

New Discovery and Tectonic Significance of Paleogene Volcanic Rocks in Nulei Area, Ritu County, Tibet

Yebin Xiao¹, Guoqing Ling², Yuan Gao¹

¹Geological Survey of Jiangxi Province, Nanchang Jiangxi

²The North-East Party of Jiangxi Geo-Mineral Bureau, Shangrao Jiangxi

Email: 476282919@qq.com

Received: Oct. 9th, 2019; accepted: Oct. 24th, 2019; published: Oct. 31st, 2019

Abstract

The volcanic rocks in Nulei area of Ritu County belong to coarse andesite, subaluminous or meta-aluminous volcanic rocks and high potassium calc-alkaline series. Rare earth partition shows that it belongs to light rare earth enrichment type with flat heavy rare earth, $\delta\text{Ce} = 0.89$, $\delta\text{Eu}_N = 0.90 - 0.92$. It is characterized by weak negative Europium anomaly and its distribution curve is right-leaning. The volcanic rocks erupt mainly in the form of fissure-centered facies, and the volcanic rocks erupt mainly in andesite magma. The LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the trachyandesite is $34.7 \pm 0.5\text{Ma}$, which belongs to the Paleogene Eocene. According to the geochemical characteristics of the rocks, the original magma of the volcanic rocks originated from the special crust-mantle transition zone beneath the thickened continental crust and above the lithospheric mantle of the Qinghai-Tibet Plateau. The formation environment of the rocks is the initial intraplate rift environment, which possesses both the lithogeochemical properties of the orogenic belt on the plate margin and is the continental land in the convergence and uplift evolution stage of the product of the genetic mechanism of internal subduction.

Keywords

Tectonic Significance, Paleogene Volcanic Rocks, Nulei Area, Ritu County, Tibet

西藏日土县奴雷地区古近纪火山岩新发现及构造意义

肖业斌¹, 凌国卿², 高原¹

¹江西省地质调查研究院, 江西 南昌

²江西省地质矿产开发局赣东北大队, 江西 上饶
Email: 476282919@qq.com

收稿日期: 2019年10月9日; 录用日期: 2019年10月24日; 发布日期: 2019年10月31日

摘要

日土县奴雷地区火山岩岩石类型为粗安岩, 属于次铝的或偏铝的火山岩, 高钾钙碱性系列。稀土配分显示属轻稀土富集型, 重稀土平坦, $\delta\text{Ce} = 0.89$, $\delta\text{Eu}_N = 0.90 \sim 0.92$, 以弱负异常为特征, 分配曲线为右倾型。火山岩喷发方式为裂隙中心式, 以喷溢相为主, 喷发的火山岩成分以安山质岩浆为主, 获得粗安岩LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄为 $34.7 \pm 0.5 \text{ Ma}$, 形成时代属古近纪始新世。从岩石地球化学特征来看, 火山岩原始岩浆来源于青藏高原加厚陆壳之下与岩石圈地幔之上的特殊壳幔过渡带, 岩石形成环境为板内初始裂谷环境, 兼具了板块边缘造山带的岩石地球化学性质, 是青藏高原汇聚隆升演化阶段陆内俯冲成因机制的产物。

关键词

构造意义, 古近纪火山岩, 奴雷地区, 西藏日土县

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

青藏高原新生代火山岩作为印度板块与欧亚板块碰撞后青藏高原形成及演化的重要记录, 为揭示高原岩石圈构造与演化及高原隆升机制等提供了重要的信息, 因此, 其时空分布及成因机制等也一直是人们关注的热点。前人对羌塘地块新生代火山岩进行了较为详细的研究, 为青藏高原演化及其深部过程提供了诸多有益的信息和论断[1]-[6]。近年来不同的学者在改则县纳丁错(汤晶等, 2011) [7]、尼玛县荣玛乡(冉皞, 2014) [8]、雀康(储慧力, 2016) [9]等地新生代火山的研究均表明, 青藏高原新生代可能不仅存在一条特殊的壳幔过渡带, 还存在与陆内俯冲作用导致的软流圈上涌有关、并受俯冲地壳物质交代的过渡型和富集型地幔。作者在羌南地块南缘日土县奴雷地区开展 1:5 万区域地质调查过程新发现一套火山岩, 获得 34.7 Ma 的锆石 U-Pb 年龄记录, 时代为古近纪始新世晚期 - 渐新世纳丁错组, 为青藏高原新生代隆升演化的研究提供新资料。

2. 地质背景及岩石学特征

工作区大地构造位置属羌南地体的南缘, 南邻班公湖 - 怒江结合带西段[10]。出露地层主要有二叠系, 三叠系, 侏罗系和第四系, 零星分布古近系和新近纪。

工作区古近纪火山岩分布于日土县奴雷地区, 出露面积仅 0.95 km^2 , 本组岩性十分单一, 以一套中酸性弱蚀变粗安岩为特征, 近东西向展布, 呈层状产出, 厚度 $> 262.4 \text{ m}$, 四周被第四纪地层不整合覆盖。喷发方式为中心式, 以喷溢相为主, 喷发的火山岩成分以安山质岩浆为主。

火山岩岩石类型为熔岩类, 岩性为粗安岩。岩石呈灰色 - 浅灰绿色, 具斑状结构、正边结构, 基质交织结构, 发育块状构造, 气孔 - 杏仁状构造。斑晶主要为斜长石及黑云母、角闪石及少量辉石、钾长

石。基质交织结构，长径 0.05~0.1 mm 的长石微晶半定向排列，其中见辉石、磁铁矿等分散分布。长石类矿物常见绢云母化。

3. 地球化学特征

工作区古近纪火山岩岩石化学全分析、微量元素、稀土元素含量见表 1。

Table 1. List of chemical analysis, trace elements and rare earth elements analysis of Paleogene volcanic rocks
表 1. 古近纪火山岩化学分析、微量元素及稀土元素分析成果一览表

全分析	粗安岩	粗安岩	微量元素	粗安岩	粗安岩	稀土元素	粗安岩	粗安岩
样号	D3040-1	D3040-3	样号	D3040-1	D3040-3	样号	D3040-1	D3040-3
SiO ₂	64.74	65.3	Nb	14.9	16.8	La	48.8	49
TiO ₂	0.69	0.62	Zr	188	197	Ce	87.4	87.3
Al ₂ O ₃	15.72	15.6	Rb	83.3	93	Pr	9.75	9.66
Fe ₂ O ₃	2.49	2.29	Sr	618	667	Nd	33	32
FeO	1.18	1.1	Mo	1.03	0.91	Sm	4.59	4.48
MnO	0.058	0.047	W	0.41	0.39	Eu	1.23	1.16
MgO	1.81	1.56	Th	11.8	11.7	Gd	3.35	3.17
CaO	3.78	3.46	Ta	1.05	0.56	Tb	0.44	0.42
Na ₂ O	4.6	4.57	Ba	786	809	Dy	1.85	1.76
K ₂ O	3.72	3.79	P	1544	1719	Ho	0.32	0.3
P ₂ O ₅	0.37	0.33	Sc	6.4	6.93	Er	0.78	0.76
CO ₂	0.062	0.05	Cr	30.8	39.6	Tm	0.12	0.12
LOI	0.85	1.13	Ni	24	23.2	Yb	0.7	0.7
H ₂ O-	0.53	0.54	Sn	2.26	1.43	Lu	0.1	0.1
SO ₃			K		3.29	Y	8.53	8.28
S			La/Y	5.72	5.92	ΣREE	192.43	190.93
总量	100.6	100	La/Nb	3.275168	2.916667	LREE	139.32	137.77
TFeO	3.67	3.39	Rb/Sr	0.13	0.14	HREE	12.84	12.44
氧化系数	0.68	0.68	Sr/Y	72.45	80.56	LREE/HREE	24.12	25.05

3.1. 主量元素特征

从表 1 中可以看出，火山岩中 SiO₂ = 64.74%~65.3%，全碱量 Na₂O + K₂O = 8.32%~8.36%；K₂O/Na₂O = 0.81~0.83；δ = 1.21~39.31，(SiO₂ < 66%)属钙碱性中性岩中的粗安类。其 CIWP 标准矿物中均含 Q 分子，无 C、Ne、Ol 分子，属 SiO₂ 过饱和岩石。固结指数较低 SI = 11.77~13.17，A/CNK 为 0.85~0.87，均小于 1.0 显示“I”型花岗岩的特征；AR 碱度率为 2.49~2.56；σ₄₃ 为 3.1~3.16；氧化系数均为 0.68，表明火山岩受到了氧化的影响，这与薄片比较吻合。从图 1 可知，样品落入高钾钙碱性系列。

3.2. 微量元素特征

从表 1 可知火山岩具有相对较高的 Ba(786~809)、Sr(618~667)、Th(11.7~11.8)，低于上部地壳的 Sc(6.4~6.93)。而 Nb(14.9~16.8)、Zr(188~197)、Rb(83.3~93)介于下部地壳与上部地壳之间，过渡金属元素中，Ni 元素含量小于下地壳或介于上、下地壳元素含量之间。Cr 元素的含量有高于和低于上部地壳元素

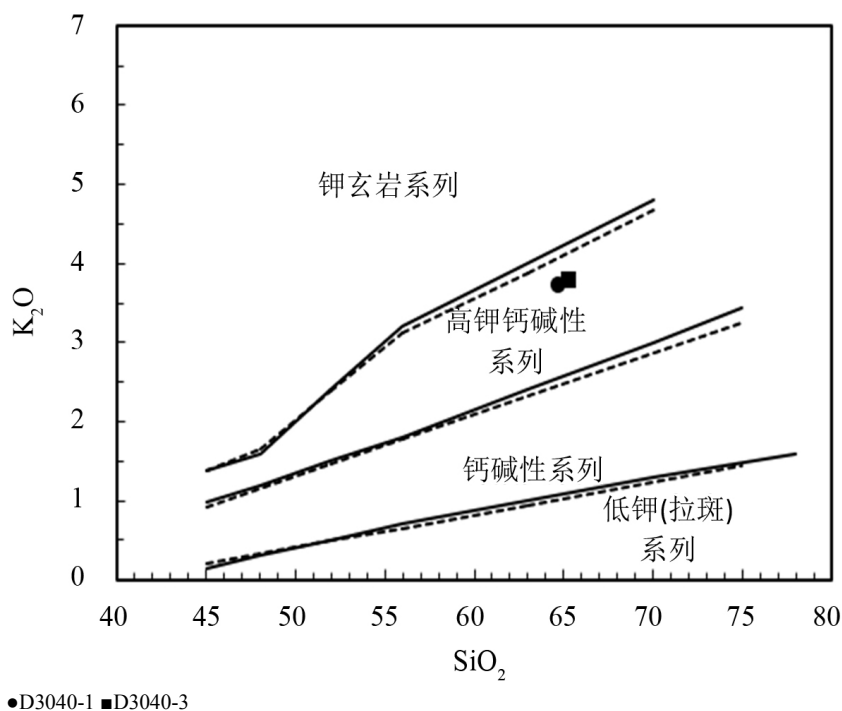


Figure 1. SiO_2 - K_2O projection of volcanic rocks
图 1. 火山岩 SiO_2 - K_2O 投影图

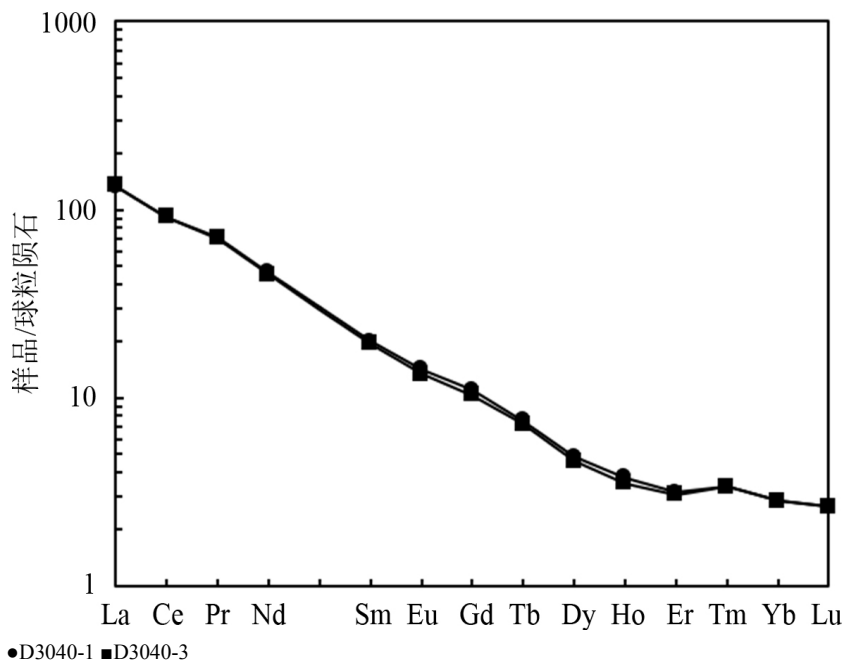


Figure 2. Standardized pattern of rare earth element chondrites in volcanic rocks
图 2. 火山岩稀土元素球粒陨石标准化图式

含量的特征，总体上属于高 Ba-Sr 火山岩范畴，岩浆形成过程中有较多地幔物质参与[11] [12]。

Rb/Sr 比值为 0.13~0.14, Rb/Sr 比值明显低于中国东部上地壳的平均值(0.31)和全球上地壳的平均值(0.32), Rb/Nb 比值为 5.53~5.59, Rb/Nb 比值低于中国东部上地壳的平均值(6.8)和全球上地壳的平均值(4.5)

[13][14]; 反映纳丁错组火山岩源自基性岩浆或下地壳。该岩体具有高的 Sr/Y (72.45~80.56, 大于 40) 和高 La/Y (5.72~5.92), 表明源区较深。

3.3. 稀土元素特征

从表 1 中可以看出 $\Sigma \text{REE} = 190.93 \sim 192.43$, $\text{LREE/HREE} = 24.12 \sim 25.05$, 为轻稀土富集型, 重稀土平坦, $\delta \text{Ce} = 0.89$, $\delta \text{Eu}_N = 0.90 \sim 0.92$, 以弱铕负异常为特征, 分配曲线为右倾型(图 2)。 $\text{La/Yb} = 69.71 \sim 70 > 1$, 说明稀土元素分馏较明显, $(\text{La/Sm})_N$ 为 6.69~6.88, 轻稀土分馏较明显; $(\text{Gd/Yb})_N$ 为 3.67~3.88, 重稀土分馏略明显; 显示“T”型花岗岩的稀土元素地球化学特征。 δEu 为 0.90~0.92, 表现为轻微亏损, 表明初始岩浆形成时斜长石分离结晶作用较弱[15][16]。 $\delta \text{Eu} > 0.7$, 表明岩浆是由玄武岩浆或下地壳经不同程度的部分熔融形成的[17]。稀土配分曲线略向右倾斜(图 2), 铕多呈弱亏损, δCe 为 0.89 显示弱负异常, 暗示岩浆形成过程中有海水参与。

4. 形成时代及形成环境

4.1. 形成时代

本次工作采集了粗安岩岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年样品, 代表性锆石 CL 图像见图 3, 分析结果列于表 2。阴极发光图像显示, 绝大多数锆石呈长柱状、短柱状和粒状, 粒径较小, 具有明显的岩浆振荡环带, 为典型的岩浆锆石, 锆石核边结构不发育。

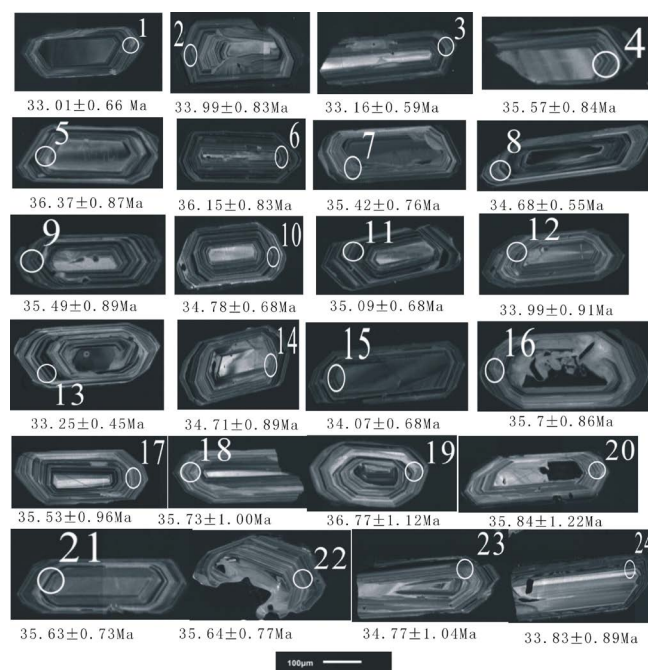


Figure 3. Zircon cathodoluminescence images of Nadingcuo formation
图 3. 纳丁错组锆石阴极发光图像

借助 CL 图像对样品进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析, 共分析了 24 个点, 锆石参数特征见表 2。本次工作选择 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄来代表岩体的成岩年龄, 该阶段侵入体年龄谱和图及平均年龄图分别见图 4 和图 5。获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $34.7 \pm 0.5 \text{ Ma}$, 形成时代属古近纪始新世。结合区域上岩石相对比, 将新发现的火山岩归属始新世-渐新世的纳丁错组。

Table 2. Zircon LA-ICP-MSPG dating $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ parameter table of D3040-TW3
表 2. D3040-TW3 锆石 LA-ICP-MSPG 定年 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 参数表

Analysis	Pb ²⁰⁸ (ppm)	Th ²³² (ppm)	U ²³⁸ (ppm)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
				Ratio	1sigma	Ratio	1sigma	rho	Age (Ma)	1sigma
D3040-01	14.65033	1528.632	2260.319	0.043943	0.00289	0.005134	0.000102	0.302924	33.01	0.66
D3040-02	9.799698	1155.264	1443.219	0.050489	0.003237	0.005288	0.000129	0.381245	33.99	0.83
D3040-03	14.24424	2053.685	2010.114	0.043505	0.002886	0.005158	9.35E-05	0.273282	33.16	0.59
D3040-04	11.94986	2059.049	1458.176	0.05476	0.003537	0.005534	0.000131	0.366261	35.57	0.84
D3040-05	10.84528	2057.308	1195.38	0.063353	0.004872	0.005658	0.000136	0.31254	36.37	0.87
D3040-06	17.02011	2644.693	2144.219	0.064602	0.021976	0.005623	0.000129	0.067479	36.15	0.83
D3040-07	12.89563	2380.865	1483.793	0.059688	0.004225	0.00551	0.000118	0.302127	35.42	0.76
D3040-08	25.95246	4098.383	3384.354	0.039216	0.002783	0.005395	8.52E-05	0.222596	34.68	0.55
D3040-09	14.54671	2730.602	1717.967	0.054281	0.003984	0.00552	0.000139	0.343916	35.49	0.89
D3040-10	16.69095	2871.069	2116.21	0.037267	0.002379	0.005409	0.000107	0.308925	34.78	0.68
D3040-11	16.27824	1945.669	2261.743	0.042286	0.00263	0.005459	0.000105	0.310456	35.09	0.68
D3040-12	7.360483	1109.859	987.5484	0.064442	0.004879	0.005286	0.000142	0.354787	33.99	0.91
D3040-13	36.20878	4929.371	5180.57	0.036263	0.001762	0.005171	7.06E-05	0.281017	33.25	0.45
D3040-14	8.134559	1234.51	1086.606	0.065244	0.004836	0.0054	0.000139	0.346835	34.71	0.89
D3040-15	19.06864	2254.579	2763.802	0.042029	0.002462	0.005299	0.000106	0.343097	34.07	0.68
D3040-16	8.426888	1107.267	1066.506	0.065125	0.005115	0.005553	0.000133	0.305762	35.7	0.86
D3040-17	8.404376	1534.609	978.8746	0.05871	0.005173	0.005527	0.000149	0.306481	35.53	0.96
D3040-18	7.782352	1194.681	973.1426	0.069853	0.005176	0.005557	0.000156	0.379662	35.73	1.00
D3040-19	7.291674	1344.531	805.5561	0.070355	0.005261	0.00572	0.000175	0.409717	36.77	1.12
D3040-20	5.361463	646.2131	631.2081	0.125003	0.010359	0.005575	0.000191	0.412802	35.84	1.22
D3040-21	11.82434	1953.44	1482.203	0.045168	0.003	0.005543	0.000113	0.307989	35.63	0.73
D3040-22	9.443721	1213.706	1218.785	0.051239	0.003497	0.005543	0.000121	0.319349	35.64	0.77
D3040-23	6.981069	1238.82	887.2303	0.06633	0.005731	0.005408	0.000162	0.345943	34.77	1.04
D3040-24	7.94966	1528.52	978.1448	0.0715	0.007659	0.005261	0.000139	0.246281	33.83	0.89

4.2. 构造环境

C/MF-A/MF 图解中(图 6), 样品落入基性岩部分熔融区与变质砂岩部分熔融区的重叠区, 表明物质来源于青藏高原加厚陆壳之下与岩石圈地幔之上的特殊壳幔过渡带, 其成因机理应为深部地幔源局部熔融的原生碱性岩浆在底侵过程中, 与加厚地壳下部的地壳物质或壳源岩浆发生了较充分的混合, 形成具有特殊地球化学性质的壳幔过渡带岩浆体系[18], 该岩浆体系在上升及喷发过程中产生共源岩浆的结晶分异和演化, 从而形成工作区纳丁措组火山岩。

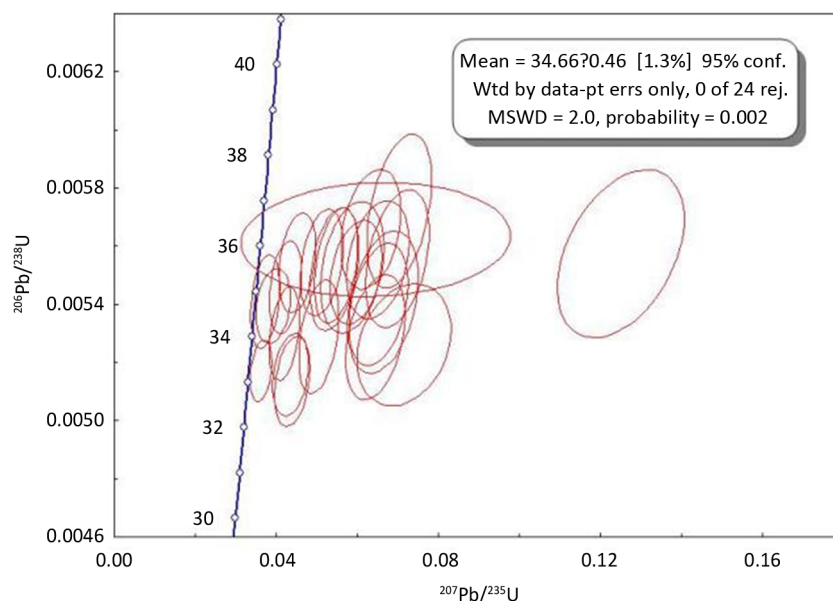


Figure 4. Zircon LA-ICP-MSPG dating $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ harmonic diagram of D3040-TW3

图 4. D3040-TW3 锆石 LA-ICP-MSPG 定年 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图

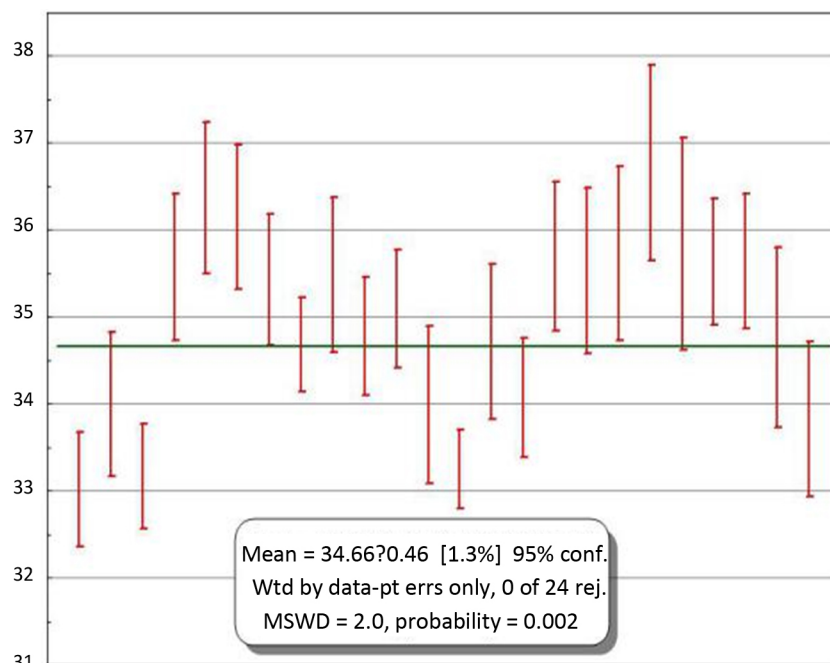
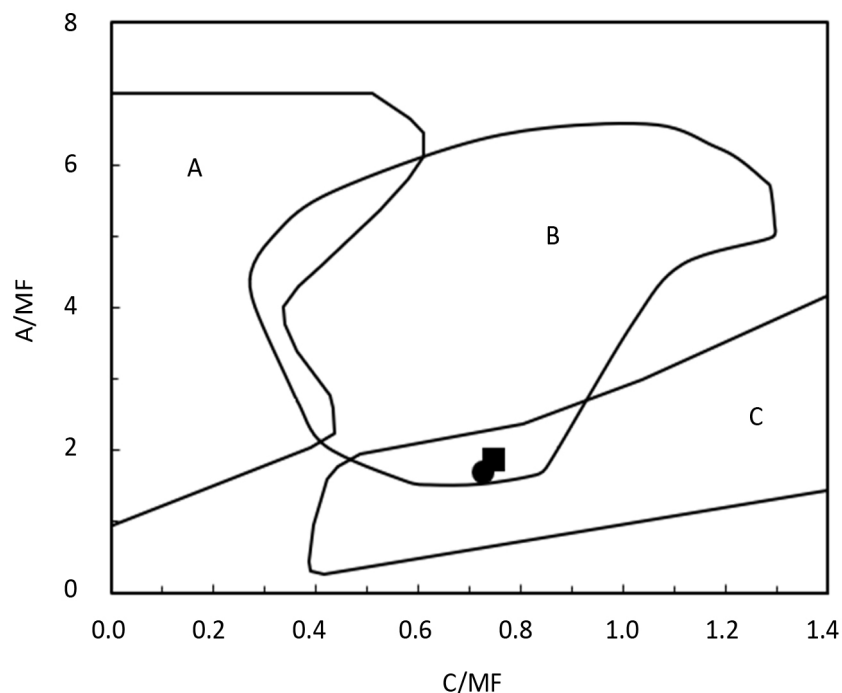


Figure 5. LA-ICP-MSPG annual average age map of D3040-TW3

图 5. D3040-TW3 LA-ICP-MSPG 定年平均年龄图

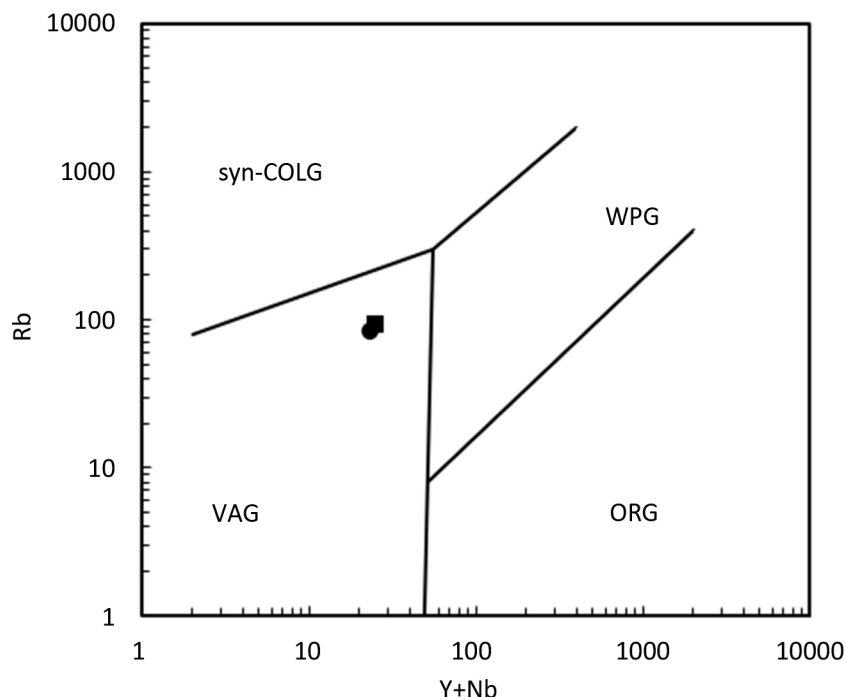
本旋回火山岩赋存于古近纪始新世-渐新世纳丁错组地层中, 主要岩石类型为粗安岩。其喷发环境应为陆相环境; 在 $\text{Y} + \text{Nb-Rb}$ 图解中(图 7), 样品落入火山弧火山岩区, 同时又属高钾钙碱性系列, 表明区内火山岩偏向造山带地区火山岩特征, 火山岩属陆内俯冲成因机制[19]。由于工作区火山岩出露位置为羌塘板块中靠近班公湖-怒江结合带附近, 故火山活动的岩浆房混入了部分造山带地区壳幔过渡带物质, 喷发形成的火山岩岩石具有造山带地区火山岩的岩石地球化学性质。



$A/MF = Al_2O_3/(FeOt + MgO)$ $C/MF = CaO/(FeOt + MgO)$ A 变质泥岩部分熔融 B 变质砂岩部分熔融 C 基性岩部分熔融 ●D3040-1 ■D3040-3

Figure 6. Discriminant map of C/MF-A/MF source area of volcanic rocks (according to Altber R et al., 2000)

图 6. 火山岩 C/MF-A/MF 源区判别图(据 Altber R 等, 2000)



Syn-COLG. 同碰撞火山岩 VAG. 火山弧火山岩 WPG. 板内火山岩 ORG. 洋脊火山岩 (c) 图中虚线为异常洋中脊火山岩与板内火山岩分界 ●D3040-1 ■D3040-3

Figure 7. Rb-Nb+Y map of volcanic rocks; (according to Pearce et al., 1984)

图 7. 火山岩 Rb-Nb+Y 图; (据 Pearce 等, 1984)

5. 结论

1) 日土县奴雷地区火山岩岩石类型为粗安岩, 属于次铝的或偏铝的火山岩, 高钾钙碱性系列。稀土配分显示属轻稀土富集型, 重稀土平坦, $\delta\text{Ce} = 0.89$, $\delta\text{Eu}_N = 0.90\sim 0.92$, 以弱负异常为特征, 分配曲线为右倾型。火山岩喷发方式为裂隙中心式, 以喷溢相为主, 喷发的火山岩成分以安山质岩浆为主。

2) 获得粗安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $34.7 \pm 0.5 \text{ Ma}$, 形成时代属古近纪始新世。

3) 从岩石地球化学特征来看, 火山岩原始岩浆来源于青藏高原加厚陆壳之下与岩石圈地幔之上的特殊壳幔过渡带, 岩石形成环境为板内初始裂谷环境。但由于岩石出露的特殊位置, 在其形成初期混入了造山带壳幔过渡带的物质, 从而兼具了板块边缘环境的岩石地球化学性质, 是青藏高原汇聚隆升演化阶段陆内俯冲成因机制的产物。

基金项目

中国地质调查局工作项目(编号 1212011121249)。

参考文献

- [1] 迟效国, 李才, 金巍, 等. 藏北新生代火山作用的时空演化与高原脉动隆升[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 978-986.
- [2] 谭富文, 潘桂棠, 徐强. 羌塘腹地新生代火山岩的地球化学特征与青藏高原隆升[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(2): 121-130.
- [3] 邓万明, 孙宏娟. 青藏高原新生代火山活动与高原隆升关系[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 952-958.
- [4] Santos, A.C., Matos, C.M., Oliveiros, B., Almeida, T., Gano, L., Neves, M. and Ferreira, N. (2012) Thermolabile Liposomes: A Controlled Release Delivery Tool in Diagnosis/Therapy in Experimental Pulmonary Oedema. *Current Radiopharmaceuticals*, **5**, 166-174. <https://doi.org/10.2174/1874471011205020166>
- [5] 赖绍聪, 秦江锋, 李永飞, 等. 藏北羌塘比隆错一带新生代火山岩的成因: 壳幔过渡带局部熔融的地球化学证据[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 64-69.
- [6] 刘建峰, 迟效国, 赵秀羽, 等. 青藏高原北部新生代走构油茶错、纳丁错火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(12): 3259-3274.
- [7] 汤晶, 朱利东, 曾江. 西藏改则县纳丁错组火山岩地球化学特征及构造意义[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 394-396.
- [8] 冉峰, 王根厚, 郑艺龙, 等. 藏北羌塘荣玛地区古近纪火山岩地球化学特征及其构造意义[J]. 矿物学报, 2014, 34(3): 360-368.
- [9] 褚慧力. 藏北阿里地区改则县雀康一带纳丁措组火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 中国地质调查, 2016, 3(6): 37-48.
- [10] 何子轩. 班公湖-怒江结合带构造演化与成矿作用[J]. 四川有色金属, 2018(2): 12-14.
- [11] Tarney, J. and Jones, C.E. (1994) Trace Element Geochemistry of Orogenic Igneous Rocks and Crustal Growth. *Journal of the Geological Society*, **151**, 855-868. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.151.5.0855>
- [12] Fowler, M.B. and Henney, P.J. (1996) Mixed Caledonian Appinite Magmas Implications for Lamprophyre Fraction and High Ba-Sr Granite Genesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **126**, 199-215. <https://doi.org/10.1007/s004100050244>
- [13] 高山, 骆庭川, 张本仁, 等. 中国东部地壳的结构和组成[J]. 中国科学 D 辑, 1999, 29(3): 204-213.
- [14] Taylor, S.R. and McLennan, S.M. (1985) The Continental Crust Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, 1-312.
- [15] Ewart, A. and Chappel, B.W. (1985) Aspects of the Mineralogy and Chemistry of the Intermediate-Silicic Cainozoic Volcanic-Rocks of Eastern Australia. Part 1: Introduction and Geochemistry. *Australian Journal of Earth Sciences*, **32**, 359-382. <https://doi.org/10.1080/08120098508729339>
- [16] London, D. (1987) Internal Differentiation of Rare Elements: Effects of Boron, Phosphorus and Fluorine. *Geochimica Cosmochimica Acta*, **51**, 403-420. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(87\)90058-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(87)90058-5)

-
- [17] 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [18] 邓万明, 钟大赉. 壳—幔过渡带及其在岩石圈构造演化中的地质意义[J]. 科学通报, 1997, 42(23): 2474-2482.
- [19] 邓万明. 西藏阿里地区北部新生代火山岩——兼论陆内俯冲作用[J]. 岩石学报, 1989(3): 1-11+98.