

王勤, 唐菊兴, 方向, 等. 西藏多龙矿集区铁格隆南铜(金银)矿床荣那矿段安山岩成岩背景: 来自锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学的证据[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1324-1336.

Wang Qin, Tang Juxing, Fang Xiang, et al. Petrogenetic setting of andsites in Rongna ore block, Tiegelong Cu (Au-Ag) deposit, Duolong ore concentration area, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LA-ICP-MS dating and petrogeochemistry of andsites[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1324-1336(in Chinese with English abstract).

西藏多龙矿集区铁格隆南铜(金银)矿床荣那矿段安山岩成岩背景: 来自锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学的证据

王 勤¹ 唐菊兴² 方 向¹ 林彬² 宋 扬² 王艺云¹ 杨欢欢¹
杨 超² 李彦波³ 卫鲁杰³ 冯 军⁴ 李 力⁴

(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 100000; 3. 西藏地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海 格尔木 816000; 4. 西藏金龙矿业股份有限公司, 西藏 拉萨 851418)

摘要: 本文主要对出露与西藏多龙矿集区铁格隆南矿区荣那矿段的安山岩开展了锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学测试, 旨在确定该套火山岩的成岩年龄及其形成的构造背景。安山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (110.1 ± 0.7) Ma (MSWD=2.3), 代表了其成岩年龄。岩石 SiO_2 为 59.5%~61.48%; Al_2O_3 为 16.14%~17.11%; $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 6.02%~6.63%; $\text{Mg}^\#$ 值中等, 微量元素富集 Ba、Rb、Th、K 等大离子亲石元素, 相对亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素, 具有 Rb 正异常和明显的 Zr、Hf 负异常, 据此认为该安山岩属高钾钙碱性系列岩石, 具有活动大陆边缘火山岩的性质, 是班公湖—怒江洋北向俯冲, 拉萨地体与羌塘地体碰撞拼贴过程中所诱发的岩浆产物。结合其他资料分析认为, 此安山岩的成岩时间应晚于铁格隆南高硫型浅成低温热液铜(金)矿床的成岩和成矿时间, 是该矿床得以良好保存的重要条件。

关键词: 多龙矿集区; 安山岩; 锆石 U-Pb 定年; 岩石地球化学; 浅成低温热液; 西藏

中图分类号: P581; P595; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1324-13

Petrogenetic setting of andsites in Rongna ore block, Tiegelong Cu (Au-Ag) deposit, Duolong ore concentration area, Tibet: Evidence from zircon U-Pb LA-ICP-MS dating and petrogeochemistry of andsites

WANG Qin¹, TANG Ju-xing², FANG Xiang¹, LIN Bin², SONG Yang², WANG Yi-yun¹,

收稿日期: 2014-10-14; 改回日期: 2015-02-25

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(201511017)、国家自然科学基金青年基金(41402178)、青藏专项项目(12120114050401)、国家 973 项目(2011CB403103)及中铝西藏矿业股份有限公司资助项目(ZLXZ-2013-JS03)联合资助。

作者简介: 王勤, 男, 1983 年生, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事固体矿产勘查与评价工作; E-mail: wagchin@163.com。

通讯作者: 唐菊兴, 男, 1964 年生, 研究员, 博士生导师, 主要从事矿床学及矿产勘查研究; E-mail: tangjuxing@126.com。

YANG Huan-huan¹, YANG Chao², LI Yan-bo³, WEI Lu-jie³, FENG Jun⁴, LI Li⁴

(1. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. MLR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Golmud 816000, Qinghai, China; 4. Jinlong Mining Co., Ltd., Lhasa 850000, Tibet, China)

Abstract: In this paper, the authors studied the andsites in Rongna ore block, Tiegelong Cu (Au-Ag) deposit, Duolong ore concentration area, Tibet, and used the zircon U-Pb data and petrogeochemistry of andsites to identify the petrogenetic age and tectonic setting of the andsites. The weighted average age of zircon U-Pb is 110.1 ± 0.7 Ma (MSWD=2.3), which represents the petrogenesis age. An analysis of the whole rock sample shows that SiO₂ values are 59.5%–61.48%, Al₂O₃ values are 16.14%–17.11% and Na₂O+K₂O values are 6.02%–6.63%; Mg[#] is of intermediate value. LILE such as Ba, Rb, Th, K are rich, HFSE such as Ta, Nb, P, Ti are relatively poor and characterized by Rb positive anomaly and obvious Zr, Hf negative anomalies. Petrological and geochemical studies show that the andsites are high potassium calc-alkaline rocks exhibiting the characteristics of Andean-type active continental margin volcanic rocks. They resulted probably from partial melting of subducted oceanic slab as well as miscibility with crustal material during the upward migration of the magma in the case that subducted oceanic slab didn't interact with the mantle. They were the magma products of the northward subduction of Bangong Co-Nujiang Ocean and Lhasa and the collision collage process of Qiangtang terrane. In combination with other dating data and drilling core catalog data, the authors hold that the formation of andsites was later than the rock-forming and ore-forming stage of the Tiegelongnan high sulfur epithermal Cu (Au-Ag) deposits, which seems to have been the important condition for the preservation of the ore deposit.

Key words: Duolong ore concentration area; andsites; zircon U-Pb dating; petrogeochemistry; epithermal deposit; Tibet

About the first author: WANG Qin, male, born in 1983, master candidate, majors in mineralogy, petrology, mineral deposit geology and engages in research on exploration and evaluation of mineral resources; E-mail: wagchin@163.com.

About the corresponding author: TANG Ju-xing, male, born in 1964, senior researcher, supervisor of doctor candidate, engages in research on economic geology and mineral exploration; E-mail: tangjuxing@126.com.

安山岩最早由Buch创名于南美安第斯山^[1],是地球上分布比较广泛的一类熔岩。世界上陆相火山的主要喷出物中有61%为安山质岩浆^[2],广泛分布于活动大陆边缘、造山带及现代岛弧地区,也可以产出于板内伸展环境、大洋中脊和板内裂谷等非造山环境^[1]。俯冲带是形成安山岩最重要的场所,在这个构造背景下的岩浆作用形成的岩浆约占全球总的岩浆释放量的15%^[3],除此之外,也有部分安山岩分布于大陆内部(如大陆裂谷)^[4]及洋中脊^[5-6]。一般认为,形成于俯冲带的安山岩是由洋壳物质或受流体交代的地幔楔物质部分熔融产生的安山质岩浆所形成的。

位于西藏多龙矿集区的铁格隆南矿床荣那矿段分布有较大面积安山岩,是铁格隆南超大型斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿体的直接盖层^[7-9],该

安山岩亦可作为多龙矿集区重要的找矿标志之一。但截至目前,其成岩时代、岩浆源区及其在铁格隆南矿床的形成与保存过程中的作用等尚无系统的研究。有报告称在多龙矿集区西部地堡那木岗地区的美日切错组安山岩中测得锆石U-Pb谐和年龄为 (120.89 ± 0.91) Ma,在多不杂矿区西侧的玄武安山岩中测得7颗锆石U-Pb谐和年龄为 (105.7 ± 1.7) Ma (MSWD=1.2),4颗锆石U-Pb谐和年龄为 (121.5 ± 2.4) Ma (MSWD=0.32),并认为是班公湖—怒江洋洋壳向北俯冲到南羌塘地块之下所造成的^①;另有报告认为美日切错组安山岩主要形成于洋壳俯冲期俯冲带后缘的挤压背景下的局部“拉张盆地”环境^②;文献[10-11]报道了在荣那地区英安岩中获得SHRIMP锆石U-Pb年龄为 (111 ± 1.4) Ma,并认为早白垩世中期班公湖—怒江洋洋盆并未完全闭合,仍

①陈红旗,张天平,李玉昌,等.西藏班公湖—怒江成矿带西段铜多金属资源调查报告[R].拉萨:西藏自治区地质调查院,2012.

②陈玉禄,张宽忠,勾永东,等.1:25万物玛幅(144C004004)区域地质调查报告[R].成都:四川省地质调查院,2005.

存在向北的俯冲作用^[12]。以上研究虽对多龙矿集区的安山岩有所涉及,但显然存在争议,且均未涉及相关火山岩源区特征的讨论,以及该套火山岩对于多龙地区斑岩成矿系统铜(金)矿床的改造、保存的重要性均未给予必要的重视。

为此,本文以出露于铁格隆南矿床荣那矿段的安山岩为研究对象,通过野外地质调查及岩相学研究、锆石U-Pb年代学、岩石地球化学特征研究,结合详细钻孔岩心编录成果,探讨铁格隆南矿床荣那矿段安山岩的成岩时代、岩浆源区特征及其在铁格隆南斑岩-浅成低温热液型铜(金)矿床的形成、改造与保存过程的重要作用。

1 区域构造背景及样品岩相学特征

班公湖-怒江缝合带分别以日土-改则-丁青断裂、班公湖-康托-兹格塘错断裂为南北两界,横亘于青藏高原中部,是羌塘地体和冈底斯地

体重要的分界线^[13](图1-a)。受中特提斯洋发展的影响,班公湖-怒江缝合带及其两侧主要由一系列增生杂岩带和岩浆岩带构成^[14-16]。多龙矿集区即位于班公湖-怒江缝合带北侧羌塘弧盆系扎普-多不扎岩浆岩带东段,以深水陆棚-盆地斜坡沉积环境的中-下侏罗统曲色组和色哇组的细碎屑岩,与枕状玄武岩、辉绿岩墙等组合为特征(图1-b)。

下白垩统美日切错组(K₁m)整体为一套安山(玢)岩-火山碎屑岩组合,是本文的研究重点。火山岩中菱形节理发育,形成于陆地环境,为一套陆相火山喷发溢流相火山岩。该套火山岩主要沿地堡那木岗-荣那-赛角及赛角-尕尔勤呈NE向和NW向展布,常呈不规则状或串珠状不整合覆盖于侏罗系碎屑岩或剥蚀出来的矿化花岗闪长岩之上。

铁格隆南矿床荣那矿段安山岩具斑状结构,块状构造(图2-a、b),由斑晶(20%~25%),基质(75%~80%)及少量磁铁矿(1%)组成。斑晶主要为斜长石、

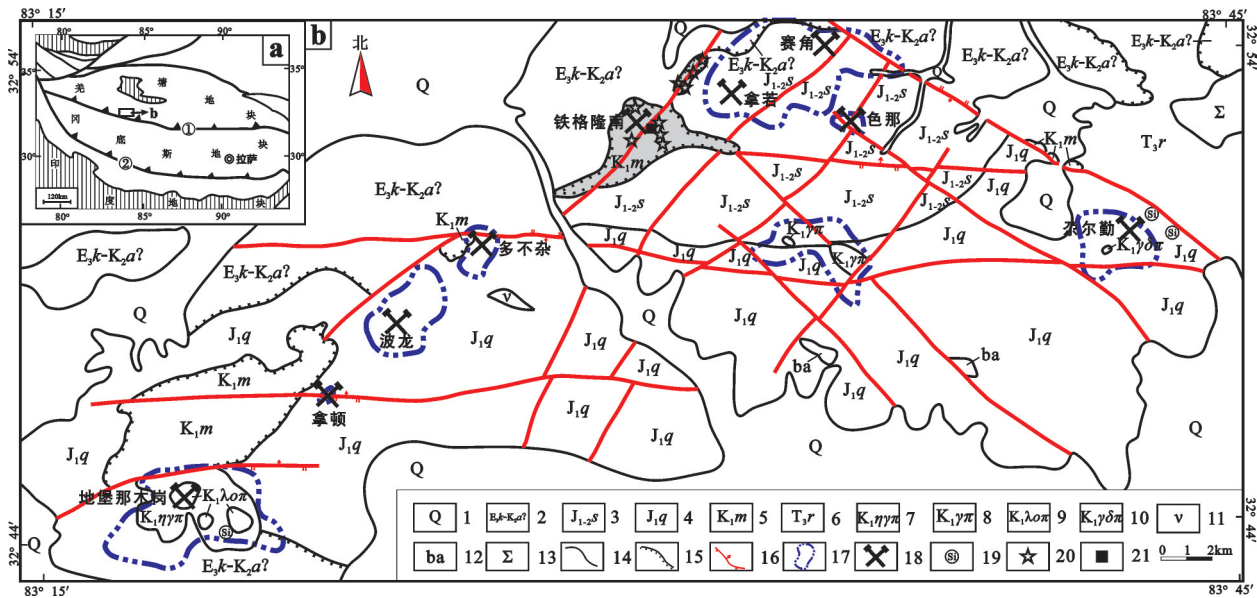


图1 西藏多龙矿集区地质简图

图a: ①—班公湖-怒江缝合带; ②—雅鲁藏布江缝合带;

图b: 1—第四系; 2—渐新统康托组-上白垩统阿布山组(?); 3—中下侏罗统色哇组; 4—下侏罗统曲色组; 5—下白垩统美日切错组; 6—上三叠统日干配组; 7—早白垩世二长花岗斑岩; 8—早白垩世花岗斑岩; 9—早白垩世石英斑岩; 10—早白垩世花岗闪长斑岩; 11—辉长岩; 12—枕状玄武岩; 13—蛇纹石化橄榄岩; 14—地层整合接触界线; 15—地层不整合接触界线; 16—断层及其性质; 17—地表蚀变范围; 18—矿床(点)所在位置; 19—地表发现的硅帽位置; 20—岩石地球化学样品采集位置; 21—锆石样品采集位置

Fig.1 Geological sketch map of the Duolong copper (gold) ore concentration area, Tibet

Fig. a: ①—Bangong Co-Nujiang suture zone; ②—Yarlung Zangbo suture zone;

Fig. b: 1—Quaternary; 2—Oligocene Kangtuo Formation—Upper Cretaceous Abushan Formation (?); 3—Middle-Lower Jurassic Sewa Formation; 4—Lower Jurassic Quse Formation; 5—Lower Cretaceous Meiriqico Formation; 6—Upper Triassic Riganpeico Formation; 7—Late Cretaceous monzonitic granite-porphry; 8—Late Cretaceous granite porphyry; 9—Late Cretaceous quartz porphyry; 10—Late Cretaceous granodiorite-porphry; 11—Gabbro; 12—Ellipsoidal basalt; 13—Serpentinized peridotite; 14—Conformable contact; 15—Unconformable contact; 16—Fault; 17—Alteration zone; 18—Location of deposit; 19—Location of silicon cap; 20—Location of lithogeochemical sample; 21—Location of zircon sample

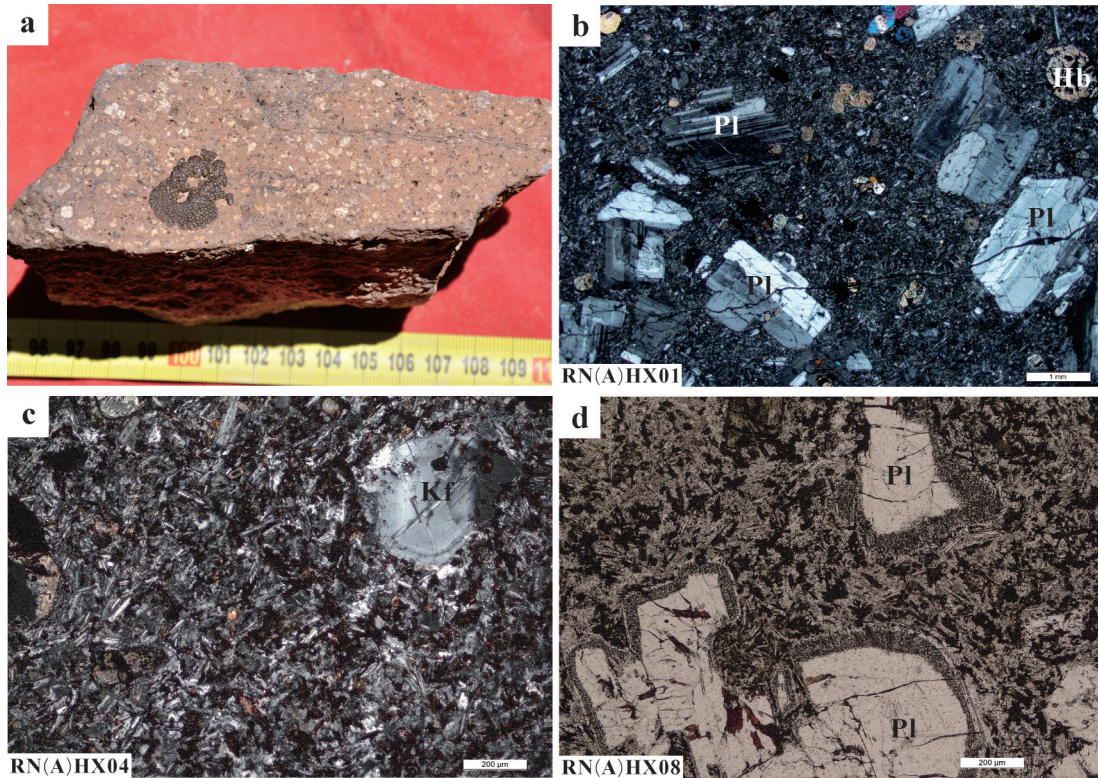


图2 荣那安山岩样品宏观及显微照片

a—安山岩样品宏观照片; b—正交偏光, RN(A)HX01 样品中安山岩具斑状结构, 斑晶以具聚片双晶的斜长石(Pl)斑晶为主, 见少量角闪石(Hb)斑晶; c—正交偏光, RN(A)HX04 样品中安山岩基质具玻基交织结构及钾长石(Kf)斑晶; d—单偏光, RN(A)HX08 样品中斜长石具有熔蚀环边及熔蚀港湾现象

Fig.2 Petrographic photos of the andesites in Rongna area

a—Petrographical photos of the andesites; b—crossed nicols (cpl), porphyritic texture in sample RN(A)HX01; c—cpl, Hyalopilitic texture in sample RN(A)HX04; d—plainlight (ppl), resorption texture in sample RN(A)HX08

角闪石和黑云母, 偶见钾长石斑晶(图2-c), 斜长石斑晶呈长板状或柱状, 颗粒大小不一, 镜下长度从1~10 mm不等, 可见聚片双晶(图2-b), 部分绢云母化, 角闪石斑晶多呈粒状或长柱状(图2-b), 粒径从0.8~4 mm不等, 单偏镜下呈浅绿色或绿色, 具明显多色性, 部分可见2组解理, 矿物边缘发生氧化形成暗化边; 黑云母斑晶呈片状、板状, 具多色性, 部分与角闪石共生。基质为安山结构(图2-c), 主要成分以斜长石及少量磁铁矿等副矿物为主。另外, 长石斑晶大多具有熔蚀环边, 且部分斑晶边缘熔蚀呈港湾状(图2-d)。

2 样品采集与分析方法

本批样品中, 选择1件安山岩样品用于LA-ICP-MS 锆石U-Pb测试。样品采自荣那沟北侧铁格隆南矿区ZK2404施工位置附近的山顶安山岩露

头。另有9件用于主量、微量元素分析, 其中4件采集于荣那沟北侧, 1件采集于荣那沟南侧山顶, 4件采集于矿区北东侧拿若山西麓呈串珠状产出的安山岩中(图1-b), 采样坐标: 东经83°30'22", 北纬32°52'36", 野外定名均为安山岩, 样品新鲜(图2-a), 新鲜面呈紫红色, 岩石均无矿化, 蚀变、脉体不发育。

锆石分选工作由廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成。样品按照常规粉碎淘洗后, 经浮选和电磁选后, 在双目镜下人工挑选纯度在99%以上的锆石。锆石的制靶和透射光、反射光、阴极发光照相在北京锆年领航科技有限公司完成。在此基础上观察锆石的内部结构, 避开包裹体和裂隙进行选点。样品测年工作在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完成, 采用LA-MC-ICP-MS进行锆石U-Pb同位素定年测试, 详细流程及原理参见文

献[17]。测试数据采用Isplot v3.75程序^[18]进行处理完成。

对9件样品进行主、微量元素分析。在对样品去除风化壳后,用破碎机粉碎,再用球磨仪研磨至粒径小于200目的粉末状,用于主量元素和微量元素分析。样品的测试分析在西南冶金分析测试所完成,主量元素用X射线荧光光谱法(XRF)测试,分析仪器为Axios X荧光仪,分析精度2%,微量元素使用ICP-MS测试,分析仪器为NexION 300x ICP-MS,分析精度优于5%。

3 分析结果

3.1 锆石U-Pb同位素年代学

本文对1件安山岩样品(RN-GS01)中的23颗锆石进行了锆石U-Pb定年(表1)。样品中锆石多呈自形一半自形短柱状,长宽比1:1~3:1,透明度高,表面光滑,颗粒大多在50~150 μm。锆石阴极发光(CL)图像显示具有明显岩浆成因的韵律环带(图3-a)。对安山岩样品23颗锆石23个点进行了锆石U-Pb同位素分析,测点都选择在韵律环带结构清

表1 荣那安山岩锆石LA-ICP-MS U-Pb分析结果
Table 1 Zircons U-Pb dating of the andesites in Rongna area, Tibet

测试号	含量/ 10^{-6}		同位素比值						谐和年龄/Ma		
	Pb	U	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
RN-GS01.1	4	236	0.3020	0.0172	0.0001	0.1155	0.0109	0.0488	0.0046	109.8	0.9
RN-GS01.2	7	385	0.3670	0.0173	0.0001	0.1155	0.0042	0.0485	0.0017	110.4	0.7
RN-GS01.3	3	165	0.3904	0.0171	0.0002	0.1154	0.0157	0.0488	0.0069	109.6	1.1
RN-GS01.4	4	213	0.4492	0.0174	0.0001	0.1125	0.0065	0.0468	0.0027	111.5	0.8
RN-GS01.5	2	128	0.4034	0.0173	0.0002	0.1150	0.0133	0.0481	0.0054	110.7	1.1
RN-GS01.6	2	120	0.4201	0.0171	0.0002	0.1139	0.0124	0.0483	0.0053	109.4	1.1
RN-GS01.7	2	125	0.4407	0.0172	0.0002	0.1132	0.0159	0.0477	0.0067	110.0	1.1
RN-GS01.8	3	186	0.5034	0.0173	0.0001	0.1155	0.0106	0.0485	0.0043	110.3	0.9
RN-GS01.9	7	414	0.4832	0.0171	0.0001	0.1171	0.0058	0.0496	0.0024	109.5	0.7
RN-GS01.10	4	195	0.4827	0.0174	0.0001	0.1135	0.0105	0.0474	0.0043	111.1	0.9
RN-GS01.11	3	174	0.4790	0.0174	0.0001	0.1156	0.0099	0.0481	0.0041	111.5	1.0
RN-GS01.12	5	257	0.2748	0.0204	0.0002	0.2144	0.0081	0.0761	0.0027	130.4	1.1
RN-GS01.13	3	157	0.4551	0.0168	0.0001	0.1159	0.0088	0.0501	0.0038	107.3	0.9
RN-GS01.14	3	184	0.4765	0.0174	0.0002	0.1130	0.0151	0.0472	0.0063	111.0	1.0
RN-GS01.15	3	145	0.4304	0.0167	0.0001	0.1174	0.0069	0.0509	0.0030	106.9	0.9
RN-GS01.16	3	164	0.4179	0.0171	0.0001	0.1173	0.0134	0.0497	0.0057	109.4	0.9
RN-GS01.17	3	166	0.4509	0.0171	0.0001	0.1171	0.0099	0.0496	0.0041	109.4	0.9
RN-GS01.18	3	140	0.3600	0.0171	0.0002	0.1148	0.0121	0.0485	0.0052	109.6	1.1
RN-GS01.19	3	159	0.0628	0.0178	0.0002	0.2266	0.0222	0.0925	0.0091	113.6	1.2
RN-GS01.20	13	180	0.4859	0.0633	0.0009	0.8680	0.0188	0.0994	0.0016	395.8	5.9
RN-GS01.21	6	287	0.3195	0.0176	0.0001	0.1164	0.0062	0.0481	0.0025	112.2	0.8
RN-GS01.22	3	136	0.3141	0.0193	0.0002	0.2646	0.0192	0.0996	0.0071	123.0	1.1
RN-GS01.23	4	142	0.3538	0.0205	0.0002	0.3520	0.0219	0.1244	0.0071	131.0	1.4

注:测试单位为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。

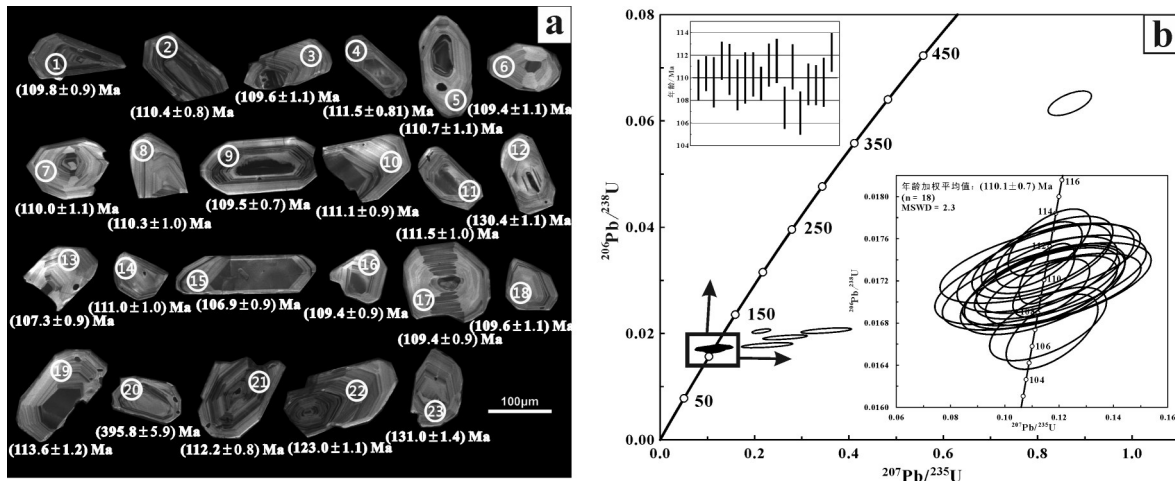


图3 岩浆锆石阴极发光图像(a)和U-Pb年龄谐和图(b)

Fig.3 Cathodoluminescence (CL) images (a) and concordia diagrams (b) of zircons from the andesites in Rongna area

晰的部位,并避开裂隙及包裹体。在所测的23个测点中,3个测点(RN-GS01.12、RN-GS01.22、RN-GS01.23)的 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄不谐和,1个测点(RN-GS01.19)Th/U比值小于0.07,属变质成因锆石^[19-21],1个测点(RN-GS01.20)所测年龄较大((395.8±5.9) Ma),可能为岩浆作用过程中捕获的早期继承锆石(图3-b)。剔除以上5个测点,其余18个测点均位于U-Pb谐和线上或其附近,谐和度较好。18颗锆石的Th/U比值均大于0.3,说明其属于岩浆锆石^[22-24]。

据测试结果,18颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄介于106.9~112.2 Ma,在置信度为95%时的加权平均年龄为(110.1±0.7) Ma (MSWD=2.3),代表了荣那安山岩的成岩年龄。

3.2 岩石地球化学特征

本次研究对荣那地区9件安山岩样品进行了全岩主量元素、微量元素和稀土元素分析,样品分析结果及主要岩石地球化学特征参数见表2。

3.2.1 主量元素地球化学特征

9件安山岩样品 SiO_2 含量为59.5%~61.48%,平均值为60.48%,全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量6.02%~6.63%,平均值为6.30%, K_2O 含量在2.48%~3.11%变化, Al_2O_3 含量为16.14%~17.11%,平均值为16.5%,接近典型岛弧火山岩(Al_2O_3 为17.1%~17.8%)^[25]; TiO_2 含量介于0.82%~0.96%,平均值为0.88%,低于大陆裂谷碱性玄武岩 TiO_2 平均值(2.2%)和钙碱性系列安山岩平均值(1.16%),与岛弧区钙碱性火山岩

(0.58%~0.85%)相似^[26]; MgO 变化范围在1.72%~2.69%, $\text{Mg}^\#$ 值中等,为36.45~44.78(表2),以上岩石地球化学特征显示荣那安山岩具有弧火山岩的特征。在TAS图解中9件样品均落入安山岩区域,位于亚碱性范畴(图4-a),在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解上样品均位于高钾钙碱性系列岩石范围(图4-b)。

3.2.2 微量元素地球化学特征

从稀土元素分析数据看(表2),荣那安山岩稀土元素总量(ΣREE)偏低,介于 $114 \times 10^{-6} \sim 143 \times 10^{-6}$,在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(图5-a)上,各样品显示出良好的一致性,自Ce元素向右,各元素的含量下降很快,表现出活动大陆边缘的特征^[32],轻稀土元素相对富集且轻、重稀土元素之间存在较强的分馏作用($(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为8.04~12.5,平均10.6),配分曲线整体右倾,Eu显示出弱的负异常($\delta\text{Eu}=0.85 \sim 1.03$),表明其具有同源区,与正常岛弧火山岩一致。轻稀土元素内部之间分馏作用明显($(\text{La}/\text{Sm})_N=3.59 \sim 4.01$),而重稀土元素分馏不明显($(\text{Gd}/\text{Yb})_N=1.56 \sim 2.42$)。

荣那安山岩微量元素主要特征列于表3,并与安第斯地区、大陆岛弧、大洋岛弧的低钾安山岩和其他安山岩的有关数值进行对比,表明研究区安山岩微量元素特征与大陆岛弧和安第斯地区安山岩相似,更类似于大陆岛弧安山岩。微量元素具高Sr(平均值大于 400×10^{-6})和低Yb(平均值小于 1.9×10^{-6})、Y(平均值小于 29.9×10^{-6})、高Sr/Y比值和低Rb/Sr比值。在球粒陨石标准化微量元素蛛网图(图5-b)上,各样品的

表2 荣那安山岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果
 Table 2 Major (%) and trace elements (10^{-6}) compositions for the andesites from Rongna area

分析项目	RN(A)HX01	RN(A)HX02	RN(A)HX03	RN(A)HX04	RN(A)HX05	RN(A)HX06	RN(A)HX07	RN(A)HX08	RN(A)HX09
SiO ₂	61.83	60.66	61.17	59.54	61.08	59.50	60.49	59.56	60.51
Al ₂ O ₃	16.21	16.23	16.36	16.83	16.14	16.46	16.51	16.67	17.11
Fe ₂ O ₃ ^T	6.04	6.35	6.13	6.85	5.94	6.57	6.19	6.70	5.94
MgO	1.92	2.49	2.06	2.27	2.41	2.69	2.48	2.53	1.72
CaO	4.32	4.43	4.60	5.17	4.46	5.11	4.80	5.19	5.62
Na ₂ O	3.52	3.59	3.53	3.51	3.65	3.56	3.51	3.54	3.68
K ₂ O	3.11	2.90	2.90	2.62	2.89	2.52	2.72	2.48	2.58
TiO ₂	0.82	0.87	0.85	0.92	0.82	0.89	0.86	0.91	0.96
MnO	0.16	0.12	0.10	0.11	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08
P ₂ O ₅	0.27	0.24	0.25	0.25	0.24	0.25	0.24	0.25	0.22
LOSS	1.68	2.07	1.66	1.63	1.76	2.08	1.87	1.92	1.41
Σ	99.79	99.89	99.50	99.56	99.39	99.62	99.68	99.76	99.76
Na ₂ O+K ₂ O	6.63	6.49	6.42	6.12	6.54	6.08	6.24	6.02	6.27
Na ₂ O/K ₂ O	1.13	1.24	1.22	1.34	1.26	1.41	1.29	1.43	1.43
σ	2.28	2.31	2.2	2.19	2.29	2.15	2.15	2.11	2.19
Mg [#]	38.64	43.72	39.96	39.63	44.56	44.78	44.25	42.79	36.45
La	30.5	30.3	31.2	26.6	29.8	28.8	30.4	27.2	24.9
Ce	53.5	53.3	55.9	46.0	52.4	50.6	54.2	49.6	44.3
Pr	6.39	6.25	6.59	5.75	6.35	6.00	6.51	5.98	5.23
Nd	26.1	25.5	27.5	24.5	25.9	25.4	26.3	24.8	21.8
Sm	4.93	4.75	5.11	4.67	4.73	4.78	4.94	4.68	4.08
Eu	1.34	1.32	1.40	1.34	1.27	1.37	1.37	1.36	1.33
Gd	4.60	4.56	4.75	4.53	4.45	4.46	4.62	4.41	3.84
Tb	0.63	0.64	0.65	0.61	0.60	0.62	0.63	0.62	0.52
Dy	3.90	3.86	3.92	3.71	3.68	3.67	3.73	3.78	3.22
Ho	0.77	0.78	0.79	0.74	0.74	0.72	0.74	0.75	0.63
Er	2.44	2.46	2.51	2.30	2.34	2.20	2.30	2.30	1.93
Tm	0.35	0.37	0.36	0.33	0.33	0.30	0.33	0.34	0.28
Yb	1.67	1.78	1.74	1.51	1.61	2.08	2.29	2.28	1.91
Lu	0.39	0.42	0.39	0.36	0.37	0.32	0.36	0.36	0.28
Y	22.7	21.3	22.1	22.6	21.9	21.6	21.4	20.7	19.1
ΣREE	137	136	143	123	135	131	139	129	114
LREE	123	121	128	109	121	117	124	114	102
HREE	14.8	14.9	15.1	14.1	14.1	14.4	15.0	14.8	12.6
LREE/HREE	8.32	8.16	8.46	7.72	8.54	8.14	8.26	7.66	8.06
δEu	0.86	0.86	0.87	0.89	0.85	0.91	0.88	0.92	1.03
δCe	0.92	0.93	0.94	0.89	0.92	0.93	0.93	0.94	0.93
(La/Sm) _N	3.89	4.01	3.84	3.59	3.96	3.78	3.88	3.66	3.85
(La/Yb) _N	12.3	11.5	12.1	11.9	12.5	9.33	8.96	8.04	8.80
(Gd/Yb) _N	2.23	2.07	2.21	2.42	2.22	1.73	1.63	1.56	1.62
BaO	616	580	599	533	582	498	540	544	531
Hf	5.27	5.06	5.31	4.94	5.30	4.83	5.16	4.87	4.87
K	25818	24083	24033	21717	24016	20945	22613	20604	21443
Nb	10.2	5.59	12.6	10.2	26.9	10.3	8.52	7.89	12.8
Pb	17.6	29.2	35.4	21.3	17.5	22.3	22.4	17.2	20.6
Rb	108	98.8	98.2	76.6	106.1	73.1	77.0	75.0	75.3
Sr	409	391	414	415	398	417	415	449	453
Ta	0.76	0.77	1.09	0.69	0.54	0.71	0.65	0.61	0.65
Th	10.3	9.69	11.4	9.07	10.6	8.42	9.10	8.51	8.94
U	3.10	2.44	5.45	2.42	2.95	2.56	1.98	2.06	1.97
Zr	185	177	187	178	185	174	181	174	176
Co	17.2	16.4	16.9	19.1	17.2	17.6	18.8	19.5	16.2
Cr	18.9	14.9	19.6	19.9	17.1	17.6	20.2	17.1	15.6
Cs	5.39	4.79	3.47	2.61	3.26	3.08	3.60	3.26	3.11
Ni	16.2	16.2	15.1	22.1	15.9	17.0	17.0	19.3	15.4
Sc	12.8	13.2	14.5	15.1	12.6	13.4	12.1	15.3	14.6
V	115	97.1	132	124	118	112	110	125	125
Sr/Y	18.0	18.3	18.7	18.3	18.2	19.3	19.4	21.7	23.8
Rb/Sr	0.26	0.25	0.24	0.18	0.27	0.18	0.19	0.17	0.17
La/Nb	2.99	5.41	2.47	2.61	1.11	2.79	3.57	3.45	1.95
La/Ta	40.0	39.3	28.6	38.7	54.8	40.3	47.0	44.9	38.3

注: 样品由西南冶金分析测试中心分析测试。

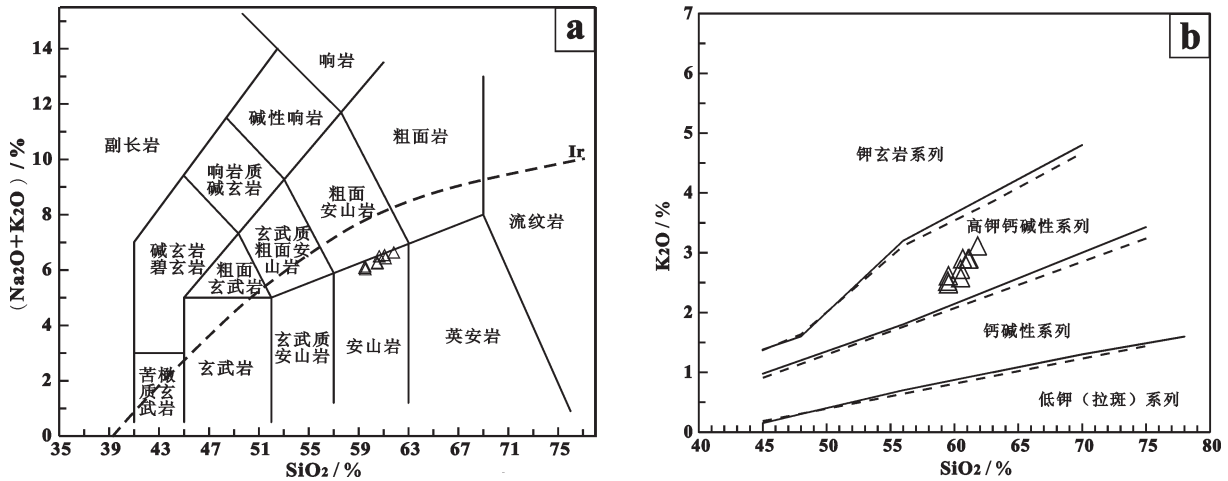


图4 荣那安山岩岩石类型和系列划分图解

a—TAS 图解(岩石分类据文献[27-28]; Ir 系列界线据文献[29], 上方为碱性, 下方为亚碱性); b—K₂O—SiO₂图解(据文献[30])

Fig.4 TAS and SiO₂-K₂O diagram of andesite from the Rongna area

a—TAS—diagram (after references [27-28]); Ir Series after reference [29], the higher part is alkaline, the lower part is subalkalic; b—K₂O—SiO₂ diagram (after reference [30])

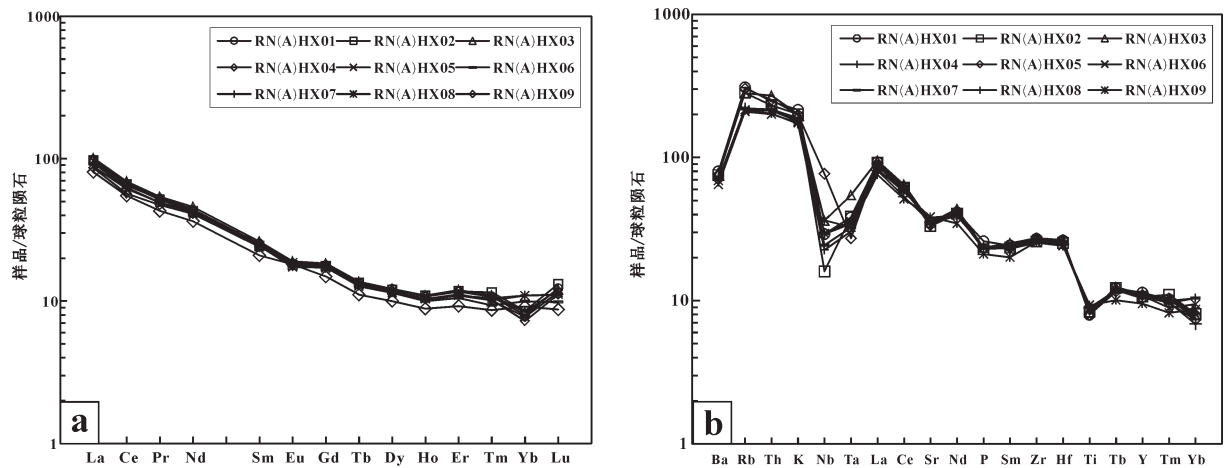


图5 荣那安山岩稀土元素球粒陨石标准化配图(a, 标准值据文献[31])和微量元素球粒陨石标准化蛛网图(b, 标准值据文献[32])

Fig. 5 The chondrite-normalized rare earth element patterns (a, normalized values after reference [32]) and chondrite-normalized spider diagram (b, normalized values after reference [33])

分布型式同样具有良好的 consistency, 均富集 Ba、Rb、Th、K 等大离子亲石元素(LILE), 相对亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素(HFSE), 显示出与俯冲作用有关的火山岩的特征^[33-34], 样品具有 Rb 正异常和明显的 Zr、Hf 负异常, 说明该安山岩形成的环境为俯冲岛弧环境^[35]。

4 讨论

4.1 安山岩的形成时代及其在矿床形成、保存中的作用

通过安山岩年代学研究, 获得了荣那安山岩

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(110.1±0.7) Ma, 代表其成岩年龄为早白垩世。此结果与前人在该地区的英安岩中获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄(111±1.4) Ma 基本一致^[8-9]。而在此安山岩覆盖之下的铁格隆南矿床荣那矿段的矿体中获含矿花岗闪长斑岩形成年代为(115.87±0.41) Ma^[37], 含矿石英闪长石英闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(120.2±1.0) Ma^[38], 此 2 组数据为该矿床的成岩年龄, 获辉钼矿 Re-Os 等时线年龄(119.0±1.4) Ma, 为铁格隆南矿床的早期成矿年龄^[38]。

表3 荣那安山岩样品微量元素特征与不同构造环境安山岩对比

Table 3 Trace element characteristics of andesite in the Rongna area and comparison with andesite from various tectonic settings

安山岩类	V	Sc	Nb	Y	Zr/Y	Ni/Co	Sc/Cr	Sc/Ni	Cr/V	Rb/Sr	Ba/Rb	Ba/Sr
荣那安山岩平均值(9个样品)	117.5	13.7	11.7	21.5	8.4	0.97	0.78	0.8	0.15	0.21	5.8	1.20
安第斯安山岩平均值*	122.0	17.0	10.0	15.0	14.6	1.40	0.36	0.6	0.64	0.11	10.0	1.05
大陆岛弧安山岩平均值*	135.0	20.0	9.4	22.0	5.4	0.95	0.61	1.1	0.15	0.09	8.2	1.16
大洋岛弧低钾安山岩平均值*	197.0	31.0	0.8	25.0	2.2	0.29	3.80	3.4	0.08	0.04	18.5	0.61
大洋岛弧其它安山岩平均值*	170.0	17.0	5.0	20.0	4.7	0.52	0.80	2.0	0.12	0.08	13.0	0.73

注: *参考数据来源于文献[36];V、Sc、Nb和Y的单位为 10^{-6} 。

同时,根据详细的钻孔岩心编录成果显示,安山岩底部存在一套古风化壳,表明该安山岩的形成应晚于铁格隆南矿床的成岩和成矿时间,显示其是在铁格隆南矿床形成、矿体出露地表接受剥蚀之后,安山岩喷发并角度不整合覆盖于矿体之上,是该高硫型浅成低温热液型铜(金)矿体得以保存基本完好的重要条件之一。

也即是意味着在最后一期成矿(116 Ma)之后,拉萨地体此时可能与南羌塘地体已经发生了碰撞拼贴,导致地壳抬升,致使形成较浅的叠加在斑岩型矿体之上的浅成低温热液型铜(金)矿体及其上的中下侏罗统色哇组围岩接受剥蚀。从成矿深度判断,此时矿床的剥蚀深度已经超过500 m,也即是在(116~110) Ma的6 Ma期间,羌塘地体南缘已经接受了约500 m的剥蚀。羌塘南缘是否受拉萨地体与南羌塘地体发生强烈的碰撞拼贴的影响并已经发生一定规模的初始隆升?还需要深入的研究。

4.2 安山质岩浆的源区特征

有学者提出,下地壳铁镁质岩石未与地幔发生相互作用,直接部分熔融形成的岩浆,或单纯的基性岩石部分熔融形成的岩浆,其 $Mg^{\#}$ 值不会超过45^[39-40],而 $Mg^{\#}>60$ 和 $Ni>100 \times 10^{-6}$ 的高镁安山质岩浆很可能与地幔橄榄石是平衡的,代表了地幔熔体^[41]。荣那安山岩的 $Mg^{\#}$ 值平均值为41.64,表明其可能由俯冲洋壳板片岩石部分熔融形成。根据Pb-Pb/Ce图解(图6)判断,荣那安山岩样品主要源区为大洋玄武岩区,表明其安山岩源区可能为大洋板片岩石。

微量元素地球化学特征显示,该地区安山岩样品均富集Ba、Rb、Th、K等大离子亲石元素(LILE),相对亏损Ta、Nb、P、Ti等高场强元素(HFSE)。在Y-Sr/Y图解(图7)中,所有样品均落入经典岛弧安山岩-英安岩-流纹岩区域,显示出岛弧火山岩的特征,也能够说明该安山岩源区可能与洋壳俯冲板片

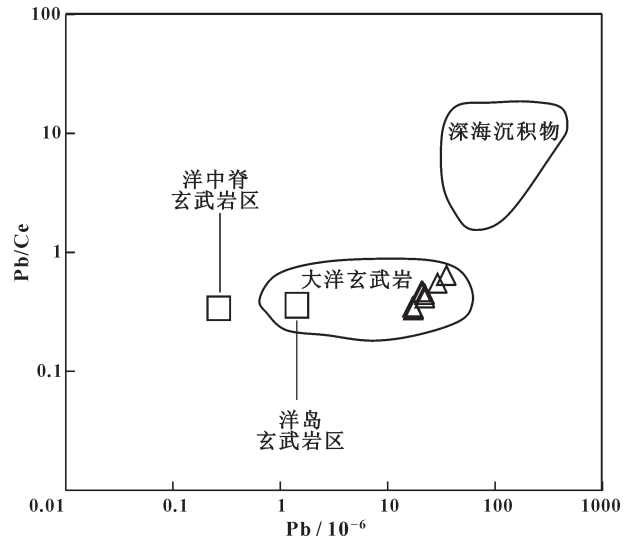


图6 荣那安山岩Pb-Pb/Ce图解(底图据文献[42])
Fig.6 Pb-Pb/Ce diagram of andesites in the Rongna area (after reference [42])

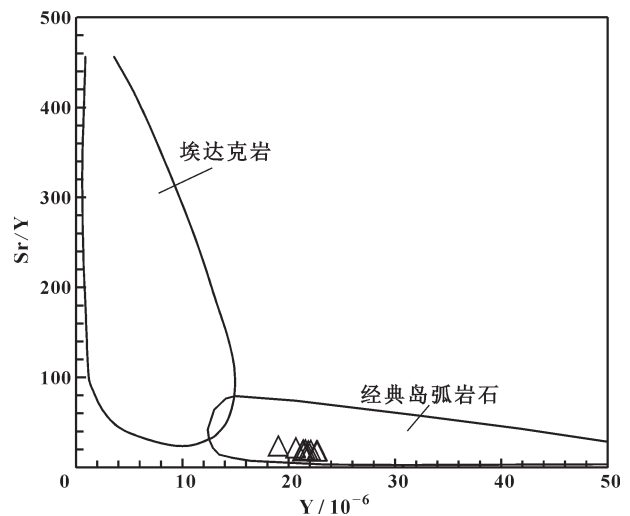


图7 荣那安山岩Y-Sr/Y图解
Fig.7 Y-Sr/Y diagram of andesites in the Rongna area

有关。这套具有洋壳冲板片性质的安山质岩浆形成的地球动力学背景,是羌塘地体与拉萨地体碰撞拼贴过程中,下插到南羌塘地体之下的班公湖—怒江洋俯冲板片脱水重熔,岩浆上侵的结果呢?还是早白垩世中期班公湖—怒江洋洋盆并未完全闭合,仍存在向北的俯冲作用,形成的安山岩浆?还需要进一步研究。

作为地壳混染指数,当 $La/Nb \ll 1$ 、 $La/Ta < 22$ 时,地壳的混染可以忽略不计^[43]。荣那地区安山岩的 La/Nb 值在 1.11~5.41,平均值为 2.93; La/Ta 值在 28.59~54.81,平均值为 41.31,可能代表了源区有地壳物质的参与,或者在岩浆上侵过程中存在后期陆壳物质的混染。

从 $La-La/Sm$ 图解(图8)看,荣那安山岩样品大致沿斜线分布,认为其源岩应为部分熔融作用的产物^[44]。

根据以上特征综合分析认为,荣那安山岩的源区应为单一源区,其形成应为洋壳俯冲板片在未与地幔物质发生相互作用的情况下部分熔融并在岩浆上升过程中混染了地壳物质。

4.3 安山岩产出的构造环境

根据全岩主、微量元素地球化学特征研究,荣那安山岩表现出活动大陆边缘的特征,并相似于大陆岛弧安山岩,样品富集 LILE,相对亏损 HFSE, Eu 弱负异常,显示出弧火山岩的亲缘性,说明其物质组成具有形成环境为俯冲岛弧的特点^[45]。文献[46]利用 $La/Yb-Sc/Ni$ 图解识别出低钾大洋岛弧安山岩、其他大洋岛弧安山岩、大陆岛弧安山岩和安第斯型活动大陆边缘安山岩等四种类型。在该图解中(图9),安山岩样品全部落入安第斯型活动大陆边

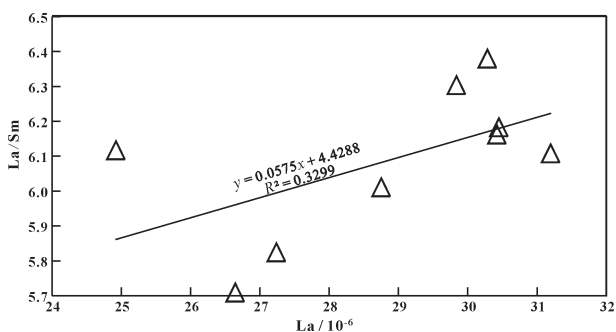


图8 荣那安山岩 $La-La/Sm$ 图解
Fig.8 $La-La/Sm$ diagram of andesites in the Rongna area

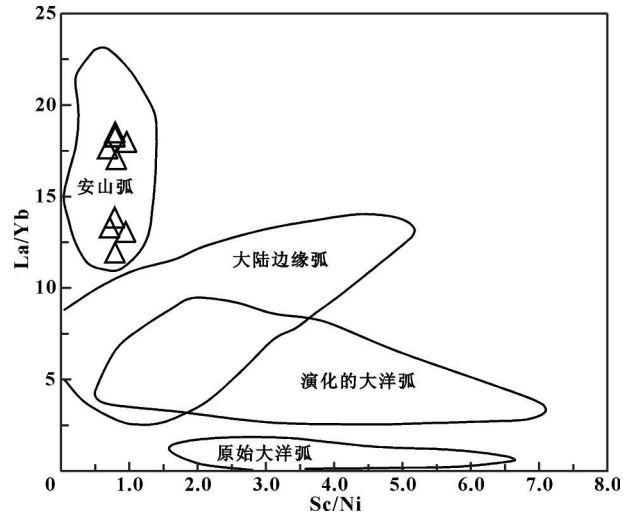


图9 荣那安山岩 $La/Yb-Sc/Ni$ 图解
Fig.9 $La/Yb-Sc/Ni$ diagram of andesites in the Rongna area

缘安山岩区中,表明荣那安山岩产出于活动大陆边缘环境。

岩石地球化学研究显示,荣那安山岩属于高钾钙碱性系列,与传统的以低钾、中钾钙碱性火山岩为主的岛弧火山岩^[47]和典型的钙碱性碰撞后弧火山岩^[48]不同,而与秘鲁南部和智利北部的中安第斯火山岩^[49]具有很强的相似性。安山岩样品的 La/Yb 比值均大于2,显示出活动大陆边缘火山岩的性质^[50]。

综上所述,荣那安山岩的岩石地球化学研究表明该安山岩属一套典型的大陆边缘型岛弧火山岩,形成于班公湖—怒江洋向北俯冲的消减带环境,是在此动力学背景下所诱发的岩浆产物。

5 结论

本文在开展野外地质调查的基础上,通过对出露于铁格隆南矿床荣那矿段的安山岩岩相学、年代学、岩石地球化学及构造环境、岩浆源区、岩石成因及与铁格隆南矿床成矿关系等方面的研究,得出如下结论:

(1)铁格隆南矿床荣那矿段的安山岩主要形成于 (110.1 ± 0.7) Ma,表明其成岩年龄为早白垩世,该安山岩的形成晚于铁格隆南矿床的成岩和成矿时间,是铁格隆南矿床得以完好保存的必要条件。

(2)岩石地球化学研究表明,荣那安山岩属高钾钙碱性系列岩石,轻、重稀土元素之间分馏作用较

强, Eu 弱负异常, 富集 LILE, 相对亏损 HFSE, 表明该安山岩的形成环境为俯冲岛弧环境。

(3) 安山岩的岩石成因应为洋壳俯冲板片在未与地幔物质发生相互作用的情况下, 部分熔融并在岩浆上升过程中混染地壳物质所形成。

(4) 荣那安山岩属一套典型的大陆边缘型岛弧火山岩, 形成于班公湖—怒江洋向北俯冲的消减带环境, 是在此动力学背景下所诱发的岩浆产物。

致谢: 笔者及所在的科研团队在野外工作、生活期间得到了中铝西藏矿业公司及西藏金龙矿业股份有限公司的大力支持和协助, 匿名审稿专家及责任编辑杨艳老师对论文提出了宝贵修改意见, 在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 桑隆康, 马昌前. 岩石学[M]. 第二版. 北京: 地质出版社, 2012: 168–180.
Sang Longkang, Ma Changqian (eds.). Petrology. 2nd Edit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2012: 168–180 (in Chinese).
- [2] Gill J B. Orogenetic Andesites and Plate Tectonic[M]. Verlag Berlin, Heidelberg: Springer, 1981: 1–202.
- [3] Crisp J A. Rates of magma emplacement and volcanic output[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1984, 20: 177.
- [4] Robyn T L. Miocene volcanism in eastern oregeon: An example of calc-alkaline volcanism unrelated to subduction[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1979, 5: 149–161.
- [5] Byerly G R, Melson W G, Vogt P R. Rhyo dacites, andesites, ferro-basalts and ocean tholeiites from the Galapagos spreading center[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 30: 215–221.
- [6] Byers C D, Muenow D W, Garcia M O. Volatiles in basalts and andesites from the Galapagos Spreading Center, 85° to 86° W[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1983, 47: 1551–1558.
- [7] 唐菊兴, 孙兴国, 丁帅, 等. 西藏多龙矿集区发现浅成低温热液型铜(金银)矿床[J]. 地球学报, 2014, 35(1): 6–10.
Tang Juxing, Sun Xingguo, Ding Shuai, et al. Discovery of the epithermal deposit of Cu (Au–Ag) in the Duolong ore concentrating area, Tibet[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2014, 35(1): 6–10(in Chinese with English abstract).
- [8] Sun Weidong, Liang Huaying, Ling Mingxing, et al. The link between reduced porphyry copper deposits and oxidized magmas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 103: 263–275.
- [9] Zhao Xiaobo, Xue Chunji, David T A Symons, et al. Microgranular enclaves in island-arc andesites: A possible link between known epithermal Au and potential porphyry Cu–Au deposits in the Tulasu ore cluster, western Tianshan, Xinjiang, China[J]. Journal of

Asian Earth Sciences, 2014, 85: 210–223.

- [10] 李光明, 段志明, 刘波, 等. 西藏班公湖—怒江结合带北缘多龙地区侏罗纪增生杂岩的特征及意义[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1256–1260.
Li Guangming, Duan Zhiming, Liu Bo, et al. The discovery of Jurassic accretionary complexes in Duolong area, northern Bangong Co–Nujiang suture zone, Tibet, and its geologic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(8): 1256–1260 (in Chinese with English abstract).
- [11] 段志明, 李光明, 张晖, 等. 西藏班公湖—怒江缝合带北缘多龙矿集区晚三叠世—侏罗纪增生杂岩结构及其对成矿地质背景的约束[J]. 地质通报, 2013, 32(5): 742–750.
Duan Zhiming, Li Guangming, Zhang Hui, et al. The formation and its geologic significance of Late Triassic–Jurassic accretionary complexes and constraints on metallogenic and geological settings in Duolong porphyry copper gold ore concentration area, northern Bangong Co–Nujiang suture zone, Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(5): 742–750 (in Chinese with English abstract).
- [12] 方向, 唐菊兴, 李彦波, 等. 西藏多龙矿集区拿若铜(金)矿床成矿元素空间分布规律及地球化学勘查模型[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 936–950.
Fang Xiang, Tang Juxing, Li Yanbo, et al. Metallogenic element spatial distribution of the Naruo copper (gold) deposit in the Duolong ore concentration area of Tibet and its geochemical exploration model[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 936–950(in Chinese with English abstract).
- [13] Pan Guitang, Wang Liquan, Li Rongshe, et al. Tectonic evolution of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 53: 3–14.
- [14] 耿全如, 潘桂棠, 王立全, 等. 班公湖—怒江带、羌塘地块特提斯演化与成矿地质背景[J]. 地质通报, 2011, 30(8): 1261–1274.
Geng Quanru, Pan Guitang, Wang Liquan, et al. Tethyan evolution and metallogenic geological background of the Bangong Co–Nujiang belt and the Qiangtang massif in Tibet[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(8): 1261–1274 (in Chinese with English abstract).
- [15] Li Jinxiang, Qin Kezhang, Li Guangming, et al. Geochronology, geochemistry, and zircon Hf isotopic compositions of Mesozoic intermediate–felsic intrusions in central Tibet: Petrogenetic and tectonic implications[J]. Lithos, 2014, 198–199: 77–91.
- [16] Li Jinxiang, Qin Kezhang, Li Guangming, et al. Magmatic–hydrothermal evolution of the Cretaceous Duolong gold–rich porphyry copper deposit in the Bangongco metallogenic belt, Tibet: Evidence from U–Pb and ⁴⁰Ar/³⁹Ar geochronology[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41: 525–536.
- [17] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA–MC–ICP–MS 锆石微区原位 U–

- Pb定年技术[J]. 矿床地质, 2009, 28(4): 481-492.
- Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(4): 481-492 (in Chinese with English abstract).
- [18] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 3.0 A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [19] Hoskin P W, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis.//Hancher J M, Hoskin P W. (eds.) [M]. Zircon Review Mineral Geochemistry, 2003, 53: 27-62.
- [20] 刘伟, 李奋其, 杨晓勇, 等. 西藏南木林县罗扎地区早白垩世流纹岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国地质, 2012, 39(5): 1151-1161.
- Liu Wei, Li Fenqi, Yang Xiaoyong, et al. Zircon U-Pb age and geochemistry of Early Cretaceous thoylite in Luozha area of Namling County, Tibet[J]. Geology in China, 2012, 39(5): 1151-1161(in Chinese with English abstract).
- [21] 徐通, 裴先治, 李瑞保, 等. 勉略构造带横观河地区张岩沟双峰式火山岩的地球化学特征: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 中国地质, 2013, 40(6): 1777-1792.
- Xu Tong, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Geochemical characteristics, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and tectonic significance of Zhangyangou bimodal volcanic rocks in Hengxianhe area, Mian-Lue tectonic zone[J]. Geology in China, 2013, 40(6): 1777-1792(in Chinese with English abstract).
- [22] Hoskin P W, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(4): 423-439.
- [23] Belousova E A, Griffin W L, Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contribution to Mineralogy and Petrology, 2002, 143: 602-622.
- [24] 张德志, 郭福生, 周万蓬, 等. 江西潭港流纹英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及地球化学特征[J]. 中国地质, 2014, 41(3): 784-796.
- Zhang Dezhi, Guo Fusheng, Zhou Wanpeng, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of Tangang rhyodacite in Jiangxi Province[J]. Geology in China, 2014, 41(3): 784-796(in Chinese with English abstract).
- [25] Hess P C. Origins of Igneous Rocks[M]. London: Harvard University Press, 1989, 109-275.
- [26] Pearce J A. Trace element discrimination diagrams for tectonic interpretation of granitic rock[J]. Petrology, 1984, 25: 956-983.
- [27] Le Bas M J, Le Maitre R W, Streckeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27: 745-750.
- [28] Le Maitre R W. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms[M]. 2nd Edition. London: Cambridge University Press, 2002, 33-39.
- [29] Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1971, 8: 523-548.
- [30] Pecerillo R, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contribution to Mineral Petrology, 1976, 50: 63-81.
- [31] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[M]// Henderson P(ed.). Rare Earth Element Geochemistry. Elsevier: 1984: 63-114.
- [32] Thompson R N. British Tertiary volcanic province[J]. Scottish Journal of Geology, 1982, 18: 59-107.
- [33] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[M]//Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. New York: John Wiley and Sons. 1982, 525-548.
- [34] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[M]//Saunders A D, Norry M J (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. London: Geological Society London Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [35] 李伍平, 路凤香, 李献华. 北京西山晚侏罗世粗安岩的成因及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志. 2001, 20(3): 247-254.
- Li Wuping, Lu Fengxiang, Li Xianhua. Genesis of Late Jurassic trachyandesite in Western Hills of Beijing and its geological implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 247-254(in Chinese with English abstract).
- [36] 胡享生, 莫宣学, 范例. 西藏江达古沟-弧-盆系的火山岩岩石学与地质学标志[M]//地质矿产部青藏高原地质文集编委会编, 青藏高原地质文集(20). 北京: 地质出版社, 1990, 1-15.
- Hu Xiangsheng, Mo Xuanxue, Fan Li. Jiangda Ancient Trench-arc-basin System, Xizang (Tibet): Evidences from volcanic rocks[C]//Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau Geology Anthology Editorial Board of Ministry of Geology and Mineral Resources (eds.). Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau(20). Beijing: Geological Publishing House, 1990, 1-15(in Chinese with English abstract).
- [37] 杨超, 唐菊兴, 王艺云, 等. 西藏铁格隆南浅成低温热液型-斑岩型 Cu-Au 矿床流体及地质特征研究[J]. 矿床地质, 2014, 33(6): 1287-1305.
- Yang Chao, Tang Juxing, Wang Yiyun, et al. Fluid and geological characteristics researches of Southern Tiegelong epithermal porphyry Cu-Au deposit in Tibet[J]. Mineral Deposits, 2014, 33(6): 1287-1305.
- [38] 方向, 唐菊兴, 宋扬, 等. 西藏铁格隆南超大型浅成低温热液铜(金、银)矿床的形成时代及其地质意义[J]. 地球学报, 2015, 36

- (2)168-176.
Fang Xiang, Tang Juxing, Song Yang, et al. Age of the south of Tiegelong epithermal deposit of Cu (Au- Ag), Tibet and its geological significance[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2015, 36(2) 168-176(in Chinese with English abstract).
- [39] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*. 1993, 362: 144-146.
- [40] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crustmantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36: 891-931.
- [41] Kelemen P B. Genesis of high Mg- number andesites and the continental- crust[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1995, 120(1): 1-19.
- [42] 程银行, 杨俊泉, 刘永顺, 等. 2012. 大兴安岭敖包查干地区安山岩年代学、地球化学研究[J]. *地质调查与研究*, 2012, 35(2): 118-127.
Cheng Yinhang, Yang Junquan, Liu Yongshun, et al. Age and geochemistry of andesites in the Qagan Obo area, Da Hinggan Mountains[J]. *Geological Survey and Research*, 2012, 35(2): 118-127(in Chinese with English abstract).
- [43] 周金城, 蒋少涌, 王孝磊, 等. 华南中侏罗世玄武岩的岩石地球化学研究——以福建藩坑玄武岩为例[J]. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(10): 927-936.
Zhou Jincheng, Jiang Shaoyong, Wang Xiaolei, et al. Study on petrogeochemistry of the middle Jurassic basalt, South of China: Study in the Pankeng basalt, Fujian Province[J]. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(10): 927-936 (in Chinese).
- [44] Allegre C J, Minster J F. Quantitative models of trace elements in igneous petrology[J]. *EPSL*, 1978, 38: 1-25.
- [45] 王玉往, 王京彬, 龙灵利, 等. 新疆北部大地构造演化阶段与斑岩-浅成低温热液矿床的构造环境类型[J]. *中国地质*, 2012, 39(3): 695-716.
Wang Yuwang, Wang Jingbin, Long Lingli, et al. Tectonic evolution stages of northern Xinjiang and tectonic types of porphyry-epithermal deposits[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3): 695-716(in Chinese with English abstract).
- [46] Bailey J C. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites[J]. *Chemical Geology*, 1981, 32: 139-154.
- [47] 邓晋福, 肖庆辉, 苏尚国, 等. 火成岩组合与构造环境: 讨论[J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 392-402.
Deng Jinfu, Xiao Qinghui, Su Shangguo, et al. Igneous petrotectonic assemblages and tectonic settings: A discussion[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(3): 392-402 (in Chinese with English abstract).
- [48] 莫宣学, 邓晋福, 董方浏, 等. 西南三江造山带火山岩-构造组合及其意义[J]. *高校地质学报*, 2001, 7(2): 121-138.
Mo Xuanxue, Deng Jinfu, Dong Fangliu, et al. Volcanic petrotectonic assemblages in Sanjiang Orogenic Belt, SW China and implication for tectonics[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2001, 7(2): 121-138(in Chinese with English abstract).
- [49] Ramos V. Plate tectonic setting of the Andean cordillera[J]. *Episodes*. 1999, 22: 183-190.
- [50] 吴根耀, 王晓鹏, 钟大赉. 藏东南地区早白垩世的安第斯型弧火山岩[J]. *岩石学报*. 1999, 15(3): 422-429.
Wu Genyao, Wang Xiaopeng, Zhong Dalai. Early Cretaceous Andean- type arc volcanics in SE Xizang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(3): 422-429(in Chinese with English abstract).