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D, *et al.* 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu-Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 219, 311~324.

- Tang Juxing, Ding Shuai, Meng Zhan, *et al.* 2016. The first discovery of the low sulfidation epithermal deposit in Linzizong volcanics, Tibet: A case study of the sinongduo Ag polymetallic deposit[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 37(4): 461~470(in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing, Duo Ji, Liu Hongfei, *et al.* 2012. Minerogenetic series of ore deposits in the east part of the Gangdise metallogenic belt[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 393~420(in Chinese with English abstract).
- Turne 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[J]. *Journal of Petrology*, 37(1): 45~71.
- Wang Qiaolin. 2011. Geochemistry and Zircon U-Pb Chronology of Linzizong Group Volcanic Rocks in Western Gangdese, Tibet[D]. Master Degree Thesis, Beijing: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19: 1~23.
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, *et al.* 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 234: 105~126.
- Xie Bingjing, Zhou Su, Xie Guogang, *et al.* 2013. Zircon SHRIMP U-Pb data and regional contrasts of geochemical characteristics of Linzizong volcanic rocks from Konglong and Dinrenle region, middle Gangdese belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3 803~3 814 (in Chinese with English abstract).
- Xie Kejia, Zeng Lingshen, Liu Jing, *et al.* 2011. Timing and geochemistry of the Linzizong Group volcanic rocks in Sangsang area, Ngamring County, southern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(9): 1 339~1 352(in Chinese with English abstract).
- Yang Hui, Xiang Shuyuan, Wang Xin, *et al.* 2013. Age and tectonic setting of Dianzhong Formation in the maxing area, Tibet, China[J]. *Geological Science and Technology Information*, 32(4): 89~96(in Chinese with English abstract).
- Yang Yi. 2015. The Study on Geological Characteristics of Lietinggang Iron Polymetallic Deposit, Tibet and Metallogenic Regularity of Typical Deposits in the North Gangdese Metllogenic Belt[D]. Chnegdu: Chengdu University of Technology, Dissertation for Doctor Degree, 1~139(in Chinese with English abstract).
- Yu Feng, Li Zhiguo, Zhao Zhidan, *et al.* 2010. Geochemistry and implication of the Linzizong volcanic succession in Cuomai area, central-western Gangdese, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2 217~2 225(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhidan, Mo xuanxue, Zhang Shuangquan, *et al.* 2001. Post-collisional magmatism in Wuyu basin, central Tibet—Exidence for recycling of subducted Tethyan oceanic crust[J]. *Science in China (Series D)*, 31: 20~26 (in Chinese).
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, *et al.* 2004. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronostratigraphic framework for Linzizong volcanic in Linzhou basin, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(20): 2 095~2 103 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Mo Xuanxue, *et al.* 2006. Late Jurassic-Early Cretaceous geodynamic setting in middle-northern Gangdese: New insights from volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 534~546(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Wang Liquan, *et al.* 2008. Spatial-temporal distribution and tectonic setting of Jurassic magmatism in the Gangdise belt, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(4): 458~468(in Chinese with English abstract).
- Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, *et al.* 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 429~1 454.

附中文参考文献

- 鲍春辉, 丁枫, 王乾, 等. 2014. 西藏措勤县雄玛地区始新统林子宗群帕那组火山岩地球化学特征及构造背景[J]. *地质论评*, 60(2): 275~284.
- 董国臣. 2002. 林周盆地林子宗火山岩及其所含的印度-欧亚大陆碰撞信息研究(博士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学.
- 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 2005. 拉萨北部林周盆地林子宗火山岩层序新议[J]. *地质通报*, 24(6): 549~557.
- 胡新伟, 马润则, 陶晓风, 等. 2007. 西藏措勤地区典中组火山岩地球化学特征及构造背景[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 34(1): 15~22.
- 付文春, 康志强, 潘会彬. 2014. 西藏冈底斯带西段狮泉河地区林子宗群火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质通报*, 33(6): 850~859.
- 贾建称, 温长顺, 王根厚, 等. 2005. 冈底斯地区林子宗群火山岩岩石地球化学特征及地球动力学意义[J]. *中国地质*, 32(3): 396~404.
- 姜军胜, 郑有业, 高顺宝, 等. 2015. 西藏查藏错铜铅锌矿床成因:

- C-H-O-S-Pb 同位素制约[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 40(6): 1 006~1 016.
- 梁银平, 朱 杰, 次 邛, 等. 2010. 青藏高原冈底斯带中部朱诺地区林子宗群火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 35(2): 211~223.
- 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 等. 2007. 藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义: 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据[J]. 岩石学报, 23(2): 493~500.
- 刘安琳, 朱弟成, 王 青, 等. 2015. 藏南米拉山地区林子宗火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和起源[J]. 地质通报, 34(5): 826~833.
- 刘鸿飞. 1993. 拉萨地区林子宗火山岩系的划分和时代归属[J]. 西藏地质, 2: 59~69.
- 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[J]. 高校地质学报, 11(3): 281~290.
- 莫宣学, 潘桂棠. 2006. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 13(6): 43~51.
- 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[J]. 地学前缘, 10(3): 135~147.
- 莫宣学, 赵志丹, 周 肃, 等. 2007. 印度-亚洲大陆碰撞的时限[J]. 地质通报, 26(10): 1 240~1 244.
- 莫宣学, 赵志丹, 朱弟成, 等. 2009. 西藏南部印度-亚洲碰撞带岩石圈: 岩石学-地球化学约束[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 34(1): 17~27.
- 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[J]. 岩石学报, 22(3): 521~533.
- 唐菊兴, 丁 帅, 孟 展, 等. 2016. 西藏林子宗群火山岩中首次发现低硫化型浅成低温热液型矿床——以斯弄多银多金属矿为例[J]. 地球学报, 37(4): 461~470.
- 唐菊兴, 多 吉, 刘鸿飞, 等. 2012. 冈底斯成矿带东段矿床成矿系列及找矿突破的关键问题研究[J]. 地球学报, 33(4): 393~410.
- 王乔林. 2011. 冈底斯西段林子宗群火山岩的地球化学特征及锆石年代学研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学.
- 谢冰晶, 周 肃, 谢国刚, 等. 2013. 西藏冈底斯中段孔隆至丁仁勒地区林子宗群火山岩锆石 SHRIMP 年龄和地球化学特征的区域对比[J]. 岩石学报, 29(11): 3 803~3 814.
- 谢克家, 曾令森, 刘 静, 等. 2011. 藏南昂仁县桑桑地区林子宗群火山岩的形成时代和地球化学特征[J]. 地质通报, 30(9): 1 339~1 352.
- 于 枫, 李志国, 赵志丹, 等. 2010. 西藏冈底斯带中西部措麦地区林子宗火山岩地球化学特征及意义[J]. 岩石学报, 26(7): 2 217~2 225.
- 杨 辉, 向树元, 王 欣, 等. 2013. 西藏马乡地区典中组年龄厘定及其构造背景[J]. 地质科技情报, 32(4): 89~96.
- 杨 毅. 2015. 西藏列廷冈铁多金属矿床地质特征及冈底斯北缘成矿规律研究(博士论文)[D]. 成都: 成都理工大学, 1~139.
- 赵志丹, 莫宣学, 张双全, 等. 2001. 西藏中部乌郁盆地碰撞后岩浆作用——特提斯洋壳俯冲再循环的证据[J]. 中国科学(D 辑), 31: 20~26.
- 周 肃, 莫宣学, 董国臣, 等. 2004. 西藏林周盆地林子宗火山岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代格架[J]. 科学通报, 49(20): 2 095~2 103.
- 朱弟成, 潘桂棠, 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[J]. 岩石学报, 22(3): 534~546.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 2008. 西藏冈底斯带侏罗纪岩浆作用的时空分布及构造环境[J]. 地质通报, 27(4): 458~468.