

拉萨地块北部孔马地区早白垩世花岗闪长岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学及其构造意义

李俊, 张士贞, 刘 函, 李奋其, 苟正彬

(中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610218)

摘要: 拉萨地块北部广泛分布白垩纪岩浆岩, 其记录的岩浆-变质事件, 对于研究拉萨地块白垩纪岩浆岩的岩石成因和构造背景具有重要的意义。本文对拉萨地块北部孔马地区花岗闪长岩进行了岩石学、地球化学和年代学研究, 结果表明, 研究区花岗闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 113.2 ± 1.3 Ma, 属早白垩世晚期岩浆作用的产物。该岩体属高钾钙碱性系列, 铝饱和指数 $A/CNK = 1.05 \sim 1.12$, 相对富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素, 亏损 Ti、P、Ta 等高场强元素, 具有中等 Eu 负异常, 为过铝质 S 型花岗岩。岩石地球化学特征显示其成岩岩浆主要来自古老地壳的部分熔融, 并受到地幔物质混染。结合区域资料, 认为孔马地区花岗闪长岩形成于早白垩世晚期班公湖-怒江洋壳南向俯冲碰撞的构造环境, 可能与重力拖拽下发生板片断离导致的软流圈物质上涌有关。

关键词: 拉萨地块; 早白垩世; 花岗闪长岩; 地球化学

中图分类号: P588.12⁺2; P597.⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2026)01-0071-15

Geochemistry and zircon U-Pb chronology of the Early Cretaceous granodiorite in Kongma area, northern Lhasa Terrane, and their tectonic significance

LI Jun, ZHANG Shi-zhen, LIU Han, LI Fen-qi and GOU Zheng-bin

(Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610218, China)

Abstract: Cretaceous magmatic rocks are widely distributed in the northern the Lhasa Terrane, and the recorded magmatic-metamorphic events are of great significance for studying the petrogenesis and tectonic setting of Cretaceous magmatic rocks in the Lhasa Terrane. This paper reports the petrology, geochemical results and zircon U-Pb age of the Early Cretaceous granodiorite exposed in the Kongma area located in the northern Lhasa Terrane. The results show that the LA-ICP-MS zircon U-Pb age of granodiorite in the study area is 113.2 ± 1.3 Ma, which belong to the late Early Cretaceous magmatism. These rocks are belong to the high potassium calc-alkaline series, with aluminum saturation index ($A/CNK = 1.05 \sim 1.12$) and medium negative Eu anomaly, relatively enriched large ion lithophile elements Rb, Th, U, K, and deficient high field strength elements Ti, P, Ta, which is a peraluminous S-type granite. Geochemical characteristics of the rocks shows that they were originated from the partial melting of the ancient crust with the mixing of mantle materials. Combined with the regional data, it is believed that the granodiorite in the Kongma area was formed in the tectonic environment of the southward subduction collision of the Bangonghu-Nujiang oceanic crust in the late Early Cretaceous, which may be related to the asthenosphere material upsurge caused by the slab break-off under gravity drag.

收稿日期: 2024-07-14; 接受日期: 2025-09-16; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20240032); 国家自然科学基金项目(42002032)

作者简介: 李俊(1987-), 高级工程师, 从事青藏高原地质演化及基础地质研究, E-mail: cdlijunwonder@163.com; 通讯作者: 张士贞(1984-), 教授级高工, 从事青藏高原基础地质调查研究工作, E-mail: zszcd2010@126.com。

Key words: Lhasa Terrane; Early Cretaceous; granodiorite; geochemistry

Fund support: Project of China Geological Survey (DD20240032); National Natural Science Foundation of China (42002032)

拉萨地块发育一条东西长逾 2 500 km、南北宽 150~450 km 的巨型构造-岩浆岩带(图 1a)。前人依据该地块的基底构造特征,以内部的狮泉河-纳木措-嘉黎蛇绿混杂岩带和米拉山-松多-隆格尔断

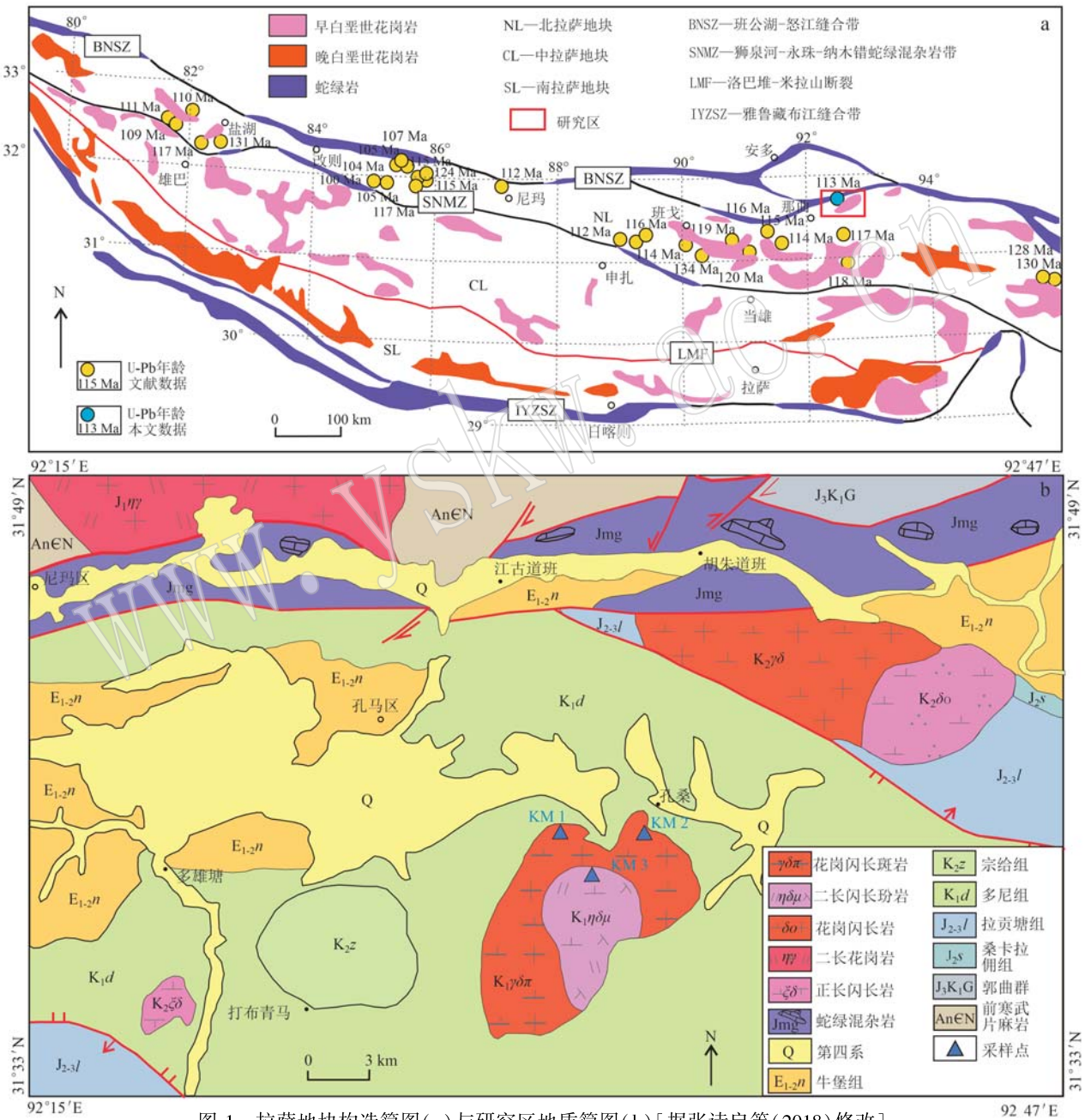


图 1 拉萨地块构造简图(a)与研究区地质简图(b) [据张诗启等(2018)修改]

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Lhasa Terrane (a) and simplified geological map of the study area(b) (modified by Zhang Shiqi *et al.*, 2018)

年龄数据来源:张亮亮等, 2010; 彭智敏等, 2011, 2015; Zhu *et al.*, 2011, 2016; 黄玉等, 2012; Qu *et al.*, 2012; 吴浩等, 2013, 2014; Wu *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2020; 尹志强等, 2023; 扎西平措等, 2024
source of age data: Zhang Liangliang *et al.*, 2010; Peng Zhimin *et al.*, 2011, 2015; Zhu *et al.*, 2011, 2016; Huang Yu *et al.*, 2012; Qu *et al.*, 2012; Wu Hao *et al.*, 2013, 2014; Wu *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2020; Yin Zhiqiang *et al.*, 2023; Zhaxi Pingcuo *et al.*, 2024

裂带为界,将其划分为北、中、南3个次一级的构造-岩浆岩带(Zhu *et al.*, 2011; 王立全等, 2013)。南带白垩纪岩浆活动普遍被认为与雅鲁藏布江洋壳的向北消减作用有关,但中、北带岩浆岩形成环境仍存争议,主要包括:①与雅鲁藏布江洋壳向北平板俯冲消减诱发的弧后伸展有关(Coulon *et al.*, 1986; 张开均等, 2003; Kapp *et al.*, 2007; 马国林等, 2010; 崔浩杰等, 2019);②与班公湖-怒江洋壳向南消减有关,晚白垩世进入碰撞阶段(潘桂棠等, 2006; 郑有业等, 2008; 王立全等, 2013; 张诗启等, 2018);③与俯冲板片断离、软流圈物质沿断离窗上涌诱发上覆岩石圈局部熔融有关(康志强等, 2008; Zhu *et al.*, 2009; 张亮亮等, 2011; 曲晓明等, 2012; 解龙等, 2015; 张诗启等, 2018; 刘海永等, 2019; 张开江等, 2019; 刘畅等, 2022)。上述争议制约了对青藏高原南部地球动力背景和构造演化的认识。因此,本文选取拉萨地块北部那曲东部孔马乡一带的花岗岩体为研究对象,进行了锆石 U-Pb 定年和地球化学特征分析,获得侵位年龄,进而探讨岩石成因及构造背景,为研究拉萨地块北部中生代构造演化过程提供新的依据。

1 地质背景和样品特征

研究区位于拉萨地块紧邻班公湖-怒江缝合带的部位(图1a)。北侧缝合带由蛇绿混杂岩带和聂荣微地体2个次级构造单元组成。前者具有广泛发育以古-中元古代聂荣岩群为代表的结晶岩系的特征,普遍被侏罗-白垩纪花岗岩侵位;后者则由晚三叠-中侏罗世混杂岩组成,含大小不等、总体定向排列的碳酸盐岩等构造岩块(王立全等, 2013)。研究区内拉萨地块以发育中侏罗-早白垩世海相陆源碎屑岩建造为特点(图1b),常构成一系列 NWW 向展布的复式褶皱,内部花岗岩枝、岩株较发育。沉积建造由拉贡塘组($J_{1-2}l$)和多尼组(K_1d)构成,前者为厚逾 2 000 m 的复理石建造,后者整体整合、局部平行不整合于前者之上,为一套厚度近 800 m 的含煤陆源碎屑岩系。此套中侏罗-早白垩世海相陆源碎屑岩建造常被一套变形微弱且残留厚度逾 500 m 的火山岩角度不整合覆盖(尼玛次仁等, 2013),岩石类型以玄武粗安岩、安山岩、石英安山岩和安山质晶屑凝灰岩为主。本区最新地层为以古新世-始新世牛堡组为代表的河湖相沉积。

本文研究对象是位于孔马区南东约 10 km 的花岗闪长岩体,呈岩基状产出,与围岩多尼组砂岩呈侵入接触。岩石风化程度中等,新鲜面为灰白色,具有中细粒花岗结构,块状构造,局部可见暗色包体(图2a、2b),主要由石英、长石和暗色矿物(角闪石)组成(图2c、2d),粒度一般为 0.5~3.2 mm。斜长石含量约 40%,多呈半自形短柱状;石英含量约 15%,呈近半自形-他形粒状;角闪石含量约 20%,呈半自形长柱状,发育弱绿泥石化;钾长石多为正长石,含量约 5%,呈半自形短柱状。副矿物主要为磷灰石、榍石和少量金属矿物等。

2 分析方法

本文选择在岩体中裂隙少且脉体不发育的部位进行取样,室内进一步清洗晾干。全岩主量元素和微量元素测试分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成,其中主量元素在波长色散 X 射线荧光光谱仪(ZSXPrimus II)上完成,分析精度优于 2%。微量元素采用酸溶法利用 Agilent 7700e 等离子质谱仪(ICP-MS)测得,分析精度优于 5%。锆石单矿物挑选在河北省廊坊市区地质调查研究院实验室完成,将样品粉碎至 80~100 目,在双目镜下挑选出晶形和透明度好的锆石,用无色透明的环氧树脂固定制靶,然后进行显微照相和阴极发光(CL)照相。LA-ICP-MS 锆石原位微区 U-Pb 同位素测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,仪器为 Agilent 7500a,激光剥蚀系统为 GeoLas2005,分析中激光斑束直径 32 μm ,使用国际标准锆石 91500 进行分馏校正。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

花岗闪长岩采集两件样品(KM2、KM3)进行 LA-ICP-MS 定年,锆石测年分析结果见表1。锆石无色透明,呈自形-半自形短柱状,粒径 120~170 μm ,长宽比约 1.3:1~2:1,可见典型的岩浆锆石韵律环带(图3)。KM2 样品分析 24 个点,其中 20 个有效点数据(测点谐和度高于 90%)落在 U-Pb 谐和线附近,样品的加权平均年龄为 $113 \pm 1.1 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.78$)(图4a)。KM3 样品分析 24 个点,其中 17 个有效点数据落在 U-Pb 谐和线附近,计算获得年龄加

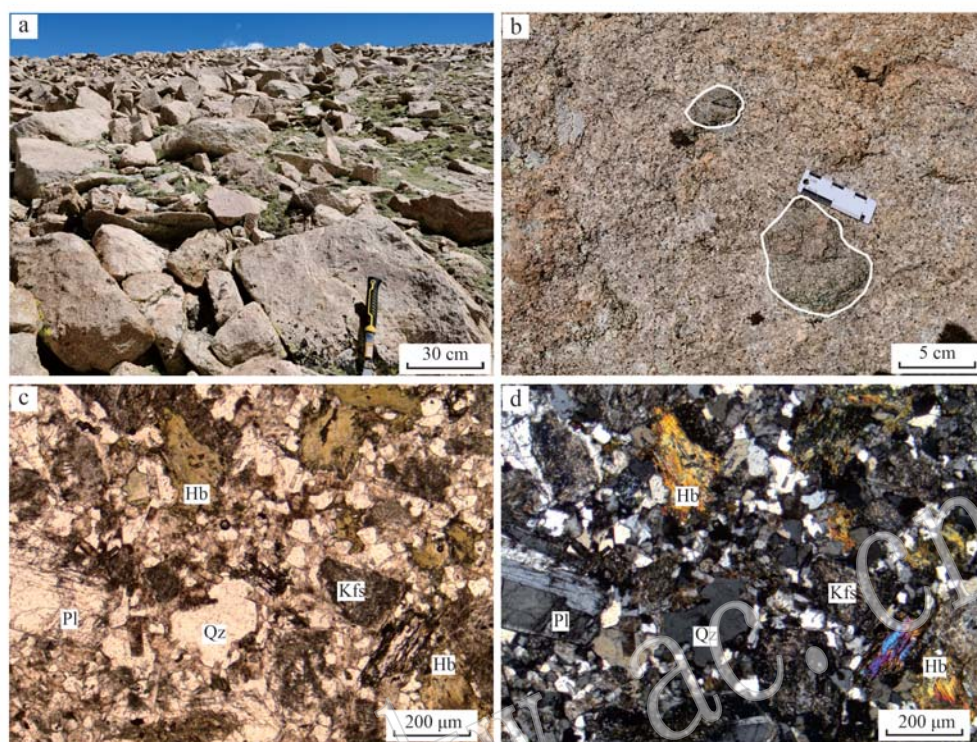


图 2 花岗闪长岩野外及镜下照片

Fig. 2 Photos of fields and micrographs of the granodiorite

a—野外宏观露头；b—岩石中暗色包体；c—花岗闪长岩单偏光照片；d—花岗闪长岩正交偏光照片；Qz—石英；Pl—斜长石；Kfs—钾长石；Hb—角闪石

a—field macro outcrop；b—dark enclaves in the rock；c—micrograph of granodiorite under plane-polarized light；d—micrograph of granodiorite under cross-polarized light；Qz—quartz；Pl—plagioclase；Kfs—K-feldspar；Hb—hornblende

权平均值为 113.2 ± 1.3 Ma (MSWD=1.18) (图 4b)。两个年龄基本一致,代表花岗闪长岩的结晶年龄。

3.2 岩石地球化学特征

花岗闪长岩主量、微量元素测试结果列于表 2。研究区花岗闪长岩样品的主量元素烧失量较低 (0.94%~1.29%), 组分总量为 99.39%~100.22%, 所有样品的主量元素均去除烧失量后换算到 100%, SiO_2 含量为 64.03%~65.03%, Na_2O 含量为 2.34%~2.72%, K_2O 含量为 3.45%~3.76%, MgO 含量低 (2.39%~2.60%), $\text{Mg}^\#$ 值为 47.80~49.34。在侵入岩 TAS 图解中, 样品落在花岗闪长岩区域 (图 5a)。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解中, 花岗闪长岩显示高钾钙碱性系列的特征 (图 5b)。

微量元素分析结果显示, 研究区样品稀土元素总量较高 ($\Sigma\text{REE}=199.42 \times 10^{-6} \sim 215.72 \times 10^{-6}$), 高于地壳岩浆平均值 164×10^{-6} ; LREE/HREE 值为 12.32~13.53, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 10.64~11.61,

$(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 1.59~1.71, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 4.23~4.50, δEu 值为 0.50~0.64, 在稀土元素球粒陨石标准化曲线图 (图 6a) 中均呈总体右倾形, 轻稀土元素富集, 分馏程度高, 重稀土元素分馏程度低, 具中等程度 Eu 负异常。在微量元素原始地幔标准化蛛网图 (图 6b) 上, 样品富集 Rb、Th、U、K 等大离子亲石元素, 亏损 Ti、P、Ta 等高场强元素。

4 讨论

4.1 岩石类型

孔马花岗闪长岩的主要矿物组合为斜长石、石英、角闪石和钾长石, 区别于 A 型花岗岩富含碱性长石和缺乏斜长石的特征 (贾小辉等, 2009)。在 $(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})/\text{CaO}-(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 图解中 (图 7a), 孔马花岗闪长岩全部投入未分异的 I 型或 S 型花岗岩的区域, 明显区别于 A 型花岗岩, 表明研究区花岗闪长

表 1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results

测点	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值				年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
21KM2-N1-1	31.85	340.08	599.88	0.57	0.048 4	0.003 9	0.115 1	0.008 2	0.017 3	0.000 4	110.6	7.5	110.9	2.6
21KM2-N1-2	28.14	275.16	563.06	0.49	0.050 6	0.004 3	0.120 4	0.009 1	0.017 7	0.000 4	115.4	8.3	113.1	2.4
21KM2-N1-3	32.19	293.28	578.32	0.51	0.048 2	0.003 9	0.120 9	0.009 1	0.018 2	0.000 4	115.9	8.2	116.2	2.6
21KM2-N1-4	28.60	275.49	583.32	0.47	0.049 0	0.003 7	0.117 3	0.008 0	0.017 5	0.000 4	112.7	7.2	112.1	2.2
21KM2-N1-5	39.40	390.34	729.36	0.54	0.049 5	0.003 8	0.119 1	0.008 9	0.017 7	0.000 4	114.3	8.1	112.8	2.4
21KM2-N1-6	17.47	162.10	323.72	0.50	0.050 6	0.005 2	0.128 4	0.010 8	0.019 1	0.000 5	122.7	9.7	122.2	3.3
21KM2-N1-7	27.87	270.40	513.90	0.53	0.049 4	0.004 1	0.122 7	0.010 3	0.018 0	0.000 4	117.5	9.3	115.1	2.6
21KM2-N1-8	27.34	248.55	497.12	0.50	0.048 9	0.004 7	0.117 9	0.010 7	0.017 8	0.000 4	113.1	9.7	113.8	2.3
21KM2-N1-9	37.18	304.40	610.02	0.50	0.080 5	0.023 0	0.204 7	0.064 4	0.018 1	0.000 4	189.1	54.3	115.3	2.3
21KM2-N1-10	30.52	301.60	555.36	0.54	0.053 6	0.004 0	0.127 4	0.009 3	0.017 3	0.000 4	121.8	8.4	110.6	2.3
21KM2-N1-11	28.58	269.44	531.97	0.51	0.051 6	0.004 4	0.119 0	0.009 5	0.017 0	0.000 4	114.2	8.6	108.5	2.4
21KM2-N1-12	22.97	219.78	476.65	0.46	0.048 1	0.004 3	0.114 6	0.010 1	0.017 6	0.000 4	110.2	9.2	112.2	2.6
21KM2-N1-13	40.36	392.98	712.30	0.55	0.051 4	0.004 7	0.120 9	0.010 1	0.017 4	0.000 4	115.9	9.2	111.5	2.3
21KM2-N1-14	44.96	446.05	763.95	0.58	0.052 9	0.004 1	0.121 9	0.008 1	0.017 3	0.000 4	116.8	7.3	110.5	2.5
21KM2-N1-15	29.63	291.66	574.96	0.51	0.049 1	0.004 0	0.119 3	0.008 3	0.017 8	0.000 4	114.5	7.5	113.4	2.5
21KM2-N1-16	38.64	368.93	649.01	0.57	0.052 8	0.003 8	0.123 9	0.007 6	0.017 5	0.000 4	118.6	6.9	111.9	2.4
21KM2-N1-17	51.31	521.06	836.59	0.62	0.049 1	0.003 5	0.120 2	0.007 7	0.017 9	0.000 3	115.3	7.0	114.7	2.0
21KM2-N1-18	48.74	540.11	839.17	0.64	0.048 5	0.002 7	0.118 5	0.006 8	0.017 8	0.000 3	113.7	6.1	113.5	2.1
21KM2-N1-19	32.45	301.10	587.13	0.51	0.051 0	0.004 2	0.124 2	0.009 7	0.018 1	0.000 4	118.8	8.8	115.6	2.8
21KM2-N1-20	39.33	367.88	705.41	0.52	0.049 0	0.003 1	0.119 2	0.007 5	0.017 8	0.000 4	114.3	6.8	113.7	2.4
21KM2-N1-21	42.21	389.32	716.48	0.54	0.052 2	0.003 8	0.132 0	0.009 4	0.018 5	0.000 4	125.9	8.5	118.1	2.8
21KM2-N1-22	34.38	254.82	469.32	0.54	0.067 6	0.005 7	0.176 0	0.012 4	0.019 7	0.000 4	164.6	10.7	126.0	2.8
21KM2-N1-23	27.48	231.63	523.28	0.44	0.053 7	0.005 0	0.131 6	0.012 3	0.017 8	0.000 4	125.6	11.1	114.0	2.5
21KM2-N1-24	35.30	271.73	587.47	0.46	0.050 1	0.003 7	0.153 5	0.011 2	0.022 5	0.000 5	145.0	9.9	143.5	2.9
21KM3-N1-1	23.36	220.37	433.44	0.51	0.053 1	0.004 7	0.127 7	0.010 3	0.018 3	0.000 4	122.1	9.3	116.8	2.7
21KM3-N1-2	34.48	343.23	602.60	0.57	0.057 7	0.004 1	0.145 9	0.010 5	0.018 4	0.000 3	138.3	9.3	117.6	2.2
21KM3-N1-3	34.58	289.58	558.78	0.52	0.065 0	0.004 5	0.159 0	0.010 6	0.017 9	0.000 4	149.9	9.3	114.6	2.4
21KM3-N1-4	28.81	280.33	474.27	0.59	0.053 5	0.004 3	0.135 2	0.009 6	0.019 0	0.000 4	128.8	8.6	121.6	2.5
21KM3-N1-5	31.24	302.04	595.75	0.51	0.050 0	0.004 2	0.116 8	0.009 4	0.017 3	0.000 4	112.1	8.6	110.7	2.3
21KM3-N1-6	28.27	306.01	523.01	0.59	0.047 7	0.003 8	0.119 9	0.009 1	0.018 0	0.000 4	115.0	8.3	115.2	2.3
21KM3-N1-7	32.80	314.57	600.58	0.52	0.051 1	0.004 0	0.121 9	0.009 2	0.017 6	0.000 4	116.8	8.3	112.2	2.2
21KM3-N1-8	47.21	515.44	757.47	0.68	0.073 7	0.004 5	0.184 1	0.010 9	0.018 2	0.000 4	171.6	9.3	116.1	2.3
21KM3-N1-9	54.30	579.87	951.75	0.61	0.049 1	0.003 2	0.116 0	0.007 2	0.017 4	0.000 4	111.5	6.5	111.2	2.2
21KM3-N1-10	41.01	420.08	767.61	0.55	0.049 9	0.002 9	0.118 5	0.006 5	0.017 3	0.000 3	113.7	5.9	110.7	1.9
21KM3-N1-11	41.40	420.72	679.63	0.62	0.046 1	0.003 0	0.114 9	0.007 4	0.018 0	0.000 3	110.5	6.7	115.1	2.2
21KM3-N1-12	33.04	336.28	631.99	0.53	0.049 8	0.004 3	0.115 6	0.009 1	0.017 5	0.000 4	111.0	8.3	111.9	2.7
21KM3-N1-13	22.15	215.83	450.86	0.48	0.046 1	0.003 8	0.113 2	0.008 6	0.017 7	0.000 4	108.9	7.8	112.9	2.5
21KM3-N1-14	31.98	320.70	600.20	0.53	0.049 9	0.004 1	0.115 0	0.008 3	0.017 3	0.000 4	110.5	7.6	110.5	2.3
21KM3-N1-15	32.04	312.39	582.12	0.54	0.048 6	0.003 6	0.123 2	0.008 9	0.018 5	0.000 4	118.0	8.1	118.1	2.4
21KM3-N1-16	48.11	475.74	870.06	0.55	0.049 2	0.003 2	0.123 1	0.008 0	0.018 2	0.000 3	117.9	7.2	116.3	1.9
21KM3-N1-17	19.11	177.91	361.21	0.49	0.051 0	0.004 9	0.128 6	0.011 3	0.019 1	0.000 5	122.8	10.2	122.2	2.9
21KM3-N1-18	40.82	389.74	703.24	0.55	0.047 5	0.003 2	0.115 6	0.007 1	0.017 9	0.000 3	111.1	6.5	114.2	2.1
21KM3-N1-19	41.67	366.29	626.61	0.58	0.060 1	0.004 6	0.159 6	0.013 1	0.018 8	0.000 5	150.3	11.5	119.8	3.1
21KM3-N1-20	35.22	329.14	701.71	0.47	0.049 5	0.003 8	0.115 7	0.008 0	0.017 3	0.000 4	111.2	7.3	110.8	2.3
21KM3-N1-21	32.52	319.58	601.14	0.53	0.051 0	0.003 8	0.124 1	0.008 8	0.018 0	0.000 4	118.7	7.9	115.0	2.3
21KM3-N1-22	38.74	316.30	633.52	0.50	0.065 0	0.004 2	0.170 8	0.010 6	0.019 1	0.000 4	160.1	9.2	121.7	2.6
21KM3-N1-23	28.83	255.43	525.09	0.49	0.051 1	0.004 4	0.118 8	0.008 7	0.017 5	0.000 4	113.9	7.9	111.7	2.3
21KM3-N1-24	35.91	362.71	653.09	0.56	0.049 3	0.003 9	0.117 8	0.008 6	0.017 4	0.000 4	113.0	7.8	111.0	2.3

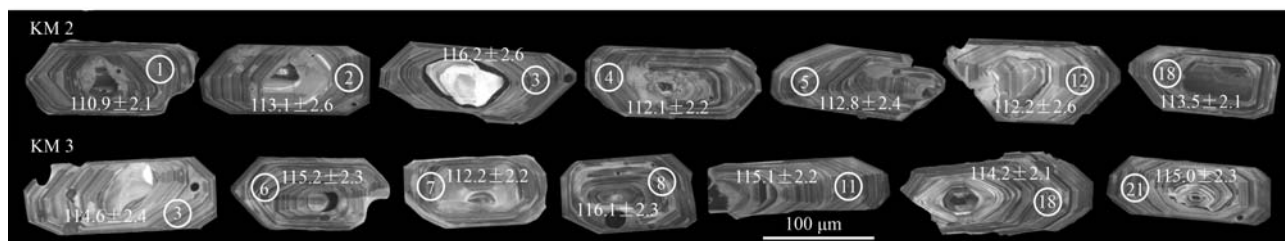


图3 锆石阴极发光图像和测年结果

Fig. 3 Cathodoluminescence images of zircon and U-Pb ages

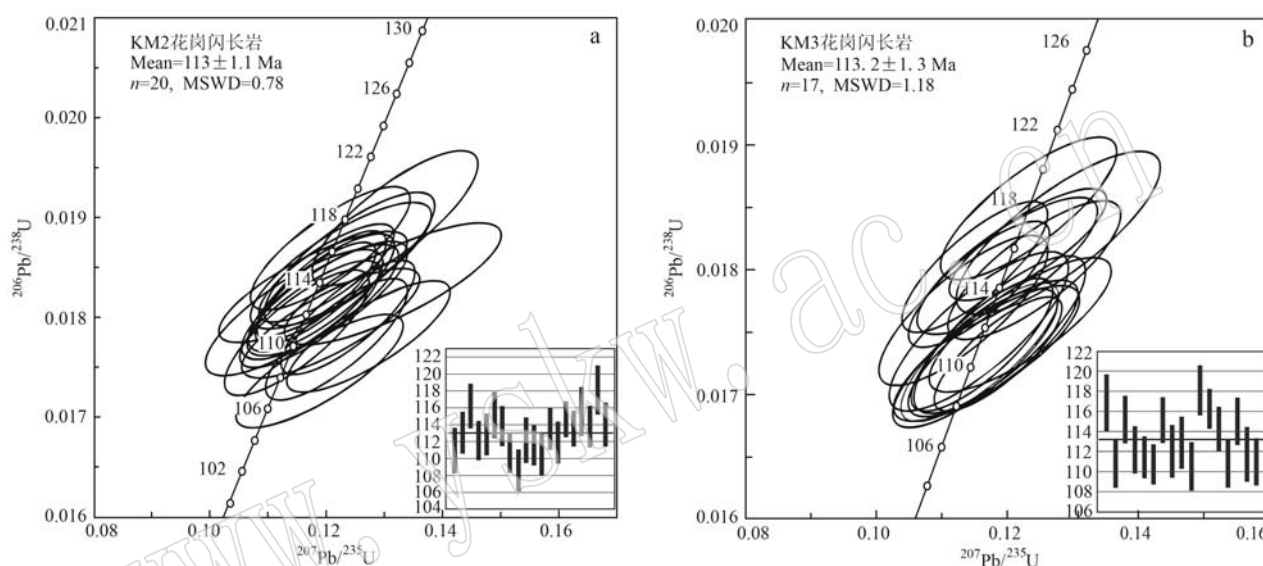


图4 孔马地区花岗闪长岩锆石 U-Pb 谐和图和年龄加权平均值图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram and weighted average age of the zircons from granodiorite in the Kongma area

岩不属于 A 型花岗岩类。研究表明, S 型花岗岩多表现为过铝质岩石 (Barbarin, 1999), 孔马地区花岗闪长岩均表现为过铝质特征 ($A/CNK = 1.05 \sim 1.12$, 平均 1.08) (图 7b)。在 TiO_2 -Zr 图解中 (图 7c), 样品全部投入 S 型花岗岩的区域。据 Wang 等 (2012) 对拉萨地块 I 型与 S 型花岗岩中锆石微量元素含量数据的统计学研究给出的划分依据, 花岗闪长岩也投入 S 型花岗岩的锆石微量元素区域内 (图 7d)。因此, 综合证据表明, 孔马花岗闪长岩属于 S 型花岗岩类。

4.2 岩石成因

目前研究认为, 基性岩浆结晶分异以及地壳混染作用和幔源岩浆加热导致的地壳物质脱水重熔均可能形成长英质岩石 (McCulloch *et al.*, 1994; Guffanti *et al.*, 1996; Ingle *et al.*, 2002)。一般而言, 由幔源岩浆结晶分异形成的岩石端员通常具有连续的

成分变化, 并且在区域上常常会伴生一定规模的中基性岩石端员。研究区及周围出露的岩浆岩以酸性花岗质岩石为主, 尚未报道中基性岩浆岩, 表明孔马岩体并非由基性岩浆结晶分异形成。研究区花岗闪长岩相对富集 LREE 和 LILE, 相对亏损 HFSE, 不相容元素 Nb、Ta、Ti 具有明显的负异常 (图 6b), 表明岩体源区有陆壳物质参与。Sm/Nd 值为 $0.19 \sim 0.20$, Rb/Sr 值为 $0.67 \sim 0.78$, 表明地壳物质在岩浆形成过程中的重要作用, 岩浆源区可能主要来自壳源物质的部分熔融 (Harris and Inger, 1992; Taylor and McLennan, 1995)。一般认为, 源岩为泥质岩和砂质岩的副片麻岩是 S 型花岗岩的母岩 (Rudnick and Fountain, 1995), 酸性岩的成分与其源区密切相关, 过铝质花岗岩可以利用 Rb-Sr-Ba 系统确定其源区成分 (Jung and Pfander, 2007)。在 Rb/Ba-Rb/Sr 图解中, 孔马花岗闪长岩落在杂砂岩源岩区域

表 2 全岩主量元素 ($w_B/\%$)、稀土和微量元素化学成分 ($w_B/10^{-6}$) 分析结果Table 2 The major elements ($w_B/\%$), REE and trace elements ($w_B/10^{-6}$) of total rock chemical compositions for the magmatic rock

样品号	KM2-1	KM2-2	KM2-3	KM2-4	KM3-1	KM3-2	KM3-3	KM3-4
SiO ₂	64.43	65.03	64.92	64.65	64.39	64.55	64.03	64.47
TiO ₂	0.65	0.64	0.64	0.61	0.67	0.64	0.64	0.61
Al ₂ O ₃	16.02	15.76	15.69	15.88	15.65	15.76	15.85	15.83
FeO	3.32	3.36	3.10	2.94	2.88	2.34	2.92	2.94
Fe ₂ O ₃	1.58	1.72	1.73	1.76	2.18	2.62	1.93	1.73
TF ₂ O ₃	5.27	5.45	5.17	5.03	5.38	5.22	5.18	5.00
MnO	0.08	0.09	0.08	0.09	0.11	0.10	0.10	0.09
MgO	2.55	2.53	2.54	2.34	2.50	2.42	2.39	2.34
CaO	3.48	3.58	3.38	3.81	3.48	3.46	3.65	3.79
Na ₂ O	2.72	2.34	2.66	2.55	2.61	2.67	2.58	2.48
K ₂ O	3.55	3.45	3.69	3.70	3.76	3.76	3.69	3.66
P ₂ O ₅	0.15	0.15	0.15	0.14	0.16	0.16	0.15	0.14
Total	99.83	100.22	100.21	99.88	99.85	99.77	99.39	99.50
LOI	0.94	1.21	1.29	1.07	1.16	1.04	1.14	1.09
La	43.1	44.1	44.2	43.0	47.8	44.5	44.3	44.2
Ce	86.0	86.5	86.3	85.8	94.8	87.6	87.8	86.2
Pr	9.68	9.92	10.00	9.78	10.70	10.10	9.89	9.78
Nd	34.5	34.5	34.6	34.1	35.0	34.6	34.4	33.3
Sm	6.59	6.66	6.70	6.50	6.85	6.63	6.62	6.40
Eu	1.28	1.13	1.24	1.24	1.24	1.23	1.24	1.21
Gd	5.74	5.70	5.74	5.52	5.75	5.67	5.55	5.45
Tb	0.88	0.89	0.88	0.86	0.90	0.88	0.86	0.84
Dy	5.17	5.30	5.11	5.10	5.18	5.17	5.09	4.91
Ho	1.05	1.07	1.03	1.04	1.06	1.04	1.02	0.98
Er	3.02	3.05	2.90	2.88	2.93	2.90	2.87	2.78
Tm	0.42	0.43	0.41	0.41	0.41	0.41	0.40	0.40
Yb	2.80	2.92	2.76	2.76	2.73	2.78	2.77	2.68
Lu	0.43	0.42	0.43	0.42	0.41	0.41	0.41	0.39
ΣREE	200.71	202.57	202.21	199.42	215.72	203.89	203.25	199.56
δEu	0.64	0.56	0.61	0.63	0.60	0.61	0.63	0.63
Li	37.8	56.7	39.6	38.7	58.0	60.2	59.2	52.6
Be	2.79	2.77	2.76	2.88	2.78	2.72	2.74	2.87
Sc	12.8	12.8	12.8	12.8	13.3	13.4	12.8	12.4
V	89.4	90.0	90.2	88.6	91.2	88.9	88.9	84.6
Cr	43.5	44.9	44.2	43.7	45.8	44.5	44.8	44.5
Ni	12.7	18.0	13.7	13.9	16.7	16.8	16.8	13.9
Co	12.8	13.0	12.7	12.5	12.8	12.5	12.4	11.6
Cu	7.37	11.30	7.79	7.72	4.75	4.54	8.82	4.80
Zn	50.1	59.2	50.6	50.1	81.0	76.1	76.2	73.5
Ga	18.9	18.6	18.5	18.4	18.3	18.5	18.8	18.3
Rb	179	172	182	180	190	185	188	182
Sr	259	255	245	247	244	254	261	258
Y	30.3	31.0	29.1	29.3	29.4	29.3	28.6	28.0
Zr	184	177	176	178	188	175	173	164
Nb	12.4	12.6	12.3	12.0	12.8	12.5	12.3	11.8
Sn	2.72	3.56	2.65	2.58	3.86	3.74	3.81	3.60
Cs	5.01	6.00	5.08	5.00	5.61	5.48	5.82	5.86
Ba	442	403	450	450	469	446	442	424
Hf	5.02	4.90	4.94	4.98	5.12	4.91	4.82	4.61
Ta	1.18	1.22	1.14	1.14	1.13	1.18	1.15	1.12
Tl	0.89	0.86	0.92	0.91	0.89	0.93	0.89	0.86
Pb	26.1	27.8	27.3	27.0	32.9	31.8	32.2	34.3
Th	22.8	24.0	23.0	23.3	24.3	23.9	23.6	23.5
U	2.20	3.38	2.15	2.16	2.94	2.91	3.00	3.18

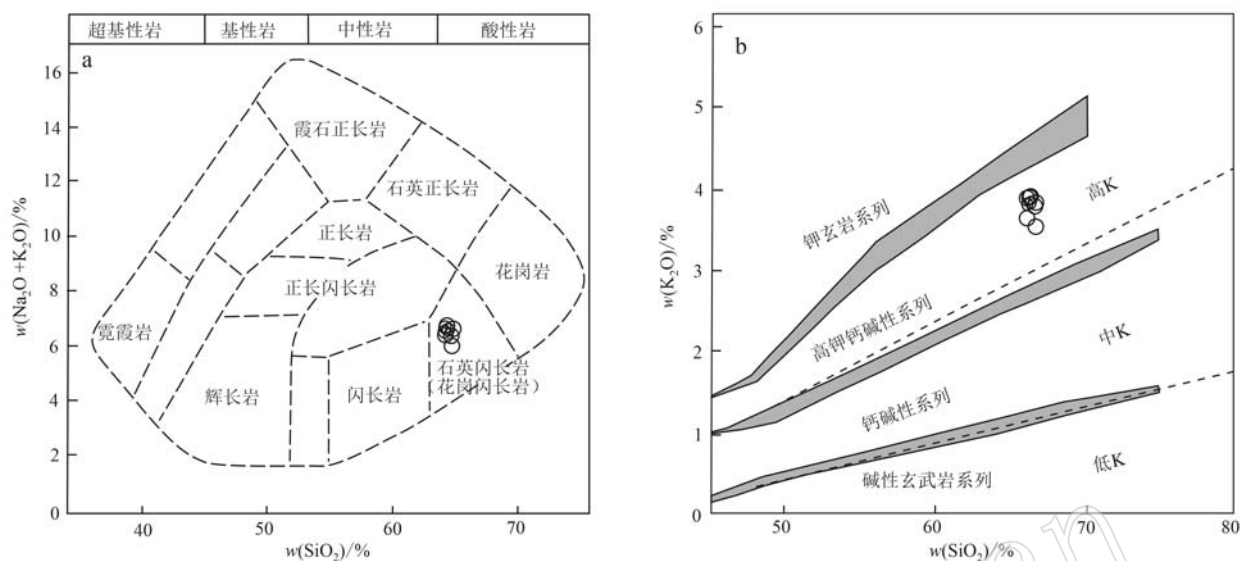


图5 孔马地区花岗闪长岩主量元素图解(a据 Wilson, 1989; b据 Le Maitre, 1989 和 Rickwood, 1989)

Fig. 5 Schematic diagram of major elements of the granodiorite from the Kongma area(a after Wilson, 1989; b after Le Maitre, 1989 and Rickwood, 1989)

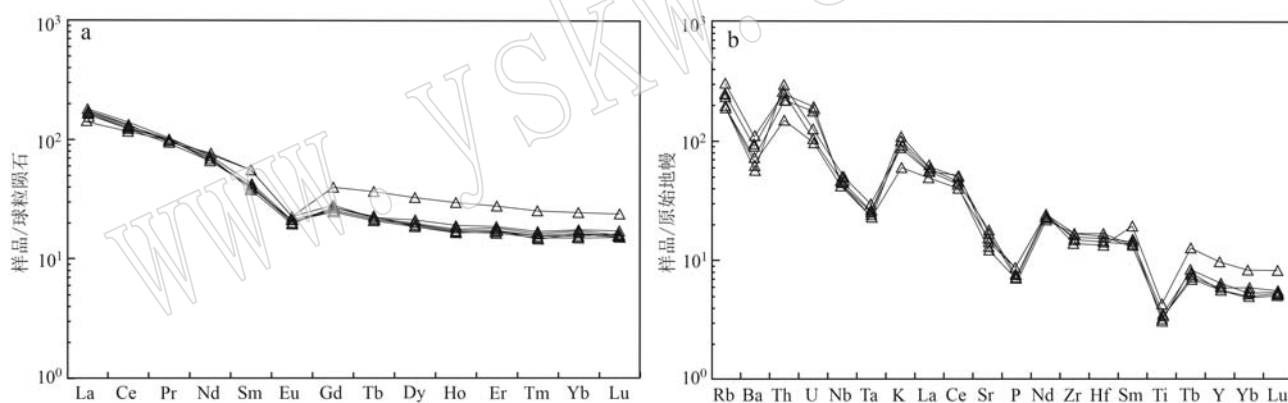


图6 孔马地区花岗闪长岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图(a)和微量元素原始地幔标准化配分曲线图(b)(球粒陨石和原始地幔标准化值引自 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite normalized REE pattern (a) and primitive mantle normalized trace element spider diagram (b) of the granodiorite from the Kongma area(standardized data cited from Sun and McDonough, 1989)

(图8a)。Sylvester等(1998)研究表明,花岗岩熔体中 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值与温度和压力无关,主要受源岩成分的控制。贫斜长石、富黏土的泥质岩部分熔融产生的过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值一般小于0.3,富斜长石、贫黏土的砂屑岩熔融生成的过铝质花岗岩 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值一般大于0.3。孔马花岗闪长岩的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为1.27~1.53,符合杂砂岩源岩的特征(图8b),因此孔马花岗闪长岩的源岩主要为杂砂岩。

成岩模拟实验证实,由下地壳部分熔融形成的岩浆中 $\text{Mg}^\#$ 值小于40,玄武岩部分熔融的岩浆往往

$\text{Mg}^\#$ 值大于45,地幔橄榄岩形成的岩浆 $\text{Mg}^\#$ 值更大于60(Atherton and Petford, 1993; Rapp, 1997),孔马地区岩浆岩的 $\text{Mg}^\#$ 值为47.80~48.93(平均值48.22),反映其岩浆不完全来源于壳源物质,可能有幔源物质的混入。Lassiter和Depaolo(1997)认为遭受岩石圈地幔混染的岩浆往往具有较高的 La/Ta 值(>5),研究区花岗闪长岩的 La/Ta 值为36.07~42.05,岩石中较高的 MgO (2.34~2.55%)、 Ni ($12.7 \times 10^{-6} \sim 18 \times 10^{-6}$)、 Cr ($43.5 \times 10^{-6} \sim 45.8 \times 10^{-6}$)含量也暗示其受到地幔物质的混染。

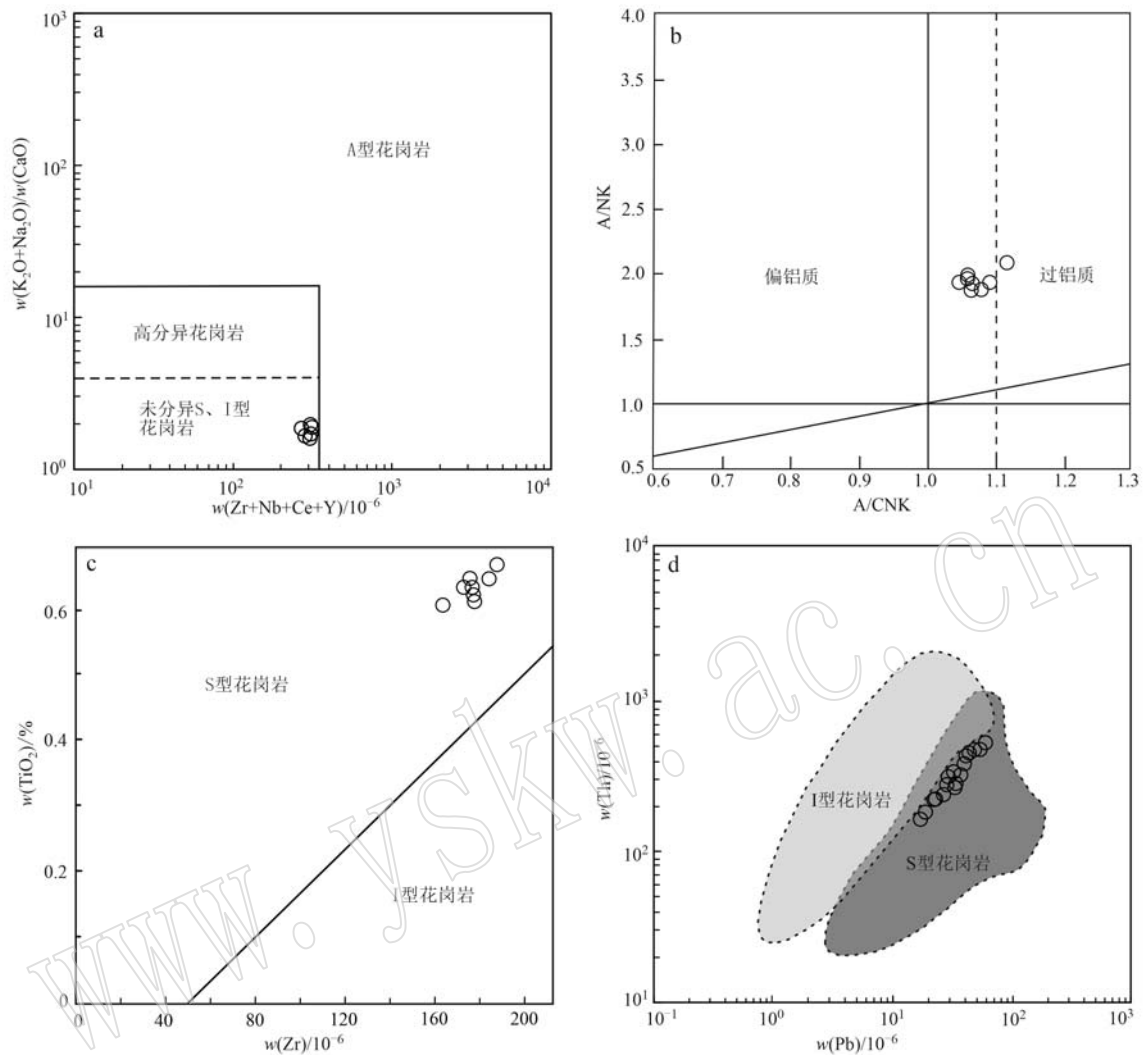


图 7 孔马花岗闪长岩成因类型判别图解(a 据 Whalen *et al.*, 1987; b 据 Maniar and Piccoli, 1989; c 据王中刚等, 1989; d 据 Wang *et al.*, 2012)

Fig. 7 Discrimination diagram of the granodiorite from the Kongma area (a, after Whalen *et al.*, 1987; b after Maniar and Piccoli, 1989; c after Wang *et al.*, 1989; d after Wang *et al.*, 2012)

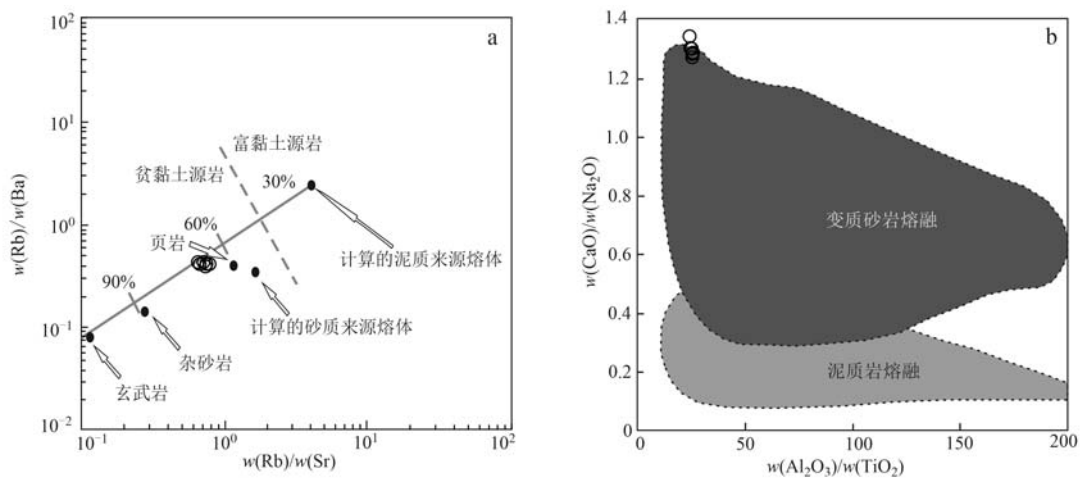


图 8 孔马花岗闪长岩源岩判别图解 (a 据 Sylvester, 1998; b 据 Jung and Pfander, 2007)

Fig. 8 Source rock discrimination diagrams of the granodiorite from the Kongma area (a after Sylvester, 1998; b after Jung and Pfander, 2007)

4.3 深部动力学过程

班公湖-怒江洋盆闭合时间是青藏高原地质研究的热点(Fan *et al.*, 2014),近年研究成果显示洋盆最可能的闭合时间是早白垩世。班公湖-怒江结合带两侧的南羌塘和拉萨地块大规模发育的上白垩统阿布山组(K_2a)和竟柱山组(K_2j)陆相沉积地层限制了洋盆闭合时间的上限。Kapp 等(2007)对尼玛地区地层沉积学方面的研究表明,该区沉积相大约在 125~118 Ma 期间从海相过渡到非海相状态,指示班公湖-怒江洋盆在中段尼玛地区闭合时限为早白垩世中晚期。而申扎-班戈一带发现的 116~109 Ma 的 A2 型花岗岩(曲晓明等, 2012; Chen *et al.*,

2014),也将班公湖-怒江洋盆申扎-班戈段的闭合时限推断为早白垩世早中期(140~125 Ma)。Ma 等(2018)对加热不错-纳江错地区沉积地层的研究中表明,区内洋盆的消亡时间为 152~118 Ma。以上研究表明,早白垩世是拉萨地块重要的构造演化时间节点,班公湖-怒江洋的闭合以及拉萨-羌塘地块的碰撞很可能发生于早白垩世(Zhu *et al.*, 2011, 2016)。孔马地区花岗闪长岩在 Pearce 等(1984)和 Pearce(1996)总结的 Rb-(Yb+Ta)构造环境判别图解(图 9a)上,落在同碰撞花岗岩和火山弧花岗岩交会区域,在 Rb-(Yb+Nb)构造判别图(图 9b)中落在同碰撞花岗岩区域,体现出板块碰撞的构造性质。

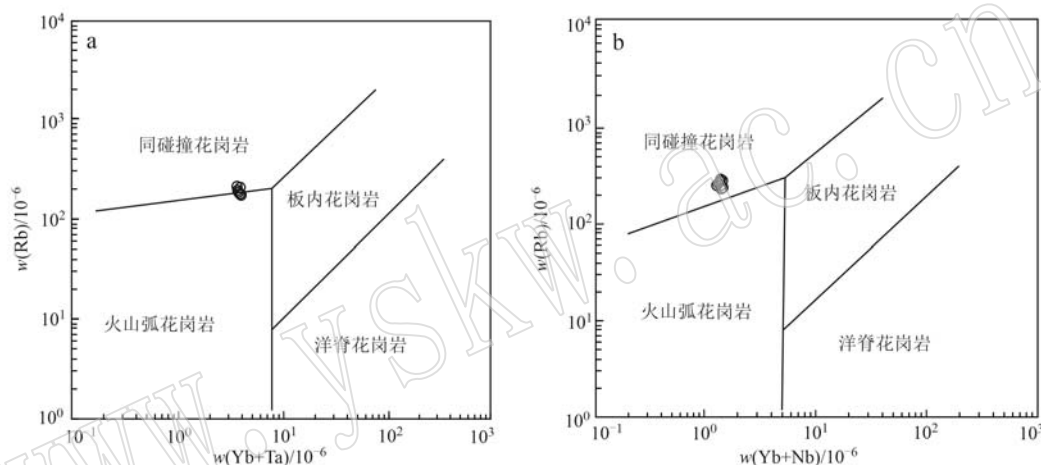


图 9 孔马地区岩浆岩构造环境判别图解(a 据 Pearce *et al.*, 1984; b 据 Pearce, 1996)

Fig. 9 Tectonic environment discrimination diagrams of the Early Cretaceous magmatite from the Kongma area (a after Pearce *et al.*, 1984; b after Pearce, 1996)

对拉萨地块北部早白垩世岩浆岩年龄进行统计分析(图 10),结果显示在约 113 Ma 发生了大规模岩浆活动,Zhu 等(2011)称其为拉萨地块岩浆大爆发事件。有学者将拉萨地块北部出露的白垩纪花岗岩解释为雅鲁藏布新特提斯洋壳岩石圈北向低角度俯冲的产物(Coulon *et al.*, 1986; Pearce and Mei, 1988)。这一假说是基于当初在拉萨地块南缘未发现白垩纪火山岩而提出的,但北拉萨地块的早白垩世岩浆弧距离雅鲁藏布江缝合带距离太远,且近年研究表明在拉萨地块南缘存在白垩纪岛弧成因岩浆活动,平板俯冲往往形成隔热层,一般不产生岩浆作用,这种低角度北向俯冲无法解释目前在拉萨地块南部发现的大规模早白垩世岩浆活动(朱弟成等, 2008)。

也有学者认为拉萨地块北部早白垩世花岗岩与

增厚地壳的熔融相关。Pearce 和 Mei(1988)认为其为羌塘地块与拉萨地块碰撞后增厚地壳熔融的产物;Xu 等(1985)则认为它是羌塘与拉萨地块碰撞过程中增厚地壳熔融的产物。增厚下地壳发生熔融主要在后碰撞阶段,这阶段幔源岩浆混入是比较少的(Zhu *et al.*, 2009)。近年研究发现拉萨地块北部亚热(115 Ma)及那曲(113 Ma)等地发现辉长岩、安山岩等基性岩墙群以及措勤(107 Ma)、达雄(106 Ma)、申扎(111 Ma)等地花岗岩中均发现大量闪长质包体和石英闪长玢岩脉(康志强等, 2008; 张亮亮等, 2011; 张晓倩等, 2012; 黄玉等, 2012; 张士贞等, 2021),显示具有岩浆混合的特点,被认为是幔源岩浆作用参与的记录(Zhu *et al.*, 2009; 张乐, 2015)。研究表明这类岩浆岩往往具有不均一的锆石 Hf 同位素组成[$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -11.65 \sim -5.74$],

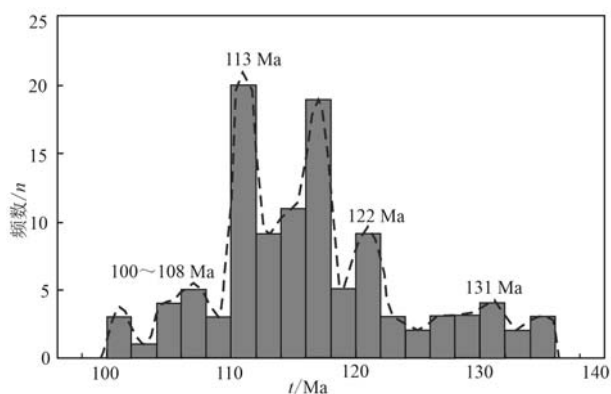


图 10 拉萨地块北部早白垩世岩浆岩年龄直方图
(数据来源同图 1a)

Fig. 10 Histogram of age for the Early Cretaceous magmatic rocks in the northern Lhasa Terrane

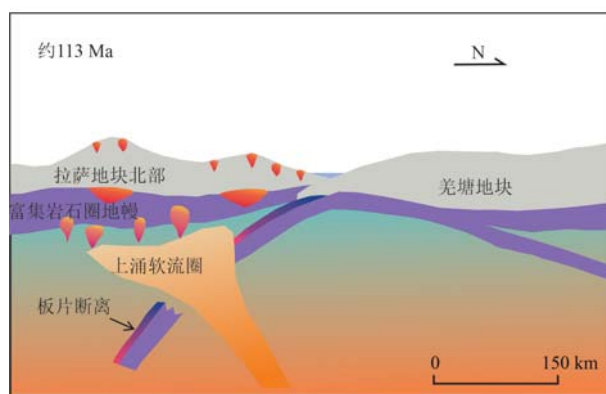


图 11 约 113 Ma 拉萨地块北部构造岩浆演化图
(据 Zhu *et al.*, 2011 修改)

Fig. 11 Tectonomagmatic evolution of the northern Lhasa Terrane at 113 Ma (modified by Zhu *et al.*, 2011)

指示其可能是两种不同性质的岩浆混合的产物(刘畅等, 2022; 扎西平措等, 2024)。孔马地区花岗闪长岩同样以发育相似的暗色包体为特征, 这些包体形态多为椭圆状和浑圆状, 具有塑性流变特征(图 2b), 这是拉萨地块北部早白垩世岩浆岩的一个共同现象, 可能是地幔物质混入的直接证据, 暗示镁铁质岩浆与酸性岩浆存在机械混合作用。因此, 单一的增厚地壳熔融不能很好解释冈底斯北部早白垩世岩浆岩成因。

近年越来越多的证据表明, 拉萨地块北部发育的大规模约 113 Ma 早白垩世岩浆活动, 与班公湖-怒江洋洋壳岩石圈的南向俯冲碰撞和随后的板片断离事件有关(Zhu *et al.*, 2009, 2011; 张晓倩等, 2010)。拉萨地块和羌塘地块发生陆陆碰撞形成加厚地壳, 早白垩世晚期随板片俯冲到一定深度因重力作用发生回转进而断离, 软流圈物质沿板片构造窗上涌, 为古老下地壳和富集岩石圈地幔提供热源, 使得两者减压升温熔融, 于是地壳熔融的长英质岩浆房被不同程度混入了幔源镁铁质岩浆(包体), 形成了拉萨地块北部既复杂又特征鲜明的早白垩世岩浆岩带(图 11)。因此, 孔马地区早白垩世花岗闪长岩成因最合理的解释应是古老地壳物质部分熔融形成的长英质岩浆与幔源镁铁质岩浆发生不同程度岩浆混合作用的产物。

5 结论

(1) 孔马地区花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 113 ± 1 Ma, 是拉萨地块早白垩世晚期发生重大构造

事件的产物。

(2) 研究区花岗闪长岩属高钾钙碱性系列, 相对富集 LREE 和 LILE, 相对亏损 HFSE 和不相容元素 Nb、Ta、Ti, 具有明显的负异常中等 Eu 负异常。岩石地球化学特征显示其岩浆源区主要来自古老地壳物质的部分熔融, 并可能受到幔源镁铁质岩浆混入。

(3) 孔马地区岩浆岩形成于早白垩世晚期班公湖-怒江洋壳南向俯冲碰撞的构造环境, 可能与板片在重力拖拽下发生的板片断离有关。

References

- Atherton M P and Petford N. 1993. Generation of sodium rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 362(6 416): 144~146.
- Barbarin B. 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments[J]. *Lithos*, 46(3): 605~626.
- Chen Y, Zhu D C, Zhao Z D, *et al.* 2014. Slab breakoff triggered ca. 113 Ma magmatism around Xainza Area of the Lhasa Terrane, Tibet [J]. *Gondwana Research*, 26(2): 449~463.
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C, *et al.* 1986. Mesozoic and Cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ^{39}Ar - ^{40}Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(3~4): 281~302.
- Cui Haojie, Gou Zhengbin, Liu Han, *et al.* 2019. The petrogenesis and tectonic significance of the late Early Cretaceous granodiorites in the

- Nyixung area, western Lhasa Block, Xizang[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 39(1): 1~13(in Chinese with English abstract).
- Fan J J, Li C, Xie C M *et al.* 2014. Petrology, geochemistry, and geochronology of the Zhonggang Ocean Island, Northern Tibet: Implications for the evolution of the Banggongco-Nujiang oceanic arm of the Neo-Tethys[J]. *International Geology Review*, 56(12): 1 504 ~ 1 520.
- Guffanti M, Clynne M A and Muffler L J. 1996. Thermal and mass implications of magmatic evolution in the Lassen volcanic region, California, and minimum constraints on basalt influx to the lower crust[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101(B2): 3 003 ~ 3 013.
- Harris N B W and Lnger S. 1992. Trace element modeling of pelite-derived rhyolites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 46~56.
- Huang Yu, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2012. Petrogenesis and implication of the andesites at ~113 Ma in the Nagqu region in the northern Lhasa Subterranean [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1 603~1 614(in Chinese with English abstract).
- Ingle S, Weis D and Frey F A. 2002. Indian continental crust recovered from Elan Bank, Kerguelen plateau[J]. *Journal of Petrology*, 43(7): 1 241~1 257.
- Jia Xiaohui, Wang Qiang and Tang Gongjian. 2009. A-type granite: Research progress and implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 33(3): 465~480(in Chinese with English abstract).
- Jung S and Pfander J A. 2007. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: Constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry [J]. *European Journal of Mineralogy*, 9: 859~870.
- Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Dong Yanhui, *et al.* 2008. Cretaceous volcanic rocks of Zenong Group in north-middle Lhasa block: Products of southward subducting of the Slainajap ocean [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 303~314(in Chinese with English abstract).
- Kapp P, Decelles P G, Gehrels G E, *et al.* 2007. Geological records of the Lhasa-Qiangtang and Indo-Asian collisions in the Nima area of central Tibet [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 119(7/8): 917~932.
- Lassiter J C and Depaolo D J. 1997. Plumes/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotope constraints[J]. *Geophysical Monography* 100, American Geophysical Union, 335~355.
- Le Maitre R W. 1989. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Liu Chang, Yang Zhusen, Xu Peiyan, *et al.* 2022. Petrogenesis and geological significance of the Mamu Early Cretaceous magmatic rocks in the western part of Gangese[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 41(3): 537~554(in Chinese with English abstract).
- Liu Haiyong, Zeng Qinggao, Wang Mu, *et al.* 2019. Zircon U-Pb ages and geochemistry of volcanic rocks in the Nie'er Co-Laguo Co area of the western Bangong Co-Nujiang suture zone[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(7): 1 136~1 145(in Chinese with English abstract).
- Ma A L, Hu X M, Kapp P, *et al.* 2018. The disappearance of a Late Jurassic Remnant Sea in the southern Qiangtang Block (Shamuluo Formation, Najiango Area): Implications for the tectonic uplift of central Tibet[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 506: 30~47.
- Ma Guolin and Yue Yahui. 2010. Cretaceous volcanic rocks in northern Lhasa Block: Constraints on the tectonic evolution of the Gangdise Arc[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(5): 525~528(in Chinese with English abstract).
- Maniar P D and Piccoli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101: 635~643.
- McCulloch M T, Kyser T K, Woodhead J D, *et al.* 1994. Pb-Sr-Nd-O isotopic constraints on the origin of rhyolites from the Taupo Volcanic Zone of New Zealand: Evidence for assimilation followed by fractionation from basalt[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(3): 303~312.
- Nima Ciren, Xie Raowu, Sha Zhaoli, *et al.* 2013. 1: 250000 Regional Geological Survey Report of Naqu County[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press(in Chinese).
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, *et al.* 2006. Spatial-temporal framework of the Gangdise Orogenic Belt and its evolution[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 521~533(in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 1996. Sources and settings of granitic rocks[J]. *Episodes*, 19(4): 120~125.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Pearce J A and Mei H J. 1988. Volcanic rocks of the Tibet Geotraverse: Lhasa to Golmud[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 327: 169~201.

- Peng Zhimin, Geng Quanru, Liu Shusheng, *et al.* 2015. Zircon U-Pb ages and geochemical features of the diorite porphyrite in Gajia Formation in the Nagqu area, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 34(2/3): 354~363(in Chinese with English abstract).
- Peng Zhimin, Geng Quanru, Zhang Zhang, *et al.* 2011. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages and geochemical characteristics of rhyolite in Nagqu area, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1 050~1 059(in Chinese with English abstract).
- Qu X M, Wang R J, Xin H B, *et al.* 2012. Age and petrogenesis of A type granites in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, Tibetan plateau[J]. *Lithos*, 146: 264~275.
- Qu Xiaoming, Xin Hongbo, Du Dedao, *et al.* 2012. Ages of post-collisional A-type granite and constraints on the closure of the oceanic basin in the middle segment of the Bangonghu-Nujiang suture, the Tibetan plateau[J]. *Geochimica*, 41(1): 1~14(in Chinese with English abstract).
- Rapp R P. 1997. Heterogenous source regions for archaic granitoids: experimental and geochemical evidence[J]. *Oxford Monographs on Geological and Geophysics*, 35: 267~279.
- Rickwood C. 1989. Boundary lines within petrologic diagram which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 22(4): 247~263.
- Rudnick R L and Fountain D M. 1995. Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective[J]. *Reviews of Geophysics*, 33: 267~309.
- Sun and McDonough. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45: 29~44.
- Taylor S R and McLennan S M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust[J]. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241~265.
- Wang Liquan, Pan Guitang, Ding Jun, *et al.* 2013. Geological Map and Description of Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Areas[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Wang Q, Zhu D C, Zhao Z D, *et al.* 2012. Magmatic zircons from I-, S- and A-type granitoids in Tibet; Trace element characteristics and their application to detrital zircon provenance study[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 59~66.
- Wang W, Wang M, Zhai Q G, *et al.* 2020. Transition from oceanic subduction to continental collision recorded in the Bangong-Nujiang suture zone: Insights from Early Cretaceous magmatic rocks in the north-central Tibet[J]. *Gondwana Research*, 78: 77~91.
- Wang Zhonggang, Yu Xueyuan, Zhao Zhenghua, *et al.* 1989. Rare Earth Geochemistry [M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- Whalen J B, Currie K L and Chappell B W. 1987. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407~419.
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*[M]. London: Allen and Unwin.
- Wu H, Li C, Hu P Y, *et al.* 2014. Early Cretaceous (100~105 Ma) Adakitic magmatism in the Dachagou area, northern Lhasa terrane, Tibet; Implications for the Bangong-Nujiang Ocean subduction and slab break-off[J]. *International Geology Review*, 57(9~10): 1 172~1 188.
- Wu Hao, Li Cai, Hu Peiyuan, *et al.* 2013. The discovery of Qushenla volcanic rocks in Tasepule area of Nyima Country, Tibet, and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(7): 1 014~1 026(in Chinese with English abstract).
- Wu Hao, Li Cai, Hu Peiyuan, *et al.* 2014. The discovery of Early Cretaceous bimodal volcanic rocks in the Dachagou area of Tibet and its significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(11): 1 804~1 814(in Chinese with English abstract).
- Xie Long, Dun Du, Zhu Lidong, *et al.* 2015. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and geological significance of the Zhaduding A-type granites in northern Gangdise, Tibet[J]. *Geology in China*, 42(5): 1 214~1 227(in Chinese with English abstract).
- Xu R H, Schärer U and Allègre C J. 1985. Magmatism and Metamorphism in the Lhasa Block (Tibet): A Geochronological Study[J]. *The Journal of Geology*, 93: 41~57.
- Yin Zhiqiang, Lü Xiaochun, Fu Xiaohu, *et al.* 2023. Petrogenesis and tectonic significance of Early Cretaceous frozen fault rock mass in Luolong area, eastern Tibet [J]. *Mineralogy and Petrology*, 43(2): 69~81(in Chinese with English abstract).
- Zhang Kaijiang, Liu Zhibo, Li Haifeng, *et al.* 2019. Zircon U-Pb age and Hf isotopic characteristics of Qushenla Formation volcanic rocks in the middle part of the Bangong Co-Nujiang suture, Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(6): 1 018~1 027(in Chinese with English abstract).
- Zhang Kaijun, Xia Bin, Xia Bangdong, *et al.* 2003. Sedimentologic evidence for Early Cretaceous back-arc rifting of the Gangdese magmatic arc, Tibet, Western China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(1): 31~37(in Chinese with English abstract).
- Zhang Le. 2015. *Geochronology and Geochemistry of the Yongzhu Granitoids in Middle-north Gangdese, Tibet*[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).

- Zhang Liangliang, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2010. Petrogenesis of magmatism in the Bearda region of Northern Gangdese Tibet: Constraints from geochemistry, geochronology and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 871~1 888(in Chinese with English abstract).
- Zhang Liangliang, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2011. Early Cretaceous granitoids in Xainza, Tibet: Evidence of slab break-off[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(7): 1 938~1 948(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shiqi, Qi Xuexiang, Wei Cheng, *et al.* 2018. Geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotope compositions of Early Cretaceous magmatic rocks in Yongzhu area, Northern, Lhasa Terrane, Tibet, and its geological significance[J]. *Earth Science*, 43(4): 1 085~1 109(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoqian, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2010. Petrogenesis of the Nixiong pluton in Coqen, Tibet and its potential significance for the Nixiong Fe-rich mineralization[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(6): 1 793~1 804(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoqian, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, *et al.* 2012. Geochemistry, zircon U-Pb geochronology and in-situ Hf isotope of the Maiga batholith in Coqen, Tibet: Constraints on the petrogenesis of the Early Cretaceous granitoids in the central Lhasa Terrane[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1 615~1 634(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shizhen, Li Fenqi, Liu Han, *et al.* 2021. The Early Cretaceous gabbro in Yare area, middle Lhasa Block: Magmatism response to the slab break-off of the southward subduction Bangong-Nujiang Ocean lithosphere[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(11): 1 852~1 864(in Chinese with English abstract).
- Zhaxi Pingcuo, Wang Xuhui, Xie Hongru, *et al.* 2024. Petrogenesis and tectonic setting of the Early Cretaceous Maiba pluton in eastern section of the northern Lhasa block: Constraints from zircon U-Pb geochronology and geochemistry[J/OL]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*. <https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20240912.1011.002>(in Chinese with English abstract).
- Zheng Youye, Xu Rongke, Zhang Yanggang *et al.* 2008. The feature of geochemistry, chronology and tectonic significance of San gong granite series of Ritu invasion batholith in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 368~376(in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Li S M, Cawood P A, *et al.* 2016. Assembly of the Lhasa and Qiangtang terranes in central Tibet by divergent double subduction[J]. *Lithos*, 245: 7~17.
- Zhu D C, Mo X X, Niu Y L, *et al.* 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet[J]. *Chemical Geology*, 268: 298~312.
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, *et al.* 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 301: 241~255.
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Wang Liquan, *et al.* 2008. Tempo-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1 535~1 550(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 崔浩杰, 苟正彬, 刘 函, 等. 2019. 拉萨地块西段尼雄地区早白垩世晚期花岗闪长岩的成因及构造意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 39(1): 1~13.
- 黄 玉, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2012. 西藏北部拉萨地块那曲地区约 113 Ma 安山岩岩石成因与意义[J]. *岩石学报*, 28(5): 1 603~1 614.
- 贾小辉, 王 强, 唐功建. 2009. A 型花岗岩的研究进展及意义[J]. *大地构造与成矿学*, 33(3): 465~480.
- 康志强, 许继峰, 董彦辉, 等. 2008. 拉萨地块中北部白垩纪则弄群火山岩: Slainajap 洋南向俯冲的产物[J]. *岩石学报*, 24(2): 303~314.
- 刘 畅, 杨竹森, 徐培言, 等. 2022. 冈底斯西段麻木早白垩世岩浆岩岩石成因及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 41(3): 537~554.
- 刘海永, 曾庆高, 旺 姆, 等. 2019. 班公湖-怒江缝合带西段聂尔错-拉果错地区火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地球化学特征[J]. *地质通报*, 38(7): 1 136~1 145.
- 马国林, 岳雅慧. 2010. 西藏拉萨地块北部白垩纪火山岩及其对冈底斯岛弧构造演化的制约[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(5): 525~528.
- 尼玛次仁, 谢尧武, 沙昭礼, 等. 2013. 1:250 000 那曲县幅区域地质调查报告[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 潘桂棠, 莫宣学, 候增谦, 等. 2006. 冈底斯造山带的时空结构和演化[J]. *岩石学报*, 22(3): 521~533.
- 彭智敏, 耿全如, 刘书生, 等. 2015. 西藏那曲地区嘎加组闪长玢岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地球化学特征[J]. *地质通报*, 34(2/3): 354~363.
- 彭智敏, 耿全如, 张 璋, 等. 2011. 西藏那曲地区流纹岩 LA-ICP-

- MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. 地质通报, 30(7): 1 050~1 059.
- 曲晓明, 辛洪波, 杜德道, 等. 2012. 西藏班公湖-怒江缝合带中段碰撞后 A 型花岗岩的时代及其对洋盆闭合时间的约束[J]. 地球化学, 41(1): 1~14.
- 王立全, 潘桂棠, 丁俊, 等. 2013. 青藏高原及邻区地质图及说明书(1:1 500 000)[M]. 北京: 地质出版社.
- 王中刚, 于学元, 赵振华, 等. 1989. 稀土元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社.
- 吴浩, 李才, 胡培远, 等. 2013. 西藏尼玛县塔色普勒地区去申拉组火山岩的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 32(7): 1 014~1 026.
- 吴浩, 李才, 胡培远, 等. 2014. 藏北班公湖-怒江缝合带早白垩世双峰式火山岩的确定及其地质意义[J]. 地质通报, 33(11): 1 804~1 814.
- 解龙, 顿都, 朱利东, 等. 2015. 西藏北冈底斯扎独顶 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及其地质意义[J]. 中国地质, 42(5): 1 214~1 227.
- 尹志强, 吕晓春, 付小虎, 等. 2023. 藏东洛隆地区早白垩世冻错岩体岩石成因及构造意义[J]. 矿物岩石, 43(2): 69~81.
- 张开江, 刘治博, 李海峰, 等. 2019. 西藏班公湖-怒江缝合带中段去申拉组火山岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 38(6): 1 018~1 027.
- 张开均, 夏斌, 夏邦栋, 等. 2003. 冈底斯弧后早白垩世裂谷作用的沉积学证据[J]. 沉积学报, 21(1): 31~37.
- 张乐. 2015. 西藏冈底斯中北部永珠地区花岗岩类年代学与地球化学[D]. 长春: 吉林大学.
- 张亮亮, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2010. 西藏北冈底斯巴尔达地区岩浆作用的成因: 地球化学、年代学及 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. 岩石学报, 26(6): 1 871~1 888.
- 张亮亮, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2011. 西藏申扎早白垩世花岗岩类: 板片断离的证据[J]. 岩石学报, 27(7): 1 938~1 948.
- 张诗启, 戚学祥, 韦诚, 等. 2018. 拉萨地体北部永珠地区早白垩世岩浆岩地球化学、锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义[J]. 地球科学, 43(4): 1 085~1 109.
- 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2010. 西藏措勤尼雄岩体的岩石成因及其对富 Fe 成矿作用的潜在意义[J]. 岩石学报, 26(6): 1 793~1 804.
- 张晓倩, 朱弟成, 赵志丹, 等. 2012. 西藏措勤麦嘎岩基的锆石 U-Pb 年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素: 对中部拉萨地块早白垩世花岗岩类岩石成因的约束[J]. 岩石学报, 28(5): 1 615~1 634.
- 张士贞, 李奋其, 刘函, 等. 2021. 中拉萨地块亚热地区早白垩世辉长岩: 班公湖-怒江洋南向俯冲板片断离的岩浆作用响应[J]. 地质通报, 40(11): 1 852~1 864.
- 扎西平措, 王旭辉, 解鸿儒, 等. 2024. 北拉萨地块东段早白垩世麦巴岩体成因及构造背景: 来自锆石 U-Pb 年代学和地球化学的制约[J/OL]. 成都理工大学学报(自然科学版). <https://link.cnki.net/urlid/51.1634.N.20240912.1011.002>.
- 郑有业, 许荣科, 张阳刚, 等. 2008. 西藏日土岩基三宫岩石序列地球化学、年代学及构造意义[J]. 岩石学报, 24(2): 368~376.
- 朱弟成, 潘桂棠, 王立全, 等. 2008. 西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论[J]. 地质通报, 27(9): 1 535~1 550.