

西藏拉萨岩体黑云母二长花岗岩:锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及其地质意义

林业朋¹, 次旦², 赵洪飞¹, 杨欧², 李力¹, 巴次¹

(1. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队, 青海 格尔木 816000; 2. 西藏自治区地质矿产勘查开发局第六地质大队, 西藏 拉萨 851418)

摘要:拉萨岩体位于冈底斯铜、铁、铅锌多金属成矿带东段,是一个典型的复式岩体。通过对拉萨岩体开展详细的野外地质调查和岩相学观察,结合锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年、岩石地球化学分析等研究,认为拉萨岩体中代表性的黑云母二长花岗岩具有高 SiO_2 (含量为 69.94% ~ 76.62%, 平均为 72.18%)、高碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = 6.95\% \sim 8.44\%$, 平均为 7.44%)、较高 CaO (含量为 0.68% ~ 2.53%, 平均 2.00%) 的特点,相对富集 Ba、Rb、Th, 亏损 Nb、Ta、P、Ti, LREE 富集、HREE 亏损,轻、重稀土元素分馏强烈, Eu 负异常明显,是典型的钙碱性 I 型花岗岩。3 件黑云母二长花岗岩成岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为 $57 \pm 0.5 \text{ Ma}$, $58 \pm 1 \text{ Ma}$, $59 \pm 1 \text{ Ma}$, 表明其为古新世岩浆活动产物。综合研究认为,拉萨岩体黑云母二长花岗岩形成于印度与亚洲大陆主碰撞阶段 (65 ~ 45 Ma), 为底侵作用产生的大量壳源熔体与少量幔源熔体混合并发生一定程度分离结晶后的产物。陆内碰撞环境下的岩浆活动及元素的迁移和富集,为冈底斯成矿带内铜、金等矿产提供了良好的成矿条件。

关键词:古新世花岗岩;地球化学;锆石 U-Pb 定年;岩石成因;拉萨岩体

中图分类号: P588.12; P542.4

文献标识码: A

拉萨岩体位于南拉萨微地体 (SL)^[1], 前人对拉萨地体中的岩浆事件进行了大量研究, 莫宣学等^[2]研究了冈底斯中段的花岗岩及其中铁镁质微粒包裹体的岩石学和岩石地球化学, 认为花岗岩中有相当数量的地幔组分, 属于壳-幔混合产物。李胜荣等从矿物学角度出发, 对西藏曲水岩体的花岗闪长岩、石英闪长岩及微粒铁镁质包体中的斜长石、钾长石、角闪石、黑云母及暗色矿物包体等进行了研究, 揭示了岩浆混合作用的存在^[3]。阮冰等对曲水岩基花岗闪长岩和二长花岗岩中的斜长石环带的阴极发光图像特征和成分变化的详细研究, 进一步揭示冈底斯中段存在岩浆混合作用^[4]。拉萨岩体是典型的复式岩体, 属曲水岩基的一部分, 本文通过详细的野外地质调查、岩相学观察、年代学、同位素地球化学研究, 更进一步揭示拉萨岩体的深部形成过程及其与矽卡岩型矿床成矿作用关系。

1 区域地质特征

冈底斯带记录了大量古特提斯至新特提斯构造演化的岩浆事件, 形成了大量铜铅锌等矿产^[5]。冈底斯带位于班公湖-怒江缝合带 (BNS) 和印度河-雅鲁藏布缝合带 (IYS) 之间, 其中南拉萨微地体 (SL) 位于洛米堆-米拉山断裂带 (LMF) 以南^[6] (图 1a)。拉萨地体主要出露新生代岩体, 古新世-始新世是岩浆活动最为剧烈的时期^[7-9], 该时期的花岗岩类构成了曲水岩基主体。曲水岩基为复式岩体, 岩性以花岗闪长岩、石英闪长岩、二长花岗岩以及正长花岗岩为主, SHRIMP 锆石 U-Pb 测年显示, 曲水岩基的主体形成于 47 ~ 53 Ma, 是印度大陆与亚洲大陆碰撞的产物^[9-10]。

研究区内岩浆活动期次多, 侵入岩分布广泛, 岩石类型复杂。中性岩类、中-酸性岩、酸性岩类

收稿日期: 2020-03-12; 改回日期: 2020-05-27

作者简介: 林业朋 (1991—), 男, 助理工程师, 从事区域地质调查工作。E-mail: 546415841@qq.com。

资助项目: 中国地质调查局成都地质调查中心冈底斯-喜马拉雅铜矿资源基地调查项目西藏达孜地区 1:5 万区域地质调查 (121201010000150014-05、DD20160015-11)

在研究区内均有出露,分布总面积达 371.8 km²。总体呈东西向展布,与主构造线方向一致,平面形态多呈椭圆形、带状,时代属古新世、中新世。

研究区主要出露地层有多底沟组、林布宗组、楚木龙组、塔克那组、典中组。研究区新生代构造活动活跃,可分为三个阶段:第一阶段以发育剪切变形褶皱为主;第二阶段以发育直立平缓倾伏等厚开阔褶皱、直立弯滑褶皱及近东西向高角度脆性剪切断裂为特征;第三阶段发育平移断裂、高角度正断层。

2 岩体地质特征

拉萨岩体为复式岩体,出露面积 192.82 km²,是曲水岩基的一部分。它由 20 个侵入体组成(图 1b),主要分布于拉萨河谷北侧一带,总体呈近东西向椭圆形展布,岩性总体为中酸性-酸性岩类,主要岩性为中细粒花岗闪长岩、中细粒黑云母二长花岗岩、中细粒石英闪长岩、中细粒花岗岩,中细粒黑云母二长花岗岩、中细粒花岗岩与中细粒花岗闪长

岩为涌动接触关系。岩体与围岩接触带多形成接触交代矽卡岩蚀变带。蚀变带规模广泛,与其有关的矿化以铜、铅、锌、钼矿化为主。

本次研究以拉萨岩体中的黑云母二长花岗岩为对象。岩体出露于拉萨市北羊达沟北东面一带,呈大岩株产出,主要侵入于中下侏罗统叶巴组 and 上侏罗统多底沟组地层。岩石野外地质特征及镜下特征见图 2。

中细粒黑云母二长花岗岩呈灰白色,岩石具糜棱岩化不等粒花岗结构,旋转定向构造。主要矿物为斜长石(45%~50%),钾长石(10%~15%),石英(35%~40%),黑云母(5%~10%);副矿物为锆石、磷灰石、磁铁矿。斜长石呈自形、半自形板状,被绢云母、绿帘石交代,内带蚀变强烈,聚片双晶和韵律环带构造发育,为中更斜长石。钾长石呈它形板状,被高岭土交代,颗粒脏,隐约条纹。石英呈它形粒状,颗粒包裹、半包裹斜长石。黑云母呈片状,被绿泥石交代,少呈假象。岩石受剪应力作用,产生糜棱岩化,具轻微破碎旋转状定向分布。

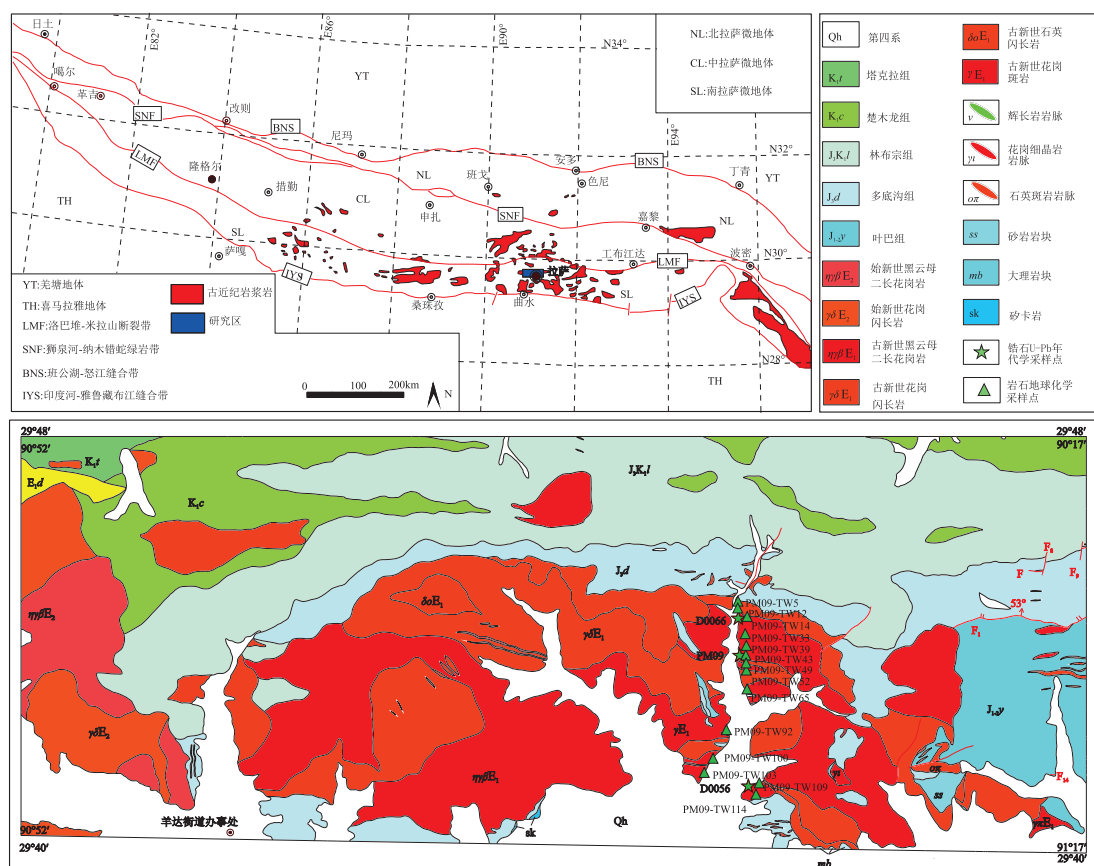


图 1 拉萨岩体大地构造位置(据文献[11])及地质简图

Fig. 1 Tectonic location (Modified after reference [11]) and geological sketch of the Lhasa rock mass

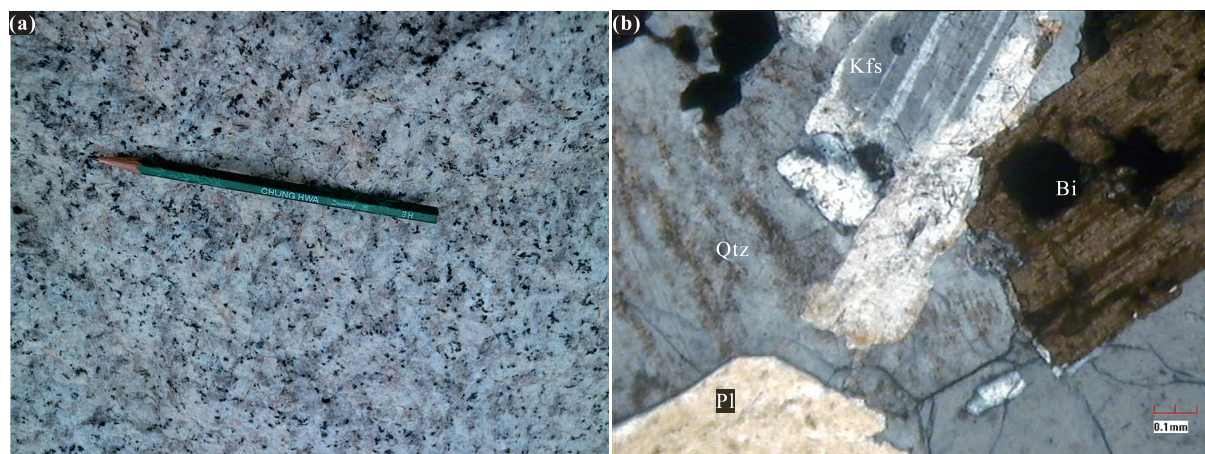


图2 黑云母二长花岗岩野外照片(a)、镜下薄片特征(b)

(Bi-黑云母;Qtz-石英;Kfs-钾长石;Pl-斜长石)

Fig. 2 The outcrop photo(a) and microscopic photo of biotite adamellite(b)

3 分析方法

用于主量、微量元素分析的新鲜黑云母二长花岗岩采集自多底沟内(图1b),分析测试在西南冶金地质测试所进行。主量元素采用X荧光法、重量法、滴定法、离子选择性电极法、高频红外吸收法等方法测试,分析仪器为AxiosX荧光仪,分析精度为2%。微量元素使用ICP-MS测试,分析仪器为等离子质谱仪(NexLON 300x ICP-MS)分析,分析精度优于5%,具体分析流程、操作步骤参见Liu *et al.* [12]。

本文共采集了3件锆石U-Pb同位素测年样品,编号分别为D0056、D0066和PM09-TW43,采样位置见图1b。样品经粉碎,用浮选和电磁选方法进行分选,再在双目镜下挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒,制靶并进行透射光、反射光和阴极发光显微照相。其中主检设备为iCAPQ电感耦合等离子体质谱仪(YQ108)及激光烧蚀Compex Pro ArF Geolas(YQ061)。实验室洁净度<1000级、温度20~25℃、湿度40%~45%,选择具有清楚震荡环带的锆石进行U-Pb同位素测试。锆石U-Pb同位素定年实验在中国冶金地质总局山东局测试中心进行。锆石微量元素含量利用多个USGS参考玻璃(BCR-2G,BIR-1G)作为多外标、Si作内标的方法进行定量计算[13]。这些USGS玻璃中元素含量的推荐值据GeoReM数据库。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[14]。锆石标准91500的U-Th-Pb同位素比值推荐值据[15]。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[16]完成。岩石地球化学图由软件Geokit[17]完成。

4 分析结果

4.1 锆石U-Pb年龄

3件样品锆石的CL图像多为柱状或长柱状,显示出清晰的震荡环带结构(图3a、c、e),表明这些锆石为典型的岩浆成因。

黑云母二长花岗岩样品D0056锆石的Th含量在 $(126.25 \sim 583.71) \times 10^{-6}$ (平均为 244.50×10^{-6}),U含量在 $(225.42 \sim 656.49) \times 10^{-6}$ (平均为 366.90×10^{-6}),Th/U比值为0.46~0.89;样品D0066锆石Th含量在 $(78.42 \sim 785.84) \times 10^{-6}$ (平均为 305.38×10^{-6}),U含量在 $(131.55 \sim 1412.08) \times 10^{-6}$ (平均为 435.96×10^{-6}),Th/U比值为0.46~1.24;样品PM09-TW43锆石Th含量为 $(78.66 \sim 996.33) \times 10^{-6}$ (平均为 422.40×10^{-6}),U含量在 $168.72 \sim 1212.92 \times 10^{-6}$ (平均为 635.70×10^{-6}),Th/U比值为0.41~0.92。3件样品Th与U两者间正相关性明显,与岩浆锆石Th/U比值(>0.1)相当[18]。表明3件拉萨岩体黑云母二长花岗岩样品的锆石均为岩浆成因锆石。

黑云母二长花岗岩中24颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄在56.73~60.09Ma之间,加权平均年龄为 $59 \pm 1\text{Ma}$ (MSWD=0.46)(图3a);样品D0066中23颗锆

石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $57.06 \sim 59.67\text{Ma}$, 加权平均年龄为 $58 \pm 1\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.26$) (图 3d); 样品 PM09-TW43 中 19 颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $56.37 \sim 58.41\text{Ma}$, 加权平均年龄为 $57 \pm 0.5\text{Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.20$) (图 3f)。3 件样品锆石 U-Pb 定年结果在 $57 \sim 59\text{Ma}$ 之间, 表明拉萨岩体形成于古新世。具体测定成果见表 1。

4.2 主量元素

岩石的主量元素分析结果见表 2。黑云母二长花岗岩的 SiO_2 含量为 $69.94\% \sim 76.62\%$, 平均为 72.18% , 与同类岩石平均 SiO_2 含量一致。同时, 岩石富 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, 含量为 $6.95\% \sim 8.44\%$, 平均为 7.44% ; K_2O 含量为 $3.03\% \sim 5.25\%$, 平均为 3.82% ; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 $0.77 \sim 1.65$, 平均为

1.07 ; 岩石的 CaO 较高, 含量为 $0.68\% \sim 2.53\%$, 平均 2% 。16 件黑云母二长花岗岩的固结指数 (SI) 介于 $0.37 \sim 7.29$ 之间, 平均为 4.94 ; 镁铁指数 (MI) 介于 $76.35 \sim 97.48$, 平均为 84.11 ; 分异指数 (DI) 介于 $80.33 \sim 94.28$, 平均为 84.77 , 显示岩石经历了较强的结晶分异作用。岩石的 TAS 图解投点落入花岗岩类中 (图 4a)。里特曼指数 σ_{43} 平均为 1.89 (< 4 , 为钙碱性), 在钙碱性指数图 (图 4b) 中显示钙碱性系列岩石的特征。黑云母二长花岗岩 Al_2O_3 含量为 $12.42\% \sim 14.73\%$, 平均为 13.89% , 在 $\text{A}/\text{NK}-\text{A}/\text{CNK}$ 图解中, 16 件样品显示过铝质特征 (图 4c)。 TiO_2 含量介于 $0.08\% \sim 0.37\%$ 之间, 平均为 0.26% ; MgO 变化范围在 $0.11\% \sim 0.8\%$ 之间, 含量较低。

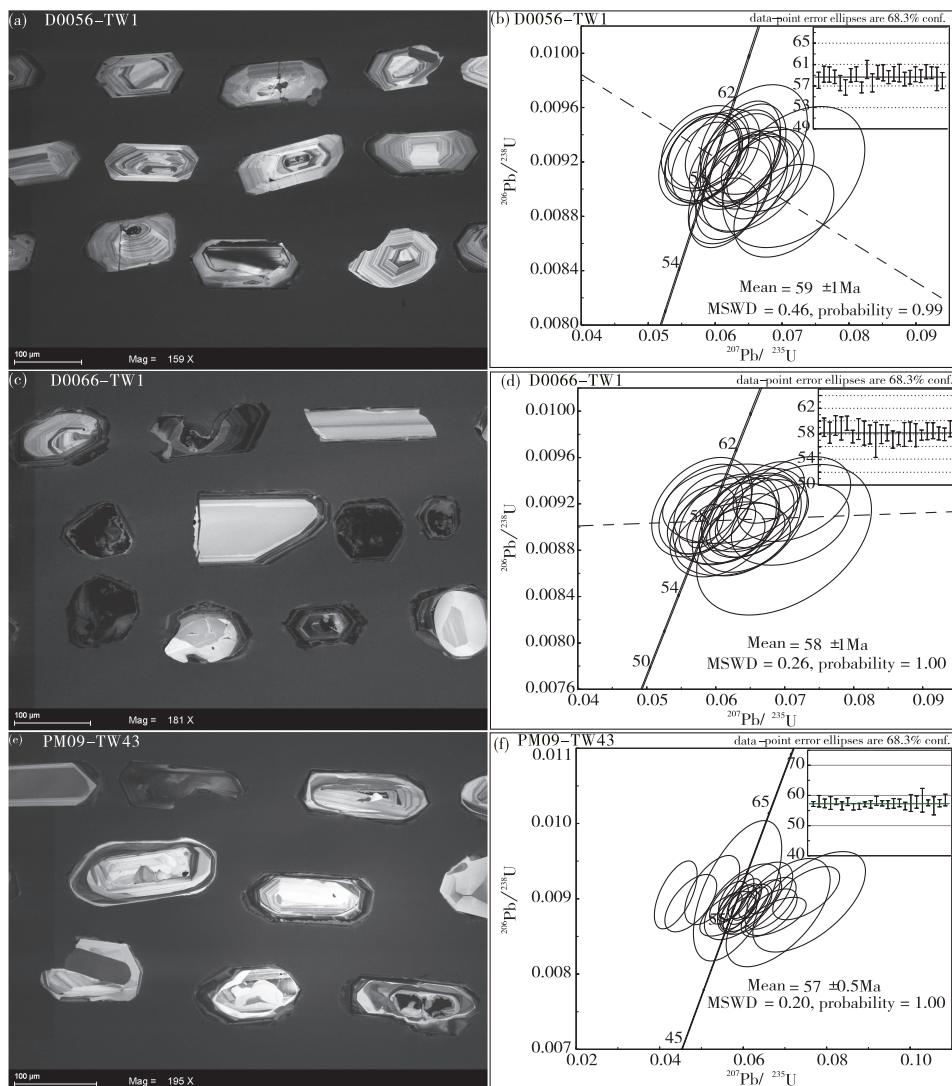


图3 锆石 CL 图像和 U-Pb 定年谐和图

Fig. 3 CL images of measured zircons and U-Pb concordia age diagrams of zircons

表1 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析结果
Table1 Analysis results of zircons for LA-ICP-MS U-Pb dating

测试号	Pb	²³² Th	²³⁸ U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ U				²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U				年龄 (Ma)				谐和度			
					比值		±σ		比值		±σ		比值		±σ		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
					±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	±σ	
24 个测点的加权平均年龄为 59 ± 1Ma, MSWD = 0.46																				
D0056-TW1-1	3.67	218.84	317.88	0.69	0.05	0.00	0.06	0.01	0.01	0.00	375.98	188.87	63.85	5.02	58.07	1.51	90%			
D0056-TW1-3	2.77	184.76	234.82	0.79	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	255.62	166.65	62.58	3.89	59.21	1.50	94%			
D0056-TW1-4	4.44	322.50	364.07	0.89	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	5.655	159.25	56.99	3.90	59.15	1.42	96%			
D0056-TW1-5	5.08	355.67	420.35	0.85	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	235.25	171.28	61.58	4.02	58.71	1.26	95%			
D0056-TW1-6	4.12	280.98	346.97	0.81	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	255.62	140.72	61.82	3.56	57.55	1.43	92%			
D0056-TW1-7	2.98	163.45	262.26	0.62	0.06	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	594.47	159.24	68.97	4.68	56.74	1.44	80%			
D0056-TW1-8	4.95	230.79	443.74	0.52	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	53.8	157.39	57.81	3.21	59.00	1.26	97%			
D0056-TW1-9	4.55	233.61	397.82	0.59	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	55.65	138.88	57.52	3.69	59.22	1.37	97%			
D0056-TW1-10	7.88	583.71	656.49	0.89	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	220.44	133.32	60.37	3.25	56.73	1.02	93%			
D0056-TW1-11	3.01	126.25	271.78	0.46	0.05	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	342.65	222.20	64.69	5.03	60.09	1.70	92%			
D0056-TW1-12	2.63	129.29	236.85	0.55	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	216.74	149.98	61.28	3.91	57.59	1.70	93%			
D0056-TW1-13	4.13	220.31	360.05	0.61	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	94.535	133.31	60.23	3.51	59.59	1.27	98%			
D0056-TW1-14	4.62	212.37	415.41	0.51	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	298.21	144.43	63.54	3.78	59.48	1.51	93%			
D0056-TW1-15	5.38	357.60	445.78	0.80	0.05	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	298.21	137.02	63.95	3.67	58.66	1.21	91%			
D0056-TW1-16	4.56	241.71	401.76	0.60	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	35.28	153.69	58.02	3.95	59.28	1.37	97%			
D0056-TW1-17	4.46	211.74	392.75	0.54	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	242.66	147.20	62.77	3.79	59.42	1.64	94%			
D0056-TW1-18	3.59	160.36	320.39	0.50	0.05	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	466.71	144.43	65.32	3.38	58.30	1.28	88%			
D0056-TW1-19	4.44	281.94	369.06	0.76	0.06	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	479.67	152.76	67.05	4.09	58.64	1.27	86%			
D0056-TW1-20	3.66	173.74	323.19	0.54	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	275.99	148.13	62.97	3.67	59.20	1.39	93%			
D0056-TW1-21	4.54	218.34	386.73	0.56	0.05	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	387.09	144.43	65.97	3.88	58.85	1.20	88%			
D0056-TW1-22	4.42	200.49	390.56	0.51	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	35.28	174.05	57.77	4.15	59.68	1.32	96%			
D0056-TW1-23	4.88	267.78	422.30	0.63	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	13.06	153.69	57.53	3.36	59.48	1.10	96%			
D0056-TW1-24	2.81	193.73	225.42	0.86	0.06	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	583.36	248.12	70.36	6.64	58.33	2.19	81%			
D0056-TW1-25	4.68	298.17	399.06	0.75	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	283.395	137.02	63.43	4.01	58.02	1.51	91%			
23 个测点的加权平均年龄为 58 ± 1Ma, MSWD = 0.26																				
D0066-TW1-1	2.62	164.02	222.56	0.74	0.05	0.00	0.06	0.01	0.01	0.00	105.645	214.79	61.30	6.27	59.04	1.44	96%			
D0066-TW1-2	2.53	173.84	209.56	0.83	0.06	0.01	0.06	0.00	0.01	0.00	450.045	205.53	61.02	4.58	58.19	1.66	95%			
D0066-TW1-3	3.40	176.64	281.51	0.63	0.06	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	546.33	188.87	69.96	5.15	59.30	1.54	83%			
D0066-TW1-4	1.71	109.90	149.05	0.74	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	77.87	175.90	57.26	4.62	58.85	1.81	97%			
D0066-TW1-5	7.60	520.07	637.72	0.82	0.05	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	366.72	118.51	66.49	3.24	59.67	1.12	89%			
D0066-TW1-6	6.48	612.67	494.29	1.24	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	327.835	131.47	63.32	3.57	57.58	0.99	90%			
D0066-TW1-7	2.71	184.12	218.54	0.84	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	172.305	177.75	57.71	4.25	58.75	1.63	98%			
D0066-TW1-8	2.88	203.32	231.43	0.88	0.06	0.00	0.07	0.01	0.01	0.00	464.86	154.61	64.32	4.95	58.12	1.89	89%			
D0066-TW1-9	7.88	350.83	617.19	0.57	0.06	0.00	0.07	0.01	0.01	0.00	487.08	172.20	69.46	5.34	57.90	1.48	81%			
D0066-TW1-10	1.68	81.48	160.87	0.51	0.06	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	527.815	228.68	68.61	7.94	57.06	2.74	81%			

续表 1

测试号	Pb	²³² Th 含量(×10 ⁻⁶)	²³⁸ U	Th/U	207Pb/206U				207Pb/235U				206Pb/238U				谐和度	
					比值		±σ		比值		±σ		比值		±σ		206Pb/238U	±σ
					比值	±σ	比值	±σ	比值	±σ	比值	±σ						
24 个测点的加权平均年龄为 59 ± 1 Ma, MSWD = 0.46																		
D0066-TW1-11	2.64	208.79	214.04	0.98	0.05	0.00	0.06	0.01	0.01	0.00	261.175	197.20	60.58	4.84	57.96	1.47	95%	
D0066-TW1-12	3.78	180.71	341.12	0.53	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	100.09	127.76	57.28	3.19	58.15	1.24	98%	
D0066-TW1-14	11.43	514.56	1045.21	0.49	0.05	0.00	0.06	0.01	0.01	0.00	238.955	199.05	61.52	5.29	57.11	1.34	92%	
D0066-TW1-15	10.87	785.84	879.79	0.89	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	250.065	118.50	61.45	3.00	57.29	0.99	92%	
D0066-TW1-16	1.52	104.16	131.55	0.79	0.06	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00	500.04	211.09	63.47	4.97	57.90	1.87	90%	
D0066-TW1-17	2.69	160.06	236.74	0.68	0.05	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	388.94	155.54	64.43	4.02	58.36	1.49	90%	
D0066-TW1-18	1.65	78.42	152.86	0.51	0.05	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00	298.21	233.31	60.20	4.87	57.77	1.82	95%	
D0066-TW1-19	15.06	652.25	1412.08	0.46	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	50.095	74.07	57.72	1.69	57.81	0.79	99%	
D0066-TW1-20	2.69	148.06	241.80	0.61	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	300.06	174.05	63.60	4.22	58.42	1.34	91%	
D0066-TW1-22	4.60	285.49	400.01	0.71	0.05	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	342.65	144.43	65.68	4.16	58.49	1.24	88%	
D0066-TW1-23	8.12	705.37	675.58	1.04	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	301.91	109.24	63.60	2.96	58.07	1.01	90%	
D0066-TW1-24	8.04	381.71	741.93	0.51	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	187.12	98.13	60.96	2.47	57.93	0.99	94%	
D0066-TW1-25	3.91	241.51	331.63	0.73	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	38.985	129.62	58.15	3.16	58.80	1.25	98%	
19 个测点的加权平均年龄为 57 ± 0.5 Ma, MSWD = 0.20																		
PM09-TW43-1	11.61	723.41	1017.08	0.71	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	200.075	77.77	59.50	2.09	57.16	0.81	95%	
PM09-TW43-3	1.89	78.66	168.72	0.47	0.05	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	413.01	140.73	65.28	3.85	57.36	1.45	87%	
PM09-TW43-4	5.28	308.67	494.13	0.62	0.05	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00	261.175	240.72	58.85	5.79	57.49	2.12	97%	
PM09-TW43-6	6.69	460.99	542.69	0.85	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	368.57	108.32	63.87	2.59	57.92	0.95	90%	
PM09-TW43-7	11.45	523.57	1128.60	0.46	0.05	0.00	0.07	0.00	0.01	0.00	387.09	149.06	64.97	4.21	56.54	1.35	86%	
PM09-TW43-8	4.72	216.56	421.84	0.51	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	100.09	109.24	57.43	2.69	57.94	1.29	99%	
PM09-TW43-10	13.03	737.35	1174.07	0.63	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	190.82	130.54	58.28	2.56	56.37	1.03	96%	
PM09-TW43-11	10.53	627.25	926.49	0.68	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	5.655	94.44	55.95	1.87	57.06	0.81	98%	
PM09-TW43-12	11.19	632.94	1041.60	0.61	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	77.87	98.14	57.97	2.69	57.04	1.24	98%	
PM09-TW43-13	5.93	421.50	455.98	0.92	0.06	0.00	0.07	0.01	0.01	0.00	733.34	155.54	73.34	4.98	58.21	1.49	77%	
PM09-TW43-14	9.19	463.14	825.66	0.56	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	257.47	90.73	61.39	2.22	57.40	0.88	93%	
PM09-TW43-15	3.19	173.43	275.53	0.63	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	350.055	176.83	59.64	3.94	56.97	1.32	95%	
PM09-TW43-17	7.79	389.59	727.68	0.54	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	153.79	107.39	59.27	2.64	57.52	1.28	97%	
PM09-TW43-19	3.12	157.22	256.85	0.61	0.06	0.01	0.08	0.01	0.01	0.00	598.17	238.86	73.99	8.39	57.49	2.82	74%	
PM09-TW43-20	2.17	87.05	196.84	0.44	0.05	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00	300.06	237.01	61.75	5.66	57.81	2.03	93%	
PM09-TW43-21	2.12	90.02	219.36	0.41	0.05	0.01	0.06	0.01	0.01	0.00	13.06	262.93	57.71	6.69	58.41	3.93	98%	
PM09-TW43-22	9.29	629.98	799.17	0.79	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	188.97	111.10	59.28	2.41	57.55	0.97	97%	
PM09-TW43-23	29.95	996.33	1212.92	0.82	0.06	0.01	0.07	0.01	0.01	0.00	477.82	282.37	66.98	7.81	56.57	3.03	83%	
PM09-TW43-24	6.02	308.00	535.14	0.58	0.05	0.00	0.06	0.00	0.01	0.00	20.47	133.32	55.76	2.93	57.42	1.20	97%	

测试单位: 中国冶金地质总局山东局测试中心

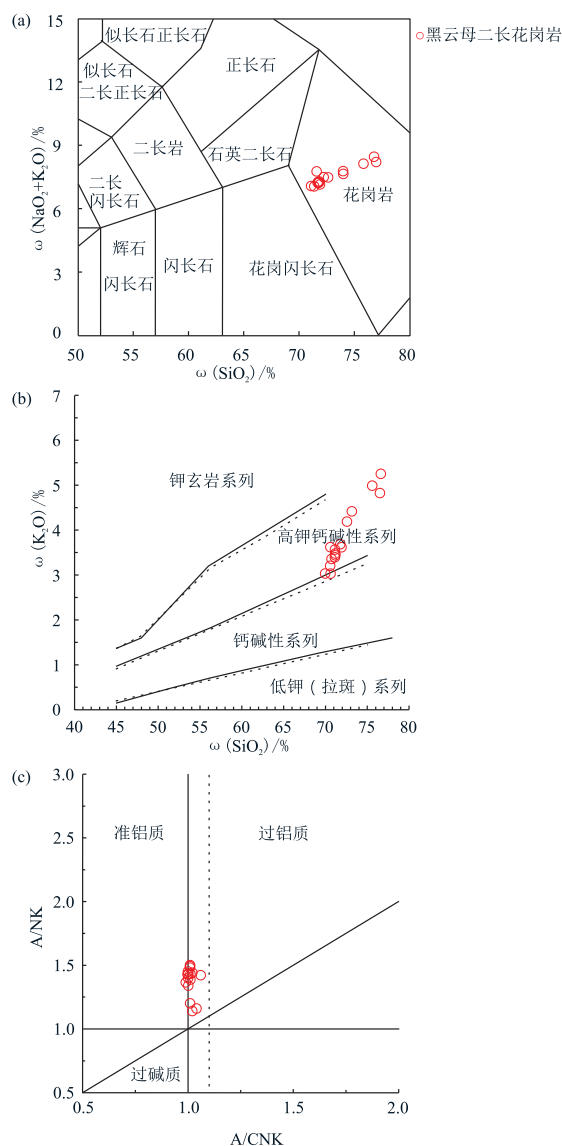


图4 岩石类型与系列划分图解

a. SiO_2 -($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)图解^[19]; b. SiO_2 - K_2O 图解(实线数据^[20], 虚线数据^[21]); c. A/NK - A/CNK 图解^[22]

Fig. 4 Diagrams showing rock types and rock series

4.3 微量元素

岩石稀土元素、微量元素分析结果见表2。

16件黑云母二长花岗岩样品稀土元素含量 $\Sigma\text{REE} = 63.87 \sim 172.85 \times 10^{-6}$, 平均为 112.64×10^{-6} , 显示为中酸性岩石特征。LREE/HREE比值为 $4.44 \sim 18.21$, 平均 9.17 , 表明轻稀土分馏程度比重稀土分馏程度高, 轻稀土相对富集。 La_N/Yb_N 为 $4.16 \sim 16.62$ (平均为 9.50), La_N/Sm_N 为 $3.59 \sim 9.80$ (平均为 4.53), Gd_N/Yb_N 为 $0.70 \sim 1.73$ (平均为 1.48), 显示出轻、重稀土分异较明显。稀土元素分异程度高, 反映源区地壳成熟较高^[23]; 稀土元素

球粒陨石标准化分配型式图呈现右倾斜(图5a), δEu 为 $0.34 \sim 1.04$ (平均为 0.72), δCe 为 $0.97 \sim 1.19$ (平均为 1.01), 具有一定程度的铕负异常特征, 岩石存在含钙造岩矿物的迁移。

拉萨岩体的黑云母二长花岗岩样品均具有相似的微量元素特征, 富集大离子亲石元素(LILE)、K、Ba、Th、Rb, 相对亏损Nb, 高场强元素HFSE里Ta、Ti、Sr元素出现负异常。微量元素原始地幔标准化蛛网图右倾斜(图5b), 显示为岛弧型花岗岩地球化学特征^[24]。微量元素中, Nb含量为 $(5.32 \sim 10.07) \times 10^{-6}$, Zr含量为 $(51.87 \sim 144.06) \times 10^{-6}$, Ta含量为 $(0.49 \sim 0.88) \times 10^{-6}$, Hf含量为 $2.45 \times 10^{-6} \sim 4.37 \times 10^{-6}$ 。Nb/Ta比值($6.17 \sim 13.17$, 平均 10.97 , 小于上地壳平均值 12)低, Zr/Hf比值($27.05 \sim 36.11$, 平均 32.68 , 小于 $33 \sim 40$)较低, 显示黑云母二长花岗岩可能具有岩浆源区受到地壳物质的混染和交代特征^[25]。

5 讨论

5.1 拉萨岩体的形成时代

大量研究显示, 印度大陆与亚洲大陆的碰撞发生在早古近纪($65 \sim 50\text{Ma}$)。这一时期是冈底斯岩浆作用的爆发期, 所形成的侵入岩构成了冈底斯岩基主体^[27-30]。该时期壳源花岗岩岩浆与幔源基性岩浆之间发生大规模的岩浆混合^[31-33]。本文拉萨岩体中黑云母二长花岗岩的定年结果为 $57 \pm 0.5\text{Ma}$, $58 \pm 1\text{Ma}$, $59 \pm 1\text{Ma}$, 反映了拉萨岩体的主体形成时代为古新世。

花岗质岩石的成因和大地构造之间具有密切的关系^[34]。冈底斯南部花岗岩具有I型花岗岩特征, 被莫宣学等^[35]认为是安第斯型汇聚边缘产物。研究表明, 晚白垩—古新世时期, 新特提斯洋壳俯冲基本趋于尾声, 并逐渐向陆陆碰撞作用转换^[36-39]。前人资料将青藏高原中—新生代构造—岩浆活动划分为3个阶段并分别对应相应的大地构造环境: (1)碰撞前新特提斯洋板块俯冲阶段($\sim 70/65\text{Ma}$); (2)同碰撞阶段($70/65\text{Ma} \sim 40\text{Ma}$); (3)后碰撞阶段($40\text{Ma} \sim \text{至今}$)^[40]。最近研究成果将冈底斯岩浆弧的形成划分为5个期, 即新特提斯洋的早期俯冲期、新特提斯洋中脊俯冲期、新特提斯洋晚期俯冲期、印度—亚洲大陆碰撞期和碰撞后^[26]。本文拉萨岩体黑云母二长花岗岩年龄显示其形成于同碰撞期。

表 2 岩石主量元素(%)和稀土、微量元素($\times 10^{-6}$)分析结果
Table 2 Analysis results of whole-rock major oxides(%), rare earth elements and trace elements ($\times 10^{-6}$)

原样编号	D0056- GS1	D0066- GS1	PM09- GS5	PM09- GS12	PM09- GS14	PM09- GS33	PM09- GS39	PM09- GS43	PM09- GS49	PM09- GS52	PM09- GS65	PM09- GS92	PM09- GS100	PM09- GS103	PM09- GS109	PM09- GS114
岩性	黑云母二 长花岗岩	黑云母 二长花 岗岩	细粒二 长花 岗 岩	花岗岩 长岩	中粗粒 花岗岩 长岩	二长花 岗 岩	中细粒 二长花 岗 岩	中细粒 二长花 岗 岩	二长花 岗 岩	黑云母 二长花 岗 岩	中细粒 二长花 岗 岩	中细粒 二长花 岗 岩	中粗粒 二长花 岗 岩	中粗粒 二长花 岗 岩	细粒二 长花 岗 岩	黑云母 二长花 岗 岩
SiO ₂	70.56	72.57	73.14	69.94	71.09	71.11	70.70	71.12	71.15	70.60	70.55	75.59	76.49	71.90	76.62	71.76
Al ₂ O ₃	14.74	13.68	14.13	14.48	14.19	14.22	14.14	14.14	14.10	14.38	14.45	12.57	12.42	13.94	12.44	14.15
Fe ₂ O ₃	0.94	0.59	0.37	0.89	1.17	0.77	1.03	0.66	0.72	0.68	0.76	0.50	0.31	0.82	0.48	0.73
FeO	1.23	0.96	1.40	2.36	1.91	2.28	2.28	2.65	2.38	2.70	2.49	1.48	1.06	1.88	0.95	2.22
MgO	0.67	0.44	0.19	0.80	0.71	0.65	0.68	0.70	0.69	0.75	0.74	0.20	0.11	0.56	0.04	0.61
CaO	2.32	1.93	1.88	2.51	2.25	2.37	2.31	2.29	2.44	2.46	2.53	1.05	0.68	2.18	0.70	2.09
Na ₂ O	4.03	3.45	3.16	3.92	3.64	3.79	3.74	3.71	3.65	3.93	3.76	3.10	3.33	3.78	3.19	3.77
K ₂ O	3.62	4.19	4.42	3.03	3.56	3.39	3.36	3.48	3.44	3.03	3.20	4.99	4.82	3.62	5.25	3.68
TiO ₂	0.30	0.23	0.14	0.37	0.33	0.31	0.32	0.32	0.31	0.34	0.34	0.16	0.12	0.28	0.08	0.28
MnO	0.07	0.03	0.02	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.10	0.09	0.03	0.05	0.07	0.04	0.08
P ₂ O ₅	0.09	0.05														
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
H ₂ O ⁺	0.31	0.94	0.48	0.70	0.44	0.34	0.42	0.22	0.42	0.34	0.48	0.16	0.18	0.18	0.13	0.18
CO ₂	0.48	0.32	0.11	0.33	0.14	0.32	0.28	0.18	0.36	0.27	0.41	0.23	0.23	0.41	0.14	0.36
S	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Σ	99.35	99.37	99.44	99.42	99.52	99.63	99.35	99.56	99.76	99.56	99.80	100.06	99.80	99.63	100.05	99.92
DI	84.53	87.43	86.51	80.40	82.28	82.04	81.81	81.33	81.57	80.33	80.57	91.29	93.89	84.30	94.28	83.70
σ43	2.11	1.96	1.90	1.78	1.84	1.83	1.81	1.83	1.78	1.75	1.76	2.01	1.98	1.89	2.12	1.93
A/CNK	1.00	1.00	1.06	1.01	1.02	1.00	1.01	1.01	1.00	1.01	1.01	1.01	1.04	0.99	1.02	1.01
C	1.25	0.76	0.94	0.87	0.50	0.67	0.73	0.46	0.72	0.73	1.08	0.62	0.97	0.72	0.53	0.95
Na ₂ O + K ₂ O	7.65	7.64	7.58	6.95	7.20	7.19	7.10	7.19	7.09	6.96	6.97	8.09	8.15	7.41	8.44	7.46
Ce	56.67	52.02	36.13	37.69	49.45	43.46	38.71	49.36	36.51	36.81	40.60	64.52	71.94	45.16	27.24	50.65
Dy	3.12	1.37	1.50	3.00	3.54	3.00	3.14	3.10	2.74	2.99	2.84	4.74	4.32	3.10	1.97	3.38
Er	2.22	0.99	0.98	1.77	2.17	1.80	1.92	1.90	1.71	1.85	1.70	2.92	2.75	1.95	1.66	2.08
Eu	1.01	0.64	0.68	0.98	0.84	0.92	0.84	0.91	0.87	0.84	0.95	0.74	0.62	0.87	0.27	0.81
Gd	3.56	1.83	1.92	3.35	3.89	3.51	3.37	3.73	3.20	3.27	3.43	5.25	5.23	3.59	1.77	3.83
Ho	0.71	0.33	0.32	0.62	0.75	0.63	0.65	0.64	0.58	0.63	0.59	0.97	0.91	0.65	0.48	0.70
La	27.98	29.56	22.00	20.39	26.45	23.89	20.83	27.67	19.88	19.89	22.24	31.71	35.14	23.33	12.13	26.12
Lu	0.42	0.23	0.19	0.28	0.35	0.29	0.32	0.30	0.27	0.30	0.28	0.41	0.42	0.31	0.37	0.32
Nd	22.71	13.70	13.41	18.92	23.81	20.32	18.69	22.42	17.56	17.90	19.40	31.49	33.42	21.88	10.66	23.73
Pr	5.88	3.91	3.73	4.44	5.83	4.96	4.56	5.65	4.22	4.31	4.69	7.73	8.39	5.34	2.81	5.94
Sm	3.83	1.95	2.12	3.67	4.27	3.61	3.61	3.95	3.35	3.46	3.55	5.70	5.91	3.87	1.86	4.15
Tb	0.70	0.38	0.28	0.53	0.62	0.53	0.54	0.56	0.48	0.52	0.52	0.82	0.77	0.54	0.30	0.58

续表 2

原样编号	D0056- GS1	D0066- GS1	PM09- GS5	PM09- GS12	PM09- GS14	PM09- GS33	PM09- GS39	PM09- GS43	PM09- GS49	PM09- GS52	PM09- GS65	PM09- GS92	PM09- GS100	PM09- GS103	PM09- GS109	PM09- GS114
岩性	黑云母二 长花岗岩	黑云母二 长花岗岩	细粒二 长花岗岩	花岗岩 长岩	中粗粒 花岗岩	二长花 岩	中细粒 花岗岩	中细粒 花岗岩	二长花 岩	黑云母 二长花 岩	中细粒 花岗岩	中细粒 花岗岩	中粗粒 花岗岩	中粗粒 花岗岩	细粒二 长花岗岩	黑云母 二长花 岩
Tm	0.37	0.19	0.17	0.27	0.34	0.28	0.31	0.30	0.25	0.28	0.27	0.43	0.41	0.30	0.30	0.31
Y	21.15	12.61	8.65	15.55	18.78	15.52	16.35	16.39	14.62	16.44	14.89	25.36	23.65	16.46	14.41	17.96
Yb	2.37	1.28	1.08	1.69	2.13	1.70	1.99	1.86	1.65	1.82	1.65	2.72	2.63	1.94	2.09	1.98
Ti	1809	1376	4681	809	2213	2001	1875	1897	1936	1872	2015	2007	968	711	5011	1663
ΣREE	131.55	108.38	84.49	97.59	124.43	108.90	99.47	122.33	93.24	94.86	102.71	160.14	172.86	112.81	63.88	124.57
LREE	101.79	120.16	86.09	110.65	97.17	87.23	109.95	82.39	83.21	91.43	141.89	155.42	83.43	54.95	111.41	124.23
HREE	13.47	6.60	6.42	11.50	13.78	11.73	12.24	12.38	10.86	11.65	11.28	18.25	17.43	12.37	8.93	13.17
δEu	0.83	1.04	1.03	0.85	0.63	0.79	0.73	0.72	0.81	0.76	0.84	0.41	0.34	0.71	0.45	0.62
δCe	1.08	1.19	0.98	0.97	0.98	0.98	0.97	0.97	0.98	0.97	0.98	1.01	1.03	0.99	1.14	1.00
La _N /Yb _N	8.47	16.62	14.63	8.66	8.91	10.06	7.50	10.69	8.66	7.84	9.69	8.38	9.60	8.63	4.16	9.46
La _N /Sm _N	4.71	9.80	6.70	3.59	4.00	4.27	3.72	4.52	3.83	3.71	4.05	3.59	3.84	3.89	4.22	4.07
Gd _N /Yb _N	1.24	1.19	1.47	1.64	1.51	1.71	1.40	1.66	1.61	1.49	1.73	1.60	1.65	1.53	0.70	1.60
Ce _N /Yb _N	6.64	11.32	9.30	6.20	6.45	7.09	5.40	7.39	6.16	5.61	6.85	6.60	7.61	6.47	3.62	7.10
Ba	580.90	626.27	624.04	562.31	578.65	537.19	507.91	506.54	557.65	460.84	589.82	635.21	515.45	573.94	46.10	534.10
Bi	0.06	0.08	0.08	0.10	0.08	0.14	0.09	0.61	0.12	0.16	0.08	0.15	0.09	0.07	0.06	0.12
Co	3.83	2.53	2.68	5.04	4.05	4.37	4.83	4.15	4.69	4.81	5.72	2.02	1.42	3.40	1.07	4.14
Cr	8.00	5.55	6.00	6.17	14.47	6.08	5.70	6.63	7.17	6.39	5.53	7.84	5.42	15.88	6.36	6.69
Ga	16.52	13.51	12.24	14.66	13.64	13.92	13.24	13.27	13.97	14.10	13.71	12.71	11.97	13.00	10.92	14.61
Hf	4.37	4.11	3.41	4.21	4.27	4.06	4.11	4.26	3.81	4.21	4.16	4.08	3.45	4.09	2.45	4.12
Nb	10.07	7.41	5.32	6.61	7.99	6.12	7.05	6.95	6.52	7.33	6.09	9.62	8.82	7.80	9.46	9.03
Ni	1.30	1.29	2.20	3.54	1.93	1.32	2.69	1.47	2.61	1.30	1.62	2.32	1.92	3.75	1.85	3.68
Rb	111.99	121.23	118.69	83.93	92.49	87.63	97.87	105.40	96.54	91.85	113.16	143.07	162.67	106.25	153.11	115.55
Sc	5.71	3.59	2.06	5.72	5.49	5.19	4.92	4.84	5.16	5.11	5.05	3.73	3.17	4.94	2.16	5.12
Sr	223.71	250.13	256.01	268.04	243.24	244.01	243.14	239.18	240.53	245.15	256.45	112.46	58.99	202.26	33.07	199.35
Ta	0.77	0.88	0.86	0.58	0.76	0.58	0.78	0.69	0.69	0.68	0.49	0.81	0.72	0.62	0.96	0.73
Th	9.76	25.57	23.21	13.59	15.05	12.45	13.72	15.37	13.29	15.37	13.46	16.58	10.84	12.30	20.95	13.25
Zr	144.06	126.86	92.24	136.72	137.74	129.82	131.33	136.26	120.26	142.05	133.61	114.76	91.45	132.07	51.87	134.16
Nb/Ta	13.09	8.39	12.22	6.17	11.39	10.48	10.64	9.03	10.12	9.42	10.77	12.53	11.87	12.29	13.17	12.51
La/Ta	36.38	33.48	25.52	35.15	34.66	41.54	26.71	40.27	28.73	29.25	45.76	39.14	48.94	37.39	12.60	35.84
Sm/Nd	0.17	0.14	0.16	0.19	0.18	0.18	0.19	0.18	0.19	0.19	0.18	0.18	0.18	0.18	0.17	0.17
La/Sm	7.30	15.18	10.37	5.55	6.20	6.61	5.77	7.00	5.94	5.75	6.27	5.56	5.94	6.03	6.54	6.30
Nb/Ta	13.09	8.39	10.51	12.62	12.22	6.17	11.39	10.48	10.64	9.03	10.12	9.42	10.77	12.53	11.87	12.29
Zr/Hf	32.97	30.87	36.09	36.11	35.77	27.05	32.48	32.26	31.98	31.95	31.99	31.56	33.74	32.12	28.13	26.51

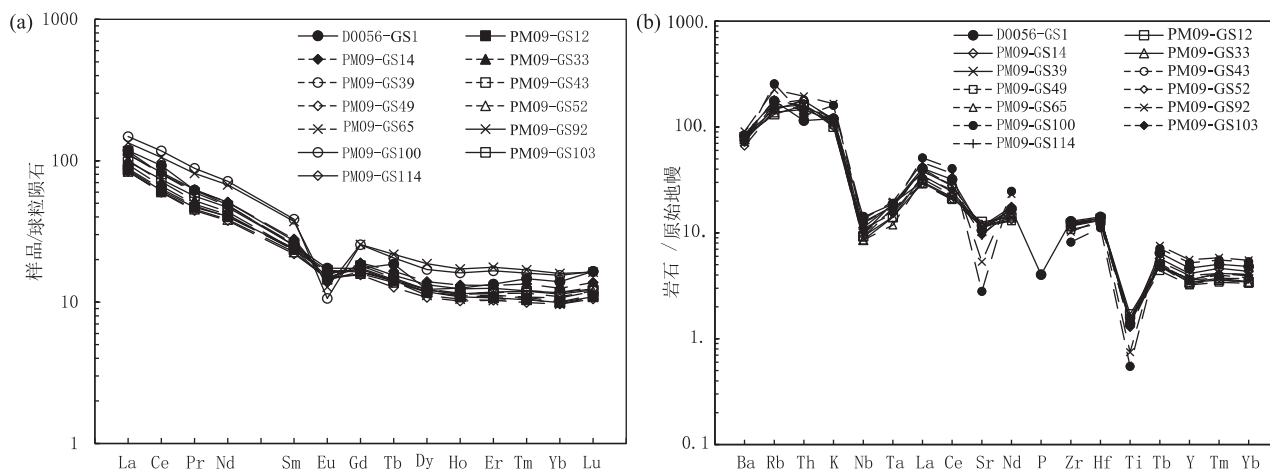


图5 黑云母二长花岗岩稀土元素球粒陨石标准化分配型式图(a)和微量元素球粒陨石标准化蛛网图(b)

(球粒陨石和原始地幔标准化值据[26])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and chondrite-normalized patterns for the biotite monzogranite (b)

黄玉等^[41]认为冈底斯岩基发育时间为65~45Ma,从成分上都属于俯冲有关的岛弧型花岗岩,但是从时间上此时的冈底斯南部已经进入同碰撞时期。对比冈底斯岩浆带周围地区研究,李胜荣等^[42]在曲水获得花岗闪长岩年龄为44~56Ma;黄玉等^[41]在拉萨东北部的花岗岩岩基获得年龄为51Ma;李洪梁等^[43]在达若地区获得花岗斑岩年龄为61.1~61.9Ma。本次分析获得同位素年龄与前人研究获得的年龄一致,表明拉萨岩体形成于古新世岩。因此拉萨岩体黑云母二长花岗岩属冈底斯岩基的一部分,侵位结晶时间为冈底斯岩浆作用爆发期。

5.2 岩浆成因及其构造环境

冈底斯带的花岗岩类在岩石地球化学方面总体表现出I型花岗岩特征^[44-47]。古新世—始新世岩浆活动与印度—亚洲板块碰撞有关,其早期为I型花岗岩,晚期逐渐过渡为S型花岗岩^[48]。花岗岩的成岩类型识别是研究花岗岩岩浆起源与演化、成岩构造背景等内容的前提。本文的样品在 Al_2O_3 -Ga图解中数据均落入I型花岗岩区域(图6a),但S型花岗岩往往与I型花岗岩具有相似的矿物组合和主微量元素特征^[49]。16件黑云母二长花岗岩样品 SiO_2 含量69.94%~76.49%, A/CNK 为0.99~1.06,平均为1.01,显示过铝质特征。拉萨岩体黑云母二长花岗岩具过铝质特征,且Th-Rb(图6b)和Y-Rb(图6c)图解呈负相关性,因为富Th和Y元素的矿物并不会在过铝质的I型岩浆演化过程的早阶段结晶,从而导致Th和Y含量在分异的I型岩浆中

含量高,并与Rb含量呈正相关,这种演化趋势与过铝质S型岩浆正好相反^[50-51]。根据Chappell判别标准黑云母二长花岗岩为I型花岗岩。同时,在岩相学上未发现堇青石、石榴子石、白云母等传统意义上S型花岗岩的判别标志富铝矿物。岩石CIPW标志矿物计算显示黑云母二长花岗岩刚玉分子(0.61~1.02,平均0.82)小于1%, Na_2O 含量为3.10%~4.03%,平均为3.61%大于3.2%,反映I型花岗岩特点^[52]。综上所述,拉萨岩体黑云母二长花岗岩应属于I型花岗岩。

徐克勤等^[56]认为I型花岗岩为上地幔派生岩浆上升,与地壳同熔及混染所形成的岩浆产物,从物源上看,它应相当于幔壳混源型(MC型)。Richards等^[57]认为I型花岗岩由幔源分异岩浆的底侵使地壳物质部分熔融形成。拉萨岩体的黑云母二长花岗岩是冈底斯南部岩浆岩的典型代表,新特提斯洋岩石圈向北的俯冲消减及印亚大陆碰撞过程中的岩浆底侵和壳幔混合作用是冈底斯南部中生代岩浆作用的主要成因^[58-62]。莫宣学等^[35]认为南冈底斯带同碰撞花岗岩中有着丰富的岩浆底侵、岩浆混合的证据。冈底斯岩基锆石Hf同位素和Nd同位素都是正值,且模式年龄较年轻,说明岩浆作用过程中有亏损地幔物质不同程度的加入。本文倾向于拉萨岩体经幔源岩浆底侵和壳幔混合作用形成。岩石地球化学成分显示出高硅、高钾、低Th/U和Nb/Ta比值以及负Eu异常、右倾的稀土元素配分曲线,显现出与幔源岩浆底侵致使地壳物质重熔形成的岩浆岩相似的特征^[63]。

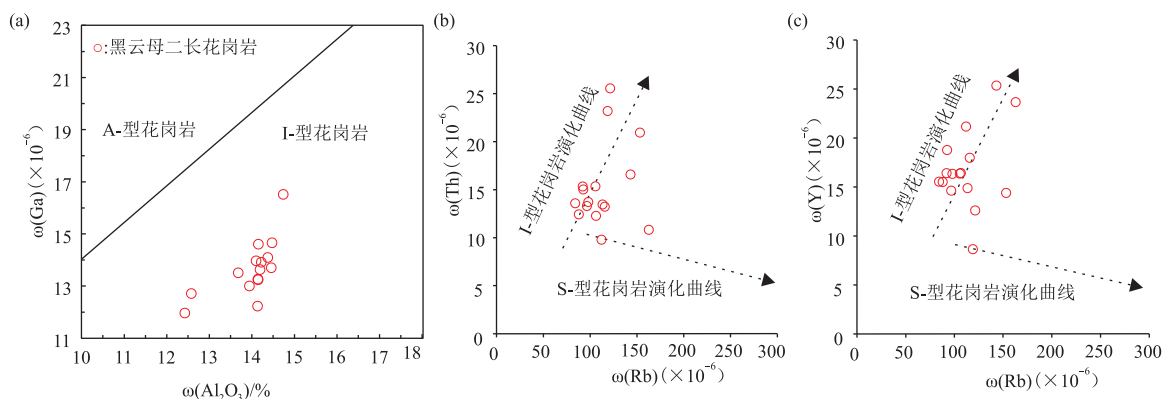


图6 拉萨岩体 Al_2O_3 -Ga 图解(a)^[53]、Th-Rh 图解(b)^[54]及(c)-Y-Rb 图解^[55]
Fig. 6 Diagrams of Al_2O_3 -Ga (a)^[53], Th-Rh^[54] and Y-Rb (c)^[55] the Lhasa rock mass

在哈克图解(图7a、b、c)中, TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 K_2O 、 NaO 、 CaO 含量与 SiO_2 含量呈现有规律的变化,氧化物含量随着岩石酸性增强而降低。这些规律性的变化,说明岩浆演化过程中发生了分离结晶作用。微量元素也是岩浆混合作用和成岩过程的记录,壳、幔两类岩浆混合及成岩过程中,有显著的元素迁移和成分交换,并形成独特的扩散作用^[52]。样品分析结果显示,黑云母二长花岗岩相对亏损Nb、Ta、Ti、Sr、P元素亏损。Nb的亏损反映其源岩具大陆壳的特征,是花岗岩增生在大陆边缘的新的地壳^[21,64],同时说明了钛铁矿、金红石、斜长石和以角闪石为主的铁镁矿物发生了分离结晶作用。黑云母二长花岗岩样品D0066-GS1、PM09-GS109的Th元素丰度大于 20×10^{-6} ,也指示岩石的源岩存在与地壳物质良好的继承性^[65]。熔融实验研究表明,陆壳熔融通常富Na,不能形成具高钾钙型特征的花岗质岩浆^[66-68]。另有,来源于地壳组分的岩石具有较

低的Sm/Nd比值($0.15 \sim 0.20$)^[69],而经历过地幔混染作用或来源于岩石圈地幔的岩浆,其La/Sm比值较稳定,变化不大,La/Ta则多大于25^[70]。Rb为强不相容元素,Ti为高场强元素,来自不同源区的岩浆成岩后,Rb/Ti值变化较大^[71]。通过图解分析,不同源区的岩石具有不同的 δEu 值和Sr丰度范围(图8a)。在 MgO - TFeO 图解中显示岩石具有岩浆混合成因的规律(图8b)。本文拉萨岩体黑云母二长花岗岩样品Sm/Nd比值为 $0.14 \sim 0.19$,La/Sm比值为 $5.55 \sim 15.18$,La/Ta比值为 $12.60 \sim 48.94$,大多数样品都大于25,显示其具有地壳岩石和地幔岩浆的特征;Rb/Ti值为 $0.01 \sim 0.3$,说明幔源基性岩浆和壳源酸性岩浆已经发生混合岩浆作用^[52]。

本文根据岩石地球化学指标及前人研究结果,认为拉萨岩体黑云母二长花岗岩为I型花岗岩,岩石为壳幔混合成因,结晶分异明显,形成于印度-亚洲大陆碰撞阶段。

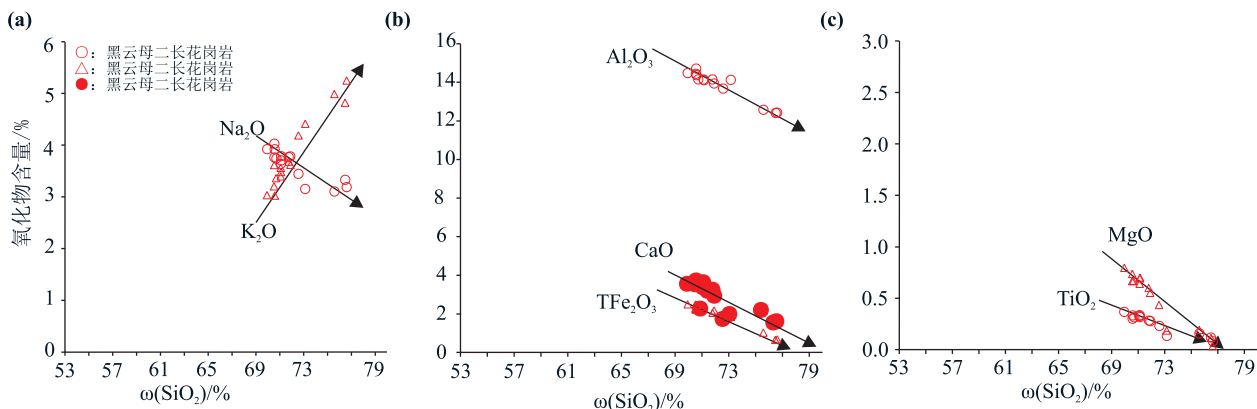


图7 拉萨岩体黑云母二长花岗岩哈克图解
Fig. 7 The Harker diagrams for biotite monzogranite from the Lhasa rock mass

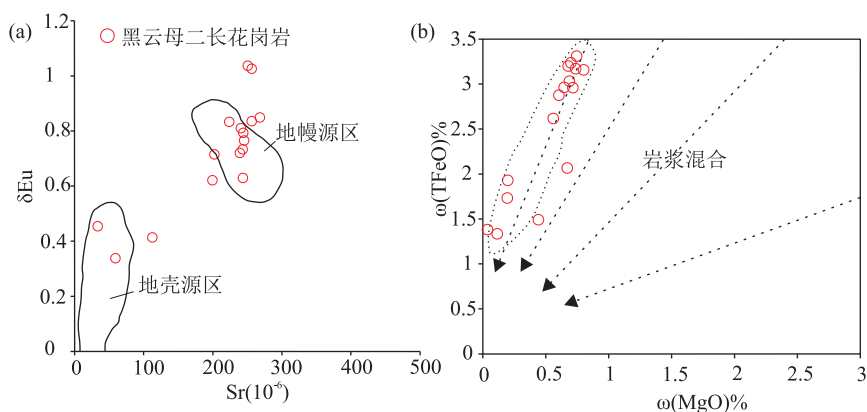


图8 拉萨岩体黑云母二长花岗岩 Sr- δ Eu 图解(a)^[72]和 MgO-TFeO 图解(b)^[73]

Fig. 8 The Sr- δ Eu diagram (a)^[72] and MgO-TFeO diagram (b)^[73] of the Lhasa rock mass

5.3 地质意义

拉萨岩体形成于古新世,为喜马拉雅期中酸性侵入岩。近年来随着勘查与研究的不断深入,研究区弧-陆主碰撞作用阶段的成矿作用被证实^[74]。冈底斯斑岩铜矿带同时发育矽卡岩型铜-铅-锌多金属矿及矽卡岩型铁铜铅锌矿产,它们与斑岩型铜矿成矿有相同的构造-岩浆活动背景,成矿时代亦相同^[75]。杨竹森等^[76]对谢通门县纳如松多和铅锌矿产和多加捕勒铁铜矿产进行了研究,确定成矿岩体的形成时代介于 63~56Ma 之间,认为该矿床与 52Ma 左右时期的中部地壳部分熔融的岩浆作用有关,外接触带的矽卡岩和林子宗群的火山机构控制了铅锌矿体的产出。在西藏冈底斯成矿带东段,王欣欣等^[77]认为努日大型矽卡岩型铜铅钨矿床形成于主碰撞阶段中晚期,其黑云母花岗岩可能源于拉萨地体。李光明等^[74]在对桑日火山弧中的克鲁铜矿、冲木达铜矿和朗达铜矿等矿产开展的研究发现,该类矽卡岩型铜金矿产与雅鲁藏布江陆-陆碰撞带北侧的碰撞型中酸性侵入体有关,其同位素年龄主要介于 55~45Ma 之间。外接触带桑日群的矽卡岩中(原岩主要为中厚层含泥质层纹状碳酸盐和钙碱性火山岩),其分布主要受侵入岩体和地层的双重控制。恰功矽卡岩型铁-铜-铅-锌-铜-钼-铁-铅-锌-银矿床,与矿化有关的二长花岗斑岩的锆石 U-Pb 年龄属于古新世^[78]。本文花岗质侵入岩同位素年龄与上述成矿岩浆岩形成同期,且研究区存在 Ga、Mo、W、Bi、Sb、Au、Ag 等元素的高背景区,具备形成矽卡岩型铁铜多金属矿的地质条件。

6 结论

(1) 本文获得拉萨岩体黑云母二长花岗岩的锆

石 U-Pb 年龄分别为 $57 \pm 0.5\text{Ma}$ 、 $58 \pm 1\text{Ma}$ 、 $59 \pm 1\text{Ma}$,表明其形成于古新世。

(2) 拉萨岩体黑云母二长花岗岩以钙碱性、过铝质-准铝质、I 型花岗岩为特征,呈现出俯冲相关弧岩浆岩的亲缘性,岩石为壳幔混合成因,经历了一定程度的结晶分异过程。

致谢 西藏地勘局第六地质大队达孜区调项目全体同事对本文野外工作提供了大力支持。审稿专家对论文提出了宝贵的意见和建议,在此一并表示诚挚感谢!

参考文献:

- [1] Zhu D. C., Zhao Z. D., Niu Y. L., et al. The Origin and Pre-cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau [J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1429-1454.
- [2] 莫宣学,董国臣,赵志丹,等. 西藏冈底斯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.
- [3] 李胜荣,孙丽,张华峰. 西藏曲水碰撞花岗岩的混合成因: 来自成因矿物学证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 884-894.
- [4] 阮冰,骆必胜,张宏飞,等. 西藏冈底斯始新世曲水岩基的岩浆混合作用: 来自斜长石阴极发光特征和成分变化的证据[J]. 地球科学, 2019, 44(6): 1835-1848.
- [5] 李光明,潘桂堂,王高明,等. 西藏冈底斯成矿带矿产资源远景评价与展望[J]. 成都理工大学学报, 2004, 31(1): 22-27.
- [6] 莫宣学,赵志丹,邓晋福,等. 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.
- [7] 莫宣学,赵志丹,喻学惠,等. 青藏高原新生代碰撞-后碰撞火成岩[M]. 北京:地质出版社, 2009, 1-396.
- [8] Zhu DC, Wang Q, Zhao ZD, et al. Magmatic record of India-Asia collision [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14289.
- [9] Wang R, Richards JP, Hou ZQ, et al. Zircon U-Pb age and Sr-Nd-

- Hf-O isotope geochemistry of the Paleocene-Eocene igneous rocks in western Gangdese: Evidence for the timing of Neo-Tethyan slab breakoff [J]. *Lithos*, 2015, 224 – 225: 179 – 194.
- [10] Ji WQ, Wu FY, Chung SL, et al. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Science in China (Series D)*, 2009, 52(9): 1240 – 1261.
- [11] Liu H., Li G. M., Huang H. X., et al. Petrogenesis of Late Cretaceous Jiangla' angzong I-Type Granite in Central Lhasa Terrane, Tibet, China: Constraints from Whole-Rock Geochemistry, Zircon U-Pb Geochronology, and Sr-Nd-Pb-Hf Isotopes [J]. *ACTA GEOLOGICA SINICA (English Edition)*, 2018, 92(4): 1396 – 1414.
- [12] Liu Y. S., Hu Z. C., Gao S., et al. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard [J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1): 34 – 43.
- [13] Liu YS, Gao S, Hu ZC, et al. 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*, 2010, 51: 537 – 571.
- [14] Liu YS, Hu ZC, Zong KQ, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin (in press)*, 2010b.
- [15] Wiedenbeck M, Allé p, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses [J]. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 1995, 19(1): 1 – 23.
- [16] Ludwig K R. ISOPLLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [J]. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, 2003, 4: 1 – 70.
- [17] 路远发. Geokit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包 [J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 459 – 464.
- [18] 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.
- [19] Middlemost E A K. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth Science Reviews*, 1994, 37(3 – 4): 215 – 224.
- [20] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1976, 58: 63 – 81.
- [21] Middlemost E A K. *Magnas and Magmatic Rocks* [J]. London: Longman, 1985, 1 – 266.
- [22] Maniar PD, Piccoli PM. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635 – 643.
- [23] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2011.
- [24] 姜军胜. 冈底斯西段林子宗群火山岩区多金属矿床成因及找矿潜力 [D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [25] Fitton JG, James D, Leeman WP. Basic magmatism associated with the late Cenozoic extension in the western United States. Compositional variations in space and time [J]. *Lithos*, 1991, 120(3): 221 – 241.
- [26] Sun S. S., McDonough F. W., Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313 – 345.
- [27] 张泽民, 丁慧霞, 董昕等. 冈底斯岩浆弧的形成与演化 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 276 – 294.
- [28] Meng J, Wang CS, Zhao XX, et al. India-Asia collision was at 24° N and 50 Ma: Palaeomagnetic proof from southernmost Asia [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2(1): 925.
- [29] Ding HX, Zhang ZM, Dong X, et al. Early Eocene (ca. 50 Ma) collision of the Indian and Asian continents: Constraints from the North Himalayan metamorphic rocks, southeastern Tibet [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 435: 64 – 73.
- [30] Ding L, Qasim M, Jadoon IAK, et al. The India-Asia collision in north Pakistan: Insight from the U-Pb detrital zircon provenance of Cenozoic foreland basin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 455: 49 – 61.
- [31] Zhu DC, Wang Q, Cawood PA, et al. Raising the Gangdese Mountains in southern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017a, 122(1): 214 – 223.
- [32] Zhu DC, Wang Q and Zhao ZD. Constraining quantitatively the timing and process of continent-continent collision using magmatic record: Method and examples [J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2017, 60(6): 1040 – 1056.
- [33] Zhu DC, Wang Q, Chung SL, et al. Gangdese magmatism in southern Tibet and India-Asia convergence since 120 Ma [C]. In: Treloar PJ and Searle MP (eds.). *Himalayan Tectonics: A Modern Synthesis* [A]. Geological Society, London, Special Publications, 2018, 483.
- [34] Wang T, Wang XX, Guo L, et al. Granitoid and tectonics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2017, 33(5): 1459 – 1478.
- [35] 莫宣学, 赵志丹, DePaolo DJ, 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.
- [36] Mo X. X., Hou Z. Q., Niu Y. L., et al. Mantle Contributions to Crustal Thickening During Continental Collision: Evidence from Cenozoic Igneous Rocks in Southern Tibet [J]. *Lithos*, 2007, 96(1): 225 – 242.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Zhu D. C., Zhao Z. D., Niu Y. L., et al. The Origin and Pre-cenozoic Evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Gondwana*

- Research, 2013, 23(4): 1429–1454.
- [40] 莫宣学. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. 高校地质学报, 2011, 17(3): 351–367.
- [41] 黄玉, 赵志丹, 张凤琴, 等. 西藏冈底斯仁布-拉萨一带花岗岩基的地球化学及其意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(10): 3132–3142.
- [42] 李胜荣, 孙丽, 张华峰. 西藏曲水碰撞花岗岩的混合成因: 来自成因矿物学证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(04): 885–894.
- [43] 李洪梁, 李光明, 刘洪, 等. 拉萨地体西段达若地区古新世花岗岩成因: 锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd-Pb-Hf 同位素的约束[J]. 地球科学, 2019, 44(7): 2276–2294.
- [44] 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 冈底斯岩浆带中段岩浆混合作用: 来自花岗岩杂岩的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 835–844.
- [45] 黄瀚霄, 张林奎, 刘洪, 等. 西藏冈底斯成矿带西段矿产类型、成矿作用和找矿方向[J]. 地球科学, 2019, 44(6): 1877–1887.
- [46] Zhu, D. C., Mo, X. X., Niu, Y. L., et al. Geochemical Investigation of Early Cretaceous Igneous Rocks along an East - West Traverse throughout the Central Lhasa Terrane, Tibet [J]. Chemical Geology, 2009, 268(3–4): 298–312.
- [47] 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(1–2): 241–255.
- [48] 侯增谦, 潘桂棠, 王安建, 等. 青藏高原碰撞造山带: II. 晚碰撞转换成矿作用[J]. 矿床地质, 2006b, 25(5): 521–543.
- [49] 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等. 花岗岩成因研究的若干问题[J]. 岩石学报, 2007, 23(6): 1217–1238.
- [50] Chappell, B. W. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites [J]. Lithos, 1999, 46(3): 535–551.
- [51] Chappell, B. W., White, A. J. R. I- and S-Type Granites in the Lachlan Fold Belt [J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1992, 83(1–2): 1–26.
- [52] 秦臻, 杨志军, 唐力, 等. 西藏冈底斯带查隆花岗岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其成矿意义[J]. 地质通报, 2019, 38(2–3): 232–241.
- [53] Collins W, Beams S, White A, et al. Nature and Origin of A-type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1982, 80(2): 189–200.
- [54] Chappell, B. W. Aluminium Saturation in I - and S - Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites [J]. Lithos, 1999, 46(3): 535–551.
- [55] Chappell, B. W., White, A. J. R. I - and S - Type Granites in the Lachlan Fold Belt [J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1992, 83(1–2): 1–26.
- [56] 徐克勤, 孙鼐, 王德滋, 等. 华南两类不同成因花岗岩岩石学特征[J]. 岩矿测试, 1982, 1(2): 1–2.
- [57] Richards, J. P. Magmatic to Hydrothermal Metal Fluxes in Convergent and Collided Margins [J]. Ore Geology Reviews, 2011, 40(1): 1–26.
- [58] Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, et al. Mo2009 Timing of the magma mixing in the Gangdise magmatic belt during the India-Asia collision: Zircon SHRIMP U-Pb dating [J]. Acta Geologica Sinica, 2005a, 79(1): 66–76.
- [59] Mo XX, Dong GC, Zhao ZD, et al. Mantle input to the crust in Southern Gangdise, Tibet, during the Cenozoic: Zircon Hf isotopic evidence [J]. Journal of Earth Science, 2009a, 20(2): 241–249.
- [60] Dong GC, Mo XX, Zhao ZD, et al. Geochronologic constraints by SHRIMP II zircon U-Pb dating on magma underplateing in the Gangdise belt following India-Eurasia collision [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 787–794.
- [61] 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, 2005b, 11(3): 281–290.
- [62] 董国臣, 莫宣学, 赵志丹, 等. 冈底斯岩浆带中段岩浆混合作用: 来自花岗岩杂岩的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(4): 835–844.
- [63] 李永军, 赵仁夫, 李注苍, 等. 岩浆混合花岗岩微量元素成因图解尝试-以西秦岭温泉岩体为例[J]. 长安大学学报, 2003, 25(3): 7–15.
- [64] 王森, 张达, Vatuva A, 等. 福建龙岩大洋-莒县花岗岩地球化学、年代学、铅同位素特征及其地质意义[J]. 地球化学, 2015, 44(5): 450–468.
- [65] Rudnick R L, Gao S. The composition of the continental crust [C]//Rudnick R L. Treatise on Geochemistry. 2003, Oxford: Elsevier: 1–64.
- [66] Rutter J M, Wyllie P. Melting of vapour-absent tonalite at 10 kbar to simulate dehydration-melting in the deep crust [J]. Nature, 1988, 331: 159–160.
- [67] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt mantle recycling [J]. Journal of Petrology, 1995, 36: 891–931.
- [68] Panino Douce Alberto E. What do experiments tell us about the relative contributions of crust and mantle to the origin of granitic magmas. Understanding Granites: Integrating New and Classical Techniques [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1999, 168: 55–75.
- [69] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [70] Lassiter J C, Depaolo D J. Plumes /lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotope constraints [J]. Geophysical Monography 100, American Geophysical Union, 1997, 100: 335–355.
- [71] 徐楠, 吴才来, 雷敏, 等. 茫崖二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. 地球科学, 2018, 43(9): 1–35.
- [72] HUO YUHUA. Tectonic Environment of Mesozoic Volcanic Rocks in the Coastal Areas of SE China [J]. GEOCHEMISTRY, 1986, 3(5): 195–205.

- [73] Zorpi M J, Coulon C, Orsini J B. Hybridization between felsic and mafic magmas in calc-alkaline granitoids: A case study in northern Sardinia, Italy [J]. *Chemical Geology*, 1991, 92(1/3): 45–86.
- [74] 李光明, 段志明, 黄勇, 等. 西藏冈底斯–喜马拉雅地质与成矿[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2017.
- [75] 余宏全, 丰成友, 张德全, 等. 西藏冈底斯中东段矽卡岩铜–铅–锌多金属矿床特征及成矿远景分析[J]. *矿床地质*, 2005, 24(5): 509–520.
- [76] 杨竹森, 侯增谦, 高伟, 等. 藏南拆离系锡金成矿特征与成因模式[J]. *地质学报*, 2006, 80: 1377–1391.
- [77] 王欣欣, 丁俊, 闫国强, 等. 西藏山南努日矽卡岩型铜钨矿床黑云母花岗岩锆石 U-Pb 定年及其成矿意义[J]. *地质学报*, 2015, 89(3): 549–559.
- [78] 李应栩, 谢玉玲, 陈伟, 等. 茫崖二长花岗岩锆石 U-Pb 年代学、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因[J]. *地球科学*, 2018, 43(9): 1–35.

Zircon U-Pb age, geochemistry and geological significances of the biotite monzogranite in Lhasa rock mass, Tibet

Lin Yengpeng¹, Ci Dan², Zhao Hongfei¹, Yang Ou², Li Li¹, Ba Ci¹

(1. No. 5 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Golmud 816000, Qinghai, China; 2. No. 6 Geological Party, Tibet Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa 851418, Tibet, China)

Abstract: The Lhasa rock mass is a compound rock mass, locating in the eastern section of the Gangdise belt. Based on detailed geological survey, zircon U-Pb dating and geochemical studies on the biotite monzogranite in the Lhasa rock mass, it is believed that the Lhasa rock mass was formed during the main collision stage of the Indian and Asian continents. The U-Pb dating of zircons from the biotite monzogranite yields three ages, 57 ± 0.5 Ma, 58 ± 1 Ma, and 59 ± 1 Ma, suggesting that the Lhasa rock mass is the product of paleocene magmatic activity. Geochemically, the representative biotite monzogranite in the Lhasa rock mass is of high SiO_2 (69.94% ~ 76.62%), high alkali (6.95% ~ 8.44%), and high CaO (0.68% ~ 2.53%) compositions. Relatively, the biotite monzogranite in the Lhasa rock mass is rich in LREE and LILE such as Ba, Rb, Th and poor in HREE and HFSE such as Nb, Ta, P, and Ti, with an obvious Eu negative anomaly. All geochemical characteristics indicate that the Lhasa rock mass is a typical calc-alkaline I-type granite rock mass, which is favorable for skarn-typed metallogenic processes in the Gangdise belt.

Key words: Paleocene granite; geochemistry; zircon U-Pb dating; petrogenesis; Lhasa rock mass