



移动阅读

侯德华, 潘志龙, 杨鑫朋, 等, 2023. 西藏札佐晚白垩世中期埃达克岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 沉积与特提斯地质, 43(3): 592–603. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.01006

HOU D H, PAN Z L, YANG X P, et al., 2023. Chronology, geochemistry and tectonic significance of middle stage of Late Cretaceous adakite in Zhazuo area, Tibet[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(3): 592–603. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.01006

西藏札佐晚白垩世中期埃达克岩年代学、地球化学及其构造意义

侯德华, 潘志龙, 杨鑫朋, 张立国, 何娇月, 张欢, 程洲, 王硕, 王金贵

(河北省区域地质调查院(河北省地学旅游研究中心), 河北 廊坊 065000)

摘要: 为解释南冈底斯晚白垩世埃达克质岩石成因及其地球动力学机制, 本文对西藏扎囊县札佐地区二长花岗岩开展了锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素和全岩地球化学分析。札佐二长花岗岩锆石 U-Pb 定年为 80.43 ± 0.62 Ma, 其 SiO_2 为 66.19%~66.84%, Al_2O_3 为 15.17%~15.48%, MgO 为 1.67%~1.91%, Mg# 为 47.4~51.5, K_2O 为 3.86%~4.09%, $A/\text{CNK}=0.91\sim 1.01$, 属准铝质高钾钙碱性岩石。岩石轻稀土富集明显, 高 Sr ($492 \times 10^{-6} \sim 670.2 \times 10^{-6}$), 低 Y ($8.27 \times 10^{-6} \sim 14.99 \times 10^{-6}$), Yb ($1.07 \times 10^{-6} \sim 1.79 \times 10^{-6}$), 高 Sr/Y (35.0~81.0), 高 La/Yb (17.4~21.4), 弱负 Eu 异常, 具埃达克岩地球化学特征。相对富集大离子亲石元素(LILE), 亏损高场强元素(HFSE)和重稀土。锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 10.5~14.1, 单阶段 Hf 模式年龄(t_{DM1})为 184.8~326.1 Ma, 平均为 203.4 Ma, 二阶段 Hf 模式年龄(t_{DM2})为 247.2~476.0 Ma, 平均为 287.1 Ma, 略大于侵位年龄, 指示岩浆物质来源于俯冲洋壳, 并可能卷入俯冲沉积物。岩石中地幔组分印记 Mg# 值和相容元素 Ni、Cr 含量较高, 表明熔体在上升过程中与上覆地幔楔发生反应。研究分析表明, 在新特提斯洋洋脊俯冲作用下, 高温热流透过板片窗导致洋壳(及俯冲沉积物)部分熔融形成札佐埃达克质二长花岗岩。同时表明, 在 80 Ma 左右, 新特提斯洋仍处于洋脊俯冲阶段。

关键词: 南冈底斯; 晚白垩世; 埃达克岩; Lu-Hf 同位素; 洋脊俯冲

中图分类号: P581; P595

文献标识码: A

Chronology, geochemistry and tectonic significance of middle stage of Late Cretaceous adakite in Zhazuo area, Tibet

HOU Dehua, PAN Zhilong, YANG Xinpeng, ZHANG Ligu, HE Jiaoyue, ZHANG Huan, CHENG Zhou, WANG Shuo, WANG Jingui

(Hebei Institute of Regional Geological Survey (Geoscience Tourism Research center of Hebei Province), Langfang 065000, China)

Abstract: In order to explain late Cretaceous adakitic rocks in South Gangdese and the geodynamic mechanism, we present zircon U-Pb chronology, Lu-Hf isotope and geochemistry analysis for the monzogranite from the Zhazuo area, Zhanang, Tibet. The zircon U-Pb dating yields 80.43 ± 0.62 Ma for the Zhazuo monzogranite. The rocks are high-K Calc-alkaline metaluminous, with SiO_2 (66.19%~66.84%), Al_2O_3 (15.17%~15.48%), MgO (1.67%~1.91%), Mg# (47.4~51.5), K_2O (3.86%~4.09%), A/CNK (0.91~1.01). The rocks show typical adakitic features, with strongly enriched in LREE, high Sr ($492 \times 10^{-6} \sim 670.2 \times 10^{-6}$), low Y

收稿日期: 2020-08-11; 改回日期: 2021-01-22; 责任编辑: 黄春梅

作者简介: 侯德华(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质调查工作。E-mail: dhhou@qq.com

资助项目: “冈底斯-喜马拉雅铜矿资源基地调查”(DD20160015-09)

($8.27 \times 10^{-6} \sim 14.99 \times 10^{-6}$) and Yb ($1.07 \times 10^{-6} \sim 1.79 \times 10^{-6}$), high Sr/Y (35.0~81.0) and La/Yb (17.4~21.4) and slightly negative Eu anomalies. They are enriched in LILE and depleted in HFSE, HREE. Zircon $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from 10.5 to 14.1, with t_{DM1} ranging from 184.8 Ma to 326.1 Ma and t_{DM2} ranging from 247.2 Ma to 476.0 Ma, slightly older than the emplaced age, indicating that the magma is derived from subducted oceanic crust probably with some subducted sediments. The Mg# value of the mantle component imprint in the rock and the content of compatible elements Ni and Cr are high, indicating that the melts have interacted with the mantle during ascent. Research analysis shows that the high heat flow flows through the slab window, which induce partial melting of oceanic crust and some subducted sediments, and forms the adakitic monzogranite in the Zhazuo area under the geodynamic setting of ridge subduction. It further indicates that Neo-Tethys is still in the ridge subduction stage at about 80 Ma.

Key words: south Gangdese; Late Cretaceous; adakite; Lu-Hf; Ridge subduction

0 引言

青藏高原原因经历了长期复杂的构造演化过程:冈瓦纳大陆裂解—特提斯洋盆扩张—大洋板片俯冲消减及闭合—陆陆碰撞—陆内造山(许志琴等, 2011; Zhu et al., 2013), 已成为地学研究的天然场所。在上述地质过程中, 伴随着广泛而强烈的岩浆活动, 形成了遍布高原且种类繁多的火成岩, 尤以冈底斯带火成岩分布最为集中(莫宣学, 2011), 构成一条平行于主碰撞带的近东西向展布的冈底斯岩浆岩带, 纪伟强称之为“西藏南部冈底斯岩基”(纪伟强等, 2009)。近些年研究成果表明, 侏罗纪至中新世埃达克质岩石在冈底斯带内广泛发育, 对于不同时期埃达克质岩石成因及其背后地球动力学背景解释均存在一定争议(Guo et al., 2007; Wen et al., 2008a, 2008b; 朱弟成等, 2009; 管琪等, 2010; Chen et al., 2015)。关于南冈底斯带晚白垩世埃达克岩, 其成因上早期学者管琪, Wen et al. (2008a)认为是由增厚下地壳部分熔融形成的; 随着研究深入, 近年来更多学者(Ma et al., 2013; 姚兴华等, 2019; Zhang et al., 2010; 代作文等, 2018; 刘金恒, 2018; 孟繁一等, 2010)认为是由俯冲洋壳和新生下地壳部分熔融形成的。而其形成环境及构造背景同样存在分歧, Zhang et al. (2004)认为晚白垩世早期埃达克岩是该时期新特提斯洋进入板片回返阶段的产物; Wen et al. (2008a)依据冈底斯南带存在 15 Ma 岩浆间断, 认为是新特提斯洋开始平板俯冲导致晚白垩世早期岩浆爆发; Zhang et al. (2010)通过对米林地区 86~90 Ma 埃达克质紫苏花岗岩分析, 认为其是由新特提斯洋洋脊俯冲形成的。本次研究笔者对冈底斯带南缘东段扎囊县札佐地区的晚白垩世中期埃达克岩开展年代学 U-Pb 测年、岩石地球化学分析及 Lu-Hf 同位素分析, 以期对冈底斯南缘

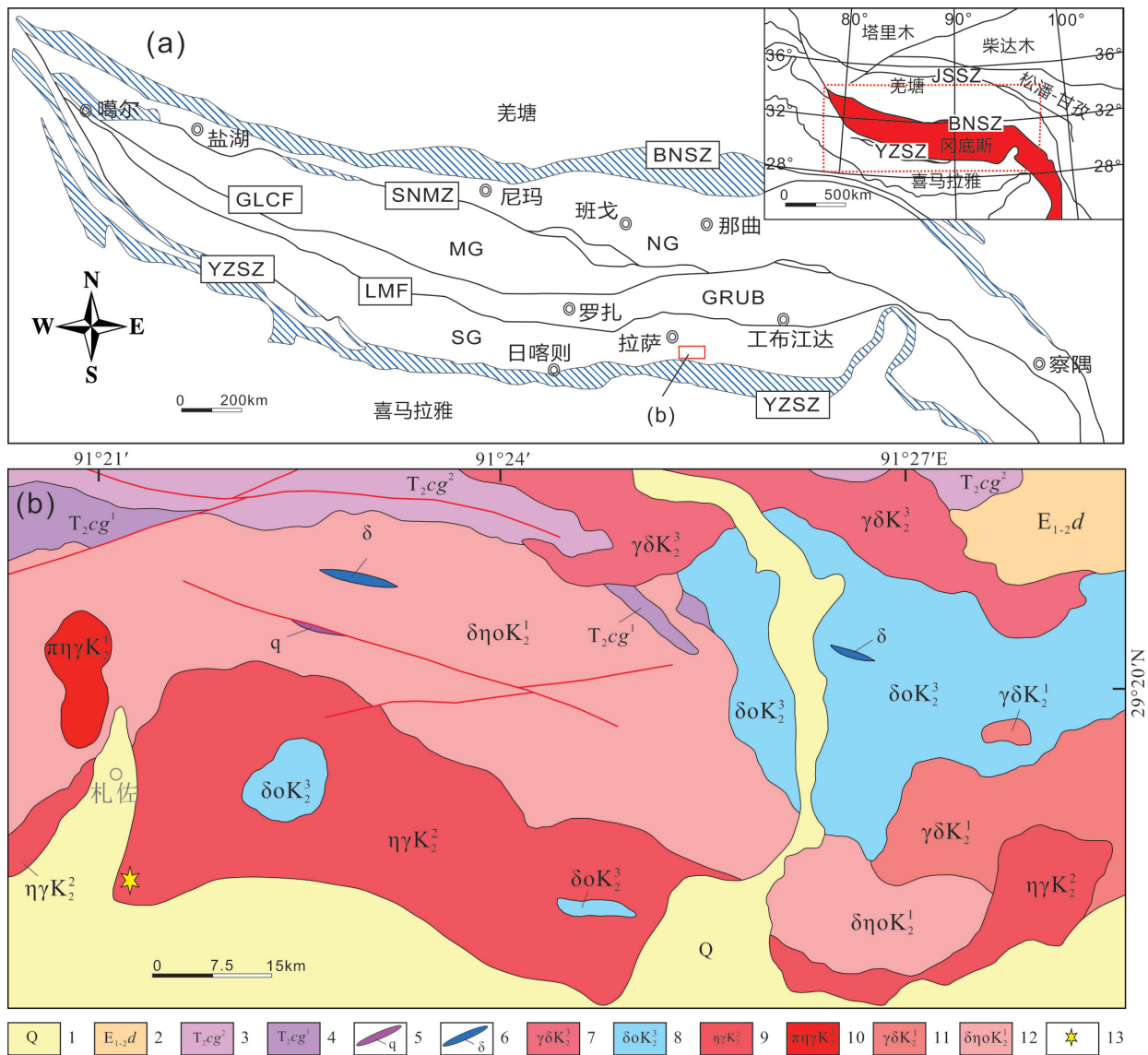
晚白垩世埃达克岩成因及其背后地球动力学背景提供约束。

1 地质概况

青藏高原依次由喜马拉雅地块、拉萨地块、羌塘地块和松潘-甘孜地块南北向拼贴而成, 其中拉萨地块又称为冈底斯造山带, 是一条近东西向延伸的构造-岩浆岩带, 由南向北被洛巴堆-米拉山断裂带(LMF), 噶尔-隆格尔-措麦断裂带(GLCF)和狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带(SNMZ)细分为南冈底斯(SG)、冈底斯弧背断隆带(GRUB)、中冈底斯(MG)和北冈底斯带(NG)(潘桂棠等, 2006)。研究区位于冈底斯南缘东段西藏扎囊县札佐地区(图 1), 地层出露较少, 主要为中三叠统昌果组, 一段岩性为一套以安山岩为主的中性火山岩, 夹少量流纹岩; 二段岩性组合主要为碳酸盐岩夹板岩和中性火山岩。该组具有明显的变质变形特征, 构造置换强烈。区内岩浆活动十分强烈, 主要集中在晚白垩世, 出露岩体由老到新依次为晚白垩世早期花岗闪长岩、斑状二长花岗岩, 晚白垩世中期二长花岗岩, 晚白垩世晚期石英闪长岩、花岗闪长岩, 晚白垩世岩浆岩侵入中三叠统昌果组。东北部出露以中酸性火山熔岩, 火山碎屑岩为主的古近纪典中组, 该组以喷发不整合于下部晚白垩世侵入岩体和 中三叠统昌果组之上。晚白垩世中期二长花岗岩紧临雅江缝合带, 呈近东西向的带状展布于札佐至之纳一带, 岩株状产出, 出露面积约 15.0 km²。岩体中发育灰黑色细粒闪长岩捕虏体, 脉体不发育。

2 样品特征与分析方法

本次研究在札佐地区二长花岗岩体天然露头采样 5 件样品, 样品新鲜, 未含捕虏体, 野外未见明显蚀变。岩石风化面灰褐色或深灰色, 新鲜面浅粉



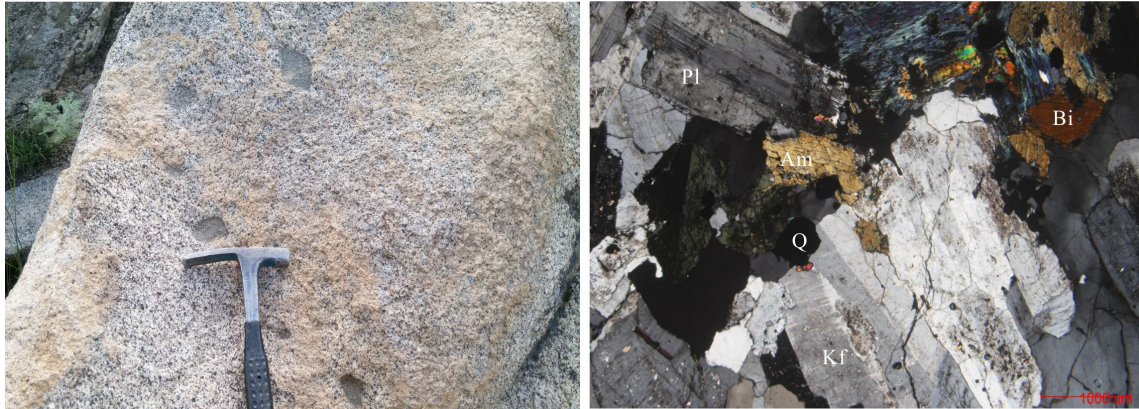
1—第四系；2—典中组；3—昌果组二段；4—昌果组一段；5—石英脉；6—闪长岩脉；7—晚白垩世晚期花岗闪长岩；8—晚白垩世晚期石英闪长岩；9—晚白垩世中期二长花岗岩；10—晚白垩世早期斑状二长花岗岩；11—晚白垩世早期花岗闪长岩；12—晚白垩世早期石英二长闪长岩；13—采样点；BNSZ—班公湖-怒江缝合带；SNMZ—狮泉河-纳木错蛇绿混杂岩带；GLCF—噶尔-隆格尔-措麦断裂带；LMF—洛巴堆-米拉山断裂带；YZSZ—雅鲁藏布缝合带；NG—北冈底斯；MG—中冈底斯；GRUB—冈底斯弧背断隆带；SG—南冈底斯。

图1 青藏高原及冈底斯构造简图(a; 据朱弟成等, 2009)和札佐地区地质图(b)

Fig. 1 Tectonic sketch of Gangdese and Tibet Plateau (a; after Zhu et al., 2009) and geological map of the Zhazuo region(b)

色, 表面具球状风化特征, 可见深灰色细粒闪长质包体(图 2(a))。岩石由斜长石、钾长石、石英、黑云母、角闪石组成, 中粒花岗结构, 块状构造。石英含量约 20%, 它形粒状, 杂乱分布, 粒度一般 2~5 mm, 少数 0.5~2 mm, 粒内具波状消光, 粒间齿状镶嵌, 少数粒内嵌布长石、云母。斜长石含量约 45%, 半自形板状, 杂乱分布, 粒度一般 2~4 mm, 部分 0.5~2 mm, 具不均匀绢云母化、黝帘石化等, 多数

表面脏, 部分隐约见环带结构, 局部与钾长石接触部位具交代蠕虫、净边结构, 由于蚀变及切面等因素影响, 聚片双晶不发育。钾长石含量 20%~25%, 为微斜长石, 半自形板状, 杂乱分布, 粒度一般 2~5 mm, 部分 0.8~2 mm, 格子双晶发育, 轻微高岭土化, 有的具简单双晶, 有的粒内见斜长石包体, 交代斜长石。黑云母含量 5%~10%, 叶片状, 星散分布, 粒径一般 0.2~2 mm, 多被绿泥石、绿帘石交代呈假像,



Q—石英；Pl—斜长石；Kf—钾长石；Am—角闪石；Bi—黑云母。

图2 札佐二长花岗岩野外及镜下特征（正交偏光）

Fig. 2 Field photo and microphotograph of the Zhazuo monzogranite

有的析出金红石，少残留，残留部分呈褐色。角闪石含量约5%±，半自形柱粒状，零星分布，粒度一般0.2~2 mm，轻微次闪石化，多色性明显。岩内少见硅质充填裂隙(图2b)。

本文对研究区札佐村南侧1件(ZZTW1)二长花岗岩样品开展了锆石U-Pb定年和Lu-Hf同位素分析，4件(ZZ01-04)样品开展岩石地球化学分析。锆石挑选、制靶按照标准流程完成，然后对靶上锆石进行透射光、反射光、阴极发光(CL)照相分析。锆石单矿物挑选在河北廊坊区域地质调查研究院实验室完成，锆石阴极发光和LA-ICP-MS U-Pb同位素年龄分析在北京科荟测试技术有限公司进行。锆石年龄计算采用国际标准锆石95100作为外标，元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃NIST 610作为外标， ^{29}Si 作为内标元素进行校正。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用ICPMSDatacal软件，并采用Anderson(2012)软件对测试数据进行普通铅校正，年龄计算及谐和图采用ISOPLOT 2.49软件完成(Liu et al., 2010)。Hf同位素测试在北京科荟测试技术有限公司进行，利用LA-ICP-MS系统对锆石U-Pb定年的同一测点进行了Hf同位素组成测试。实验过程中采用He作为剥蚀物质载气，激光束直径为40 μm，激光脉冲频率为4~6 Hz。本次分析过程中使用锆石国际标样Mud tank作为外标。仪器分析条件和数据获取方法参考侯可军等(2007)和Wu et al.(2006)。

本次测试样品主量元素及微量元素在河北省区域地质矿产调查研究所实验室分析完成。主量元素(SiO_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 MnO 、 Na_2O 、

K_2O 、 CaO 、 P_2O_5)分析采用X射线荧光熔片法完成，分析精度为0.05%；FeO采用滴定分析完成；灼烧减量、 H_2O^+ 和 H_2O^- 用重量法完成。微量元素分析采用 $\text{HF}+\text{HClO}_3+\text{HNO}_3$ 溶解样品，王水复溶，在线加入Rh内标溶液，用ThermoFisher X Series II型LA-ICP-MS完成测定，稀土元素分析精度为 0.1×10^{-6} ，微量元素分析精度小于 5×10^{-6} 。

3 分析结果

3.1 岩石地球化学

札佐二长花岗岩4件样品主量、微量和稀土元素分析结果见表1。 SiO_2 为66.19%~66.84%，平均为66.77%； Al_2O_3 为15.17%~15.48%，平均为15.29%； MgO 为1.67%~1.91%， Mg\# 为47.4~51.5，平均为49.5； Na_2O 为3.49%~3.92%， K_2O 为3.86%~4.09%，全碱ALK为7.58%~7.82%，平均为7.69%， $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为1.00~1.17；里特曼指数 σ 为2.52~2.46。在TAS图解(图3a)中，样品落入花岗闪长岩与石英二长岩交界区，为亚碱性岩系，结合室内薄片鉴定结果综合定名为二长花岗岩。在 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解(图3b)中，样品均落入高钾钙碱性系列区；碱度率(A.R.)为2.41~2.59；铝饱和指数 $\text{A}/\text{CNK}=0.91\sim 1.01$ ， $\text{A}/\text{NK}=1.43\sim 1.50$ ，岩石属准铝质。综上，岩石具富硅、富碱、富钾特征，属准铝质高钾钙碱性系列。

札佐二长花岗岩稀土总量 ΣREE (包括Y元素)为 $101.0\times 10^{-6}\sim 161.1\times 10^{-6}$ ，平均为 131.9×10^{-6} ，略低于上地壳稀土总量(210×10^{-6})，高于下地壳稀土总量(74×10^{-6}) (Taylor et al., 1979)；轻稀土LREE/重稀土HREE为4.96~5.55， $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 值为11.73~14.45，

表 1 二长花岗岩主量、稀土、微量元素分析结果
Table 1 Major elements, REE and trace elements of the monzogranite

样号	ZZ01	ZZ02	ZZ03	ZZ04	样号	ZZ01	ZZ02	ZZ03	ZZ04
SiO ₂	66.19	66.84	67.56	66.48	Hf	3.12	4.64	4.45	3.69
Al ₂ O ₃	15.48	15.27	15.23	15.17	Ta	0.69	0.69	0.38	0.89
TiO ₂	0.52	0.49	0.47	0.56	W	0.33	0.41	0.56	0.47
Fe ₂ O ₃	1.59	1.82	1.62	1.73	Tl	0.44	0.75	0.66	0.53
FeO	2.05	1.75	1.57	2.05	Pb	11.1	16.6	13.1	11.4
CaO	3.11	2.87	2.4	3.39	Bi	0.07	0.12	0.06	0.055
MgO	1.85	1.81	1.67	1.91	Th	9.84	15.3	5.51	33.2
K ₂ O	3.86	4.09	3.91	3.95	U	2.27	3.82	2.76	8.47
Na ₂ O	3.82	3.49	3.92	3.77	La	23.56	31	21.29	29.38
MnO	0.06	0.06	0.06	0.07	Ce	45.75	61.84	38.57	56.44
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.14	0.17	Pr	5.87	7.57	4.57	6.63
LOS	1.14	1.19	1.27	0.61	Nd	20.35	27.91	17.2	24.3
Σ	99.84	99.85	99.82	99.86	Sm	3.42	4.77	2.85	4.16
ALK	7.68	7.58	7.82	7.72	Eu	0.86	1.1	1.1	0.99
K ₂ O/Na ₂ O	1.01	1.17	1	1.05	Gd	2.93	3.85	2.37	3.58
A/NK	1.48	1.5	1.43	1.45	Tb	0.39	0.56	0.33	0.49
A/CNK	0.96	0.99	1.01	0.91	Dy	2.03	3.03	1.76	2.64
Mg#	47.44	50.84	51.54	48.23	Ho	0.37	0.54	0.32	0.49
Li	10.3	14.8	16.8	14.8	Er	1.08	1.63	0.97	1.44
Be	1.46	1.54	1.44	1.61	Tm	0.19	0.28	0.17	0.22
Sc	7.76	8.53	5.92	9.13	Yb	1.1	1.79	1.07	1.41
V	82.7	88.0	74.2	93.6	Lu	0.16	0.25	0.16	0.23
Cr	33.3	35.0	29.4	31.1	Y	11.89	14.99	8.27	13.17
Co	10.1	10.4	9.9	11.8	ΣREE	119.95	161.1	101	145.56
Ni	18.1	18.4	15.1	16.9	LREE/HREE	4.96	4.99	5.55	5.15
Cu	23.6	23.2	6.15	9.50	(La/Yb) _N	14.45	11.73	13.43	14.1
Zn	47.5	47.6	36.9	47.7	δEu	0.81	0.76	1.26	0.77
Ga	15.8	19.4	17.9	19.5	Sr/Y	51.42	35.05	81.04	37.36
Rb	93.3	125	107	113	Th/Ce	0.22	0.25	0.14	0.59
Sr	611	525	670	492	Sm/Nd	0.17	0.17	0.17	0.17
Zr	101	143	141	110	(La/Sm) _N	4.33	4.09	4.71	4.44
Nb	9.06	9.34	5.30	8.00	(Gd/Yb) _N	2.15	1.75	1.8	2.06
Mo	0.87	0.86	0.93	1.30	Rb/Sr	0.15	0.24	0.16	0.23
Sn	0.87	1.17	0.92	1.13	Nb/Ta	13.16	13.55	13.88	8.99
Cs	1.40	2.88	2.96	4.34	Zr/Hf	32.21	30.85	31.68	29.93
Ba	443	563	713	450	Th/Yb	8.94	8.52	5.15	23.55

注：LOS为烧失量；ALK=Na₂O+K₂O, A/NK=Al₂O₃/(Na₂O+K₂O), A/CNK=Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O); Mg#=100×Mg/(Mg+Fe); δEu=2Eu_N/(Sm_N+Gd_N), 其中N表示球粒陨石标准化。

轻稀土富集明显; (La/Sm)_N 值为 4.09~4.71, (Gd/Yb)_N 值为 1.75~2.15, 显示轻稀土较重稀土分馏强烈; Sm/Nd 值为 0.17<0.333, 显示由轻稀土富集稀土元素组成; δEu 值为 0.76~1.26(仅一个样品为异常, 平均为 0.9), 略显负异常; 低 Yb 含量(1.07~1.79, 平均为 1.34)和 Y 含量(8.27~14.99, 平均为 12.08)≈

10Yb; La/Yb>20(17.4~21.4, 平均为 19.9)稀土配分曲线(图 4a)为 LREE 富集的右倾型。在原始地幔标准化的微量元素蜘蛛网图中(图 4b), 相对富集大离子亲石元素(LILES)Rb、Ba、U、Th、K 和 LREE, 亏损高场强元素(HFSE)Ta、Nb、Y、Ti 及 HREE、P, 显示出与板块俯冲作用有关的岛弧岩浆岩特征。

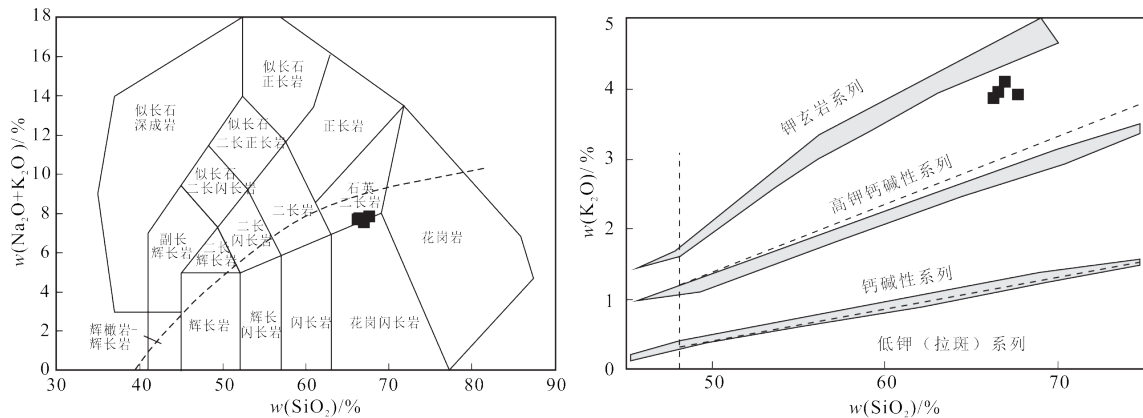


图3 二长花岗岩 TAS 图解 (a; 底图据 Middlemost (1994)) 和 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解 (b; 底图据 Peccerillo et al. (1976))
Fig. 3 TAS diagram (a; base map after Middlemost (1994)) and Plots of $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (b; base map after Peccerillo et al. (1976)) of the monzogranite

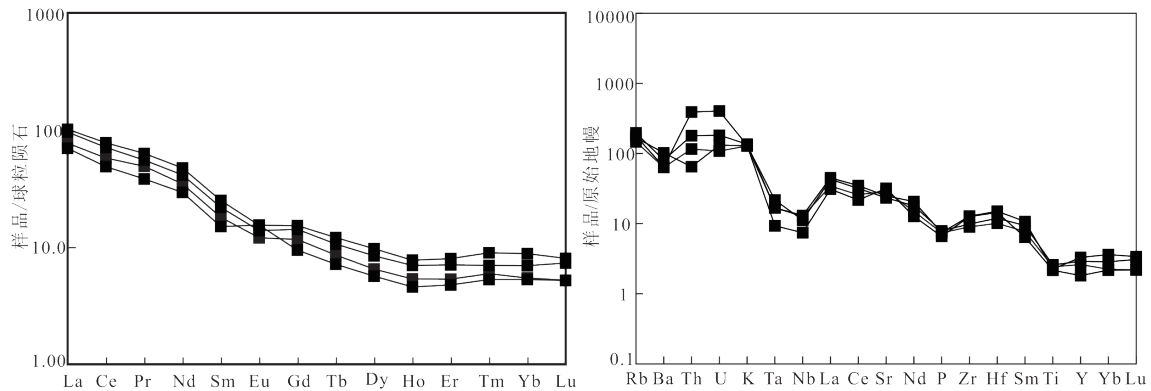


图4 二长花岗岩稀土元素配分曲线 (a) 和微量元素配分曲线 (b) (稀土元素标准化值据 Boynton and William, 1984; 微量元素标准化值据 McDonough and Sun, 1995)
Fig. 4 Chondrite-normalized REE pattern (a) and Primitive mantle-normalized multi-element spider diagram (b) for the monzogranite in Zhazuo (Chondrite normalizing values after Boynton and William, 1984; Primitive mantle normalizing values after McDonough and Sun, 1995)

3.2 锆石 U-Pb 年龄

札佐二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄见表 2。札佐二长花岗岩锆石自形程度较高,多成无色短柱状,发育良好的震荡环带(图 5), Th/U 值在 0.66~1.16 之间,属于典型的岩浆成因锆石。本次选取 20 颗锆石进行测试,除 8 号点和 12 号点偏离谐和线较远,给与剔除,其余 18 个点年龄十分谐和(图 6), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 78.8~82.8Ma, 加权平均年龄为 $80.43 \pm 0.62\text{Ma}$, 能够代表二长花岗岩侵入结晶年龄,因此札佐二长花岗岩属于晚白垩世中期岩浆产物。

3.3 锆石 Lu-Hf 同位素

Lu-Hf 同位素分析结果见表 3。札佐二长花岗岩样品中 12 颗锆石 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.016 298~0.033 991, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 为 0.000 681~0.001 611, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$

为 0.283 020~0.283 409, 锆石 Hf 同位素分布均一, 指示单一岩浆源区, 表明锆石形成后, 仅存在少量放射性成因 Hf 积累, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试结果可以代表锆石形成时比值。 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 变化在 -0.98~-0.96 之间。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为较高的正值, 主要变化于 10.5~14.1 之间。单阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 主要集中在 184.8~326.1 Ma 之间, 平均为 203.4 Ma。二阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM2}) 变化于 247.2~476.0 之间, 平均为 287.1 Ma。

4 讨论

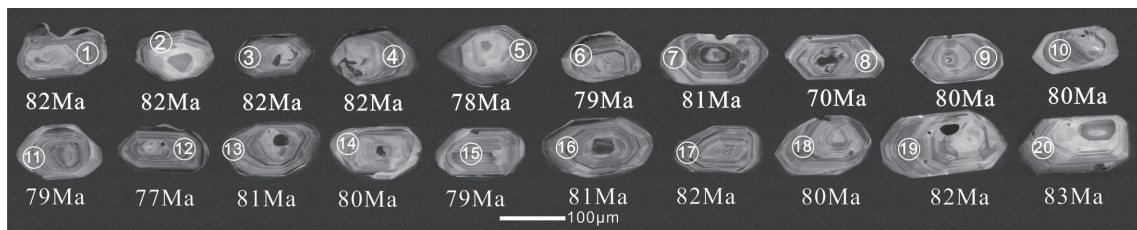
4.1 岩石成因

4.1.1 埃达克岩确定及源区性质

“埃达克岩(adakite)”是 1990 年由 Defant and Drummond(1990)在研究阿留申群岛火山岩提

表 2 二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results of the monzogranite

测点	元素含量($\times 10^{-6}$)				同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
ZZTW1-1	6.4	340.8	409.5	0.83	0.047 1	0.002 9	0.083 7	0.005 4	0.012 8	0.000 2	58	137	82	5	82	1
ZZTW1-2	3.9	194.7	248.6	0.78	0.045 9	0.002 8	0.079 9	0.004 8	0.012 7	0.000 2	—	—	78	5	82	1
ZZTW1-3	12.2	595.0	782.6	0.76	0.047 8	0.001 9	0.084 4	0.003 4	0.012 8	0.000 1	87	102	82	3	82	1
ZZTW1-4	7.6	337.7	513.0	0.66	0.047 3	0.001 6	0.083 3	0.003 0	0.012 8	0.000 1	65	81	81	3	82	1
ZZTW1-5	6.3	306.2	442.3	0.69	0.050 7	0.002 0	0.086 1	0.003 7	0.012 2	0.000 2	228	58	84	3	78	1
ZZTW1-6	5.5	281.4	375.4	0.75	0.054 8	0.002 6	0.092 9	0.004 3	0.012 3	0.000 2	467	106	90	4	79	1
ZZTW1-7	13.4	959.5	827.1	1.16	0.049 7	0.001 7	0.085 9	0.002 9	0.012 6	0.000 2	189	80	84	3	81	1
ZZTW1-8	4.6	265.6	365.4	0.73	0.059 3	0.008 4	0.086 6	0.011 1	0.010 8	0.000 3	589	313	84	—	70	2
ZZTW1-9	4.5	229.6	314.3	0.73	0.048 8	0.002 6	0.083 2	0.004 2	0.012 5	0.000 2	139	124	81	4	80	1
ZZTW1-10	5.4	272.0	384.1	0.71	0.051 8	0.002 3	0.089 0	0.004 0	0.012 5	0.000 2	276	104	87	4	80	1
ZZTW1-11	18.5	859.3	1295.1	0.66	0.046 9	0.001 4	0.080 0	0.002 3	0.012 4	0.000 1	43	67	78	2	79	1
ZZTW1-12	10.0	454.6	714.0	0.64	0.057 3	0.005 3	0.095 1	0.009 2	0.012 0	0.000 2	502	206	92	9	77	1
ZZTW1-13	6.7	382.3	436.6	0.88	0.052 0	0.004 4	0.090 3	0.007 4	0.012 6	0.000 3	283	201	88	7	81	2
ZZTW1-14	3.0	167.1	191.5	0.87	0.049 5	0.003 1	0.084 7	0.005 2	0.012 5	0.000 2	169	146	83	5	80	1
ZZTW1-15	3.8	194.0	255.9	0.76	0.049 2	0.003 1	0.083 5	0.005 2	0.012 4	0.000 2	167	-51	81	5	79	1
ZZTW1-16	8.3	494.1	529.7	0.93	0.051 5	0.002 5	0.088 8	0.004 2	0.012 6	0.000 1	261	113	86	4	81	1
ZZTW1-17	8.7	551.4	508.8	1.08	0.052 3	0.002 9	0.092 8	0.005 5	0.012 8	0.000 2	298	128	90	5	82	1
ZZTW1-18	7.0	364.4	460.7	0.79	0.046 7	0.003 2	0.080 2	0.005 3	0.012 5	0.000 2	35	156	78	5	80	1
ZZTW1-19	5.6	285.3	350.9	0.81	0.052 0	0.002 6	0.091 5	0.004 6	0.012 8	0.000 2	287	115	89	4	82	1
ZZTW1-20	4.2	227.3	250.9	0.91	0.047 5	0.005 1	0.082 6	0.008 1	0.012 9	0.000 3	72	237	81	8	83	2



白色圆圈为 U-Pb 测年靶点。

图 5 二长花岗岩锆石阴极发光图像

Fig. 5 Representative cathodoluminescence (CL) images of zircons from the monzogranite

出的一种具有特定地球化学和成因的火山岩或侵入岩,其地球化学特征是:高 $\text{SiO}_2 \geq 56\%$, 高 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$, $\text{MgO} < 3\%$ (很少高于 6%), $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$, $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$, 高 $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$, LREE 富集, 无 Eu 异常 (或) 轻微负 Eu 异常 (Defant and Drummond, 1990)。

札佐二长花岗岩地球化学特征表明其具有埃达克岩特征, 表现为 $\text{SiO}_2 > 56\%$ ($66.19\% \sim 66.84\%$), $\text{Al}_2\text{O}_3 > 15\%$ ($15.17\% \sim 15.48\%$), $\text{MgO} < 3\%$ ($1.67\% \sim 1.91\%$), $\text{Sr} > 400 \times 10^{-6}$ ($492 \times 10^{-6} \sim 670.2 \times 10^{-6}$), $\text{Y} < 18 \times 10^{-6}$ ($8.27 \times 10^{-6} \sim 14.99 \times 10^{-6}$) 和 $\text{Yb} < 1.9 \times 10^{-6}$ ($1.07 \times 10^{-6} \sim 1.79 \times 10^{-6}$), $\text{Sr}/\text{Y} > 20$ ($35.0 \sim 81.0$), $\text{La}/\text{Yb} > 20$

($17.4 \sim 21.4$, 平均为 19.9), LREE 富集, 具弱负 Eu 异常 ($0.76 \sim 1.26$, 仅一个样品正异常, 平均为 0.9), 高场强元素 (HFSE) 亏损。在 $\text{Yb}_N - (\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 $\text{Y} - \text{Sr}/\text{Y}$ 判别图解中, 所有样品均落入埃达克岩区 (图 7)。

札佐二长花岗岩与典型的埃达克岩相较相对富钾, K_2O 含量 ($3.86\% \sim 4.09\%$) 且 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ ($0.99 \sim 1.17$) < 2 , 属于高钾钙碱性系列, 高于源自下地壳的埃达克岩, 类似于中国东部富钾埃达克岩 (续海金和马昌前, 2003)。花岗岩部分熔融实验表明, 初生物质的 K 含量对派生熔体的 K 含量有明显影响。

源于板片熔融的埃达克岩 K_2O 平均 1.72(Martin, 1999), 其原岩 MORB 的 K_2O 平均含量为 0.18%, 明显低于大陆下地壳 K_2O 含量(2.9%~4.1%)。富钾可能具有多种成因:(1)源区富钾、压力大或部分熔融程度较低(Robert et al., 2002);(2)深部富钾流体参与和下地壳混染(张旗等, 2003);(3)板片熔融卷入俯冲沉积物(Hermann and Spandler, 2006)。

锆石原位 Hf 同位素是揭示地壳演化和示踪岩浆源区的重要手段, 并在岩石学研究中得到了广泛应用。本次锆石 Hf 同位素 $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为较高的正值(10.5~14.1, 平均为 12.3), 高度亏损的 Hf 同位素组成指示岩浆物质来源于亏损地幔或初生地壳的部分熔融(张宏飞等, 2007), 在 $\epsilon_{Hf}(t)$ - t 图解中样品均落入球粒陨石和亏损地幔之间(图 8)。单阶段 Hf

模式年龄(t_{DM1})主要集中在 184.8~326.1 Ma 之间, 平均为 203.4 Ma($\epsilon_{Hf}(t)$ 值为正时多用单阶段模式年龄), 略大于其形成年龄, 进一步说明岩浆来源于亏损地幔或初生地壳物质(吴福元等, 2007)。

4.1.2 岩石成因

札佐二长花岗岩可以通过埃达克岩的成因模型探讨其成因。埃达克岩提出伊始被认为是俯冲洋壳在一定深度部分熔融的产物(Defant and Drummond, 1990), 后续研究表明, 其他构造背景中亦可形成埃达克质岩石。近几年, 关于埃达克岩形成机制, 研究者存在以下 5 种观点: ①俯冲洋壳部分熔融(Ma et al., 2013; 姚兴华等, 2019; Zhang et al., 2010; 代作文等, 2018; 刘金恒, 2018; 孟繁一等, 2010); ②拆沉下地壳熔融(WANG, 2006; Xu et al., 2002); ③增厚镁铁质下地壳熔融(Wen et al., 2008a, 2008b); ④玄武质岩浆底侵(Muir et al., 1995; 章凤奇等, 2010); ⑤幔源玄武质岩浆的结晶分异(Macpherson et al., 2006)。

研究分析表明札佐二长花岗岩属于俯冲洋壳部分熔融产物, 证据如下:(1)首先排除其地幔来源可能。一般认为, 地幔部分熔融不能直接产生花岗岩岩浆(张宏飞等, 2007)。尽管 Jiang et al.(2006)认为有些花岗岩类是富集地幔直接部分熔融的产物, 但札佐二长花岗岩高度亏损的 Hf 同位素组成显然不属于这种情况。且地幔岩浆经过显著分离结晶才能形成花岗质岩石, 区域上必然会形成大量基性岩石, 而该地区未发现大量同期基性岩出露, 因此札佐二长花岗岩不是来自幔源玄武质岩浆的

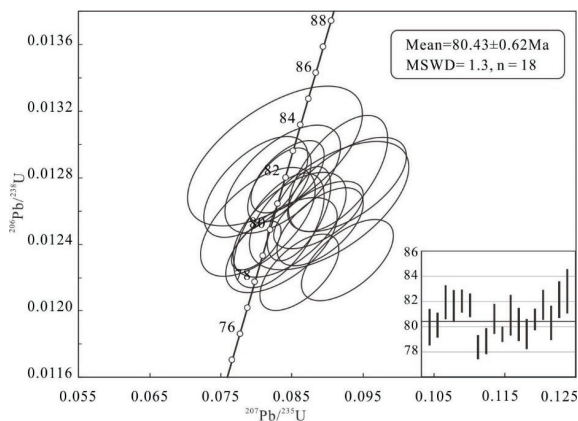


图 6 二长花岗岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及加权平均年龄图
Fig. 6 Zircon U-Pb concordia and average age diagrams for the monzogranite

表 3 二长花岗岩锆石 Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Hf isotopic analysis results of the monzogranite

测点号	t (Ma)	$^{176}Yb/^{177}Hf$	$^{176}Lu/^{177}Hf$	$^{176}Hf/^{177}Hf$	2σ	$\epsilon_{Hf}(t)$	t_{DM1} (Ma)	t_{DM2} (Ma)	$f_{Lu/Hf}$
ZZTW1-2	81.65	0.016 990	0.000 700	0.283 117	0.000 069	14.0	188.1	253.2	-0.98
ZZTW1-4	81.70	0.016 298	0.000 716	0.283 020	0.000 043	10.5	326.5	476.0	-0.98
ZZTW1-5	78.37	0.022 818	0.000 902	0.283 119	0.000 277	13.9	187.6	253.4	-0.97
ZZTW1-7	80.62	0.020 354	0.000 822	0.283 100	0.000 040	13.3	213.7	294.3	-0.98
ZZTW1-10	80.12	0.021 959	0.001 043	0.283 065	0.000 042	12.0	265.5	376.1	-0.97
ZZTW1-11	79.39	0.033 991	0.001 611	0.283 063	0.000 030	11.9	272.4	382.8	-0.95
ZZTW1-13	80.92	0.019 700	0.000 787	0.283 061	0.000 039	11.9	269.1	383.4	-0.98
ZZTW1-15	79.41	0.022 569	0.000 905	0.283 037	0.000 035	11.1	303.4	438.3	-0.97
ZZTW1-16	80.57	0.017 773	0.000 784	0.283 062	0.000 027	12.0	267.3	380.8	-0.98
ZZTW1-18	80.30	0.017 272	0.000 738	0.283 027	0.000 027	10.8	316.2	459.9	-0.98
ZZTW1-19	82.17	0.018 928	0.000 776	0.283 120	0.000 039	14.1	184.8	247.2	-0.98
ZZTW1-20	82.83	0.018 108	0.000 779	0.283 070	0.000 027	12.3	255.8	360.9	-0.98

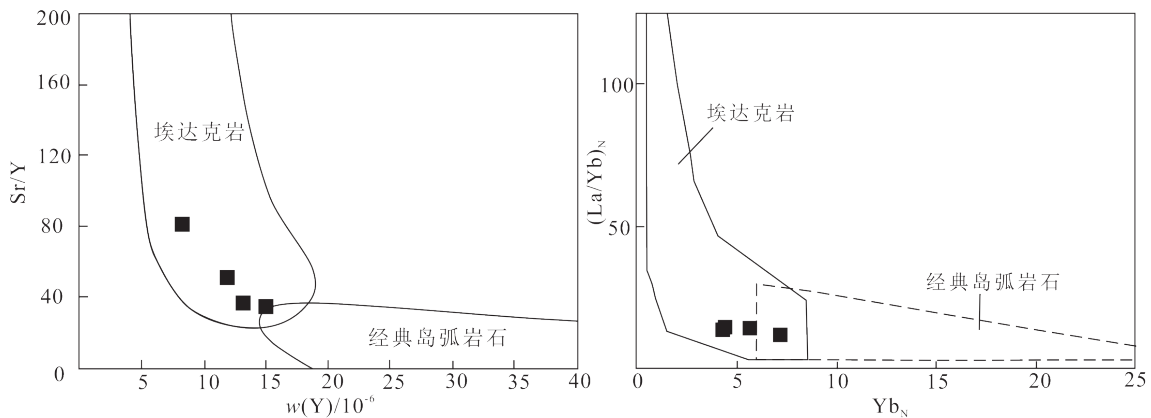


图7 札佐二长花岗岩 Y-Sr/Y(a) 和 Yb_N -(La/Yb) $_N$ (b) 判别图解 (据 Defant and Drummond, 1990)

Fig. 7 Discrimination diagram of Sr/Y-Y(a) and $(La/Yb)_N$ - Yb_N (b) of Zhazuo monzogranite (after Defant and Drummond, 1990)

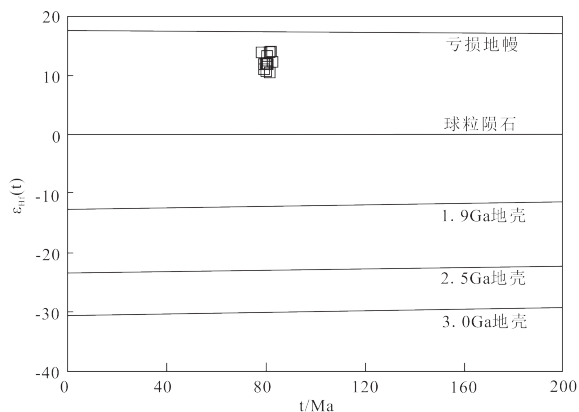


图8 札佐二长花岗岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ -t 图解

Fig. 8 Diagram of zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ -t of the Zhazuo monzogranite

结晶分异；(2)下地壳拆沉熔融主要发生在板内伸展的动力学背景下(王强, 2007), 札佐二长花岗岩紧邻雅鲁藏布江结合带, 形成于晚白垩世中期 (80.43 ± 0.62 Ma), 时间上正处于新特提斯洋壳向北俯冲阶段, 因此札佐二长花岗岩不是下地壳拆沉熔融形成的；(3)札佐二长花岗岩微量元素地球化学特征显示, 其富集富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U、K, 亏损高场强元素 Ta、Nb、Ti 和 P、重稀土 Yb, 显示出与板块俯冲作用有关的岩浆岩特征。在 SiO_2 -Yb 图解上, 大部分样品均落入俯冲洋壳部分熔融区(图 9a)；(3)Zhu et al. (2017)最新研究 $(La/Yb)_N$ 比值发现冈底斯带地壳增厚始于 70 ~ 60 Ma, 晚于札佐二长花岗岩侵位年龄。因此, 拆沉下地壳模式不能用于解释札佐埃达克岩成因；(4)地幔橄榄岩混染印记是证明埃达克岩形成背景的重

要依据(Smithies, 2000), 岩石中地幔组分印记是板片熔融最直接的证据, 熔体上升过程中与上覆地幔楔发生反应, 具体表现为高的 MgO、Ni、Cr, 低的 SiO_2 等(肖龙等, 2004), 往往发生在俯冲环境或者下地壳拆沉区域(Xu et al., 2002)。札佐二长花岗岩高 MgO(1.67%~1.91%), 高 Mg#值为 47.4~51.5, 高相容元素(Cr 29.4×10^{-6} ~ 35.0×10^{-6} , Ni 15.1×10^{-6} ~ 18.4×10^{-6})。在 SiO_2 -MgO 图解上, 样品均落入俯冲洋壳部分熔融区(图 9b)。除俯冲洋壳外, 俯冲沉积物同样可能为札佐埃达克岩提供了物质来源。俯冲沉积物具有较高的 Th 含量, 大量俯冲沉积物参与形成的现代弧岩浆岩 Th/Yb 值往往大于 2 (Hawkesworth et al., 1997), 札佐二长花岗岩具有较高的 Th/Yb(5.15~21.55, 平均为 11.54), 表明大洋沉积物参与岩体形成。以上讨论表明, 札佐二长花岗岩很可能是由俯冲消减的新特提斯洋壳部分熔融, 在此过程中卷入了俯冲沉积物, 熔体在上升过程中与上覆地幔楔发生反应形成的。

4.2 地球动力学机制

关于冈底斯带南缘晚白垩世早(中)期埃达克质岩浆诱发机制和地球动力学背景存在较多争议, 目前主要存在三种观点:(1)板片回返；(2)平板俯冲；(3)洋脊俯冲。Zhang et al.(2004) 提出在晚白垩世早期新特提斯洋已经进入了板片回返阶段。这种俯冲机制会导致拉萨地块岩浆作用来源于地块北部, 从北至南岩浆应显示由老至新的趋势。但冈底斯带岩浆岩由南至北并未显示这种趋势(Zheng et al., 2014), 因此板片回返模式并不能解释晚白垩世埃达克岩岩浆活动。Wen et al.(2008)提出

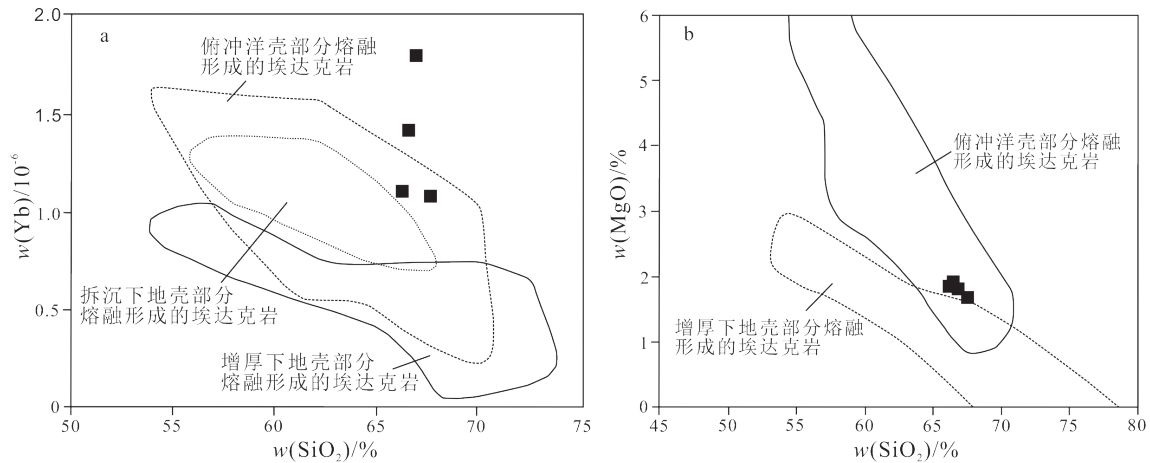


图9 札佐埃达克岩源区判别图解 Yb-SiO₂ (a) 和 MgO-SiO₂(b)(据 Wang, 2006)

Fig. 9 Discrimination diagram of Yb-SiO₂(a) and MgO-SiO₂ (b) of the Zhazuo adakite (after Wang, 2006)

平板俯冲是引起晚白垩世岩浆活动的构造机制 (Wen et al., 2008a, 2008b)。由于平板俯冲会将地幔楔挤出, 或仅存少量地幔楔物质, 导致幔源基性岩浆很难产生, 广泛分布于南冈底斯带同期的幔源弧岩浆岩基本否定了平板俯冲模式 (Xu et al., 2015)。因此洋脊俯冲可能是解释晚白垩世早中期埃达克质岩浆活动的理想模式。Zhang et al. (2010) 提出用洋脊俯冲模式解释里龙与米林之间的埃达克质紫苏花岗岩, 认为在洋脊俯冲作用下, 高温热流透过板片窗导致洋壳部分熔融形成埃达克质岩浆作用。近些年后, 更多的学者倾向于用该模式来解释南冈底斯晚白垩世埃达克岩岩浆活动 (代作文等, 2018; 刘金恒, 2018; Xu et al., 2015; 董随亮等, 2015; 吴昌烜, 2019)。Zheng et al. (2014) 认为在新特提斯洋板片可能在俯冲期中间点即 105±10 Ma 左右开始洋脊俯冲 (Zheng et al., 2014)。研究区东侧桑日县努日、泽当、马门地区发现晚白垩世早期埃达克之火山岩和侵入岩, 其年龄集中在 96~90 Ma, 均认为是洋脊俯冲模式下洋壳部分熔融的产物 (姚兴华等, 2019; 代作文等, 2018; 刘金恒, 2018; Xu et al., 2015; 董随亮等, 2015; 吴昌烜, 2019)。因此, 笔者认为札佐埃达克岩由洋脊俯冲形成, 在 80 Ma 左右新特提斯洋处于洋脊俯冲阶段。

5 结论

(1) 冈底斯南缘扎囊县札佐地区二长花岗岩侵位于 80.43±0.62 Ma, 属于晚白垩世中期岩浆活动产物。

(2) 札佐二长花岗岩显示埃达克岩地球化学特

征, 高 SiO₂, Al₂O₃, MgO, Mg#, Sr, Sr/Y, La/Yb, 低 Y 和 Yb, 无明显负 Eu 异常, 富集大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、U、K, 亏损高场强元素 Ta、Nb、Ti 和 P。其锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为较高的正值 (10.5~14.1), 单阶段 Hf 模式年龄 (t_{DM1}) 为 184.8~326.1 Ma, 略大于其形成年龄, 指示岩浆来源于亏损地幔或初生地壳物质。

(3) 札佐二长花岗岩很可能是新特提斯洋洋脊俯冲模式下, 高温热流透过板片窗导致洋壳部分熔融, 在此过程中并卷入了俯冲沉积物, 熔体在上升过程与上覆地幔楔发生反应形成的产物。同时表明, 在 80 Ma 左右, 新特提斯洋仍处于洋脊俯冲阶段。

References

- Boynton W V, 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies [J]. *Developments in Geochemistry*, 63-114.
- Chen L, Qin K Z, Li G M, et al., 2015. Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Sr-Nd-Pb-Hf isotopes of the Nuri intrusive rocks in the Gangdese area, southern Tibet: Constraints on timing, petrogenesis, and tectonic transformation [J]. *Lithos*, 212-215: 379-396.
- Dai Z W, Li G M, Ding J, et al., 2018. Late Cretaceous adakite in Nuri area, Tibet: products of ridge subduction? [J]. *Earth Science*, 43 (8) : 2727-2741 (in Chinese with English abstract).
- Defant M J, Drummond M S, 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 347 (6294) : 662-665.
- Dong S L, Huang Y, Li G M, et al., 2015. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemistry of late Cretaceous quartz diorite in the Nuri Cu-Mo-W deposit, south Tibet [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 34 (6) : 712-718 (in Chinese with English abstract).
- Guan Q, Zhu D C, Zhao Z D, et al., 2010. Late Cretaceous adakites in

- the eastern segment of the Gangdese Belt, southern Tibet: Products of Neo-Tethyan ridge subduction? [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7) : 2165 – 2179 (in Chinese with English abstract).
- Guo Z, Wilson M, Liu J, 2007. Post-collisional adakites in south Tibet: Products of partial melting of subduction-modified lower crust [J]. *Lithos*, 96 (1-2) : 205 – 224 .
- Hawkesworth C, Turner S, Peate D, et al., 1997. Elemental U and Th variations in island arc rocks: implications for U-series isotopes [J]. *Chemical Geology*, 139 (1-4) : 207 – 221 .
- Hermann J, Spandler C, 2006. Sediment melts at sub-arc depth [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 70 (18-suppl-S) : A248 – A248 .
- Hou K J, Li Y H, Zou T R, et al., 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotopic for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological application [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (10) : 2595 – 2604 (in Chinese with English abstract).
- Ji W Q, Wu F Y, Zhong S L, et al., 2009. Geochronology and petrogenesis of granitic rocks in Gangdese batholith, southern Tibet [J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 39 (7) : 849 – 871 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Y H, Jiang S Y, Ling H F, et al., 2006. Low-degree melting of a metasomatized lithospheric mantle for the origin of Cenozoic Yulong monzogranite-porphyry, east Tibet: Geochemical and Sr–Nd–Pb–Hf isotopic constraints [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 241 (3-4) : 617 – 633 .
- Liu J H, 2018. Petrogenesis and tectonic setting of the late Cretaceous magmatic rocks in Songdo area, Tibet [D]. Chang Chun: Jilin University.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al., 2010. 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 from Mantle Xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 51: 537 – 571 .
- Ma L, Wang Q, Li Z X, et al., 2013. Early Late Cretaceous (ca. 93 Ma) norites and hornblendites in the Milin area, eastern Gangdese: Lithosphere–asthenosphere interaction during slab roll-back and an insight into early Late Cretaceous (ca. 100–80 Ma) magmatic "flare-up" in southern Lhasa (Tibet) [J]. *Lithos*, 172-173: 17 – 30 .
- Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F, 2006. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 243 (3-4) : 581 – 593 .
- Martin H, 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids [J]. *Lithos*, 46.
- McDonough W F, Sun S S, 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120 (3-4) : 223 – 253 .
- Meng F Y, Zhao Z D, Zhu D C, et al., 2010. Petrogenesis of Late Cretaceous adakite-like rocks in Mamba from the eastern Gangdese, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (7) : 2180 – 2192 (in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K, 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system [J]. *Earth-Science Reviews*, 37 (3-4) : 215 – 224 .
- Mo X X, 2011. Magmatism and Evolution of the Tibetan Plateau [J]. *Geological Journal of China Universities*, 17 (3) : 351 – 367 (in Chinese with English abstract).
- Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, et al., 1995. The Cretaceous Separation Point batholith, New Zealand: granitoid magmas formed by melting of mafic lithosphere [J]. *Journal of the Geological Society*, 152 (4) : 689 – 701 .
- Pan G T, Mo X X, Hou Z Q, et al., 2006. Spatial-temporal framework of the gangdese orogenic belt and its evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (3) : 521 – 533 (in Chinese with English abstract).
- Peccerillo A, Taylor S R, 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 58 (1) : 63 – 81 .
- R H Smithies, 2000. The Archaean tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG) series is not an analogue of Cenozoic adakite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 182 (1) : 115 – 125 .
- Rapp R P, Xiao L, Shimizu N, 2002. Experimental constraints on the origin of potassium-rich adakites in eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18 (3) : 293 – 302 (in Chinese with English abstract).
- Taylor M E, Forester R M, 1979. Distributional model for marine isopod crustaceans and its bearing on early Paleozoic paleogeography and continental drift [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 90 (4) : 731 .
- Wang Q, 2006. Petrogenesis of Adakitic Porphyries in an Extensional Tectonic Setting, Dexing, South China: Implications for the Genesis of Porphyry Copper Mineralization [J]. *Journal of Petrology*, 47 (1) : 119 – 144 .
- Wang Q, Xu J F, Zhao Z H, et al., 2007. Adakites or adakitic rocks and associated metal metallogenesis in China [J]. *Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry*, 26 (4) : 336 – 349 (in Chinese with English abstract).
- Wen D R, Chung S L, Song B, et al., 2008. Late Cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics, SE Tibet: Petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 105 (1-2) : 1 – 11 .
- Wen D R, Liu D, Chung S L, et al., 2008. Zircon SHRIMP U–Pb ages of the Gangdese Batholith and implications for Neotethyan subduction in southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 252 (3-4) : 191 – 201 .
- Wu C D, 2019. Petrogenesis of adakites and its potential for porphyry copper mineralization in Gangdese belt, Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) .
- Wu F Y, Li X H, Zh Y F, et al., 2007. Lu–Hf isotopic systematics and their application in petrology [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (2) : 185 – 220 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, et al., 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U–Pb geochronology [J]. *Chemical Geology*, 234 (1-2) : 105 – 126 .
- Xiao L, Robert R P, Xu J F, 2004. The role of deep process controls on variation of compositions adakitic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 20 (2) : 219–228.
- Xu H J, Ma C Q, 2003. Constraints of experimental petrology on the origin of adakites, and petrogenesis of Mesozoic K-rich and high Sr/Y ratio granitoids in eastern China [J]. *Earth Science Frontiers*, 10 (4) : 417 – 427 (in Chinese with English abstract).
- Xu J F, Shinjo R, Defant M J, et al., 2002. Origin of Mesozoic adakitic

- intrusive rocks in the Ningzhen area of east China: Partial melting of delaminated lower continental crust?[J]. *Geology*, 30 (12) : 1111 – 1114.
- Xu W C, Zhang H F, Luo B J, et al., 2015. Adakite-like geochemical signature produced by amphibole-dominated fractionation of arc magmas: An example from the Late Cretaceous magmatism in Gangdese belt, south Tibet[J]. *Lithos*, 232: 197 – 210.
- Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al., 2011. On the tectonics of the India-Asia collision[J]. *Acta Geological Sinica*, 85 (1) : 1 – 33 (in Chinese with English abstract).
- Yao X H, Zhang Z P, Wang H T, et al., 2019. Chronology, geochemistry and tectonic significance of late Cretaceous O-type adakite in Mamen, Sangri county, Tibet[J]. *Mineral Exploration*, (6) : 1327 – 1338 (in Chinese with English abstract).
- Zhang F Q, Chen H L, Cao R C, et al., 2010. Discovery of late Paleozoic adakite from the basement of the Hailaer Basin in NE China and its geological implication[J]. *Acta Geological Sinica*, 26 (2) : 633 – 641 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H F, Xu W C, Guo J Q, et al., 2007. Ziron U-Pb and Hf isotopic composition of deformed granite in the southern margin of the Gangdese belt, Tibet: Evidence for early Jurassic subduction of Neo-Tethyan oceanic slab[J]. *Acta Geological Sinica*, 23 (6) : 1347 – 1353 (in Chinese with English abstract).
- Zhang K J, Xia B D, Wang G M, et al., 2004. Early Cretaceous stratigraphy, depositional environments, sandstone provenance, and tectonic setting of central Tibet, western China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 116 (9) : 1202.
- Zhang Q, Jin W J, Li C D, et al., 2010. Revisiting the new classification of granitic rocks based on whole-rock Sr and Yb contents: Index[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (4) : 985 – 1015.
- Zhang Q, Wang Y, Liu H T, et al., 2003. On the space-time distribution and geodynamic environments of adakites in China Annex: Controversies over differing opinions for adakites in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 10 (4) : 16 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Z, Zhao G, Santosh M, et al., 2010. Late Cretaceous charnockite with adakitic affinities from the Gangdese batholith, southeastern Tibet: Evidence for Neo-Tethyan mid-ocean ridge subduction?[J]. *Gondwana Research*, 17 (4) : 615 – 631.
- Zheng Y C, Hou Z Q, Gong Y L, et al., 2014. Petrogenesis of Cretaceous adakite-like intrusions of the Gangdese Plutonic Belt, southern Tibet: Implications for mid-ocean ridge subduction and crustal growth[J]. *Lithos*, 190-191: 240 – 263.
- Zhu D C, Mo X X, Wang L Q, et al., 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdese, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes[J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 39 (7) : 833 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Wang Q, Cawood P A, et al., 2017. Raising the Gangdese Mountains in southern Tibet[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122 (1) .
- Zhu D C, Zhao Z D, Niu Y L, et al., 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 23 (4) : 1429 – 1454.
- ## 附中文参考文献
- 代作文, 李光明, 丁俊, 等, 2018. 西藏努日晚白垩世埃达克岩: 洋脊俯冲的产物[J]. *地球科学*, 43 (8) : 2727 – 2741.
- 董随亮, 黄勇, 李光明, 等, 2015. 藏南努日铜-钨-钼矿床晚白垩世石英闪长岩 U-Pb 定年及其地球化学特征[J]. *岩矿测试*, 34 (6) : 712 – 718.
- 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等, 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩: 新特提斯洋脊俯冲的产物[J]. *岩石学报*, 26 (7) : 2165 – 2179.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等, 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. *岩石学报*, 23 (10) : 2595 – 2604.
- 纪伟强, 吴福元, 锤孙霖, 等, 2009. 西藏南部冈底斯岩基花岗岩时代与岩石成因[J]. *中国科学 D 辑*, 39 (7) : 849 – 871.
- 刘金恒, 2018. 西藏松多地区晚白垩世两期岩浆岩岩石成因及构造背景[D]. 长春: 吉林大学.
- 孟繁一, 赵志丹, 朱弟成, 等, 2010. 西藏冈底斯东部门巴地区晚白垩世埃达克质岩的岩石成因[J]. *岩石学报*, 26 (7) : 2180 – 2192.
- 莫宣学, 2011. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 17 (3) : 351 – 367.
- 潘桂棠, 莫宣学, 侯增谦, 等, 2006. 冈底斯造山带的时空结构及演化[J]. *岩石学报*, 22 (3) : 521 – 533.
- Robert P RAPP, 肖龙, Nobu Shimizu, 2002. 中国东部富钾埃达克岩成因的实验约束[J]. *岩石学报*, 18 (3) : 293 – 302.
- 王强, 许继峰, 赵振华, 等, 2007. 中国埃达克岩或埃达克质岩及相关金属成矿作用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 26 (4) : 336 – 349.
- 吴昌旭, 2019. 西藏冈底斯带埃达克岩岩石成因与斑岩铜成矿潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等, 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 23 (2) : 185 – 220.
- 肖龙, Robert P RAPP, 许继峰, 2004. 深部过程对埃达克质岩成分的制约[J]. *岩石学报*, 20 (2) : 219 – 228.
- 续海金, 马昌前, 2003. 实验岩石学对埃达克岩成因的限定——兼论中国东部富钾高 Sr/Y 比值花岗岩类[J]. *地学前缘*, 10 (4) : 417 – 427.
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等, 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造[J]. *地质学报*, 85 (1) : 1 – 33.
- 姚兴华, 张志平, 汪宏涛, 等, 2019. 西藏桑日县马门晚白垩世 O 型埃达克岩年代学、地球化学及构造意义[J]. *矿产勘查*, (6) : 1327 – 1338.
- 章凤奇, 陈汉林, 曹瑞成, 等, 2010. 海拉尔盆地基底晚古生代 adakite 的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 26 (2) : 633 – 641.
- 张宏飞, 徐旺春, 郭建秋, 等, 2007. 冈底斯南缘变形花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成: 新特提斯洋早侏罗世俯冲作用的证据[J]. *岩石学报*, 23 (6) : 1347 – 1353.
- 张旗, 王焰, 刘红涛, 等, 2003. 中国埃达克岩的时空分布及其形成背景附: 《国内关于埃达克岩的争论》[J]. *地学前缘*, 10 (4) : 16.
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等, 2009. 西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因: 锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素约束[J]. *中国科学: 地球科学*, 39 (7) : 833.