

# 西藏冈底斯东段日多地区典中组火山岩年龄、地球化学特征及其构造环境

鲁麟<sup>1,2</sup>, 潘亮<sup>1,2</sup>, 周斌<sup>1</sup>, 韩奎<sup>1,2</sup>, 乔新星<sup>1</sup>

LU Lin<sup>1,2</sup>, PAN Liang<sup>1,2</sup>, ZHOU Bin<sup>1</sup>, HAN Kui<sup>1,2</sup>, QIAO Xinxing<sup>1</sup>

1.陕西省地质调查院, 陕西 西安 710054;

2.陕西省矿产地质调查中心, 陕西 西安 710068

1. Shaanxi Institute of Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Mineral Resources and Geological Survey, Xi'an 710068, Shaanxi, China

**摘要:**林子宗群火山岩为古近纪岩浆活动的典型代表,记录了印度与欧亚大陆碰撞造山过程。以冈底斯带东段日多地区林子宗群典中组火山岩为研究对象,对其基性和中酸性火山岩进行岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年结果表明,典中组玄武岩、安山质晶屑凝灰岩锆石 U-Pb 年龄分别为  $57.9 \pm 1.2$  Ma 和  $57.4 \pm 1.2$  Ma。典中组火山岩为钙碱性-高钾钙碱性岩石,其中,基性火山岩表现为低  $\text{SiO}_2$  (48.67%~49.34%)、富  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.25%~18.59%)、 $\text{MgO}$  (3.76%~8.69%),轻稀土元素相对富集和正 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu} = 1.15 \sim 1.37$ ) 特征;中酸性火山岩具有高  $\text{SiO}_2$  (54.92%~64.16%)、富  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.85%~16.72%)、 $\text{K}_2\text{O}$  (0.65%~2.14%)、低  $\text{MgO}$  (1.34%~3.67%) 的特征,轻稀土元素富集,呈现出弱的负 Eu 异常 ( $\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.92$ )。两者不同程度富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素,球粒陨石标准化稀土元素配分模式图均呈现出右倾、轻稀土元素富集型曲线。锆石 Lu-Hf 同位素结果显示,基性火山岩(玄武岩)  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 4.86~8.97,中酸性火山岩(安山质晶屑凝灰岩)  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 0.26~6.37。结合前人研究成果,认为西藏日多地区典中组火山岩形成于古新世印度-欧亚大陆碰撞对接的同碰撞阶段,基性火山岩主要源自消减板片流体交代上覆地幔楔部分熔融的产物,中酸性火山岩主要为新生地壳的部分熔融,上升过程中均受到不同程度地壳物质的混染。

**关键词:** 锆石 U-Pb 年龄; Lu-Hf 同位素; 典中组火山岩; 日多地区; 冈底斯带

中图分类号: P534.61<sup>+</sup>1; P59; P597<sup>+</sup>.3 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2021)08-1314-16

**Lu L, Pan L, Zhou B, Han K, Qiao X X. Geochronology, geochemistry and tectonic setting of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area, Eastern Gangdise belt, Tibet. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(8): 1314-1329**

**Abstract:** The Linzizong Group is a typical Paleogene volcanic assemblage in the Gangdise belt, which records the orogenic history of subduction and collision between India and Eurasia. Zircon U-Pb chronology and Lu-Hf isotope studies were conducted on the Dianzhong Formation basic and intermediate volcanic rocks at the bottom of the Linzizong Group in the Riduo region of the Eastern Gangdise belt. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results show that ages of the Dianzhong Formation basalt and andesite crystalline tuff are  $57.9 \pm 1.2$  Ma and  $57.4 \pm 1.2$  Ma respectively, indicating that they were formed in the Late Paleozoic. Geochemically, the volcanic rocks generally belong to high-K (calc-alkaline) series. The basic volcanic rocks have low  $\text{SiO}_2$  (48.67%~49.34%), high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.25%~18.59%) and high  $\text{MgO}$  (3.76%~8.69%). They are characterized by LREE enrichment and positive Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 1.15 \sim 1.37$ ). The intermediate volcanic rocks have high  $\text{SiO}_2$  (54.92%~64.16%), high  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (15.85%~16.72%), high  $\text{K}_2\text{O}$  (0.65%~2.14%) and low  $\text{MgO}$  (1.34%~3.67%). They are relatively enriched in LREE and weak negative Eu anomalies ( $\delta\text{Eu} = 0.77 \sim 0.92$ ).

收稿日期: 2020-08-21; 修订日期: 2021-03-10

资助项目: 中国地质调查局项目《冈底斯-喜马拉雅铜资源基地调查》(编号: DD20160015)

作者简介: 鲁麟(1988-), 女, 博士, 工程师, 从事岩石学、矿床学研究。E-mail: lulin995280@126.com

Both volcanic rocks exhibit fractionated REE and rightward patterns, strong enrichment of LILE (Rb, Ba, Sr), and depletion of HFSE (Nb, Ta, Ti). The zircon  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of the basic volcanic rocks range from 4.86 to 8.97, and the  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  values of the intermediate volcanic rocks are from 0.26 to 6.37. Based on previous results, it is suggested that the Dianzhong Formation volcanic rocks in Riduo area were formed in the syn-collision tectonic setting of the collision between India and Eurasia. The basic volcanic rocks were mainly derived from the partial melting of overlying mantle wedge metasomatized by the fluids of subducting plate, while the intermediate volcanic rocks were originated from partial melting of the juvenile crust materials, both of which were influenced by the contamination of old crustal materials to various degrees.

**Key words:** zircon U-Pb geochronology; Lu-Hf isotope; Dianzhong Formation volcanic rocks; Riduo area; Gangdise belt

位于青藏高原南部的班公湖-怒江缝合带 (BNSZ) 和雅鲁藏布江缝合带 (YZSZ) 之间的冈底斯带岩浆活动强烈, 其中林子宗群火山岩为古近纪岩浆活动的典型代表。林子宗群火山岩西起狮泉河一带, 东至拉萨东部, 延伸长度超过 1200 km, 角度不整合于中生代或更老地层之上。自下而上划分为典中组、年波组和帕那组<sup>[1-2]</sup>, 由具有典型弧火山岩地球化学特征的钙碱性岩石组成, 其火山岩序列显示从低钾拉斑玄武岩到钙碱性-钾玄岩系列的变化特征<sup>[3-5]</sup>。该套火山岩与印度-欧亚大陆碰撞事件密切相关<sup>[6-9]</sup>, 记录了新特提斯洋北向俯冲到印度-欧亚大陆碰撞的过程<sup>[10]</sup>, 因此得到地质学者的广泛关注。前人对林子宗群火山岩的研究集中在地层学<sup>[11-12]</sup>、年代学<sup>[13-14]</sup>、岩石成因<sup>[1-5]</sup>、构造背景<sup>[3, 15]</sup>等方面, 并认为林子宗群底部火山岩代表了印度-欧亚大陆碰撞的初始时间, 但冈底斯东段、中段与西段火山岩形成时代差异较大, 据此提出了印度与欧亚板块碰撞的多种模式, 例如点-点同步碰撞<sup>[16]</sup>、由西往东或由西向东的斜向穿时性碰撞等<sup>[17-20]</sup>。林子宗群各组火山岩地球化学特征显示出同碰撞-后碰撞环境转变过程中产生的具岛弧或陆缘弧特点的火山岩<sup>[4]</sup>。

前人对冈底斯东段林子宗群火山岩的研究主要集中在林周盆地, 获得典中组形成时代为 64~59 Ma。例如, 周肃等<sup>[14]</sup>厘定出林周盆地林子宗火山岩活动时期为 64.43~43.93 Ma, 典中组形成于 64.43~60 Ma; 陈贝贝等<sup>[21]</sup>限定的林周盆地典中组年龄范围为 66~59 Ma; Huang 等<sup>[22]</sup>获得典中组锆石 U-Pb 年龄为 64~62 Ma 等。但目前尚无林周盆地以东的日多地区林子宗群典中组精确的年龄报道, 且研究区该套火山岩岩石成因的研究程度仍然很低, 制约了对冈底斯东段同碰撞深部构造-岩浆过程的认识。

本文对日多地区林子宗群火山岩典中组进行

了岩石地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Lu-Hf 同位素研究, 厘定了火山岩的成岩时代, 探讨了岩石成因与构造背景, 为研究冈底斯东段印度-欧亚大陆碰撞过程提供新的证据。

## 1 地质概况

冈底斯带为一巨型岩浆岩带, 夹持于北部的班公湖-怒江缝合带 (BNSZ) 和南侧的印度河-雅鲁藏布江缝合带 (YZSZ) 之间 (图 1-a)。自南向北, 冈底斯带被划分为南冈底斯带、隆格尔-念青唐古拉带、措勤-多瓦后陆拗陷带、中冈底斯带和北冈底斯带 (图 1-b)。

研究区位于南冈底斯带东段的墨竹工卡县的日多地区, 出露中下侏罗统叶巴组火山-沉积岩组合、下白垩统楚木龙组碎屑岩建造、下白垩统塔克那组细碎屑岩夹碳酸盐岩建造和上白垩统设兴组碎屑岩建造。这些地层普遍被古近系林子宗群典中组火山岩角度不整合覆盖。出露的侵入岩主要为古新世航木多二长花岗岩。区内断裂构造较发育, 以北西向、近南北向为主<sup>[23]</sup>。

研究区典中组火山岩整体呈近东西向展布, 为一套基性-中酸性陆相火山岩系, 底部以角度不整合于早中侏罗世-晚白垩世地层之上 (图 1-c)。根据尼龙拉一带的火山喷发旋回柱状图 (图 2), 典中组以中性火山碎屑岩为主, 少量基性、中性火山熔岩, 反映火山岩相以爆发相为主, 溢流相次之。可划分为 1 个喷发旋回, 5 个喷发韵律, 总厚度大于 708 m, 各韵律层的基本岩石组合为火山碎屑岩→火山熔岩, 各韵律层间厚度由厚变薄再变厚, 反映火山活动经历了一个由爆发→溢流多次脉动的活动过程, 即具有火山喷发强度由强到弱的特点。底部以角度不整合于上白垩统设兴组之上 (图 3-a)。岩石类型为灰绿色玄武岩、浅灰色-灰绿色玄武安山岩、安山岩、安山质 (含角砾) 晶屑岩屑凝灰岩、英安

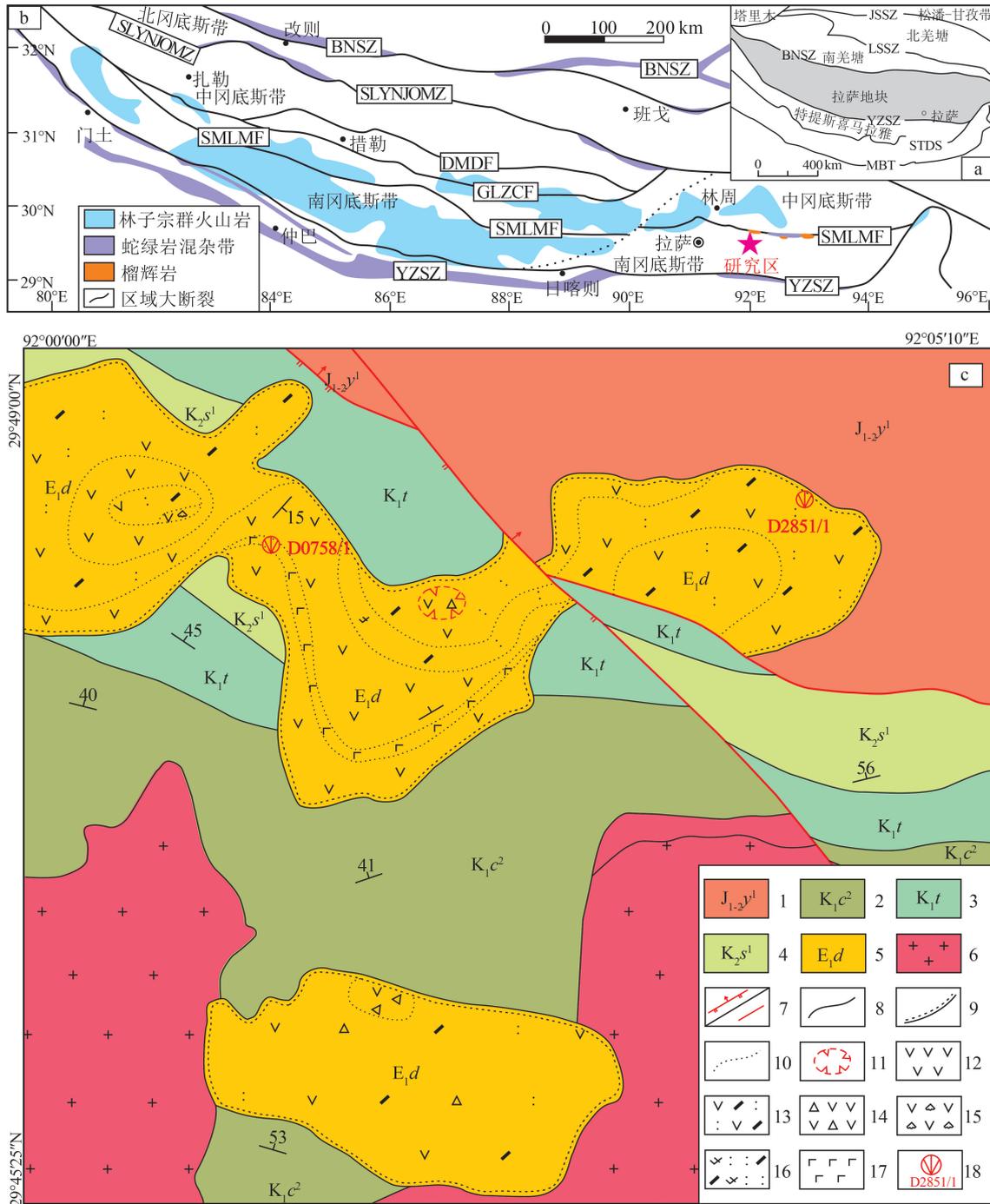


图1 拉萨地块大地构造位置(a,b)和日多地区地质简图(c) (据参考文献①[19,24-26]修改)

Fig. 1 Tectonic position of Lhasa terrane(a,b) and geological map of the Riduo area(c)

1—下中侏罗统叶巴组一段:粉砂质板岩、砂岩夹火山岩;2—下白垩统楚木龙组二段:粉砂岩、粉砂质板岩夹石英砂岩;3—下白垩统塔克那组:千枚岩、粉砂质板岩、泥晶-微晶灰岩;4—上白垩统设兴组一段:浅灰绿色绿泥绢云母化粉砂岩;5—古新统典中组火山岩;6—航木多二长花岗岩;7—逆断层/断层;8—地质界线;9—角度不整合界线;10—火山岩相界线;11—破火山口;12—安山岩;13—安山质晶屑凝灰岩;14—安山质火山角砾岩;15—安山质集块岩;16—英安质晶屑凝灰岩;17—玄武岩;18—测年样品位置(D0758/1—玄武岩,D2851/1—安山质晶屑凝灰岩);BNSZ—班公湖-怒江缝合带;YZSZ—印度河-雅鲁藏布江缝合带;SMLMF—沙莫勒-麦拉-洛巴堆-米拉山断裂;GLZCF—噶尔-隆格尔-扎日南木错-错麦断裂带;DMDf—达马错-马尔下-德庆断裂;JSSZ—金沙江缝合带;SLYNJOMZ—狮泉河-拉果错-永珠-嘉黎蛇绿混杂岩带;STDS—藏南拆离系;MBT—主边缘逆冲断层

组名	旋回	韵律	层号	厚度/m	柱状图	岩性	岩相
典中组	典中火山旋回	5	14	85.9	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色安山岩	溢流相
			13	41.1	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色安山质晶屑凝灰岩	爆发相
			12	29.7	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	浅灰绿色安山质含角砾晶屑凝灰岩	
		4	11	50.6	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色安山岩	溢流相
			10	21.9	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色安山质含角砾晶屑凝灰岩	爆发相
		3	9	57.6	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色玄武岩	溢流相
			8	9.6	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	紫灰色英安质晶屑凝灰岩	爆发相
		2	7	65.8	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色玄武岩	溢流相
			6	2.5	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	紫灰色英安质晶屑凝灰岩	爆发相
		1	5	12.5	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色玄武岩	溢流相
			4	26.5	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	紫灰色英安质晶屑凝灰岩	爆发相
			3	177	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色安山质晶屑凝灰岩	
			2	70	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色安山质火山角砾岩	
			1	57.6	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇	灰绿色安山质晶屑凝灰岩	
			设兴组			566.5	∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇ ∇

图 2 日多地区典中组火山喷发旋回柱状图

Fig. 2 Column of Dianzhong Formation volcanic rocks in Riduo area

岩、英安质角砾晶屑凝灰岩等,少量安山质火山角砾岩、英安质集块角砾岩等。

## 2 样品与分析方法

本文对典中组基性火山岩和中酸性火山岩进行了研究。2 类岩石的代表性样品岩石学特征如下。

**玄武岩:**呈灰绿色,具斑状结构,块状构造,岩石由斑晶(20%)和基质(80%)组成。斑晶为基性斜长石和单斜辉石,斑晶斜长石粒径为 0.25~1.50 mm,部分绿泥石化。单斜辉石主要为透辉石,粒径为 0.25~1.60 mm,半自形-自形晶,发生绿泥石化、

绿帘石化、碳酸盐化等蚀变,部分具交代假像结构或交代残余结构。基质主要由斜长石和暗色矿物组成,部分为隐晶质的火山玻璃,已次生变化(图 3-b、d)。

**安山质晶屑凝灰岩:**呈灰绿色,凝灰结构,块状构造,由岩屑(55%)、晶屑(25%)、火山灰(20%)组成。岩屑成分为安山质凝灰岩等,粒径小于 2 mm,呈棱角状、不规则粒状;晶屑为斜长石,呈碎屑状、棱角状,粒径小于 2 mm,聚片双晶发育,以拉长石和中长石为主;火山灰为中基性成分。岩石次生变化较强,主要为钠黝帘石化、绿泥石化、碳酸盐化等(图 3-c、e)。

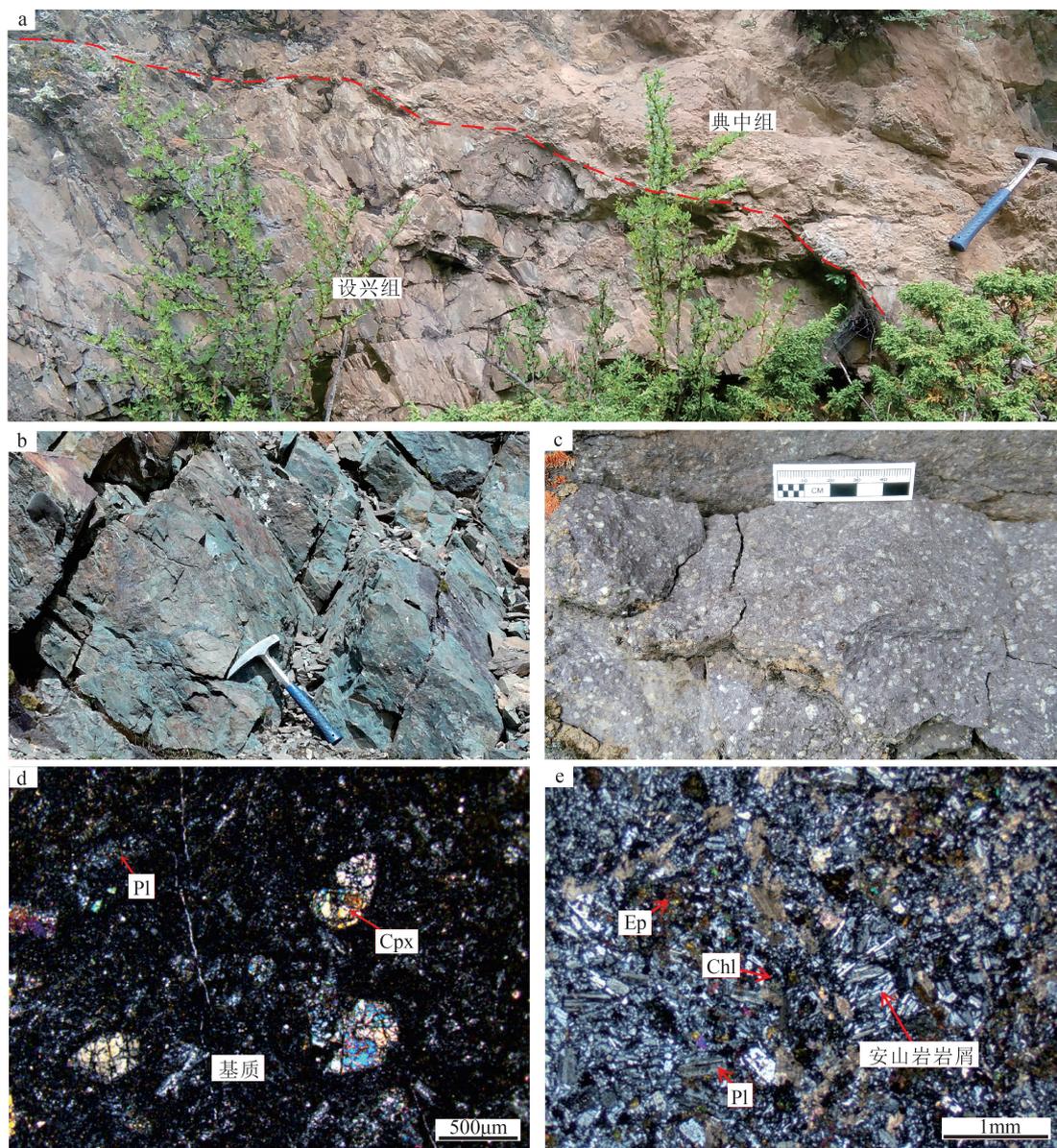


图3 日多地区典中组火山岩野外露头(a~c)及镜下照片(d,e)

Fig. 3 Outcrop(a~c) and microscopic(d,e) photos of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

a—典中组(安山质凝灰岩)与下伏上白垩统设兴组(粉砂质泥岩)角度不整合接触;b—玄武岩;c—安山质晶屑凝灰岩;  
d—蚀变玄武岩,透射正交偏光;e—安山质晶屑凝灰岩,透射正交偏光。Pl—斜长石;Ep—绿帘石;Chl—绿泥石;Cpx—辉石

在典中组中共采集7件火山岩样品。其中,对2件基性火山岩和5件中酸性火山岩进行了主量、微量元素测试;对其中1件基性火山岩(玄武岩)和1件中性火山岩(安山质晶屑凝灰岩)样品进行了LA-ICP-MS锆石U-Pb测年。

### 2.1 全岩化学分析

全岩主量、微量和稀土元素分析测试在核工业二〇三研究所分析测试中心完成,测试结果见表1。

主量元素分析采用XRF法,在荷兰帕纳科制造的Ax-iosX射线光谱仪上测定,分析误差小于5%。经烧失量校正后,计算主要岩石地球化学参数。微量和稀土元素采用ICP-MS法,在ThermoFisherScientific制造的XSERIES II型电感耦合等离子体发射光谱仪上测定,分析误差一般小于5%。分别对稀土和微量元素数据采用球粒陨石、原始地幔数据<sup>[27-28]</sup>进行标准化处理。

## 2.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年

分别对 1 件玄武岩(D0758/1)和 1 件安山质晶屑凝灰岩样品(D2851/1)进行锆石 U-Pb 年代学分析。锆石挑选由西安瑞石地质科技公司完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素年龄分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。将挑选出的锆石放置于环氧树脂中进行打磨,待锆石中心面露出后抛光,之后对处理好的样品进行反射光及阴极发光(CL)照相。阴极发光照相采用美国 Gatan 公司的 MonoCL3+X 型阴极荧光探头获得。锆石测试点的选择通过反射光照片和阴极发光照相反复对比,避开内部裂隙和包体,以期获得较准确的年龄数据。锆石 U-Pb 同位素分析在四极杆 ICP-MSElan6100DRC 上进行测定。激光剥蚀系统是德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M。激光束斑直径为 30  $\mu\text{m}$ ,激光脉冲 10 Hz,能量 32~36 mJ。同位素组成采用澳大利亚锆石标样 GEMOC GJ-1 为内标进行校正,采用锆石标样 Plesovice 为外部标样进行监控,并采用 Glitter 和 Isoplot 进行数据处理和作图。在进行年龄数据分析时,结合 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 计算锆石各测点数据的谐和性,剔除谐和度小于 90% 的测点数据。

## 2.3 锆石 Lu-Hf 同位素

锆石 Lu-Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。采用配备 193 nm 激光的 Neptune 多接收电感耦合等离子体质谱仪分析,分析过程中采用 8 Hz 的激光频率、100 mJ 的激光强度和 50  $\mu\text{m}$  的激光束斑直径,以氦作为剥蚀物质的

载气,采用标准锆石 91500 为外部标样。Hf 同位素测定时采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02669$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb}=0.5886$ 进行同量异位干扰校正,测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值。实验过程及数据处理方法见参考文献[29]。

## 3 分析结果

### 3.1 岩石地球化学特征

#### 3.1.1 主量元素

典中组火山岩主量元素测试结果见表 1。基性火山岩样品测试结果表明, $\text{SiO}_2$  含量为 48.67%~49.34% (平均 49.01%), $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 15.25%~18.59% (平均 16.92%), $\text{MgO}$  含量为 3.76%~8.69% (平均 6.23%), $\text{TiO}_2$  含量为 0.76%~1.07% (平均 0.92%), $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.65%~2.14% (平均 1.40%),总碱量 ALK 为 3.07%~4.60%, $\text{Mg}^\#$  值为 49~67,具有低  $\text{SiO}_2$ 、高  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、富  $\text{MgO}$  的特征;中酸性火山岩样品  $\text{SiO}_2$  含量为 54.92%~64.16% (平均 60.21%), $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量为 15.85%~16.72% (平均 16.25%), $\text{MgO}$  含量为 1.34%~3.67% (平均 2.24%), $\text{TiO}_2$  含量为 0.70%~1.18% (平均 0.85%), $\text{K}_2\text{O}$  含量为 0.30%~2.92% (平均 2.13%),总碱量 ALK 为 2.97%~6.48%, $\text{Mg}^\#$  值介于 38~47 之间,表现为高  $\text{SiO}_2$ 、富  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、低  $\text{MgO}$  的特征。

在 TAS 图解(图 4-a)中,基性岩和中酸性岩样品分别落入玄武岩、玄武安山岩、安山岩和英安岩区,且所有样品点均位于亚碱性系列。里特曼指数( $\sigma$ )为 0.7~2.7(均小于 3.3),属钙碱性系列。在 AFM

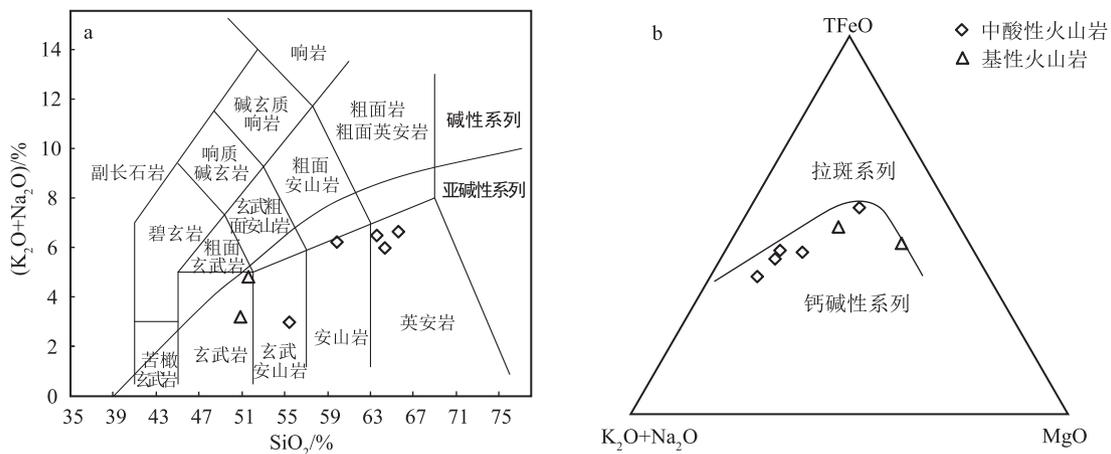


图 4 日多地区典中组火山岩 TAS 分类图解(a)和 FAM 图解(b)

Fig. 4 TAS(a) and FAM(b) diagrams of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

表1 日多地区典中组火山岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace and rare earth element composition of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

样品编号	D0758/1	D2844/2	D1016/1	D3040/1	D4998/3	D4998/5	D4998/9
岩石分类	基性火山岩		中酸性火山岩				
岩石名称	玄武岩		玄武安山岩	安山质晶屑凝灰岩			英安岩
SiO <sub>2</sub>	49.34	48.67	54.92	58.34	61.28	64.16	62.37
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18.59	15.25	16.62	16.72	16.05	16.01	15.85
TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.14	9.98	10.44	7.45	6.13	4.95	6.31
MgO	3.76	8.69	3.67	2.82	1.70	1.34	1.66
CaO	9.44	9.30	9.36	5.23	4.04	4.11	4.40
Na <sub>2</sub> O	2.46	2.42	2.67	4.07	3.42	3.56	3.28
K <sub>2</sub> O	2.14	0.65	0.30	2.08	2.82	2.92	2.51
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.27	0.12	0.22	0.24	0.24	0.22	0.25
MnO	0.21	0.19	0.19	0.13	0.12	0.10	0.11
TiO <sub>2</sub>	0.76	1.07	1.18	0.88	0.75	0.70	0.74
烧失量	4.00	4.21	0.32	1.92	3.30	1.91	2.36
总计	100.11	100.55	99.89	99.88	99.85	99.98	99.84
Mg <sup>#</sup>	49	67	45	47	39	37	38
里特曼指数(σ)	2.7	1.3	0.7	2.4	2	1.9	1.7
Sr	795	299	426	507	488	445	527
Zr	105	73.3	148	277	185	226	156
Ba	516	229	139	413	505	471	541
Rb	43.0	13.4	10.0	59.0	73.2	89.3	60.6
Th	6.90	1.30	6.43	7.24	5.52	9.25	7.57
U	1.45	0.68	1.13	1.5	1.45	2.51	1.43
Nb	7.31	2.40	13.45	6.27	7.01	9.67	7.12
Hf	1.86	2.02	2.95	5.29	3.91	4.91	4.13
Ta	0.72	0.38	0.80	0.50	0.66	0.70	0.52
Y	20.1	26.5	28.2	23.8	24.8	28.8	22.1
La	20.3	6.6	20.7	26.3	24.9	26.7	22.8
Ce	41.6	15.4	42.1	53.8	57.6	60.2	47.7
Pr	4.61	2.20	4.58	6.27	6.07	6.65	5.39
Nd	18.8	11.0	19.2	24.3	24.1	26.4	21.4
Sm	4.10	3.64	4.25	4.75	4.92	5.48	4.47
Eu	1.45	1.55	1.24	1.45	1.43	1.38	1.18
Gd	3.61	3.31	4.50	4.85	4.93	5.53	4.41
Tb	0.56	0.70	0.72	0.72	0.74	0.85	0.66
Dy	2.96	4.03	4.35	4.19	4.40	4.99	3.89
Ho	0.67	0.96	0.88	0.87	0.91	1.06	0.82
Er	1.74	2.17	2.69	2.62	2.71	3.14	2.42
Tm	0.25	0.42	0.37	0.39	0.39	0.46	0.36
Yb	1.58	2.21	2.49	2.51	2.65	3.00	2.38
Lu	0.24	0.30	0.38	0.43	0.43	0.48	0.37
ΣREE	102	55	108	133	136	146	118
ΣLREE/ΣHREE	7.83	2.87	5.62	7.05	6.93	6.50	6.72
(La/Yb) <sub>N</sub>	9.22	2.16	5.96	7.52	6.73	6.38	6.87
δEu	1.15	1.37	0.87	0.92	0.89	0.77	0.81

注: Mg<sup>#</sup> = 100 × Mg<sup>2+</sup> / (Mg<sup>2+</sup> + Fe<sup>2+</sup>); 里特曼指数(σ) = [ω(K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O)]<sup>2</sup> / [ω(SiO<sub>2</sub> - 43)], 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10<sup>-6</sup>

图解(图 4-b)中,所有样品点落入钙碱性系列区。 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图解显示(图 5),大多数样品为高钾钙碱性系列,总体显示钙碱性-高钾钙碱性岩石特征。

### 3.1.2 稀土和微量元素

稀土元素分析结果显示,2 件基性火山岩的稀土元素总量  $\Sigma\text{REE}$  为  $54.53 \times 10^{-6} \sim 102.47 \times 10^{-6}$ ,轻、重稀土元素比值  $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$  为 2.87~7.83,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 2.16~9.22(平均 5.69),具有正 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=1.15 \sim 1.37$ );5 件中酸性火山岩的稀土元素总量高于基性火山岩,含量为  $108.37 \times 10^{-6} \sim 146.31 \times 10^{-6}$ ,轻、重稀土元素比值为 5.62~7.05,  $(\text{La}/\text{Yb})_N$  值为 5.96~7.52(平均 6.69),具弱的负 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=0.77 \sim 0.92$ )。所有样品的球粒陨石标准化稀土元素配分模式图均呈现出右倾、轻稀土元素富集型曲线(图 6-a)。

在原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 6-b)上,基性火山岩表现为 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素相对富集,Nb、Ta、Ti 等高场强元素相对亏损;中酸性火山岩表现与基性火山岩相似,但在微量元素含量及富集程度上存在明显差异,中酸性火山岩大离子亲石元素含量较基性火山岩高,其富集程度也明显高于基性火山岩,而中酸性火山岩高场强元素 Nb、Ta 等元素亏损程度较基性火山岩低。

### 3.2 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄

典中组玄武岩(D0758/1)和安山质晶屑凝灰岩样品(D2851/1)的锆石颗粒均呈浅黄色-无色透明,多呈自形长柱状,部分呈短柱状,长宽比为 1:1~2:1,粒径在 50~100  $\mu\text{m}$  之间,阴极发光图像显示

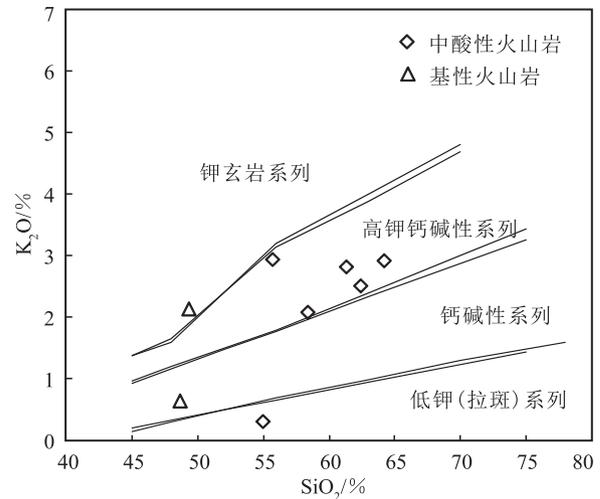


图 5 日多地区典中组火山岩  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  图解  
Fig. 5  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  diagram of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

明显的岩浆型锆石振荡环带结构(图 7)。锆石的 Th/U 值较高,介于 0.67~2.16 之间(平均 1.23)(表 2),总体显示岩浆成因锆石的特点<sup>[30]</sup>。

锆石 U-Pb 同位素测年结果显示,1 件玄武岩样品(D0758/1)校正后有效测点为 15 个, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于 55.0~61.9 Ma 之间,对应的加权平均值为  $57.9 \pm 1.2$  Ma;1 件安山质晶屑凝灰岩样品(D2851/1)校正后有效测点为 18 个, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄值介于 53.0~62.1 Ma 之间,加权平均值为  $57.4 \pm 1.2$  Ma。2 件样品锆石 U-Pb 定年结果在误差范围内一致,推测日多地区典中组火山岩形成时代为古新世。

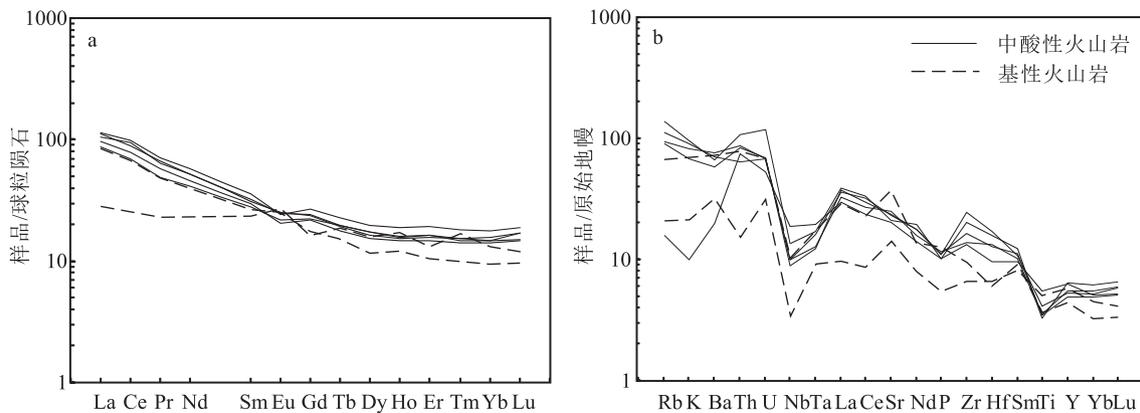


图 6 日多地区典中组火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)  
Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle normalized spider diagram(b) of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

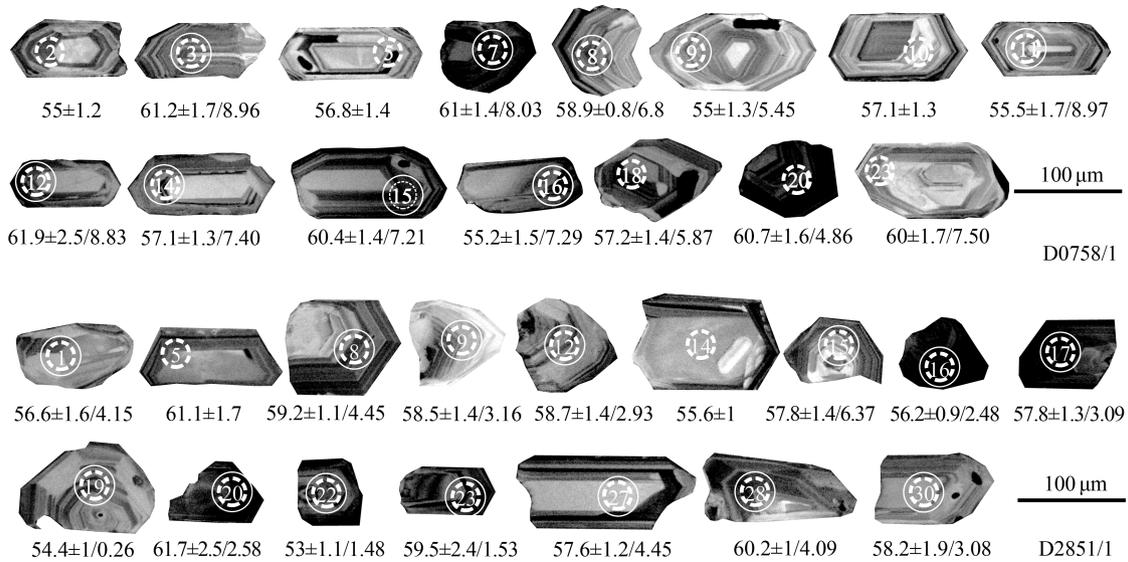


图7 日多地区典中组火山岩锆石阴极发光(CL)图像及测点位置示意图  
(虚线圆圈表示 U-Pb 测点,实线圆圈表示 Lu-Hf 测点,数字代表测点号及年龄(Ma)/ $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ;  
D0758/1-玄武岩,D2851/1-安山质晶屑凝灰岩)

Fig. 7 CL images and analyzing locations of zircons from the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

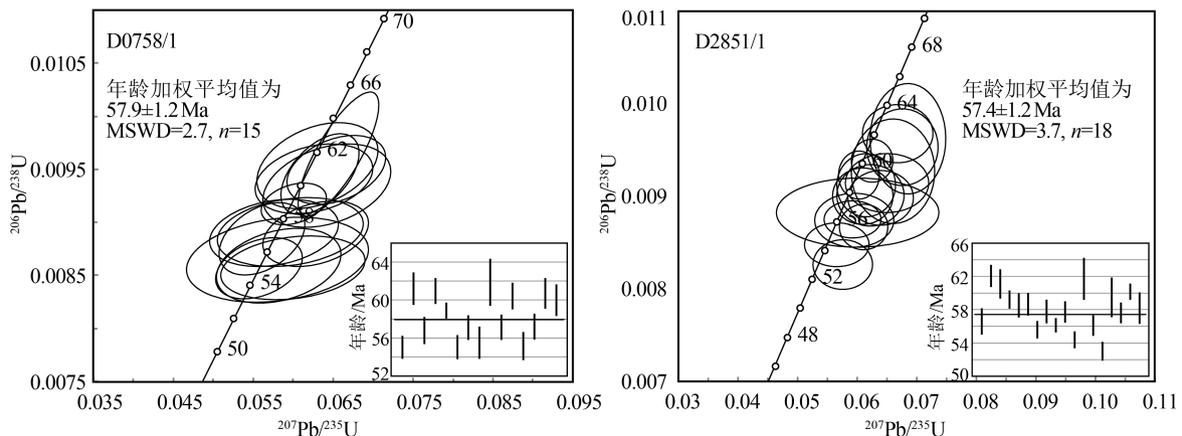


图8 日多地区典中组火山岩锆石 U-Pb 谐和图及 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值图  
Fig. 8 Zircon U-Pb concordia diagram and  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age weighted average value diagram  
of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

### 3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

在 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年的基础上,对玄武岩(D0758/1)和安山质晶屑凝灰岩(D2851/1)分别进行了锆石原位 Lu-Hf 同位素分析。测试及相关计算结果见表 3,所有测点均选取与锆石 U-Pb 年代学测试点相同部位(图 7)。所测锆石 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.001389~0.004568,表明放射性成因的 Hf 积累较少,可用于火山岩的成因研究<sup>[31-32]</sup>。玄武岩样品(D0758/1)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.282879~

0.282996 之间,平均值为 0.282947, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 4.86~8.97,平均值为 7.26;安山质晶屑凝灰岩样品(D2851/1)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.282752~0.282923 之间,平均值为 0.282827, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为 0.26~6.37,平均值为 2.99。

## 4 讨论

### 4.1 成岩时代

日多地区位于林周盆地以东约 120 km。本次

表 2 日多地区典中组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果  
Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of zircons from the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

测点	含量/ $10^{-6}$				同位素比值										年龄值/Ma			
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$1\sigma$		
D0758/1 玄武岩																		
2	14.0	404	307	1.31	0.0471	0.0030	0.0558	0.0037	0.00857	0.00019	53.8	140.7	55.0	3.4	55.0	1.2		
3	7.11	181	114	1.59	0.0475	0.0034	0.0630	0.0050	0.00954	0.00028	72.3	162.9	62.1	4.8	61.2	1.7		
5	10.4	298	172	1.73	0.0463	0.0030	0.0560	0.0037	0.00885	0.00023	9.4	144.4	55.4	3.4	56.8	1.4		
7	11.5	306	183	1.67	0.0499	0.0029	0.0653	0.0041	0.00950	0.00021	190.8	134.2	64.3	3.9	61.0	1.4		
8	24.1	639	298	2.15	0.0475	0.0021	0.0600	0.0027	0.00918	0.00013	76.0	113.0	59.2	2.6	58.9	0.8		
9	5.77	151	105	1.44	0.0515	0.0051	0.0599	0.0060	0.00857	0.00020	261.2	229.6	59.1	5.7	55.0	1.3		
10	10.7	302	199	1.52	0.0521	0.0037	0.0628	0.0044	0.00890	0.00020	300.1	167.6	61.8	4.2	57.1	1.3		
11	14.2	374	173	2.16	0.0488	0.0061	0.0580	0.0075	0.00865	0.00026	139.0	270.3	57.2	7.2	55.5	1.7		
12	26.0	603	739	0.82	0.0494	0.0017	0.0656	0.0033	0.00964	0.00039	164.9	88.0	64.5	3.2	61.9	2.5		
14	6.76	197	98	2.01	0.0468	0.0043	0.0575	0.0053	0.00890	0.00021	39.0	216.6	56.8	5.1	57.1	1.3		
15	6.87	178	117	1.52	0.0477	0.0035	0.0626	0.0049	0.00942	0.00022	87.1	162.9	61.6	4.7	60.4	1.4		
16	6.55	186	127	1.47	0.0505	0.0049	0.0582	0.0051	0.00859	0.00023	216.7	211.1	57.4	4.9	55.2	1.5		
18	13.6	376	218	1.72	0.0479	0.0042	0.0596	0.0060	0.00891	0.00021	100.1	187.0	58.8	5.8	57.2	1.4		
20	14.8	372	229	1.62	0.0488	0.0022	0.0633	0.0032	0.00946	0.00025	139.0	105.5	62.3	3.1	60.7	1.6		
23	5.57	142	102	1.40	0.0499	0.0040	0.0642	0.0053	0.00935	0.00026	190.8	177.8	63.2	5.1	60.0	1.7		
D2851/1 安山质晶屑凝灰岩																		
1	13.6	87.9	75.7	1.16	0.0497	0.0072	0.0601	0.0090	0.00882	0.00025	189.0	298.1	59.3	8.6	56.6	1.6		
4	24.1	187	260	0.72	0.0496	0.0024	0.0669	0.0039	0.00967	0.00021	172.3	116.7	65.7	3.7	62.1	1.3		
5	37.0	307	417	0.74	0.0504	0.0020	0.0676	0.0039	0.00953	0.00027	216.7	88.9	66.4	3.7	61.1	1.7		
8	23.1	206	259	0.79	0.0478	0.0018	0.0604	0.0023	0.00923	0.00017	100.1	-112.0	59.5	2.2	59.2	1.1		
9	28.0	290	276	1.05	0.0491	0.0023	0.0616	0.0033	0.00912	0.00023	153.8	109.2	60.7	3.1	58.5	1.4		
12	8.46	79.1	89.0	0.89	0.0529	0.0037	0.0650	0.0046	0.00914	0.00021	327.8	156.5	64.0	4.4	58.7	1.4		
14	28.0	257	350	0.73	0.0512	0.0022	0.0611	0.0027	0.00866	0.00016	250.1	98.1	60.2	2.6	55.6	1.0		
15	32.5	295	322	0.92	0.0496	0.0024	0.0623	0.0037	0.00901	0.00022	189.0	114.8	61.3	3.6	57.8	1.4		
16	36.3	297	410	0.72	0.0492	0.0027	0.0593	0.0032	0.00875	0.00013	166.8	123.1	58.5	3.0	56.2	0.9		
17	67.9	613	767	0.80	0.0484	0.0019	0.0610	0.0033	0.00900	0.00020	120.5	88.0	60.1	3.2	57.8	1.3		
19	15.6	119	158	0.75	0.0482	0.0028	0.0567	0.0036	0.00848	0.00016	109.4	129.6	56.0	3.4	54.4	1.0		
20	52.4	525	533	0.99	0.0512	0.0019	0.0685	0.0042	0.00962	0.00039	250.1	89.8	67.3	4.0	61.7	2.5		
21	23.6	289	187	1.55	0.0494	0.0032	0.0595	0.0044	0.00874	0.00019	164.9	151.8	58.7	4.2	56.1	1.2		
22	21.5	163	244	0.67	0.0513	0.0031	0.0576	0.0033	0.00826	0.00018	253.8	138.9	56.9	3.2	53.0	1.1		
23	43.9	444	456	0.97	0.0520	0.0027	0.0660	0.0046	0.00927	0.00037	283.4	118.5	64.9	4.4	59.5	2.4		
27	19.6	159	236	0.68	0.0520	0.0030	0.0639	0.0036	0.00898	0.00019	283.4	131.5	62.9	3.5	57.6	1.2		
28	63.6	581	664	0.88	0.0480	0.0014	0.0626	0.0023	0.00938	0.00015	98.2	70.4	61.6	2.2	60.2	1.0		
30	24.7	278	204	1.37	0.0506	0.0032	0.0624	0.0044	0.00907	0.00030	220.4	141.6	61.5	4.2	58.2	1.9		

表3 日多地区典中组火山岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果  
Table 3 Lu-Hf isotopic data of zircons from the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area

测点编号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$t_{\text{DM1}}/\text{Ma}$	$t_{\text{DM2}}/\text{Ma}$
D0758/1 玄武岩											
3	61.2	0.078482	0.000488	0.003121	0.000009	0.282994	0.000030	7.74	8.96	392	558
7	61.0	0.068604	0.000780	0.002834	0.000025	0.282968	0.000028	6.81	8.03	429	618
8	58.9	0.085772	0.001875	0.003356	0.000059	0.282935	0.000026	5.64	6.80	485	695
9	55.0	0.048382	0.000772	0.002026	0.000030	0.282896	0.000026	4.31	5.45	522	778
11	55.5	0.062427	0.000684	0.002425	0.000024	0.282996	0.000023	7.84	8.97	381	553
12	61.9	0.117556	0.005751	0.004568	0.000219	0.282994	0.000022	7.66	8.83	413	567
14	57.1	0.052639	0.001068	0.002079	0.000037	0.282950	0.000020	6.23	7.40	444	655
15	60.4	0.078384	0.000460	0.003189	0.000016	0.282946	0.000028	6.02	7.21	467	669
16	55.2	0.062395	0.001212	0.002504	0.000052	0.282949	0.000029	6.17	7.29	451	661
18	57.2	0.058012	0.001090	0.002296	0.000038	0.282907	0.000027	4.70	5.87	510	753
20	60.7	0.073338	0.000904	0.002985	0.000033	0.282879	0.000027	3.65	4.86	564	820
23	60.0	0.044750	0.001483	0.001842	0.000057	0.282951	0.000028	6.26	7.50	440	651
D2851/2 安山质晶屑凝灰岩											
1	56.6	0.046272	0.001210	0.001941	0.000049	0.282858	0.000025	2.98	4.15	576	862
4	62.1	0.070582	0.001031	0.002887	0.000034	0.282824	0.000023	1.73	2.97	644	942
8	59.2	0.055712	0.000239	0.002192	0.000009	0.282866	0.000021	3.23	4.45	569	845
9	58.5	0.050771	0.000300	0.002027	0.000008	0.282830	0.000020	1.96	3.16	619	927
12	58.7	0.034924	0.000499	0.001389	0.000018	0.282822	0.000018	1.70	2.93	619	942
15	57.8	0.078208	0.000511	0.003208	0.000013	0.282923	0.000028	5.23	6.37	501	721
16	56.2	0.079574	0.000772	0.003205	0.000017	0.282814	0.000029	1.36	2.48	665	969
17	57.8	0.100605	0.001505	0.003989	0.000046	0.282832	0.000027	1.97	3.09	654	931
19	54.4	0.071036	0.000351	0.003005	0.000009	0.282752	0.000030	-0.83	0.26	754	1109
20	61.7	0.098993	0.000930	0.003906	0.000029	0.282816	0.000030	1.38	2.58	678	966
21	56.1	0.083099	0.002810	0.003230	0.000113	0.282764	0.000028	-0.39	0.72	740	1080
22	53.0	0.069312	0.001323	0.002846	0.000049	0.282787	0.000029	0.42	1.48	698	1030
23	59.5	0.074525	0.000991	0.002934	0.000029	0.282785	0.000029	0.35	1.53	703	1031
27	57.6	0.075913	0.001345	0.002986	0.000047	0.282868	0.000027	3.30	4.45	579	844
28	60.2	0.097575	0.001446	0.003906	0.000039	0.282859	0.000027	2.92	4.09	611	869
30	58.2	0.062287	0.000458	0.002584	0.000013	0.282829	0.000027	1.90	3.08	631	932

注： $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10,000 \times [ \frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} \times (e^{\lambda t} - 1)}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR},0} - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}} - 1 ]$ ， $t_{\text{DM1}} = (1/\lambda) \times \ln [ 1 + \frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}} ]$ ， $t_{\text{DM2}} = (1/\lambda) \times \ln [ 1 + \frac{(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_s - (^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}}{(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM},t}} ]$ 。 ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>CHUR,0</sub> = 0.0332, ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>DM} = 0.28325, ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>DM} = 0.0384, ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>c} = 0.015,  $\lambda = 1.867 \times 10^{-11}/\text{a}$ ,  $t$  为锆石结晶年龄</sub></sub></sub>

研究显示,冈底斯东段日多地区典中组火山岩以基性-中酸性火山碎屑岩为主,具有与邻区林周盆地典中组相似的岩石组合<sup>[14]</sup>,研究区可见典中组底部与设兴组呈角度不整合接触。本次采集的典中组玄武岩和安山质晶屑凝灰岩样品锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄加权平均值分别为 57.9±1.2 Ma、57.4±1.2 Ma,与前人获得的林周盆地典中组形成时代(64.43~59 Ma)上限接近,表明日多地区典中组火山岩形成于古新世。

冈底斯带林子宗群典中组火山岩大量年代学研究结果表明(表 4),典中组火山岩形成时代由冈底斯带东段向西段存在明显差异,东段、中段、西段的年龄分别为 60.6~70.9 Ma、64.8~83.4 Ma 和 61.9~82.2 Ma。其中,最老年龄出现在冈底斯西段的石巴罗和中段的申扎地区,最年轻年龄出现在冈底斯东段的林周盆地。印度与欧亚大陆板块碰撞具有穿时性,其碰撞可能开始于西段和中段,东段最后才发生碰撞。莫宣学等<sup>[8,33]</sup>认为,林子宗群火山岩不整合覆盖于中生代褶皱构造层之上,是印度-欧亚陆块初始碰撞的证据和标志。本次获得的

典中组年龄,可能代表了冈底斯东段印度-欧亚陆块的碰撞时间。

#### 4.2 岩石成因

本次测得典中组玄武岩样品  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值介于 4.86~8.97 之间,在  $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  图解中,所有测点均落在球粒陨石和亏损地幔演化线之间(图 9-a),显示幔源属性特征。典中组玄武岩一阶段 Hf 模式年龄大于成岩年龄,表明岩浆源区受到地壳物质混染或来自富集地幔<sup>[32]</sup>。在 La/Yb-Th/Ta 图解(图 9-b)中,典中组基性火山岩偏离原始地幔而靠近富集地幔端元,岩石 Nb/U 值(平均值 4.29)和 Ta/U 值(平均值 0.53)偏低,都指示岩浆来源于遭受俯冲板片流体交代改造的地幔源区<sup>[42-43]</sup>。同时,典中组玄武岩具有大离子亲石元素(Rb、Ba、Sr)相对富集、高场强元素(Nb、Ta、Ti)相对亏损的地球化学特征,与典型弧玄武岩相似,指示岩浆源区存在俯冲流体的交代作用<sup>[44]</sup>。通常,幔源岩浆在上升及侵位过程中会受到不同程度地壳物质混染<sup>[45]</sup>。Th/Ta 值可以有效指示基性岩在形成过程中是否存在混染的地壳物质。典中组玄武岩 Th/Ta 值(3.42~9.58)介

表 4 冈底斯带典中组火山岩形成时代

Table 4 Formation age of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Gangdise belt

位 置	采样地点	岩 性	年龄/Ma	测试方法	数据来源
冈底斯东段	南木林	英安岩、安山岩	60.6~64.4	Ar-Ar	[34]
	林周盆地	安山岩	65~57	Ar-Ar	[35]
	林周盆地	安山岩	60.6~64.4	Ar-Ar	[14]
	林周盆地	流纹岩	62.6~68.7	U-Pb	[36]
	林周盆地	辉石安山岩	62~64	U-Pb	[22]
	林周盆地	辉石安山岩	66.0	U-Pb	[21]
	林周盆地	黑云母安山岩	65.8	U-Pb	[21]
	新嘎果地区	流纹质晶屑凝灰岩	70.9	U-Pb	[37]
冈底斯中段	日多地区	安山质晶屑凝灰岩、玄武岩	57.4~57.9	U-Pb	本文
	朱诺地区	流纹质晶屑凝灰岩	64.8	U-Pb	[38]
	措麦地区	凝灰岩	65~70	U-Pb	[39]
	桑桑地区	凝灰岩	69.9	U-Pb	[18]
	申扎地区		78.5~83.4	K-Ar	②
冈底斯西段	查孜地区	流纹质晶屑凝灰岩	70.7	U-Pb	[40]
	狮泉河	流纹岩	64.5	U-Pb	[41]
	石巴罗地区	英安岩、火山角砾岩	77.1~79.2	U-Pb	③
	塔若错和仁多地区	英安岩和流纹岩	63.9~82.2	K-Ar	④

于原始地幔(2.3)和大陆地壳(10)之间,且样品的 $Mg^{\#}$ 值(49~67)略低于原生玄武岩变化范围( $Mg^{\#}=68\sim75$ )<sup>[46]</sup>,说明玄武质岩浆在上升或侵位过程中还可能受到一定程度的地壳物质混染。

中性火山岩的形成一般有2种模式:一是基性岩浆的结晶分异作用<sup>[47]</sup>;二是来自幔源基性岩浆的热量使下地壳物质脱水发生重熔的产物<sup>[48-49]</sup>。安山质晶屑凝灰岩相对富集Rb、Sr等大离子亲石元素,明显亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素,表明源区来自地壳物质。由 $t-\varepsilon_{Hf}(t)$ 图解(图9-a)可见,安山质晶屑凝灰岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为0.26~6.37,接近并位于球粒陨石演化线之上,暗示岩浆在演化过程中有新端元组分的加入<sup>[32]</sup>,其源区可能与新生地壳部分熔融有关。另外,在La-La/Sm图解(图9-c)中,所有样品显示出部分熔融的特点。(Th/Nb)<sub>N</sub>-Nb/La图解(图9-d)进一步表明,中性火山岩也经历了地壳混染作用。

此外,根据前人大量的Hf同位素数据,南部拉

萨地体以新生地壳为主,中部拉萨地体存在古老结晶基底<sup>[50-51]</sup>。研究区典中组火山岩主要分布于南部拉萨地体,结合研究区岩石地球化学及Hf同位素特征,指示日多地区典中组中酸性火山岩可能为热的基性岩浆底侵到新生地壳使地壳岩石发生部分熔融而成,而基性火山岩可能起源于遭受板块俯冲流体交代的地幔源区,两者在上升过程中均受到不同程度地壳物质的混染。

#### 4.3 构造环境

岩石地球化学特征表明,典中组火山岩在地球化学上属于钙碱性-高钾钙碱性岩石,球粒陨石标准化稀土元素配分模式图呈向右缓倾的轻稀土元素富集型曲线,相对富集Rb、Ba、Sr等大离子亲石元素,而相对亏损Nb、Ta、Ti等高场强元素,且基性火山岩TiO<sub>2</sub>含量(平均0.92%)与岛弧玄武岩接近(0.98%),总体显示出俯冲背景下弧火山岩的地球化学特征,与区域上典中组火山岩地球化学特征一致<sup>[7]</sup>。在(Y+Nb)-Rb图解(图10-a)中,所有样品

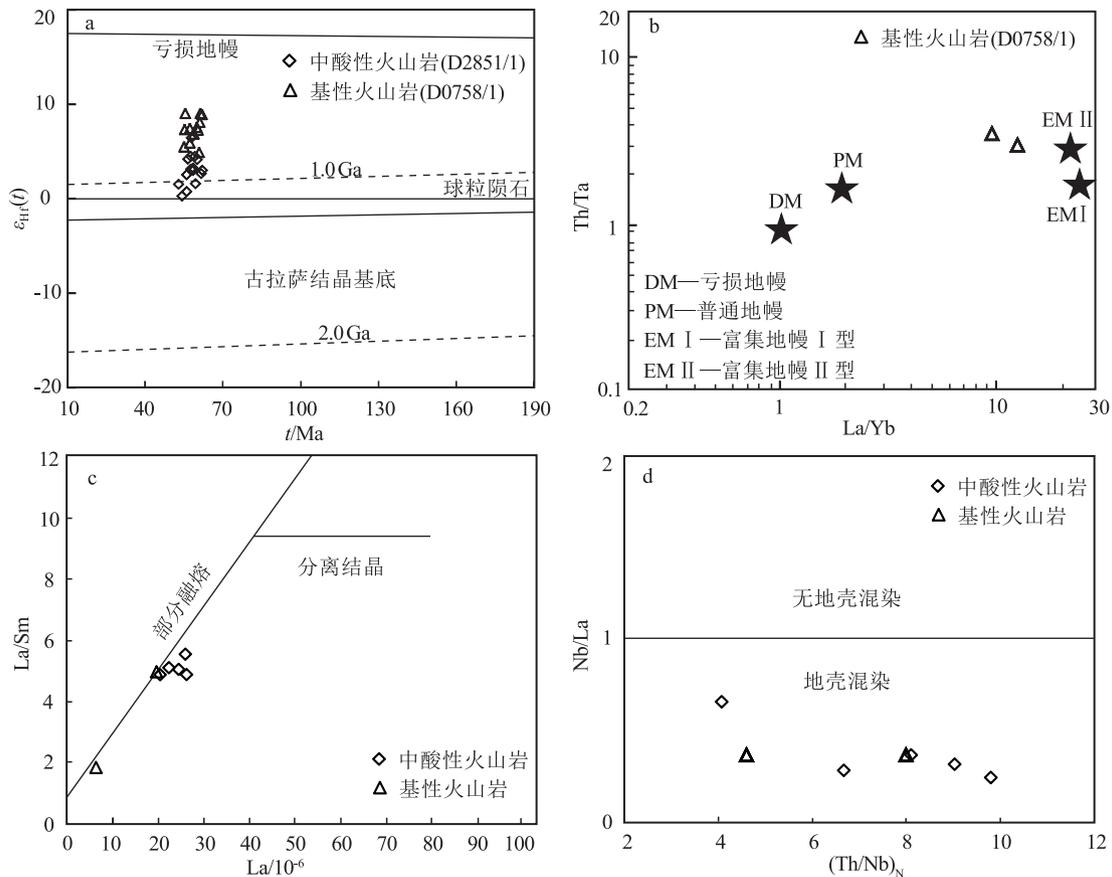


图9 日多地区典中组火山岩成因图解

Fig. 9 Petrogenesis diagrams of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area  
a—锆石  $t-\varepsilon_{Hf}(t)$  图解;b—La/Yb-Th/Ta 图解;c—La-La/Sm 图解;d—(Th/Nb)<sub>N</sub>-Nb/La 图解

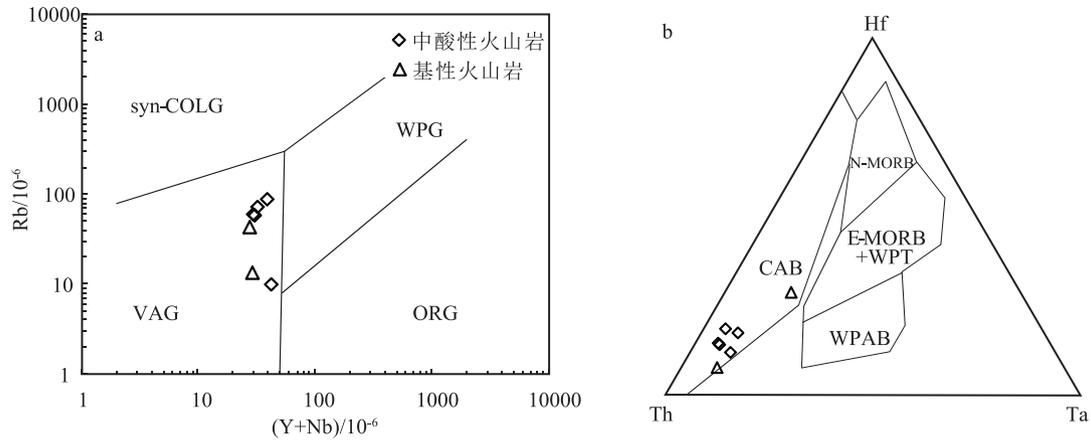


图 10 日多地区典中组火山岩 (Y+Nb)-Rb 图解 (a) 和 Hf-Th-Ta 图解 (b)

Fig. 10 (Y+Nb)-Rb(a) and Hf-Th-Ta(b) diagrams of the Dianzhong Formation volcanic rocks in the Riduo area  
 WPG—板内花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; syn-COLG—同碰撞花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; N-MORB—正常大洋中脊玄武岩;  
 E-MORB—富集型大洋中脊玄武岩; WPT—板内拉斑玄武岩; WPAB—板内碱性玄武岩; CAB—钙碱性弧火山岩

点均投入弧火山岩区;在 Rb/30-Hf-3Ta 图解 (图 10-b) 中,样品点亦投入钙碱性弧火山岩区。结合上述岩石的源区属性、岩石地球化学特征及构造环境判别图解,典中组火山岩为形成于俯冲消减构造背景下的弧火山岩,与俯冲板片脱水产生的流体交代地幔楔有关。

典中组火山岩中 Ba 和 Sr 含量明显偏低,且具有并不明显的负异常,与典型的岛弧或陆缘弧环境的钙碱性火山岩明显不同。Mo 等<sup>[5]</sup>认为,洋壳蚀变作用加上成熟的地壳物质(如再生陆源沉积物)的参与,使熔体中 Ba、Rb、Th、U、K、Pb 的丰度增加,显示弧火山岩地球化学特征。同时也指示具有岛弧岩石地球化学特征的典中组火山岩的形成是俯冲洋壳陆-陆碰撞诱发的滞后的弧岩浆作用的效应<sup>[8, 33]</sup>。

印度-欧亚大陆碰撞经历了新特提斯洋俯冲消减-同碰撞过程。然而,基于对岩相古地理、古生物、古地磁学、区域岩石学的不同证据,印度-欧亚陆块碰撞的初始时间还存在较大争议,如莫宣学等<sup>[8]</sup>认为,印度-欧亚陆块初始碰撞的时间在西藏不晚于 65 Ma,65~45 Ma 处于印度和欧亚大陆从开始接触到完全接触的同碰撞阶段<sup>[7-8, 52-53]</sup>;Chen 等<sup>[54]</sup>通过古地磁等资料,将印度和欧亚大陆初始碰撞的时间限定在 65~50 Ma 之间;也有学者认为,新特提斯洋完全消亡到印度-欧亚主碰撞的时间应不早于 56 Ma<sup>[55]</sup>。综合分析认为,日多地区典中组火山岩

形成于 57 Ma 左右,应处于印度-欧亚大陆碰撞对接的同碰撞阶段,即古新世印度大陆向北漂移与欧亚大陆由西向东碰撞对接,连接在印度大陆前端的残留新特提斯洋壳滞留在欧亚大陆之下,随着俯冲深度增加、压力增大,原来低角度消减的新特提斯大洋板片阻力加大,发生回转,导致地幔楔对流增强并诱使残留的新特提斯大洋板片俯冲流体交代上覆地幔楔而发生部分熔融,产生一定量的基性岩浆,部分底侵于南拉萨地块之下,使新生地壳发生部分熔融产生中酸性火山岩,两者在上升过程中可能受到不同程度地壳物质的混染。

## 5 结 论

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年获得日多地区典中组火山岩锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄加权平均值为  $57.4 \pm 1.2$  Ma、 $57.9 \pm 1.2$  Ma,表明日多地区典中组火山岩形成时代为古新世。

(2) 典中组火山岩为钙碱性-高钾钙碱性岩石,具有弧火山岩地球化学特征。稀土元素配分曲线表现为轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型,不同程度富集 Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素。

(3) 冈底斯东段的日多地区典中组火山岩形成于印度-欧亚大陆同碰撞阶段。基性火山岩主要为滞留的消减板片流体诱发上覆地幔楔发生部分熔融的产物,中酸性火山岩主要源于新生地壳的部分

熔融,上升过程中均受到不同程度地壳物质的混染。

**致谢:**感谢审稿专家对本文提出建设性的修改意见;感谢野外工作中成都地质调查中心李光明研究员、张林奎高级工程师、西藏地勘局胡敬仁高级工程师的大力支持;感谢参与本文野外取样及数据处理的所有专家、同志。

## 参考文献

- [1] Lee H Y, Chung S L, Ji J, et al. Geochemical and Sr-Nd isotopic constraints on the genesis of the Cenozoic Linzizong volcanic successions, southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53(2): 96-114.
- [2] 黄映聪,杨德明,郑常青,等.西藏林周县扎雪地区林子宗群帕那组火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2005, 35(5): 576-580.
- [3] Lee H Y, Chung S L, Lo C H, et al. Eocene Neotethyan slab breakoff in southern Tibet inferred from the Linzizong volcanic record[J]. *Tectonophysics*, 2009, 477(1): 20-35.
- [4] Mo X X, Hou Z Q, Niu Y L, et al. Antle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet[J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 225-242.
- [5] Mo X X, Niu Y L, Dong G C, et al. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: a case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 2008, 250(1): 49-67.
- [6] Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al. The Lhasa Terrane: record of a microcontinent and its histories of drift and growth [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 301(1): 241-255.
- [7] 莫宣学,赵志丹,邓晋福.印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. *地学前缘*, 2003, 10(3): 135-148.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 侯增谦,杨竹森,徐文艺,等.青藏高原碰撞造山带: I. 主碰撞造山成矿作用[J]. *矿床地质*, 2006, 25(4): 337-358.
- [11] 张博川,范建军,罗安波,等.拉萨地块东部米拉山地区中新世地层的特征及构造意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(7): 2392-2407.
- [12] 于云鹏,解超明,王伟,等.青藏高原陆相火山岩区填图新进展——以松多地区新生代火山机构为例[J]. *地质通报*, 2018, 37(8): 129-135.
- [13] 刘安琳,朱弟成,王青,等.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*, 2015, 34(5): 826-833.
- [14] 周肃,莫宣学,董国臣,等.西藏林周盆地林子宗火山岩<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar 年代格架[J]. *科学通报*, 2004, 49(20): 2095-2103.
- [15] Ran M L, Kang Z Q, Xu J F, et al. Evolution of the northward subduction of the Neo-Tethys: Implications of geochemistry of Cretaceous arc volcanics in Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2019, 515: 83-94.
- [16] 董树文,武红岭,刘晓春,等.陆-陆点碰撞与超高压变质作用[J]. *地质学报*, 2002, 76(2): 163-172.
- [17] 韦天伟,杨锋,康志强,等.西藏拉萨地块东部尼木-加查地区林子宗群火山岩年代学,地球化学特征及其构造意义[J]. *现代地质*, 2019, 33(4): 715-726.
- [18] 谢冰晶,周肃,谢国刚,等.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*, 2013, 29(11): 3803-3814.
- [19] 张运昌,陈彦,杨青,等.西藏冈底斯带中部南木林地区林子宗群火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征 [J]. *地质通报*, 2019, 38(5): 719-732.
- [20] 周征宇,廖宗廷.印度板块向欧亚板块俯冲碰撞的新模式及其对青藏高原构造演化的影响 [J]. *沉积与特提斯地质*, 2005, 25(4): 826-833.
- [21] 陈贝贝,丁林,许强,等.西藏林周盆地林子宗群火山岩的精细年代框架[J]. *第四纪研究*, 2016, 36(5): 1037-1054.
- [22] Huang W T, Dupont-Nivet G, Lippert P C, et al. What was the Paleogene latitude of the Lhasa terrane? A reassessment of the geochronology and paleomagnetism of Linzizong volcanic rocks (Linzhou Basin, Tibet) [J]. *Tectonics*, 2015, 34: 594-622.
- [23] 王立全,潘桂棠,张万平,等.青藏高原及邻区大地构造图及说明书(1:1 500 000) [M]. 北京:地质出版社, 2013.
- [24] 董宇超,解超明,于云鹏,等.西藏工布江达县龙崖松多榴辉岩的发现及意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(8): 1464-1471.
- [25] 董宇超,解超明,范建军,等.西藏松多地区榴辉岩的原岩属性探讨及其地质意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(7): 2234-2248.
- [26] 解超明,李才,李光明,等.西藏松多古特提斯洋研究进展与存在问题[J]. *沉积与特提斯地质*, 2020, 40(2): 1-13.
- [27] Boynton W. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [J]. *Dev. Geochem.*, 1984, 2: 63-114.
- [28] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society of London Special Publication*, 1989, 42: 313-345.
- [29] Yuan H L, Gao S, Dai M N, et al. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS [J]. *Chemical Geology*, 2008, 247: 100-117.
- [30] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184(1): 123-138.
- [31] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, et al. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. *Lithos*, 2002, 61(3): 237-269.
- [32] 吴福元,李献华,郑永飞,等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用 [J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 185-220.
- [33] 莫宣学. 青藏高原岩浆成因研究: 成果与展望 [J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1694-1703.
- [34] 莫宣学,赵志丹, Depaolo D J, 等. 青藏高原拉萨地块碰撞-后碰撞岩浆作用的三种类型及其对大陆俯冲和成矿作用的启示: Sr-

- Nd 同位素证据[J].岩石学报,2006,22(4):795-803.
- [35] 董国臣.西藏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[D].中国地质大学(北京)博士学位论文,2002.
- [36] He S D, Kapp P, Decelles P G, et al. Cretaceous-Tertiary geology of the Gangdese Arc in the Linzhou area, southern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 2007, 433: 13-37.
- [37] 唐攀, 唐菊兴, 郑文宝, 等. 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[J]. *岩石矿物学杂志*, 2018, 37(1): 47-60.
- [38] 梁银平, 朱杰, 次邛, 等. 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)*, 2010, 35(2): 211-223.
- [39] 于枫, 李志国, 赵志丹, 等. 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*, 2010, 26(7): 2217-2225.
- [40] 李勇, 张士贞, 李奋其, 等. 拉萨地块中段查孜地区典中组火山岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(8): 2755-2766.
- [41] 王乔林. 冈底斯西部林子宗群火山岩的地球化学特征及锆石年代学研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2011.
- [42] Ayers J. Trace element modeling of aqueous fluid-peridotite interaction in the mantle wedge of subduction zones[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1998, 132(4): 390-404.
- [43] Regelous M, Collerson K, Ewart A, et al. Trace element transport rates in subduction zones: Evidence from Th, Sr and Pb isotope data for Tonga-Kermadec arc lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 150: 291-302.
- [44] 徐义刚, 王强, 唐功建, 等. 弧玄武岩的成因: 进展与问题[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(12): 1818-1844.
- [45] Mohr P A. Crustal Contamination in mafic Sheets: A summary[C]// Halls H C, Fahrig W F. *Mafic Dyke Swarms*, Special Publication - Geological Association of Canada, 1987: 75-80.
- [46] Wilson M. *Igneous petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1989.
- [47] Bacon C R, Druitt T H. Compositional evolution of the zoned calcalkaline magma chamber of Mount Mazama, Crater Lake, Oregon[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1988, 98: 224-256.
- [48] Guffanti M, Clyne M, Muffler L, et al. Thermal and mass implications of magmatic evolution in the Lassen volcanic region, California, and constraints on basalt influx to the lower crust [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101: 3003-3013.
- [49] Roberts M P, Clemens J D. Origin of high-potassium, calc-alkaline, I-type granitoids[J]. *Geology*, 1993, 21: 825.
- [50] 张立雪, 王青, 朱弟成, 等. 拉萨地体锆石 Hf 同位素填图: 对地壳性质和成矿潜力的约束[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 3681-3688.
- [51] 朱弟成, 赵志丹, 牛耀龄, 等. 拉萨地体的起源和古生代构造演化[J]. *高校地质学报*, 2012, 18(1): 1-15.
- [52] Ding L, Kapp P, Wan X Q, et al. Paleocene-Eocene record of ophiolite obduction and initial India-Asia collision, south central Tibet[J]. *Tectonics*, 2005, 24(3): TC3001.
- [53] Yin A, Harrison T M. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, 28(1): 211-280.
- [54] Chen J S, Huang B C, Sun L S, et al. New constraints to the onset of the India-Asia collision: paleomagnetic reconnaissance on the Linzizong Group in the Lhasa Block, China[J]. *Tectonophysics*, 2010, 489: 189-209.
- [55] 李皓扬, 钟孙霖, 王彦斌, 等. 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*, 2007, 23(2): 493-500.
- ①周斌, 韩奎, 潘亮, 等. 西藏日多地区 1:5 万区域地质调查成果报告. 陕西省地质调查中心, 2019.
- ②吉林大学地质调查院. 中华人民共和国 1:25 万申扎幅区域地质调查报告. 吉林大学档案馆, 2002.
- ③四川省地质调查院. 中华人民共和国 1:25 万措勤县幅区域地质调查报告. 成都理工大学档案馆, 2002.
- ④成都理工大学地质调查院. 中华人民共和国 1:5 万措勤县南嘎仁错东部地区区域地质矿产调查报告. 成都理工大学档案馆, 2010.