

西藏乃东县扎嘎当 O 型埃达克岩成因

——来自地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素的制约

牛得草¹, 张志平^{1,2}, 董瀚¹, 汪宏涛¹, 武雪梅¹

NIU Decao¹, ZHANG Zhiping^{1,2}, DONG Han¹, WANG Hongtao¹, WU Xuemei¹

1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第三地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730050;

2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059

1. The Third Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730050, Gansu, China;

2. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China

摘要:埃达克岩是具有特定地球化学性质的一套中酸性火成岩组合,具有多种成因模式和特殊的构造意义。位于西藏泽当一带的泽当蛇绿岩对研究新特提斯洋的演化具有重要的意义,选取泽当蛇绿岩内出露的奥长花岗岩为研究对象,开展了岩石学、岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素等研究。研究显示,扎嘎当奥长花岗岩地球化学特征表现为高硅、高铝、富钠($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}>2$)、低镁,准铝质钙碱性,同时具高 Sr 和 Sr/Y 值,低 Y、Yb,属 O 型埃达克岩。岩石稀土元素总量偏低,富集轻稀土元素和大离子亲石元素 Rb、K、Ba,亏损高场强元素 Nb、Ti、P, Eu 具微弱的正异常。岩石具有较高的 Sr、Sm、Nd、Pb 含量, $I_{\text{Sr}}=0.704251\sim0.704329$, $I_{\text{Nd}}=0.512776\sim0.512807$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=6.61\sim7.22$ 。岩石铅同位素组成较均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.378\sim18.495$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.542\sim15.554$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.336\sim38.406$ 。研究表明,扎嘎当奥长花岗岩源区来源于具有地幔特征的洋壳,由消减大洋板片在一定深度部分熔融形成。综合泽当地区的地质特征和前人研究成果,认为泽当洋内弧是存在的。

关键词:扎嘎当;奥长花岗岩;O 型埃达克岩;Sr-Nd-Pb 同位素;洋内弧

中图分类号: P588.1; P597+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)08-1369-11

Niu D C, Zhang Z P, Dong H, Wang H T, Wu X M. Petrogenesis of the Zhagadang O-type adakite in Naidong County of Tibet: Constraints from its geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic compositions. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(8): 1369-1379

Abstract: Adakite, as a set of intermediate-acid igneous rock assemblages with special geochemical characteristics, has a variety of genetic models and special tectonic significance. The Zedang ophiolite is of great significance to the study of the evolution of the Neo-Tethys Ocean. The trondjemite outcropped in the Zedang ophiolite was selected to study its petrology, petrochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes. The results show that the Zhagadang trondjemite is a high SiO_2 and Al_2O_3 , rich Na_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}>2$), low MgO , and para-aluminous calc-alkaline series. It is characterized by high Sr and Sr/Y, low Y and Yb. These geochemical characteristics are comparable with those of O-type adakite. The Zhagadang trondjemite is rich in large ion lithophile elements (e.g., Rb, K and Ba), poor in high field-strength elements (e.g., Nb, Ti and P) and rare earth elements, and exhibits a weak positive Eu anomaly. The Sr-Nd-Pb isotopic compositions indicate that the Zhagadang trondjemite is characterized by high Sr, Sm, Nd and Pb contents, with I_{Sr} of $0.704251\sim0.704329$, I_{Nd} of $0.512776\sim0.512807$, positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values ($6.61\sim7.22$) and relatively uniform lead isotopic composition ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.378\sim18.495$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.542\sim15.554$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.336\sim38.406$).

收稿日期: 2021-03-19; 修订日期: 2021-05-07

资助项目: 中国地质调查局项目《冈底斯-喜马拉雅铜矿资源基地项目》(编号: 1212010100001500146)

作者简介: 牛得草(1986-), 男, 高级工程师, 从事矿产地质勘查研究。E-mail: 309424021@qq.com

18.378~18.495, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.542\sim15.554$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.336\sim38.406$). The study indicates that the Zhagadang trondhjemite bearing mantle characteristics was formed by partial melting of the subducting oceanic slab at a certain depth. The result confirms the existence of the Zedang intra-oceanic.

Key words: Zhagadang; trondhjemite; O-type adakite; Sr-Nd-Pb isotopic; intra-oceanic arc

埃达克岩由 Defant 等^[1]于 1990 年在研究 Adak 岛与显生宙板片熔融相关的岛弧火山岩时首次提出。它不是一类单独的岩石类型,而是一套以中酸性岩为主的岩浆岩组合,且具有特定的地球化学性质: $\text{SiO}_2 \geq 56\%$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 15\%$ 、 $\text{MgO} < 3\%$ (很少 $> 6\%$)、高 Sr ($> 400 \times 10^{-6}$)、低 Y ($< 18 \times 10^{-6}$) 和 Yb ($< 1.9 \times 10^{-6}$)、轻稀土元素富集, Eu 无异常, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} < 0.704$ 。随着埃达克岩概念的提出,国内外学者在世界范围内对其进行了大量的研究,研究表明,埃达克岩可以由多种模式形成:俯冲洋壳板片部分熔融^[2-5]、底侵玄武质下地壳部分熔融^[6]、加厚下地壳部分熔融^[7-8]、拆沉下地壳部分熔融^[9]、幔源玄武质岩浆结晶分异^[10]等。

张旗等^[11]在埃达克岩产生机制的基础上,根据埃达克岩的形成环境,将其划分为 O 型与 C 型。其中, O 型埃达克岩代表由板片熔融形成,主要反映与俯冲有关的构造环境; C 型埃达克岩代表由加厚下地壳部分熔融形成,主要反映与地壳增厚有关的构造环境。这与朱弟成等^[12]根据 Defant 等原始定义的埃达克岩划分的 I、II 类埃达克岩吻合, I 类由俯冲的年轻大洋板片发生部分熔融形成, II 类由底侵的玄武质下地壳熔融形成。

近年的研究显示,泽当蛇绿岩内发育少量大洋斜长花岗岩,且为埃达克质岩,这对研究蛇绿岩的形成和特提斯构造演化,特别是对洋内弧的研究有重要的意义。多数学者在研究泽当一带的蛇绿岩等地质体时,通过不同的研究方式均认为新特提斯洋内发生过洋内俯冲,所以,泽当洋内岛弧是存在的^[13-16]。吴福元等^[17]在论述大洋岛弧的成因时,认为泽当洋内岛弧实际上是北部冈底斯岩浆弧的一部分,新特提斯洋内没有发生过洋内俯冲。笔者在泽当一带进行地质调查时,填绘出扎嘎当岩体,并以扎嘎当奥长花岗岩为研究对象,开展了岩石地球化学、Sr-Nd-Pb 同位素等研究,分析了其形成的岩浆源区及岩石成因,探讨了其地球化学动力,进一步为该区域新特提斯洋演化模式提供了依据。

1 地质背景及岩石学特征

西藏泽当地区的泽当蛇绿混杂岩带是雅鲁藏布江结合带的重要组成部分,位于结合带东段,由泽当蛇绿岩和嘎学岩群、大竹卡组等混杂组成,北部与冈底斯地层、新生代岩基呈断层接触,南部与晚三叠世姐德秀岩组呈断层接触(图 1-a)。泽当蛇绿岩沿雅鲁藏布江南侧扎其乡—泽当镇—绒乡带

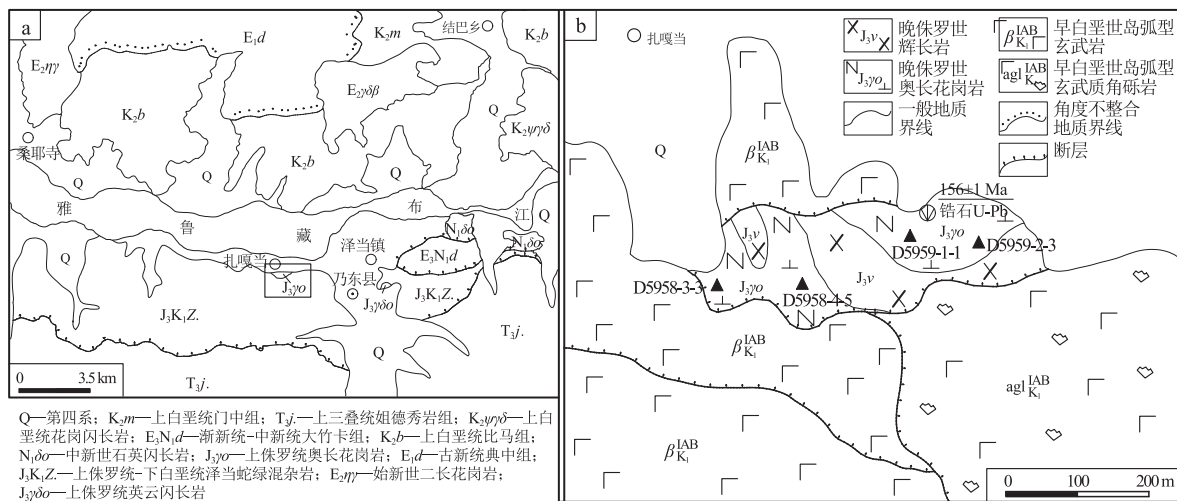


图 1 西藏乃东县一带区域地质简图(a)及扎嘎当地区地质简图(b)

Fig. 1 Simplified regional geological map of Naidong country(a) and geological map of zhagadang(b), Tibet

状分布,东西长逾 40 km,西宽东窄,呈不规则楔状体。泽当蛇绿岩主要由地幔橄榄岩、辉长(辉绿)岩、玄武岩、远洋沉积物(泥岩),以及少量大洋斜长花岗岩等组成。姐德秀岩组为一套细碎屑岩为主的浊流沉积。

扎嘎当岩体出露于泽当镇西约 10 km 处的扎嘎当一带,出露面积约 34 m²,侵位于泽当蛇绿岩镁铁质杂岩内,由奥长花岗岩和辉长岩组成,两者呈脉动接触(图 1-b)。奥长花岗岩呈灰白色,细粒结构,块状构造,内部致密坚硬,局部蚀变。岩石主要由斜长石(60%~65%)、石英(20%~25%)及少量黑云母、角闪石等组成。斜长石呈相对自形的板条状、长柱状,大小在 2.0 mm 以下;石英呈不规则的他形粒状镶嵌于其他矿物的空隙中;黑云母呈细小鳞片状,褐色-淡黄多色,部分绿帘石化;角闪石呈针状、柱状,深绿色(图 2)。

2 样品采集与测试

在野外详细调查的基础上,共采集了 4 件新鲜样品。经加工处理后,进行了主量、微量元素和 Sr-Nd-Pb 同位素分析,测试工作均由中国科学院地球化学研究所完成。其中,主量和微量元素分别使用 X 射线荧光光谱法、电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,稀土元素采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS),各数据分析精度小于 5%^[18],Sr-Nd 同位素采用 MC-ICP-MS 分析^[19],Pb 同位素采用 MC-ICP-MS(Neptune Plus)分析^[20-21],分析精度均符合要求。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

从岩石地球化学分析结果(表 1)看,扎嘎当奥长花岗岩主量元素含量整体变化不大,SiO₂含量为 64.40%~66.87%,Al₂O₃含量为 17.58%~18.74%,MgO 含量为 0.72%~0.99%,K₂O 含量为 1.72%~2.52%,CaO 含量为 2.64%~4.11%,Na₂O 含量为 5.80%~6.80%,全碱含量(K₂O+Na₂O)为 8.01%~9.01%。在花岗岩 TAS 图解(图 3-a)中,样品点落入石英二长岩范围;An-Ab-Or 标准矿物判别图解(图 3-b)显示,样品点全部落入奥长花岗岩。岩石铝饱和指数 A/CNK=0.93~0.97,里特曼指数(σ)介于 2.59~3.42 之间,平均值为 3.12,Na₂O/K₂O=2.53~3.82。在 SiO₂-K₂O 图解(图 3-c)上,样品点均落于中钾钙碱性区域;在 A/CNK-A/NK 图解(图 3-d)上,位于准铝质区域。扎嘎当奥长花岗岩具有低的 MgO 含量(0.72%~0.99%)和较高的 Mg[#]值(51.26~52.30)。综上所述,扎嘎当奥长花岗岩具有高硅、高铝、富钠(Na₂O/K₂O>2)、低镁特征,为准铝质钙碱性系列岩石。

3.2 微量元素

岩石地球化学数据(表 1)显示,扎嘎当奥长花岗岩微量元素含量整体变化不大,个别元素(Ba 等)含量变化较大,具高 Sr(688.10×10⁻⁶~1058.21×10⁻⁶)>400.10×10⁻⁶、Ba(700.86×10⁻⁶~1796.65×10⁻⁶)、Pb(29.28×10⁻⁶~31.40×10⁻⁶)和 Sr/Y 值(109.32~159.38),低 Y(5.78×10⁻⁶~6.64×10⁻⁶)<18×

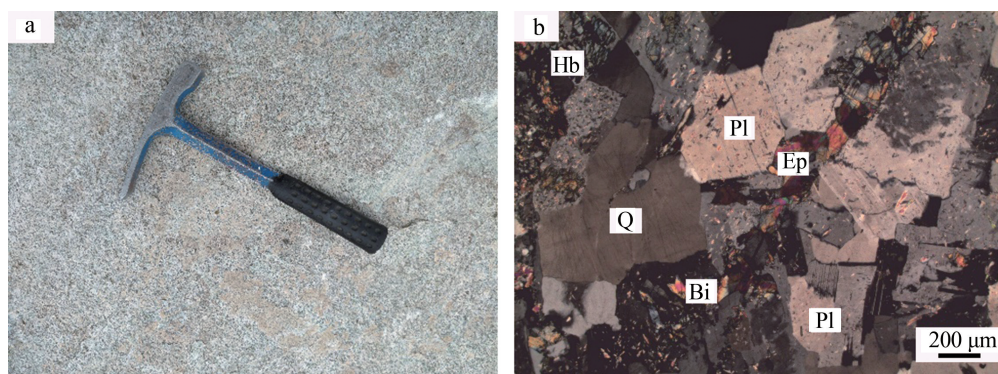


图 2 扎嘎当奥长花岗岩基岩露头(a)及显微镜下特征(b)(正交偏光,10×2.5)

Fig. 2 Field outcrop photo(a) and microphotograph(b) of the Zhagadang trondhjemite

Q—石英;Pl—斜长石;Ep—绿帘石;Hb—角闪石;Bi—黑云母

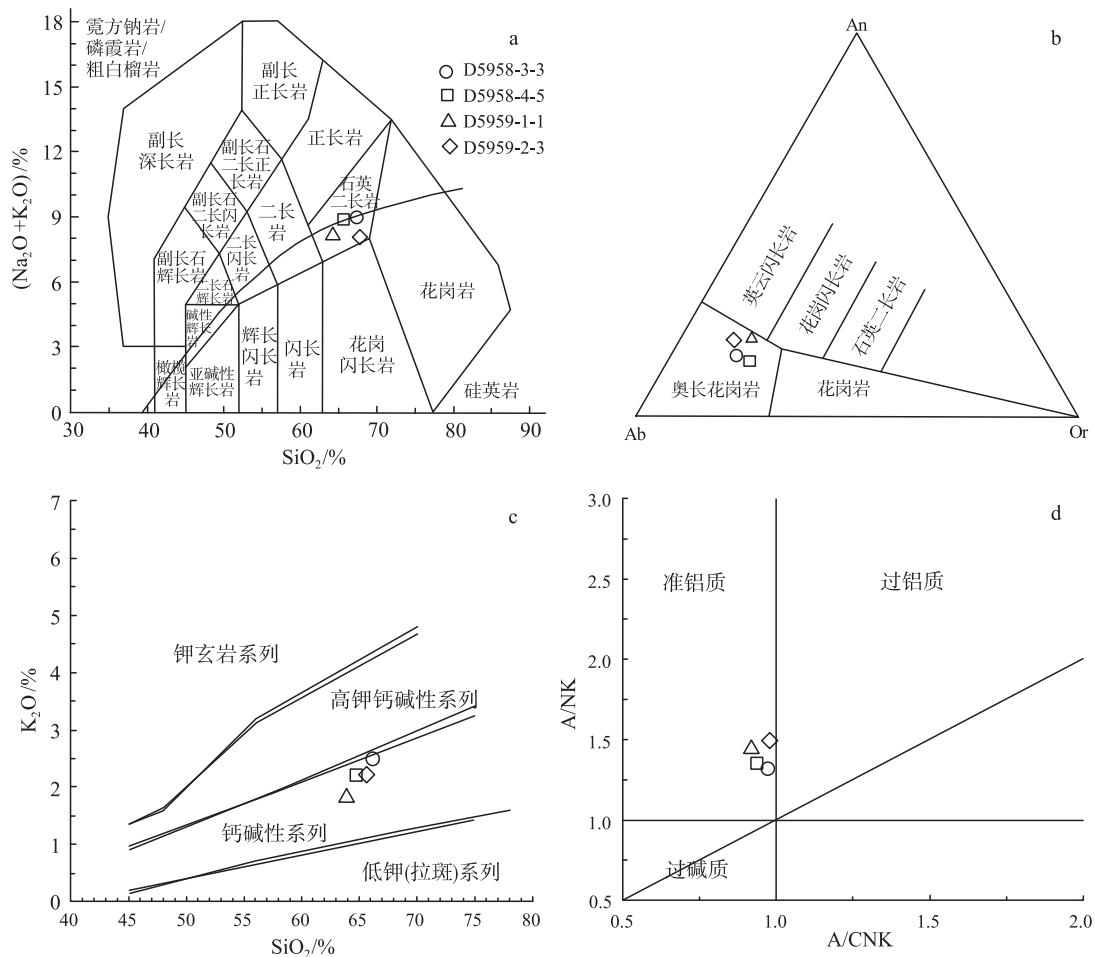


图3 扎嘎当奥长花岗岩岩石地球化学图解

Fig. 3 Petrogeochemical diagrams of Zhagadang trondhjemite

a—花岗岩 TAS 图解^[22]; b—An-Ab-Or 图解^[23]; c—SiO₂-K₂O 图解^[24]; d—A/CNK-A/NK 图解^[25]

10^{-6} , Yb ($0.58 \times 10^{-6} \sim 0.70 \times 10^{-6}$) $< 1.9 \times 10^{-6}$ 、Ni ($3.63 \times 10^{-6} \sim 6.60 \times 10^{-6}$)。从原始地幔微量元素蛛网图(图4-a)可以看出,扎嘎当奥长花岗岩富集大离子亲石元素 Rb、K、Ba 等,亏损高场强元素 Nb、Ti、P 等,元素中 Sr、Zr、Th、U 相对富集,这与俯冲洋壳熔融埃达克岩特征非常相似^[2-5]。对扎嘎当奥长花岗岩采用 Y-Sr/Y 和 Yb_N-(La/Yb)_N 判别图解(图5),样品点全部落入石榴子石-角闪岩相埃达克岩区域,进一步印证了扎嘎当奥长花岗岩为 O 型埃达克岩,同时反映了扎嘎当奥长花岗岩的源区矿物相与石榴子石、角闪石密切相关。

3.3 稀土元素

稀土元素地球化学分析结果见表1。扎嘎当奥长花岗岩的稀土元素总量偏低,变化于 $62.08 \times 10^{-6} \sim 79.34 \times 10^{-6}$ 之间, $(La/Yb)_N = 19.82 \sim 23.28$,

$(La/Sm)_N = 7.73 \sim 9.10$, $(Gd/Yb)_N = 1.34 \sim 1.79$, LREE/HREE=15.24~18.99。稀土元素配分模式图(图4-b)显示,扎嘎当奥长花岗岩稀土元素分馏明显右倾,轻稀土元素富集且斜率较大,重稀土元素斜率相对平缓,各曲线基本平行,反映同源岩浆演化的特点。 $\delta Eu = 1.01 \sim 1.08$,平均值为 1.04,显示微弱的正 Eu 异常,反映岩石未经历较强或多阶段的结晶分异过程。

3.4 Sr-Nd-Pb 同位素组成

同位素数据(表2)显示,扎嘎当奥长花岗岩具有较高的 Sr、Sm、Nd、Pb 含量,且组分变化不大。Rb/Sr=0.05~0.08, Sm/Nd=0.152~0.167,初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 值为 0.704610~0.704859,初始 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 值为 0.512682~0.512745, $I_{Sr} = 0.704251 \sim 0.704329$,平均值为 0.704300, $I_{Nd} = 0.512776 \sim 0.512807$,平均

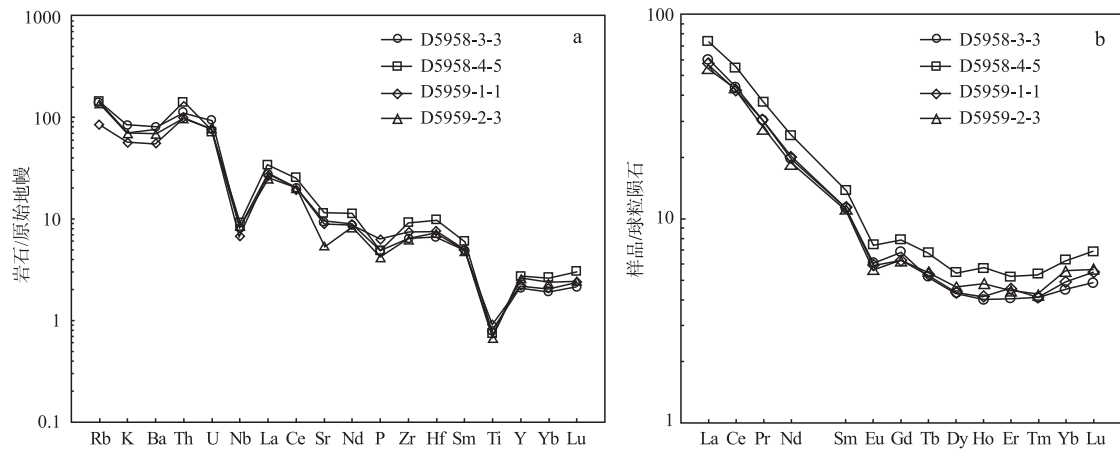


图 4 扎嘎当奥长花岗岩微量元素标准化蛛网图(a, 标准化值据参考文献[27])和稀土元素球粒陨石标准化分布模式图(b, 标准化值据参考文献[28])

Fig. 4 Normalized trace element patterns(a) and chondrite-normalized REE patterns(b) of Zhagadang trondhjemite

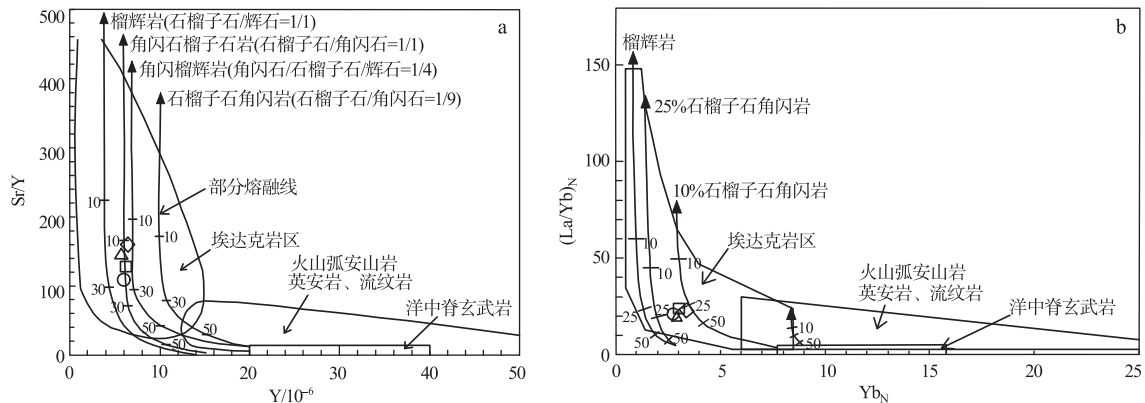


图 5 扎嘎当奥长花岗岩 $Y-Sr/Y$ (a)^[1] 和 $Yb_N-(La/Yb)_N$ (b)^[26] 判别图解

Fig. 5 Discriminant diagrams of $Y-Sr/Y$ (a) and $Yb_N-(La/Yb)_N$ (b) of Zhagadang trondhjemite

值为 0.512795, 显示了较低的变化范围和低 Sr、高 Nd 特点, $\epsilon_{Nd}(t) = 6.61 \sim 7.22$ 。在 $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i - \epsilon_{Nd}(t)$ 判别图解(图 6)中, 样品点全部集中于新特提斯洋蛇绿岩内(200~100 Ma)。岩石铅同位素组成较均一, 富含放射成因铅, $^{206}Pb/^{204}Pb = 18.378 \sim 18.495$, $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.542 \sim 15.554$ 和 $^{208}Pb/^{204}Pb = 38.336 \sim 38.406$ 。岩体全岩含有微量的 U 和 Th, U 为 $1.20433 \times 10^{-6} \sim 2.17569 \times 10^{-6}$, Th 为 $6.28764 \times 10^{-6} \sim 10.44127 \times 10^{-6}$, 总体显示奥长花岗岩以富放射成因铅同位素为特征^[30]。

4 讨论

4.1 花岗岩源区性质及岩石成因

张旗等^[11]根据埃达克岩的形成环境, 将埃达克

划分为 O 型与 C 型, 其中 O 型埃达克岩除具有 Defant 定义的埃达克岩地球化学特征外, 还具有贫 K、高 Na/K 值, Sr 同位素初始值低和正的 Nd 同位素比值等特征。

扎嘎当奥长花岗岩具有高的 SiO_2 ($>64.40\%$)、 Al_2O_3 ($>17.58\%$)、Sr ($>688 \times 10^{-6}$) 含量和 Na_2O/K_2O 值 (2.53~3.82), 低的 K_2O (<2.52)、Y ($<6.64 \times 10^{-6}$)、Yb 含量 ($<0.70 \times 10^{-6}$)。Sr/Y = 109.32~159.38, 平均值为 136.22, La/Yb = 30.01~35.25, 平均值为 32.80, Sr/Yb = 1196.45~1508.63, 平均值为 1359.51。同位素方面, 有较低的 I_{Sr} (0.704250~0.704329)、较高的 I_{Nd} (0.512776~0.512807) 和正的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值 (6.61278~7.22183)。以上特征表明, 扎嘎当奥长花岗岩属于 O 型埃达克岩范畴^[31]。另外, 在

表 1 扎嘎当奥长花岗岩主量、微量和稀土元素组成及其特征参数

Table 1 Compositions and characteristic parameters of major, trace element and REE of Zhagadang trondhjemite

样品编号	D5958-3-3	D5958-4-5	D5959-1-1	D5959-2-3	样品编号	D5958-3-3	D5958-4-5	D5959-1-1	D5959-2-3
SiO ₂	66.87	65.65	64.40	66.73	Sc	4.92	4.13	4.42	3.78
TiO ₂	0.17	0.16	0.20	0.15	Li	3.05	6.29	4.94	10.68
Al ₂ O ₃	17.58	18.39	18.74	17.83	Cs	0.75	0.73	0.74	1.60
TF ₂ O ₃	1.62	1.47	1.87	1.36	Be	2.39	2.46	3.03	1.65
MnO	0.06	0.05	0.06	0.07	Ga	17.66	16.95	19.43	17.76
MgO	0.87	0.81	0.99	0.72	Tl	0.29	0.28	0.27	0.32
CaO	2.64	3.25	4.11	3.67	Pb	29.86	29.28	20.54	31.40
Na ₂ O	6.37	6.80	6.58	5.80	As	0.68	0.72	0.44	1.82
K ₂ O	2.52	2.05	1.72	2.09	Bi	0.01	0.01	0.03	0.06
P ₂ O ₅	0.11	0.10	0.14	0.09	Ge	0.79	0.81	0.71	0.90
烧失量	1.17	1.24	1.29	1.21	W	0.09	0.16	0.09	0.12
总计	99.98	99.97	100.10	99.70	La	18.03	22.35	18.24	24.26
An	12.06	13.76	16.74	16.72	Ce	27.65	34.86	29.02	35.54
Ab	54.6	58.32	56.39	49.83	Pr	2.54	2.96	2.68	3.36
Or	15.1	12.29	10.31	12.53	Nd	8.23	9.83	8.60	10.12
A/NK	1.33	1.371	1.477	1.511	Sm	1.37	1.50	1.44	1.63
A/CNK	0.976	0.952	0.93	0.966	Eu	0.43	0.46	0.45	0.46
Mg [#]	51.82	52.30	51.29	51.26	Gd	1.28	1.26	1.18	1.17
Na ₂ O/K ₂ O	2.53	3.31	3.82	2.78	Tb	0.17	0.17	0.17	0.16
Rb	56.89	47.70	47.76	58.06	Dy	0.93	0.87	0.84	0.98
Sr	688.10	842.16	853.44	1058.21	Ho	0.19	0.19	0.16	0.20
Ba	1796.65	908.89	700.86	1457.97	Er	0.49	0.53	0.45	0.54
Th	6.89	9.02	6.29	10.44	Tm	0.09	0.08	0.09	0.09
U	1.20	1.96	1.48	2.18	Yb	0.58	0.63	0.61	0.70
Nb	6.09	5.89	5.34	6.05	Lu	0.11	0.12	0.11	0.12
Ta	0.40	0.34	0.36	0.33	Y	6.29	6.55	5.78	6.64
Zr	82.39	102.40	97.51	103.91	ΣREE	62.08	75.82	64.04	79.34
Hf	2.25	2.45	2.54	2.70	LREE/HREE	15.24	18.63	16.75	18.99
Co	2.57	1.52	1.52	1.26	(La/Yb) _N	20.70	23.28	19.82	22.83
Ni	6.60	5.06	6.02	3.63	(La/Sm) _N	8.00	9.10	7.73	9.09
Cr	10.09	8.78	13.17	7.16	δEu	1.01	1.04	1.08	1.03
V	39.21	30.62	47.84	27.12	δCe	0.96	1.00	0.97	0.92

注:Mg[#]=100(Mg/Mg+Fe²⁺);主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为10⁻⁶

表 2 扎嘎当奥长花岗岩 Sr-Nd-Pb 同位素组成
Table 2 Sr, Nd and Pb isotope data of Zhagadang trondhjemite

同位素组成	D5958-3-3	D5958-4-5	D5959-1-1	D5959-2-3	同位素组成	D5958-3-3	D5958-4-5	D5959-1-1	D5959-2-3
Rb	56.89	47.70	47.76	58.06	T_{2DM}/Ma	6291	6876	6240	6538
Sr	688.10	842.12	853.44	1058.21	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.23915	0.16385	0.16189	0.15871
Sm	8.23	9.83	8.60	10.12	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.70486	0.70468	0.70461	0.70466
Nd	1.37	1.50	1.44	1.63	I_{Sr}	0.704329	0.704329	0.704251	0.704303
U	1.20	1.96	1.48	2.18	I_{Nd}	0.512799	0.512776	0.512807	0.512779
Th	6.89	9.02	6.29	10.44	$\epsilon_{\text{Sr}}(t)$	0.2	0.1	-1	-0.2
Pb	29.86	29.28	20.54	31.40	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	18.413	18.378	18.495	18.382
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	3.64769	3.99721	3.63911	3.78579	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	15.542	15.554	15.549	15.547
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512694	0.512682	0.512745	0.512708	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	38.336	38.406	38.358	38.374
$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	7.06377	6.61278	7.22183	6.67386	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	1.1847	1.1816	1.1895	1.1824

注: Sm、Rb、Sr、Nd、U、Th 和 Pb 单位为 10^{-6}

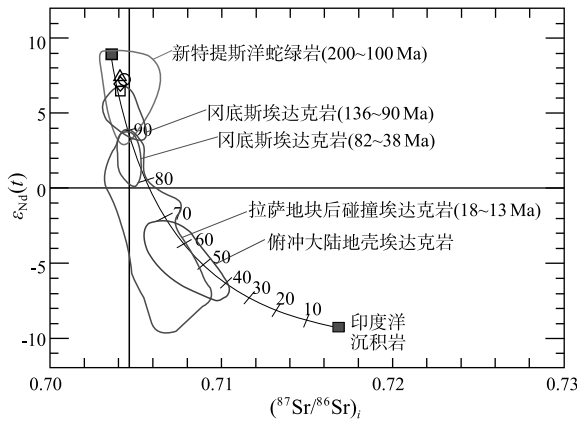


图 6 扎嘎当奥长花岗岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 判别图解^[29]
Fig. 6 Disriminant diamgram of $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ vs $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ of Zhagadang trondhjemite

$\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解(图 7)中,样品点全部落入 O 型埃达克岩内。

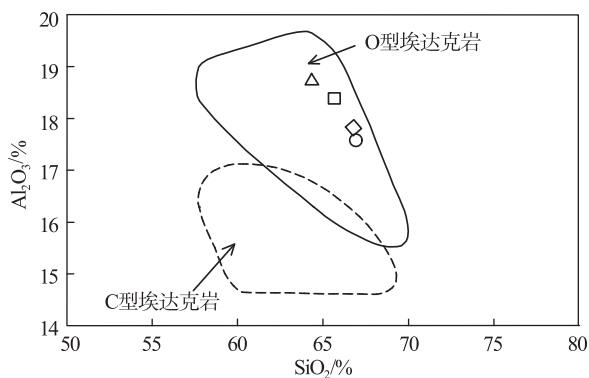
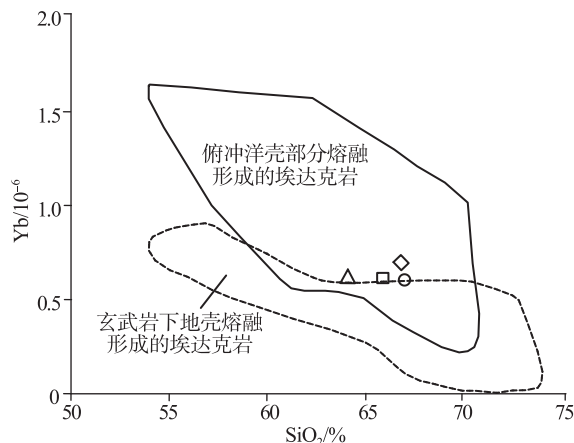
近年的研究成果表明,O 型埃达克岩主要有 2 种成因:一是洋壳在俯冲作用初期与消减板片 MORB 的熔融有关,主要表现为弧-弧碰撞作用下被加热的年轻地壳或板片发生部分熔融;二是岛弧或活动陆缘环境与下地壳玄武岩浆底侵作用有关,主要表现为底侵玄武岩的熔融^[11-12]。根据扎嘎当奥长花岗岩的岩石地球化学及同位素特征,结合地质特征,笔者做了以下分析。

(1)前人在研究 O 型埃达克岩时,指出 $\text{Mg}^\#$ 值是判断 O 型埃达克岩构造环境的重要标志之一,

$\text{Mg}^\#$ 值大于 50 可能是消减板片初始熔融的产物, $\text{Mg}^\#$ 值小于 50 则可能是底侵的下地壳底部贫钾的玄武岩部分熔融形成的^[11-12]。扎嘎当奥长花岗岩的 $\text{Mg}^\#$ 值(51.26~52.30)大于 50,表明其可能是由消减板片熔融形成的埃达克岩,不可能是底侵的下地壳底部的玄武岩部分熔融形成的。另外,从埃达克岩判别图 $\text{SiO}_2 - \text{Yb}$ 图解(图 8)看,样品点全部落入俯冲洋壳熔融形成的埃达克岩区,3 个样品点位于玄武岩下地壳熔融形成的埃达克岩外边缘,进一步支持了俯冲洋壳板片熔融的模式。

(2)扎嘎当奥长花岗岩铅同位素组成较均一,且富含放射成因铅,在 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} - ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图解(图 9)中,样品点均落入印度洋 MORB(洋中脊玄武岩)端元,都分布在北半球参考线(NHRL)之上,表明扎嘎当奥长花岗岩的铅来源于具有地幔特征的洋脊^[32]。

(3)玄武岩浆底侵作用产生的 O 型埃达克岩,是底侵作用呈横向二维伸展作用侵入于下地壳底部,使其发生部分熔融产生的垂向增生的产物,其同位素应具有明显的壳源特征,即高 $\text{Sr}(I_{\text{Sr}} = 0.706 \sim 0.710)$ 、低 $\text{Nd}(I_{\text{Nd}} < 0.5126)$ 。扎嘎当奥长花岗岩 Sr-Nd 同位素体系显示, $I_{\text{Sr}}(0.704250 \sim 0.704329) <$ 壳源 $I_{\text{Sr}}(0.706 \sim 0.710)$, $I_{\text{Nd}}(0.512776 \sim 0.512807) >$ 壳源 $I_{\text{Nd}}(< 0.5126)$ ^[33],以及正的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(6.61278~7.22183),因此,其源区与下地壳玄武岩浆底侵作用无关。同时,结合扎嘎当奥长花岗岩地质背景,泽当蛇绿混杂岩代表板块俯冲汇聚的残余,明显不同

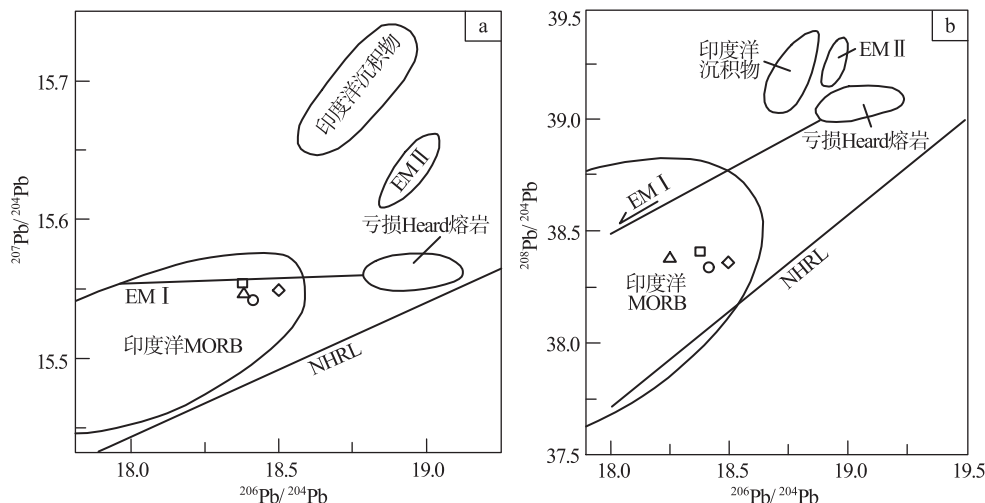
图7 扎嘎当奥长花岗岩 SiO_2 - Al_2O_3 图解^[31]Fig. 7 SiO_2 - Al_2O_3 diagram of Zhagadang trondhjemite图8 扎嘎当奥长花岗岩 SiO_2 -Yb图解^[31]Fig. 8 SiO_2 -Yb diagram of Zhagadang trondhjemite

于大陆板块内部的构造环境,可进一步排除扎嘎当奥长花岗岩与下地壳玄武岩浆底侵作用有关。

(4)张旗等^[33]的研究显示,富Na的埃达克岩主要有3种情况:①消减板片 MORB 的部分熔融;②由洋壳组成的地体;③底侵的贫K玄武岩。前述扎嘎当奥长花岗岩地球化学特征($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$ 、 $\text{Mg}^\# > 50$)和 Sr-Nd-Pb 同位素体系特征,均指向其富Na的特征是由消减板片 MORB(印度洋 MORB)部分熔融形成的,从侧面印证了扎嘎当奥长花岗岩在洋壳俯冲作用初期与消减板片 MORB 的熔融有关。

(5)实验研究表明,O型埃达克岩的形成需要较高的压力。Rapp等^[34]通过不同的压力段实验研究玄武岩熔融,其中在0.8~3.2 GPa下产生的熔浆

为英云闪长岩-奥长花岗岩。在产生熔浆的过程中,随着压力的递升,残留相呈有规律的变化,压力由0.8 GPa→1.6 GPa→2.2~3.2 GPa变化时,残留相由角闪石+斜长石±斜方辉石±Fe-Ti氧化物→石榴子石+单斜辉石±角闪石±斜长石±斜方辉石±Fe-Ti氧化物→石榴子石+单斜辉石变化^[34]。Peacock等^[35]在研究埃达克岩形成的压力时认为,埃达克岩只能形成在很狭窄的压力范围(1.8~2.3 GPa,相当于60~70 km深度),通过实验得出该压力范围内的残留相为石榴子石+单斜辉石+角闪石。模拟实验表明,在俯冲早期,由于被快速加热,热的板块和流体的作用易使俯冲洋壳熔融形成埃达克岩浆^[1, 36],

图9 扎嘎当奥长花岗岩 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a)和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b)同位素判别图解^[32]Fig. 9 Plots of $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (a) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (b) of Zhagadang trondhjemite

EM I—第I类富集地幔组分;EM II—第II类富集地幔组分;NHRL—北半球参考线;Heard熔岩—赫德岛熔岩;MORB—洋中脊玄武岩

与地幔正常的脱水熔融作用相比,形成于俯冲板片熔融作用的埃达克岩浆一般发生在更浅部位。

(6)地球化学数据显示,扎嘎当奥长花岗岩富集 Sr 和 Al,且具有微弱的正 Eu 异常,通过 Y/Yb 、 $(Ho/Yb)_N$ 值及 HREE 曲线形态可以判别残留相的主要成分^[37]。扎嘎当奥长花岗岩 $Y/Yb = 9.47 \sim 10.94$, $(Ho/Yb)_N = 0.78 \sim 0.94$, HREE 曲线呈左倾,表明残留相中石榴子石与角闪石含量大致相当,这与 $Y-Sr/Y$ 判别图解(图 5-a)中样品点在角闪石榴子石岩部分熔融曲线上呈规律排列吻合。在 $Yb_N - (La/Yb)_N$ 判别图解(图 5-b)中,样品点也分布在 10%~25% 石榴子石角闪岩部分熔融演化线过渡带。以上表明,扎嘎当奥长花岗岩岩源区的残留相中主要为石榴子石和角闪石,且两者含量相当,推测其残留相可能由角闪石+石榴子石组成。

综合以上分析,笔者认为,扎嘎当奥长花岗岩 O 型埃达克岩是洋壳在俯冲作用初期,由消减板片 MORB(印度洋 MORB)在一定深度(60~70 km 深处,残留相为石榴子石+单斜辉石+角闪石)部分熔融形成的^[1,35]。

4.2 地质意义

研究显示,特提斯洋内部演化可能极复杂。Allegre 等^[13]通过研究提出,在新特提斯洋内部可能存在一个岛弧,但该岛弧已经消失。McDermid 等^[14]在研究泽当蛇绿岩时认为,雅鲁藏布江缝合带泽当段存在晚侏罗世洋内岩浆弧;Aithison 等^[15]在对泽当蛇绿岩进行考察和研究后,认为该区在中生代存在一个新特提斯洋内俯冲系统;韦栋梁等^[16]指出,雅鲁藏布江缝合带泽当段洋内岛弧(泽当岛弧)是早期特提斯大洋岩石圈向北俯冲的产物,同时指出泽当英云闪长岩是新特提斯洋内俯冲的证据之一。那么在泽当地区,洋内弧是否存在,什么时候俯冲的呢?

泽当地区发育要素较齐全的蛇绿岩,研究显示该蛇绿岩为 SZZ 型蛇绿岩^[38]。扎嘎当奥长花岗岩出露于泽当蛇绿混杂岩带内的最北端,与泽当蛇绿岩中的岛弧玄武岩共生,而俯冲洋壳成因的埃达克岩通常与 SSZ 型蛇绿岩共生。张旗等^[31]根据 O 埃达克岩的特征,将其又细分为 2 类,其中的一类是西湾型埃达克岩,特点是多产于蛇绿岩中,规模小、分布少,多具有斜长花岗岩的特征^[31],这与扎嘎当奥长花岗岩地质特征一致。另外,Shervais 等^[39]在研

究北美板块洋内弧俯冲作用时,也认为洋内弧俯冲作用与 SSZ 蛇绿岩形成演化有关,在其俯冲进入成熟稳定时,英云闪长岩、奥长花岗岩等深成岩较发育。扎嘎当奥长花岗岩作为泽当蛇绿混杂岩带内的一个端元,与 SSZ 型蛇绿岩共生,说明扎嘎当奥长花岗岩应为洋壳俯冲的产物。同时,与奥长花岗岩产出构造相配套的岛弧产物的是否存在可以进一步印证扎嘎当奥长花岗岩是否是洋内俯冲的产物,那么这套岛弧产物是否存在呢?

肖庆辉等^[40]在研究洋陆转换的岩石学特征时,分析了洋内弧与初始俯冲的关系与识别,根据洋内弧的构造分区,认为位于海沟和火山-岩浆弧之间的前弧保存了洋盆俯冲作用初期形成的初生地壳具有与俯冲作用有关的标志性的、独特的地球化学特点,即富集硅和大离子 K、U、Sr、Pb 等亲石元素,亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强不相容元素^[41]。扎嘎当 O 埃达克岩在洋壳俯冲作用初期形成,它的出现代表了大洋板片的俯冲方向和俯冲消减的开始。与扎嘎当奥长花岗岩共生的泽当蛇绿岩中发育一套大洋岛弧钙碱性系列火山岩,其地球化学特点是高硅($SiO_2 > 48\%$)、富铝($Al_2O_3 > 16\%$)、低钛($TiO_2 < 1.2$),富集 K、Rb、Sr、Pb 等大离子亲石元素及 LREE,亏损 Nb、Ti、Hf、Zr、Th 等高场强元素及 HREE。上述表明,泽当蛇绿岩应为前弧构造的产物,印证了与洋内弧配套的岛弧,特别是前弧的存在。

区域上,在西藏扎囊—贡嘎一带多吉扎地区以东昌果乡南侧出露的刘琼组,整体为具埃达克岩性质、发育高镁安山岩等前弧玄武岩系列的一套深海—浅海火山沉积岩组合,岩性为玄武岩、玄武安山岩、安山岩、凝灰岩及灰岩,夹凝灰质砂岩、火山角砾岩,具典型洋内弧岩石组合特征,形成于 181 Ma,属早侏罗世^①。泽当英云闪长岩、扎嘎当奥长花岗岩均形成于 158~152 Ma,为晚侏罗世,具有埃达克岩性质,代表了俯冲环境下洋壳部分熔融的产物^[16,42]。而泽当蛇绿岩形成于 162~130 Ma,蛇绿岩中 LREE 亏损的火山岩及岩墙具有 MORB 属性,表明该区经历了初始洋盆扩张阶段^[38]。综上所述,泽当地区的洋内弧俯冲可能始于 160 Ma 左右。

综合扎嘎当奥长花岗岩的岩石地球化学、同位素地球化学、地质学等特征,在前人研究基础上,笔者认为,扎嘎当奥长花岗岩的出现可作为泽当地区洋内弧存在的证据之一,这与其本身的特性有

关,也与其所处的地质背景相关,同时可进一步反映泽当地区于 160 Ma 左右开始发生初期的洋内俯冲。

5 结 论

(1) 扎嘎当奥长花岗岩具高硅、高铝、富钠($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 2$)、低镁,属准铝质钙碱性系列岩石。具高 Sr 和 Sr/Y 值,低 Y、Yb,属 O 型埃达克岩。稀土元素总量偏低,轻稀土元素富集,大离子亲石元素 Rb、K、Ba 富集,高场强元素 Nb、Ti、P 亏损,Eu 具微弱的正异常。

(2) 岩石具有较高的 Sr、Sm、Nd、Pb 含量, $I_{\text{Sr}} = 0.704251 \sim 0.704329$, $I_{\text{Nd}} = 0.512776 \sim 0.512807$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = 6.61 \sim 7.22$ 。岩石铅同位素组成较均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.378 \sim 18.495$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.542 \sim 15.554$ 和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.336 \sim 38.406$ 。

(3) 地球化学和地质特征表明,扎嘎当奥长花岗岩是洋壳在俯冲作用初期,由消减板片 MORB (印度洋 MORB) 在一定深度部分熔融形成的,可作为新特提斯洋内俯冲的证据之一,进一步表明泽当洋内弧的存在,并可能于 160 Ma 左右开始发生初期的洋内俯冲。

致谢: 审稿专家及吉林大学地球科学学院解超明副教授对本文提出了宝贵的修改意见,在此深表感谢。

参考文献

- [1] Defant M J, Drummond M S. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347 (6294): 662–665.
- [2] 朱弟成, 莫宜学, 王立全, 等. 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(D 辑)*, 2009, 39(7): 833–848.
- [3] 赵珍, 胡道功, 陆露, 等. 西藏泽当地区晚白垩世埃达克岩的发现及其成矿意义 [J]. *地质力学学报*, 2013, 19(1): 45–52.
- [4] Zheng Y C, Hou Z Q, Gong Y L, et al. Petrogenesis of Cretaceous adakite-like intrusions of the Gangdese plutonic Belt, southern Tibet: Implications for mid-ocean ridge subduction and crustal growth [J]. *Lithos*, 2014, 190/191: 240–263.
- [5] Chen L, Qin K Z, Li G M, et al. 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*, 2015, 212/215: 379–396.
- [6] Muir R J, Weaver S D, Bradshaw J D, et al. The Cretaceous separation point batholith, New Zealand: Granitoid magmas formed by melting of

- mafic lithosphere [J]. *Journal of the Geological Society*, 1995, 152(4): 689–701.
- [7] Wen D R, Chung S L, Song B, et al. Late Cretaceous Gangdese intrusions of adakitic geochemical characteristics, SE Tibet: petrogenesis and tectonic implications [J]. *Lithos*, 2008, 105(1/2): 1–11.
- [8] 管琪, 朱弟成, 赵志丹, 等. 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*, 2010, 26(7): 2165–2179.
- [9] Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, et al. Recycling lower continental crust in the North China Craton [J]. *Nature*, 2004, 432(7019): 892–897.
- [10] Macpherson C G, Dreher S T, Thirlwall M F. Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 243(3/4): 581–593.
- [11] 张旗, 金惟俊, 熊小林, 等. 中国不同时代 O 型埃达克岩的特征及其意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(3): 432–447.
- [12] 朱弟成, 段丽萍, 廖忠礼, 等. 两类埃达克岩 (Adakite) 的判别 [J]. *矿物岩石*, 2002, 22(3): 5–9.
- [13] Allegre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya Tibet orogenic belt [J]. *Nature*, 1984, 307: 17–22.
- [14] Aitchison J C, Badengzhu, Davis A M, et al. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung–Zangbo suture (southern Tibet) [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2000, 183: 231–244.
- [15] McDermid I R C, Aitchison J C, Davis A M, et al. The Zedong terrane: a Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung–Tsangpo suture zone, southeastern Tibet [J]. *Chem. Geol.*, 2002, 187: 267–277.
- [16] 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 等. 西藏泽当英云闪长岩的地球化学和 Sr–Nd 同位素特征: 特提斯洋内俯冲的新证据 [J]. *中国科学*, 2007, 42(5): 1515–1534.
- [17] 吴福元, 王建刚, 刘传周, 等. 大洋岛弧的前世今生 [J]. *岩石学报*, 2019, 35(1): 1–15.
- [18] Song S G, Su L, Li X H, et al. Tracing the 850 Ma continental flood basalts from a piece of subducted continental crust in the North Qaidam UHPM belt, NW China [J]. *Precambrian Research*, 2010, 183 (4): 805–816.
- [19] Chen F, Siebel W, Satir M, et al. Geochronology of the Karaderebasement (NW Turkey) and implications for the geological evolution of the Istanbul zone [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2002, 91(3): 469–481.
- [20] Russell W A, Papanastassiou D A, Tombrello T A. Ca isotope fractionation on the Earth and other solar system materials [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(8): 1075–1090.
- [21] Baker J, Peate D, Waight T, et al. Pb isotopic analysis of standards and samples using a ^{207}Pb – ^{204}Pb double spike and thallium to correct for mass bias with a double-focusing MCICP–MS [J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(3/4): 275–303.
- [22] Middlemost E A K. Naming materials in the magma igneous rock system [J]. *Earth–Science Reviews*, 1994, 37: 215–224.
- [23] Barker F. Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin [C] // Barker F. Trondhjemites, dacites and related rocks.

- Amsterdam: Elsevier, 1979: 1-12.
- [24] Middlemost E A K. Magas and magmatic rocks [M]. London: Longman, 1985: 1-266.
- [25] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. Geological Society of America Bulletin, 1989, 101: 635-643.
- [26] Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite - trondhjemite - granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution [J]. Lithos, 2005, 79(1/2): 1-24.
- [27] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. Chemical Geology, 1995, 120(3/4): 223-253.
- [28] Boynton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [J]. Developments in Geochemistry, 1984, 2(2): 63-114.
- [29] Jiang Z Q, Wang Q, Derek A. Wyman, et al. Transition from oceanic to continental lithosphere subduction in southern Tibet: Evidence from the Late Cretaceous - Early Oligocene (~91-30Ma) intrusive rocks in the Chanang-Zedong area, southern Gangdese [J]. Lithos, 2014, 196/197: 213-231.
- [30] 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩成因: 壳层熔岩的 Sr-Nd-Pb 同位素制约 [J]. 矿物岩石, 2006, 26(1): 57-63.
- [31] 张旗, 王焰, 熊小林, 等. 埃达克岩和花岗岩: 挑战与机遇 [M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [32] Edwards C M, Menies M A, Thirlwall M F, et al. The transition to potassic volcanism in island arcs the Ringgit-Beser complex, east Jast Java, Indonesia [J]. J. Petology, 1994, 35: 1557-1595.
- [33] 张旗, 王焰, 刘伟, 等. 埃达克岩的特征及其意义 [J]. 地质通报, 2002, 21(7): 431-435.
- [34] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalites [J]. Precambrian Res., 1991, 51: 1-25.
- [35] Peacock S M, Rushmer T, Thompson A B. Partial melting of subducting oceanic crust [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1994, 121: 227-244.
- [36] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust [J]. Nature, 1993, 362: 144-146.
- [37] 于涛, 徐佳丽, 高强, 等. 藏东卡贡地区早侏罗世似斑状钾长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征 [J]. 地质通报, 2020, 39(5): 621-630.
- [38] 董瀚, 张志平, 魏学平, 等. 西藏泽当蛇绿岩物质组成、年代格架及地质意义 [J]. 矿产勘查, 2019, 10(6): 1265-1273.
- [39] Shervais J W. Birth, death and resurrection: the life cycle of suprasubduction zone ophiolites [J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2001, DOI: 10.1029/2000GC000080.
- [40] Stern R J. Subduction zones [J]. Reviews of Geophysics, 2002, 40(4): 1012, DOI: 10.1029/2001RG000108.
- [41] 肖庆辉, 李廷栋, 潘桂棠, 等. 识别洋陆转换的岩石学思路——洋内弧与初始俯冲的识别 [J]. 中国地质, 2016, 43(3): 721-737.
- [42] 赵珍, 吴珍, 胡道功, 等. 青藏高原冈底斯带南缘泽当多金属矿田多期岩浆活动及年代意义 [J]. 地球学报, 2014, 35(6): 703-712.
- ① 西藏自治区地质矿产勘查开发局第五地质大队. 西藏桑耶地区 1:5 万区域地质调查 (H46E016005、H46E016006、H46E017005、H46E017006) 报告. 2019.