

内蒙古阿拉善地块北缘雅布赖地区埃达克岩锆石 U-Pb 年龄、岩石成因和构造背景

王凯垒, 张学萌, 李会恺, 郑乐, 张家兴, 邢东雪, 陈涛, 侯占元

WANG Kailei, ZHANG Xuemeng, LI Huikai, ZHENG Le, ZHANG Jiaxing, XING Dongxue, CHEN Tao, HOU Zhanyuan

华北地质勘查局五一九大队, 河北 保定 071051

No.519 Geological Party, North China Geological Exploration Bureau, Baoding 071051, Hebei, China

摘要:雅布赖地区位于阿拉善地块北缘,埃达克岩岩石类型主要为闪长岩和石英闪长岩。用 LA-ICP-MS 方法测得埃达克岩中的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 $275\pm 1\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.00, n=27$, 闪长岩) 和 $277\pm 2\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.64, n=26$, 石英闪长岩), 故认为雅布赖地区埃达克岩侵位年龄为 $275\pm 1\sim 277\pm 2\text{ Ma}$, 形成时代为早二叠世。地球化学特征表明, 该岩体具有较高的 SiO_2 ($60.56\%\sim 63.41\%$)、 Al_2O_3 ($15.86\%\sim 17.33\%$)、 Sr ($572\times 10^{-6}\sim 758\times 10^{-6}$) 含量, 较低的 MgO ($1.45\%\sim 3.06\%$)、 Y ($11.10\times 10^{-6}\sim 14.7\times 10^{-6}$)、 Yb ($1.06\times 10^{-6}\sim 1.55\times 10^{-6}$) 含量, 富集大离子亲石元素 K 、 Rb 、 Ba 、 Sr 等, 亏损高场强元素 Ta 、 Nb 、 Ti 、 P 等。岩石重稀土元素强烈亏损, 轻、重稀土元素分馏明显, Eu 异常较弱 ($0.81<\delta\text{Eu}<1.04$), $\text{Mg}^\#$ 值较高 ($38\sim 53$), Y/Yb 值为 $7.35\sim 11.89$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 $1.18\sim 1.77$, 具有 C 型埃达克岩特征, 为折沉下地壳部分熔融产生的流体与地幔橄榄岩相互作用形成的产物。结合前人研究, 其可能形成于碰撞后伸展环境。

关键词:埃达克岩; 锆石 U-Pb 定年; 雅布赖; 岩浆混合; 阿拉善地块

中图分类号: P581; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)09-1443-16

Wang K L, Zhang X M, Li H K, Zheng L, Zhang J X, Xing D X, Chen T, Hou Z Y. Zircon U-Pb age, petrogenesis and tectonic setting of the Yabulai adakite, northern Alxa Block, Inner Mongolia. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(9): 1443-1458

Abstract: Yabulai adakite is located in the western part of Yabulai-Nuorigong-Honggueryulin belt, northern Alxa Block. The main rock types of the Yabulai adakite are diorite and quartz diorite. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating results are $275\pm 1\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.00, n=27$, diorite) and $277\pm 2\text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.64, n=26$, quartz diorite), which shows that the ages of the adakite are between 275 Ma and 277 Ma, suggesting a product of Early Permian. Geochemical characteristics show that the Yabulai adakite with high content of SiO_2 ($60.56\%\sim 63.41\%$), Al_2O_3 ($15.86\%\sim 17.33\%$), Sr ($572\times 10^{-6}\sim 758\times 10^{-6}$) and low content of MgO ($1.45\%\sim 3.06\%$), Y ($11.1\times 10^{-6}\sim 14.7\times 10^{-6}$), Yb ($1.06\times 10^{-6}\sim 1.55\times 10^{-6}$), enrichment of large ion lithophile elements (such as K, Rb, Ba and Sr), and depletion of high field-strength elements (such as Ta, Nb, Ti and P). The Yabulai adakite is typical C-type adakite with high content of $\text{Mg}^\#$ ($38\sim 53$), the ratio of Y/Yb is between 7.35 and 11.89, and $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ is between 1.18 and 1.77; in addition, it exhibits significant fractionation between LREE and HREE and is depleted in HREE with slight Eu anomaly ($0.81<\delta\text{Eu}<1.04$). The authors hold that the Yabulai adakite was formed by partial melting of delaminated lower crust and interaction with the mantle peridotite, and magmatic mixing was experienced during diagenesis. Combined with previous studies, the authors hold that the Yabulai adakite might have been formed in a post-collision extension stage.

Key words: adakite; zircon U-Pb dating; Yabulai; magma mixing; Alxa Block

收稿日期: 2019-09-10; 修订日期: 2020-04-15

资助项目: 中国地质调查局项目《阴山成矿带小狐狸山和雅布赖地区地质矿产调查》(编号: DD20160039)、《内蒙古 1:5 万塔尔拜呼都格、白石头、红柳沟幅区域地质矿产调查》(编号: DD20160039-13)

作者简介: 王凯垒 (1989-), 男, 工程师, 从事区域地质、矿产地质调查工作。E-mail: 947981910@qq.com

早二叠世 280~270 Ma 的岩浆活动形成于造山后的伸展背景,可能构成地幔柱成因的大火成岩省^[28],但多数学者认为,其形成于古亚洲洋向阿拉善地块俯冲增生、碰撞到后碰撞的不同阶段。

近年来,对阿拉善地块北缘岩浆岩的研究以花岗岩类和辉长岩类为主,而对中性岩类的研究较少,限制了对该地区岩浆岩成因和构造演化的认识。本文以阿拉善地块北缘雅布赖-诺日公-红谷尔玉林构造带西端雅布赖地区新发现的埃达克岩为研究对象,通过岩体成岩时代、岩石成因及构造背景的确定,为深入了解阿拉善地区北部晚古生代岩浆作用和构造演化提供新的资料。

1 区域地质背景及岩石学、岩相学特征

研究区位于阿拉善地块北缘,雅布赖-诺日公-红谷尔玉林构造带西端雅布赖山地区(图1-b)。区内基岩呈北东向展布,主要出露晚古生代花岗闪长岩与二长花岗岩,同时含有正长花岗岩,并伴生石英闪长岩、闪长岩与辉长岩。可见花岗闪长岩、二长花岗岩侵入闪长岩与石英闪长岩(图版 I-a,b),且花岗闪长岩、二长花岗岩与石英闪长岩内均发育暗色微粒包体(图版 I-c)。出露地层为古元古代阿拉善岩群祖宗毛道组,与岩浆岩呈断层接触,南部小面积出露侏罗纪芨芨沟组和白垩纪庙沟组,雅布赖山两侧为第四系覆盖,北西侧为巴丹吉林沙漠,南东侧为腾格里沙漠。

区内埃达克岩岩性为闪长岩与石英闪长岩,两者野外特征相似,为渐变过渡接触,主要出露于研究区北部,其他地区亦有零星出露(图2)。

闪长岩呈半自形粒状结构、似斑状结构,块状构造。斑晶主要由斜长石(约10%)组成,杂乱分布,呈半自形-近半自形板状,部分可见环带结构,多见聚片双晶。基质为半自形粒状结构,由斜长石(55%~60%)、角闪石(30%~35%)、黑云母(约10%)及少量石英组成。斜长石呈半自形板状,杂乱分布;角闪石呈半自形柱状,杂乱分布,单偏光下具黄-绿色多色性,部分具褐铁矿化;黑云母呈鳞片状,零散分布,单偏光下具黄褐色-浅黄色多色性;石英呈他形粒状,零星填隙状分布(图版 I-d)。

石英闪长岩呈半自形粒状结构、似斑状结构,块状构造。斑晶主要由斜长石(5%~10%)组成,杂乱分布,呈半自形-近半自形板状,部分可见环带结构,多见聚片双晶。基质为半自形粒状结构,由斜长石(55%~60%)、钾长石(3%~5%)、角闪石(10%~15%)、黑云母(10%~15%)、石英(约10%)组成。斜长石主要呈半自形-近半自形宽板状,杂乱状排列;钾长石呈他形粒状,较少见,填隙状分布;石英呈他形粒状、不规则粒状,填隙于斜长石粒间;角闪石呈半自形-近半自形柱状、粒状,与黑云母混染略显堆状聚集,零散分布;黑云母呈叶片状,分布状况基本同角闪石;岩内见少量被褐铁矿等充填的裂纹(图版 I-e)。

岩石中除正常结晶的环带结构斜长石外,还具筛孔状核部的斜长石斑晶(图版 I-f),部分斜长石内外环带不连续,核部与边部具有粗糙的界面(图版 I-h),斜长石斑晶内部可见包嵌细小角闪石、黑云母等晶体(图版 I-g),这些结构复杂的斜长石表明该岩体经历了岩浆混合作用^[39]。

2 测试方法

锆石 U-Pb 同位素测试在北京科荟测试技术有限公司使用 LA-Q-ICP-MS 完成。激光剥蚀系统

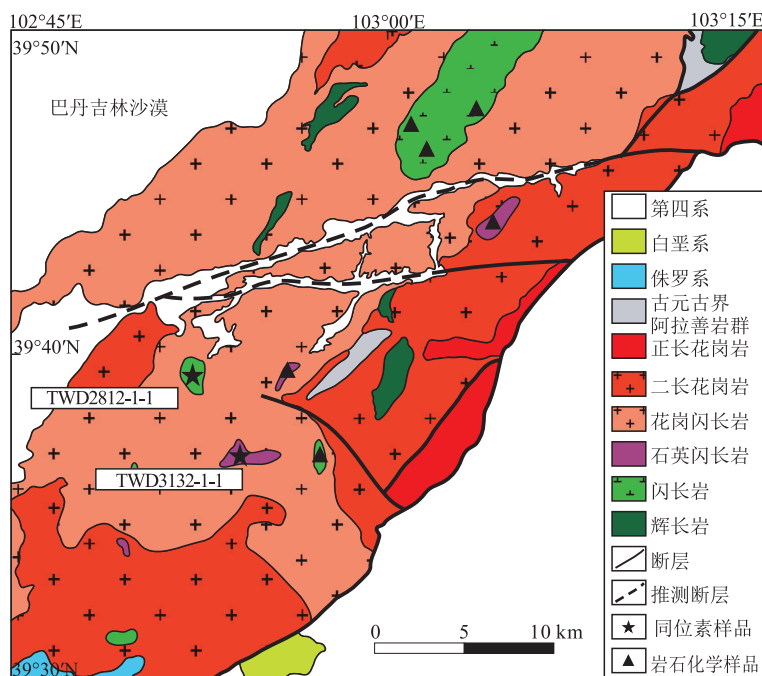
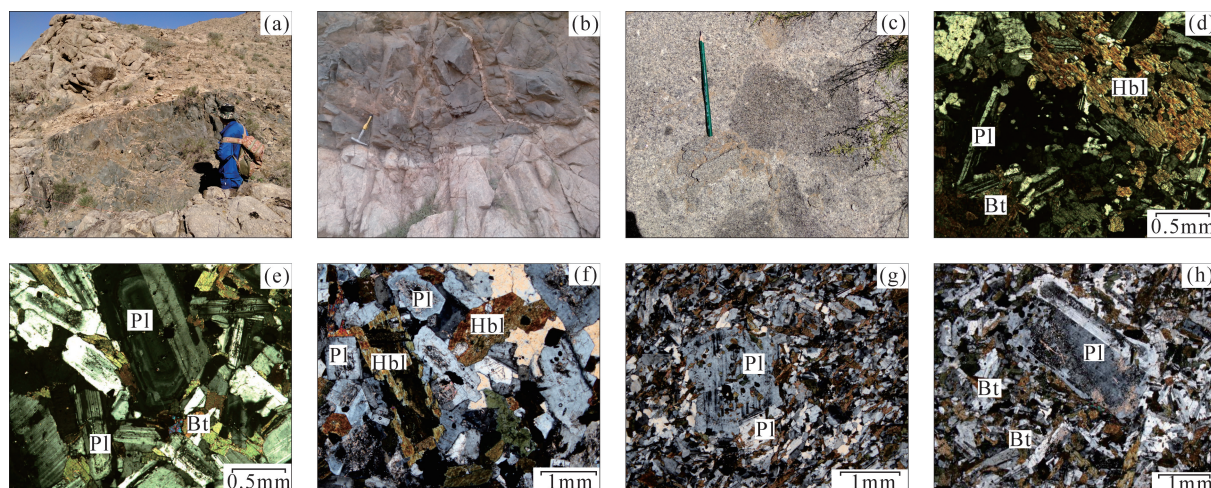


图2 雅布赖地区地质简图

Fig. 2 Geological map of the Yabulai area

图版 I Plate I



a, b. 埃达克岩被花岗岩侵入; c. 石英闪长岩内暗色微粒包体; d. 闪长岩(D3132-1-1)镜下特征; e. 石英闪长岩(D0605-1-1)镜下特征; f, g, h. 斜长石镜下特征。Pl—斜长石; Bt—黑云母; Hbl—角闪石

为 ESI NWR 193nm, ICP-MS 为 Analytikjena PlasmaQuant MS Elite ICP-MS。对分析数据的离线处理采用程序 ICPMSDataCal 完成^[40]。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 GJ-1 为外标进行同位素分馏校正。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用 GJ-1 的变化采用线性内插的方式进行校正。锆石 U-Pb 谱和图绘制和加权平均计算使用 Isoplot 程序完成。分析结果见表 1。

主量、微量元素测试在华北有色地质勘查局燕郊中心实验室完成。主量元素亚铁和全铁用连续比色测定,二氧化钛的测定采用二安替吡啉甲烷比色法,五氧化二磷的测定用钨磷钼兰比色法,其余元素用 ICP-AES 测定。微量和稀土元素 Zr、Hf 用电感耦合等离子体发射光谱法测定,其余元素用电感耦合等离子质谱法测定。分析结果见表 2。

斜长石成分分析在北京科荟测试技术有限公司的 JXA-8230 电子探针上完成,分析条件为:加速电压 15 kV,电流 20 nA,束斑直径 5 μm 。分析结果见表 3。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

闪长岩样品(TWD3132-1-1)的锆石阴极发光(CL)图像显示(图 3),样品锆石晶形较好,多呈长柱状,部分呈粒状,粒径介于 110~240 μm 之间,长

宽比为 1~4,韵律环带发育,Th/U 值在 0.53~1.19 之间,为典型的岩浆型锆石。共测得 30 个数据,其中 27 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 268~284 Ma 之间(表 1),其年龄加权平均值为 275 ± 1 Ma(MSWD=1.00, $n=27$)(图 4)。

石英闪长岩样品(TWD2812-1-1)的锆石 CL 图像显示(图 3),样品锆石颗粒较粗大,晶形较好,多呈长柱状,部分呈粒状,粒径介于 115~265 μm 之间,长宽比为 1~3,韵律环带发育,Th/U 值在 0.55~1.33 之间,为典型的岩浆型锆石。共测得 30 个数据,其中 26 个 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 272~283 Ma 之间(表 1),其年龄加权平均值为 277 ± 2 Ma(MSWD=0.64, $n=26$)(图 4)。

3.2 主量元素

本文对 8 件样品进行地球化学分析,分析结果见表 2。测试结果表明,雅布赖地区埃达克岩总体富硅(SiO_2 为 60.56%~63.41%)、富铝(Al_2O_3 为 15.86%~17.33%), Na_2O 含量为 2.93%~4.62%, K_2O 含量为 1.80%~3.40%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 1.18~1.77,平均值为 1.52, MgO 含量为 1.45%~3.06%, $\text{Mg}^\#$ 值为 0.38~0.53,平均值为 0.46。里特曼指数(σ)为 1.27~3.01,属钙碱性系列;在 SiO_2 - K_2O 图解(图 5-a)中,样品点落入钙碱性系列-高钾钙碱性系列。 A/CNK 值为 0.82~0.95,在 A/CNK - A/NK 图解(图 5-b)中,样品点落入准铝质区。

表 1 雅布赖地区埃达克岩闪长岩和石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素测试结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb data of diorite and quartz diorite of the Yabulai adakite

测点号	元素含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
TWD3132-1-1 闪长岩																	
1	35.3	664	588	1.13	0.0504	0.0012	0.3024	0.0073	0.0437	0.0006	213	90	268	5.7	276	3.8	97
2	13.8	181	234	0.77	0.0517	0.0017	0.3195	0.0111	0.0449	0.0007	333	74	282	8.6	283	4.5	99
3	21.9	334	382	0.87	0.0532	0.0013	0.3148	0.0080	0.0429	0.0004	345	56	278	6.1	271	2.6	97
4	21.2	330	367	0.90	0.0521	0.0010	0.3099	0.0066	0.0431	0.0005	300	44	274	5.1	272	3.3	99
5	35.4	467	606	0.77	0.0507	0.0007	0.3148	0.0059	0.0450	0.0006	228	33	278	4.5	284	4.0	97
6	17.0	197	271	0.73	0.0518	0.0010	0.3446	0.0101	0.0482	0.0011	280	43	301	7.6	303	6.9	99
7	12.4	149	228	0.65	0.0519	0.0015	0.3106	0.0094	0.0433	0.0005	283	65	275	7.3	274	3.1	99
8	29.5	553	464	1.19	0.0702	0.0012	0.4280	0.0114	0.0440	0.0006	1000	35	362	8.1	277	4.0	73
9	18.5	199	346	0.57	0.0561	0.0015	0.3404	0.0098	0.0441	0.0008	457	62	297	7.4	278	4.7	93
10	16.9	198	312	0.63	0.0524	0.0012	0.3233	0.0095	0.0446	0.0008	302	52	284	7.3	282	4.8	98
11	22.9	273	413	0.66	0.0527	0.0012	0.3202	0.0074	0.0442	0.0007	322	50	282	5.7	279	4.3	98
12	11.8	164	171	0.96	0.0560	0.0028	0.3888	0.0192	0.0505	0.0011	454	108	333	14	318	6.7	95
13	20.4	236	370	0.64	0.0532	0.0010	0.3214	0.0066	0.0438	0.0005	345	44	283	5.1	276	2.8	97
14	16.6	257	283	0.91	0.0501	0.0012	0.3016	0.0066	0.0439	0.0005	211	54	268	5.2	277	3.4	96
15	21.1	286	370	0.77	0.0529	0.0010	0.3232	0.0074	0.0443	0.0006	324	43	284	5.7	279	3.7	98
16	15.7	225	271	0.83	0.0519	0.0016	0.3137	0.0104	0.0439	0.0005	280	70	277	8.0	277	3.0	99
17	8.9	90.2	171	0.53	0.0537	0.0019	0.3211	0.0123	0.0434	0.0007	367	80	283	9.4	274	4.3	96
18	29.4	493	505	0.98	0.0524	0.0011	0.3124	0.0075	0.0434	0.0008	302	46	276	5.8	274	4.7	99
19	27.4	375	484	0.78	0.0561	0.0012	0.3312	0.0097	0.0429	0.0009	454	48	290	7.4	271	5.5	92
20	12.0	115	226	0.51	0.0520	0.0017	0.3085	0.0106	0.0431	0.0006	287	78	273	8.2	272	3.7	99
21	21.4	303	370	0.82	0.0566	0.0011	0.3364	0.0077	0.0432	0.0006	476	43	294	5.9	273	3.6	92
22	31.0	439	533	0.82	0.0524	0.0011	0.3165	0.0072	0.0439	0.0006	302	46	279	5.5	277	3.5	99
23	21.3	248	382	0.65	0.0518	0.0012	0.3114	0.0079	0.0436	0.0005	280	56	275	6.1	275	2.9	99
24	29.3	427	502	0.85	0.0528	0.0012	0.3146	0.0096	0.0431	0.0008	320	50	278	7.4	272	5.0	97
25	22.7	277	404	0.69	0.0561	0.0012	0.3344	0.0085	0.0432	0.0005	457	50	293	6.5	273	3.2	92
26	14.2	172	254	0.68	0.0554	0.0016	0.3260	0.0102	0.0428	0.0005	428	69	286	7.8	270	3.2	94
27	22.3	303	392	0.77	0.0511	0.0014	0.3044	0.0091	0.0434	0.0007	243	60	270	7.1	274	4.3	98
28	24.6	363	403	0.90	0.0600	0.0012	0.3548	0.0069	0.0431	0.0006	606	47	308	5.2	272	3.8	87
29	36.2	478	641	0.75	0.0555	0.0009	0.3247	0.0065	0.0425	0.0006	432	35	286	5.0	268	3.7	93
30	14.3	208	239	0.87	0.0517	0.0015	0.3089	0.0095	0.0434	0.0006	333	67	273	7.4	274	3.6	99

续表 1

测点号	元素含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						同位素年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
TWD2812-1-1 石英闪长岩																	
1	10.6	118	212	0.55	0.0534	0.0023	0.3033	0.0137	0.0416	0.0010	346	100	269	11	263	6.4	97
2	25.5	400	471	0.85	0.0479	0.0014	0.2777	0.0092	0.0421	0.0007	100	70	249	7.3	266	4.6	93
3	21.7	246	400	0.61	0.0576	0.0017	0.3463	0.0112	0.0438	0.0010	517	69	302	8.4	277	6.1	91
4	15.4	222	301	0.74	0.0530	0.0023	0.3004	0.0135	0.0412	0.0006	328	103	267	11	261	3.8	97
5	13.3	162	257	0.63	0.0520	0.0028	0.3100	0.0174	0.0435	0.0007	287	119	274	13	275	4.0	99
6	13.2	176	245	0.72	0.0532	0.0031	0.3170	0.0176	0.0434	0.0007	345	125	280	14	274	4.5	97
7	10.2	123	198	0.62	0.0524	0.0032	0.3089	0.0184	0.0437	0.0007	302	136	273	14	275	4.3	99
8	18.4	240	349	0.69	0.0522	0.0025	0.3101	0.0157	0.0430	0.0005	295	107	274	12	272	3.2	98
9	11.5	164	217	0.76	0.0542	0.0042	0.3332	0.0283	0.0442	0.0011	376	174	292	22	279	6.5	95
10	11.8	160	228	0.70	0.0499	0.0040	0.2851	0.0240	0.0417	0.0006	191	178	255	19	264	3.9	96
11	14.9	255	265	0.96	0.0447	0.0027	0.2654	0.0154	0.0437	0.0007	error		239	12	276	4.0	85
12	18.5	233	352	0.66	0.0562	0.0024	0.3360	0.0148	0.0435	0.0006	461	96	294	11	275	3.7	93
13	15.8	192	299	0.64	0.0558	0.0025	0.3411	0.0164	0.0441	0.0007	443	98	298	12	278	4.0	93
14	7.6	87.4	144	0.60	0.0513	0.0030	0.3138	0.0172	0.0448	0.0009	254	133	277	13	283	5.9	97
15	16.4	220	300	0.73	0.0527	0.0023	0.3234	0.0153	0.0443	0.0007	317	98	285	12	279	4.6	98
16	14.2	190	264	0.72	0.0545	0.0040	0.3247	0.0244	0.0433	0.0007	391	163	286	19	273	4.2	95
17	10.0	137	187	0.73	0.0555	0.0050	0.3269	0.0286	0.0432	0.0008	432	204	287	22	273	5.0	94
18	21.2	310	389	0.80	0.0582	0.0023	0.3524	0.0138	0.0442	0.0007	539	85	306	10	279	4.5	90
19	21.5	344	393	0.88	0.0555	0.0024	0.3310	0.0145	0.0435	0.0007	432	98	290	11	274	4.5	94
20	13.6	189	248	0.76	0.0540	0.0027	0.3277	0.0167	0.0441	0.0007	369	113	288	13	278	4.2	96
21	16.1	229	297	0.77	0.0541	0.0025	0.3287	0.0151	0.0443	0.0007	376	71	289	12	280	4.6	96
22	31.1	445	564	0.79	0.0518	0.0015	0.3183	0.0110	0.0444	0.0006	276	69	281	8.5	280	3.7	99
23	33.4	425	614	0.69	0.0510	0.0017	0.3157	0.0110	0.0449	0.0007	243	79	279	8.5	283	4.0	98
24	45.1	559	827	0.68	0.0575	0.0023	0.3477	0.0134	0.0442	0.0009	509	89	303	10	279	5.3	91
25	13.0	167	250	0.67	0.0524	0.0037	0.3237	0.0238	0.0447	0.0011	302	127	285	18	282	6.8	99
26	19.1	296	342	0.86	0.0505	0.0021	0.3127	0.0150	0.0447	0.0007	217	103	276	12	282	4.2	98
27	11.5	154	213	0.72	0.0500	0.0024	0.2971	0.0134	0.0434	0.0005	195	111	264	10	274	3.3	96
28	18.7	266	344	0.77	0.0489	0.0018	0.2948	0.0115	0.0437	0.0005	143	87	262	9.0	276	3.3	95
29	18.3	247	341	0.73	0.0502	0.0019	0.3046	0.0114	0.0443	0.0006	211	95	270	8.8	279	3.8	96
30	26.4	570	430	1.33	0.0522	0.0016	0.3199	0.0102	0.0445	0.0006	300	72	282	7.8	281	4.0	99

表 2 雅布赖地区埃达克岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Content of major, trace elements, and REE of the Yabulai adakite

样号	PM001-20-1	D5483-1-1	D5865-1-1	D3132-1-1	PM021-10-1	D2812-1-1	D0605-1-1	D7135-1-1
岩性	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩
SiO ₂	61.23	63.41	61.21	61.63	62.98	61.32	61.12	60.56
TiO ₂	0.74	0.62	0.68	0.70	0.56	0.71	0.79	0.80
Al ₂ O ₃	17.33	16.00	16.18	16.38	15.86	16.35	16.02	16.99
Fe ₂ O ₃	2.31	1.23	1.60	1.86	1.67	1.80	1.94	1.89
FeO	3.37	4.19	4.00	3.92	3.00	3.51	3.79	4.36
MnO	0.10	0.09	0.10	0.12	0.09	0.10	0.11	0.11
MgO	1.45	2.52	2.99	1.65	2.34	1.78	1.95	3.06
CaO	4.26	5.08	6.22	4.65	5.11	5.21	5.43	6.39
Na ₂ O	4.62	3.63	3.50	3.78	3.48	4.02	4.06	2.93
K ₂ O	2.63	2.09	1.98	2.89	2.65	3.40	2.74	1.80
P ₂ O ₅	0.25	0.19	0.20	0.32	0.20	0.26	0.29	0.21
H ₂ O ⁺	0.78	0.19	0.6	0.82	0.46	0.74	0.85	0.28
CO ₂	0.4	0.12	0.27	0.74	0.37	0.51	0.62	0.45
烧失量	1.24	0.36	0.96	1.69	1.49	1.33	1.56	0.78
总计	99.53	99.41	99.62	99.59	99.43	99.79	99.80	99.88
Na ₂ O/K ₂ O	1.76	1.74	1.77	1.31	1.31	1.18	1.48	1.63
Mg [#]	38	49	53	38	53	43	43	51
A/CNK	0.95	0.91	0.85	0.92	0.89	0.82	0.82	0.93
σ	2.88	1.60	1.65	2.39	1.88	3.01	2.55	1.27
Cs	3.03	2.03	2.52	1.80	2.02	1.31	1.43	3.38
Rb	124	98.2	74.2	98.6	89.9	77.4	73.5	68.2
Sr	758	746	725	697	572	640	581	611
Ba	310	345	423	725	816	457	412	489
Nb	10.2	8.96	6.33	9.55	7.44	8.46	9.14	6.10
Ta	0.85	1.13	0.69	0.58	1.06	0.63	0.62	0.62
Zr	432	122	136	316	123	285	278	178
Hf	9.78	5.41	4.34	6.95	5.96	7.04	6.85	7.20
Th	20.2	9.63	9.23	16.5	13.4	8.12	9.14	6.44
V	48.3	102	113	57.5	90.1	70.7	76.7	127
Cr	6.70	63.6	35.5	14.7	17.0	11.7	9.94	13.8
Co	8.56	21.6	15.2	9.33	11.7	10.5	10.5	17.7
Ni	5.53	34.2	17.2	7.25	12.3	7.19	5.53	9.86
Li	26.4	16.3	16.5	16.2	17.8	9.67	11.1	24.6
U	2.29	1.32	1.81	1.45	1.44	1.24	1.30	1.46
La	92.2	22.8	20.1	64.1	22.8	44.1	44.5	27.6
Ce	165	41.6	38.4	119	44.1	85.5	86.2	51.3
Pr	16.2	4.85	4.67	12.0	5.13	9.24	9.07	6.00
Nd	50.2	19.6	18.9	42.5	19.0	33.1	32.6	24.3
Sm	6.32	3.56	3.72	6.65	3.19	5.30	5.45	4.42

续表 2

样号	PM001-20-1D5483-1-1	D5865-1-1	D3132-1-1	PM021-10-1D2812-1-1	D0605-1-1	D7135-1-1		
岩性	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩	石英闪长岩
Eu	1.60	1.08	1.21	1.55	0.97	1.46	1.40	1.22
Gd	3.76	2.98	3.23	4.64	2.69	4.10	4.03	3.62
Tb	0.49	0.48	0.47	0.63	0.37	0.58	0.58	0.47
Dy	1.84	2.52	2.62	2.78	2.16	2.68	2.74	2.20
Ho	0.36	0.52	0.47	0.52	0.42	0.50	0.52	0.41
Er	1.12	1.41	1.42	1.32	1.22	1.43	1.48	1.21
Tm	0.16	0.24	0.22	0.18	0.18	0.20	0.21	0.17
Yb	1.06	1.55	1.45	1.23	1.25	1.31	1.43	1.13
Lu	0.18	0.22	0.23	0.18	0.19	0.20	0.21	0.17
Y	12.6	11.4	11.1	14.6	12.0	14.0	14.7	11.8
ΣREE	353.1	114.8	108.2	271.9	115.6	203.7	205.1	136.0
LREE/HREE	37.0	9.42	8.61	21.4	11.2	16.3	16.0	12.2
δEu	0.93	0.99	1.04	0.81	0.99	0.92	0.88	0.91
(La/Yb) _N	58.7	9.91	9.34	35.1	12.3	22.7	21.0	16.4
Sr/Y	60.2	65.4	65.3	47.7	47.8	45.7	39.5	51.8
La/Nb	9.04	2.54	3.17	6.71	3.06	5.21	4.87	4.52
Y/Yb	11.9	7.35	7.66	11.9	9.58	10.7	10.3	10.4
Rb/Sr	0.16	0.13	0.10	0.14	0.16	0.12	0.13	0.11
La/Sm	14.6	6.40	5.40	9.64	7.16	8.32	8.17	6.24
La/Yb	87.0	14.7	13.9	52.1	18.2	33.7	31.1	24.3

注:主量元素含量单位为%,微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

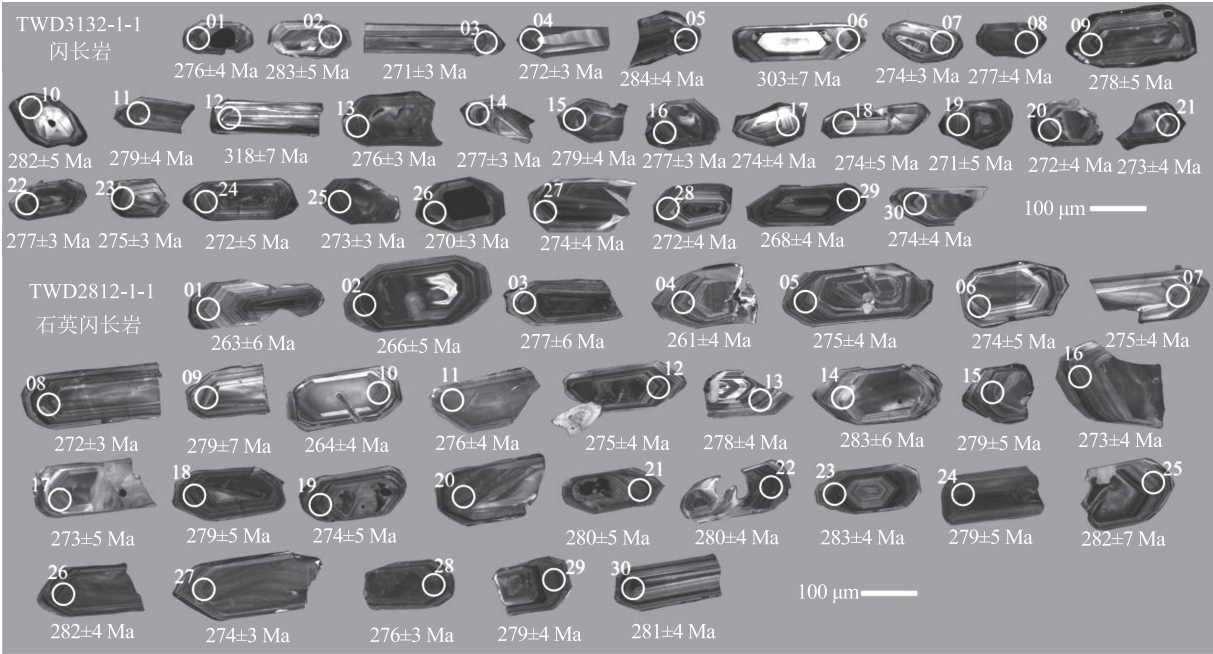


图 3 雅布赖地区埃达克岩锆石阴极发光图像和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

Fig. 3 Cathodoluminescence images and $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages of zircons from the Yabulai adakite

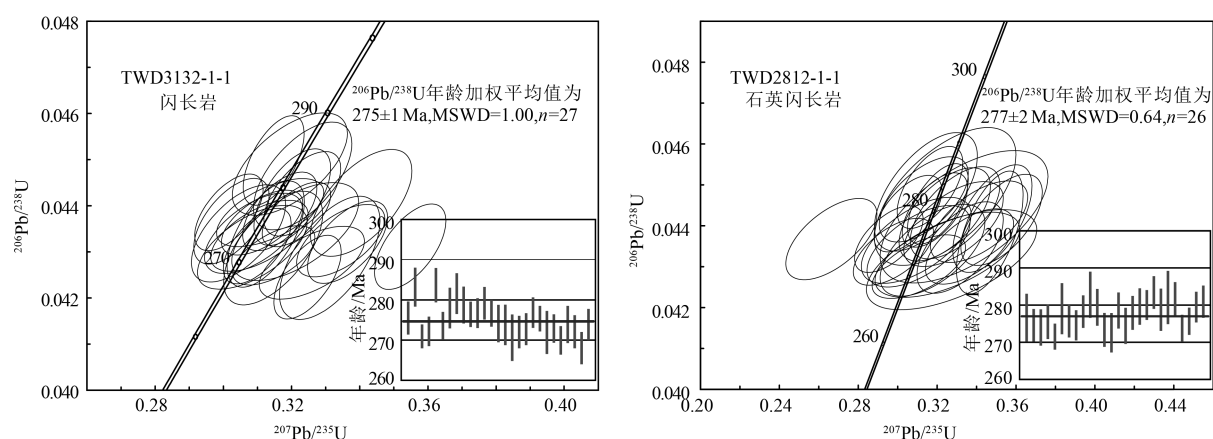
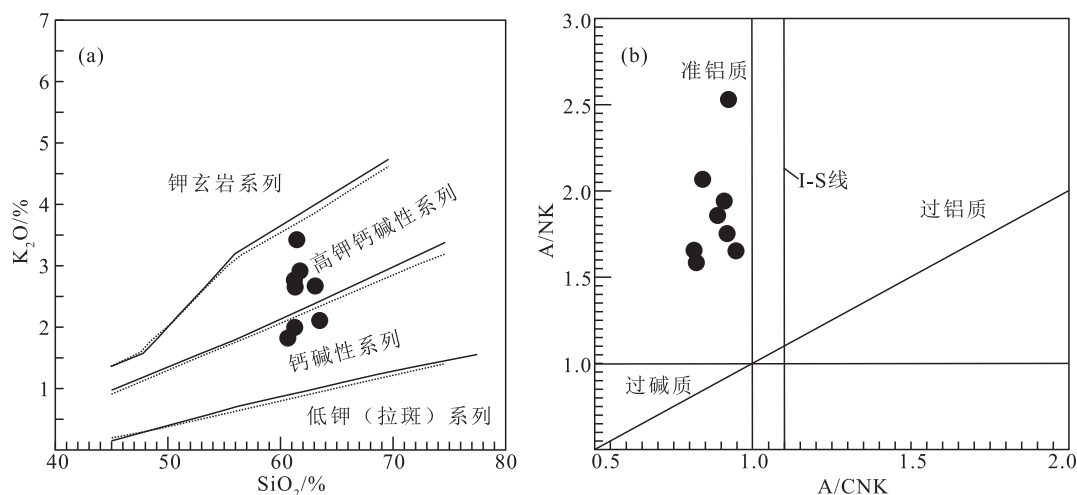


图 4 雅布赖地区埃达克岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 U-Pb isotopic concordia diagrams for zircons from the Yabulai adakite

图 5 雅布赖地区埃达克岩 SiO_2 - K_2O (a)^[41] 和 A/CNK - A/NK (b)^[42] 图解Fig. 5 SiO_2 - K_2O (a) and A/CNK - A/NK (b) diagrams of the Yabulai adakite

3.3 稀土与微量元素

稀土元素分析结果显示,雅布赖地区埃达克岩稀土元素总量(ΣREE)介于 $108.2 \times 10^{-6} \sim 353.1 \times 10^{-6}$ 之间(平均值为 188.6×10^{-6}),轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)为 8.61~37.0, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 9.34~58.7,轻、重稀土元素分馏程度较大,轻稀土元素富集。在稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(图 6-a)上,8 件样品具有一致的稀土元素配分曲线,均呈轻稀土元素富集、重稀土元素亏损的右倾型。 δEu 值为 0.81~1.04,平均值为 0.93,具有弱的负 Eu 异常,表明岩浆演化过程中斜长石没有发生显著的分离结晶作用。

微量元素具高 Sr 和 Sr/Y 值, Sr 含量为 $572 \times 10^{-6} \sim 758 \times 10^{-6}$,平均值为 666×10^{-6} , Sr/Y 值为

39.5~65.4,平均值为 52.9。在微量元素原始地幔蛛网图(图 6-b)上,总体富集大离子亲石元素(LILE) K、Rb、Ba、Sr 和高场强元素(HFSE) Th、Hf,亏损 Ta、Nb、Ti、P、HREE 等。

3.4 矿物学特征

样品 D7135-1-1 岩性为石英闪长岩,其中斜长石斑晶具有筛孔状核部(图 7-a),斜长石斑晶边部主要为中长石-拉长石($\text{An} = 44 \sim 52$);核部区域边角浑圆,呈溶蚀状,其 An 值为 75~86,为培长石,核部斜长石从中心到边缘 An 值逐渐降低,环带成分连续变化,表明核部为正常结晶形成。斜长石斑晶核部被溶蚀成港湾状,且与边部具有明显的界线,二者成分差异较大,具有明显的突变。另一类斜长石(样

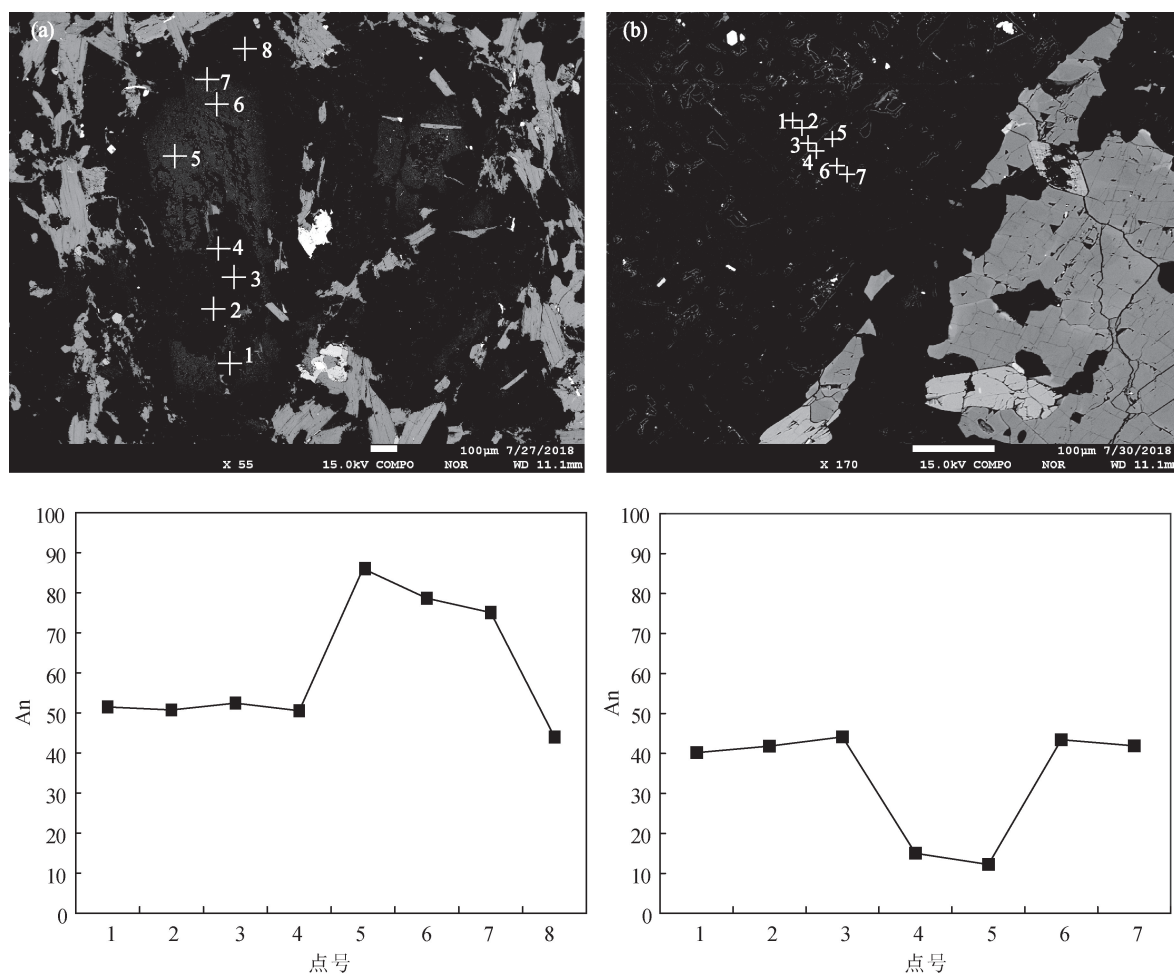


图 7 雅布赖地区埃达克岩的斜长石成分环带 An 变化图

Fig. 7 Variation of An values of plagioclases from the Yabulai adakite

4 讨 论

4.1 岩体形成时代

前人对雅布赖-诺日公-红谷尔玉林构造带内广泛发育的晚古生代岩浆岩进行了大量研究。史兴俊等^[26]认为,该构造带东段哈里努登花岗岩具有类似埃达克质岩石的地球化学特征,锆石 U-Pb 年龄为 284 ± 2 Ma。张建军^[29]获得雅布赖地区花岗闪长岩 U-Pb 年龄为 270 ± 2 Ma,时代为早二叠世晚期。叶柯等^[22]获得正长花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 286 ± 1 Ma,花岗闪长岩和英云闪长岩锆石 U-Pb 年龄分别为 280 ± 1 Ma 和 272 ± 1 Ma,认为主体形成于早二叠世。作康林^[24]在研究区东侧花岗闪长岩中获得锆石 U-Pb 年龄为 273 ± 7 Ma,时代归属为早二叠世。而对于雅布赖-诺日公-红谷尔玉林构造带

中段和东段大量出露的花岗岩类和辉长岩,近年来亦发表了大量的同位素年龄,多集中于 250 ~ 306 Ma^[21-31, 34, 36-38]。

本次测定的年龄 (275 ± 1 Ma、 277 ± 2 Ma) 为岩体的侵位年龄,时代归属为早二叠世,表明其与雅布赖-诺日公-红谷尔玉林构造带内广泛分布的花岗岩类岩石和辉长岩为同时期的产物。

4.2 岩石成因和源区特征

雅布赖地区埃达克岩的 A/CNK 值在 0.82 ~ 0.95 之间,为准铝质(图 5-b),属钙碱性-高钾钙碱性(图 5-a),富集 Rb、Th、Ba、K、Sr,相对亏损 Ta、Nb、Ti、P,不含白云母、堇青石等矿物,暗色矿物主要为黑云母、角闪石,表明其应属于 I 型花岗岩,暗示其源于基性下地壳的部分熔融^[29]。本次对岩石中不同类型的斜长石进行研究时发现,2 种斜长石

边部成分相似,而核部成分截然不同,暗示其来自不同的岩浆源区,较基性的斜长石核部($An = 75 \sim 86$)可能为幔源,而酸性斜长石核部($An = 12 \sim 15$)可能为壳源。上述斜长石边部还包裹角闪石、黑云母等矿物,可能反映不同源区的岩浆发生混合后,斜长石再次生长,继而将先前结晶的基性暗色矿物包裹起来。上述特征表明,雅布赖地区埃达克岩源区具有壳幔混合的特征。

雅布赖地区埃达克岩具有高硅、富铝特征, SiO_2 含量大于 56%, Al_2O_3 大于 15%, MgO 含量较低(小于 3%), $Mg^\#$ 值为 38~53, Sr 含量较高(平均值为 666×10^{-6} ,大于 400×10^{-6}), Y 含量($11.1 \times 10^{-6} \sim 14.7 \times 10^{-6}$,平均 12.8×10^{-6} ,小于 18×10^{-6})和 Yb 含量($1.06 \times 10^{-6} \sim 1.55 \times 10^{-6}$,小于 1.9×10^{-6})较低,没有明显的 Eu 异常,相对富集 K 、 Rb 、 Ba 、 Sr 等大离子亲石元素,亏损 Ta 、 Nb 、 Ti 、 P 等高场强元素。在 $Y-Sr/Y$ 图解(图 8-a)和 $Yb_N-(La/Yb)_N$ 图解(图 8-b)中,样品点均落入典型埃达克岩区域。

样品 $(La/Yb)_N$ 值较高(9.91~58.7,平均值为 23.2), $LREE$ 强烈富集,正 Sr 异常不明显,具较平坦的 $HREE$ 配分模式, Y/Yb 值主要变化于 7.35~11.9 之间,平均值为 9.96,接近于球粒陨石值(10),与中国东部埃达克岩相似^[8,45],表现出 C 型埃达克岩的特征。

根据目前的研究成果,埃达克岩成因模式主要有 4 种:①俯冲洋壳玄武质组部分熔融^[1,3]产生的流体与楔形地幔橄榄岩发生不同程度反应形成的

埃达克岩^[2,46];②含水玄武质岩浆在高/低压条件下发生结晶分异作用^[17];③受玄武质岩浆底侵作用或陆内俯冲的上地壳脱水作用产生的流体诱发的增厚下地壳的熔融^[5,47~48];④拆沉下地壳发生部分熔融产生的流体与地幔橄榄岩相互作用形成的高 $Mg^\#$ 值埃达克岩^[49]。

首先,可以排除雅布赖地区埃达克岩的俯冲洋壳部分熔融的来源。雅布赖地区埃达克岩为 C 型埃达克岩,具有较高的 K_2O 含量(1.80%~3.40%)和较低的 Na_2O/K_2O 值(1.18~1.77),明显不同于俯冲洋壳部分熔融形成的埃达克岩(K_2O 含量平均不超过 1.72%, Na_2O/K_2O 值为 2.5~6.5)。另外,样品中相容元素(如 Cr 、 Ni)的含量低,不同于源于俯冲洋壳部分熔融并可能和楔形地幔橄榄岩发生反应形成的埃达克岩。同时,较高的 Rb/Sr 值(0.10~0.16)与典型俯冲洋壳部分熔融产生埃达克岩的 Rb/Sr 值(<0.05)明显不同,而与加厚的下地壳部分熔融形成埃达克岩的 Rb/Sr 值类似^[50]。以上特征表明,雅布赖地区埃达克岩并非由俯冲洋壳部分熔融产生。

其次,可以排除含水玄武质岩浆高/低压条件下发生结晶分异作用成因。高压条件下结晶分异过程涉及石榴子石,而石榴子石会降低岩石中 $HREE$ 和 Y 的含量,因此, Dy/Yb 和 Sr/Y 值会与 SiO_2 成正相关,而雅布赖地区埃达克岩并未表现出类似的关系;玄武质岩浆低压条件下发生结晶分异作用形成的埃达克岩, MgO 、 Cr 、 Ni 等元素会随着

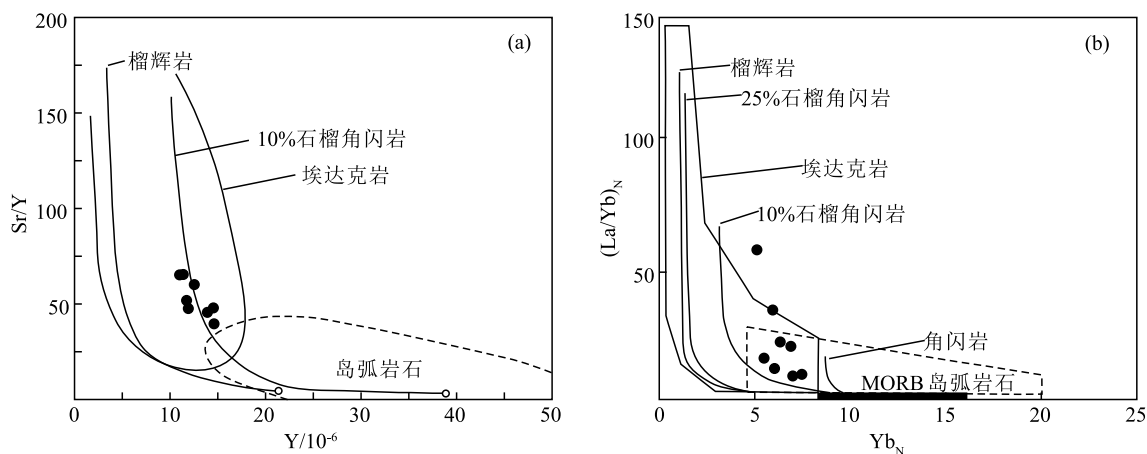
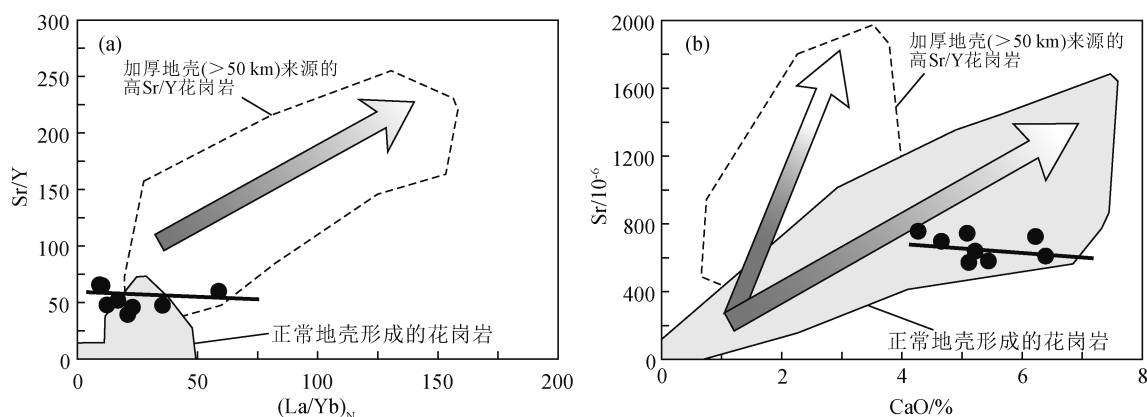


图 8 雅布赖地区埃达克岩 $Y-Sr/Y$ (a) 和 $Yb_N-(La/Yb)_N$ (b) 图解^[1]

Fig. 8 $Y-Sr/Y$ (a) and $Yb_N-(La/Yb)_N$ (b) diagrams for the Yabulai adakite

MORB—大洋中脊玄武岩

图 9 雅布赖地区埃达克岩 $(La/Yb)_N$ -Sr/Y(a) 和 CaO-Sr(b) 图解Fig. 9 $(La/Yb)_N$ -Sr/Y(a) and CaO-Sr(b) diagrams for the Yabulai Adakite

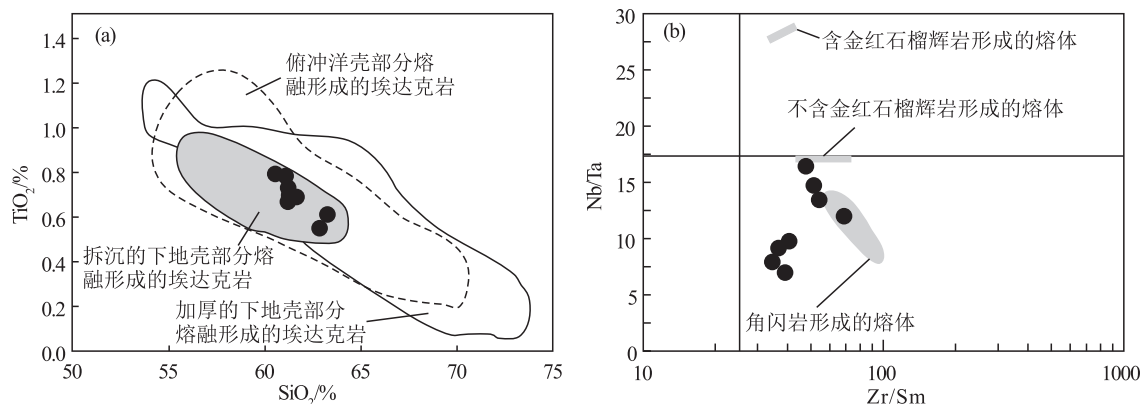
SiO_2 的增加而减少,雅布赖地区埃达克岩也未表现出相关特征。此外,结晶分异趋势中 La/Sm 和 La/Yb 值不会随 La 变化而发生较大的改变^[51],而雅布赖地区埃达克岩 La/Sm 和 La/Yb 与 La 表现出与结晶分异明显不同的趋势。

加厚镁铁质下地壳(大于 50 km)形成的花岗岩不但具有较高的 Sr/Y 、 Sr/CaO 、 $(La/Yb)_N$ 、 $(Dy/Yb)_N$ 和 Nb/Ta 值,而且这些比值之间存在显著的正相关关系^[52]。这与雅布赖地区埃达克岩平坦的 HREE 配分模式明显不同。其 Sr/Y 与 $(La/Yb)_N$ 值未表现出正相关(图 9-a),其 Sr 、 CaO 含量变化趋势也与加厚下地壳来源的埃达克岩大相径庭(图 9-b)。此外,在 SiO_2 - TiO_2 图解(图 10-a)中,雅布赖地区埃达克岩样品点投影在拆沉下地壳部分熔融形成的埃达克岩范围,而与加厚下地壳

直接部分熔融形成的埃达克岩不同。

通常认为,玄武质下地壳加厚以后首先发生角闪岩相变质,进而发生榴辉岩相变质,形成由榴辉岩类物质组成的加厚下地壳^[50]。在 Zr/Sm - Nb/Ta 图解(图 10-b)中,雅布赖埃达克岩样品点均靠近角闪岩熔融区域,而远离(含金红石)榴辉岩熔体,这与 Y - Sr/Y 图解(图 8-a)和 Yb_N - $(La/Yb)_N$ 图解(图 8-b)中样品点靠近(含 10% 石榴子石)角闪岩熔融曲线、远离榴辉岩残留相的熔融曲线一致。结合金红石的稳定压力下限为 1.5 GPa 推测,该地区埃达克岩起源深度应该不大于 50 km,因而其成因也不可能与榴辉岩相下地壳的熔融或拆沉有关。

Kay 等^[53]提出,当地壳厚度达到一定程度,并且经历拆沉作用后可以形成埃达克岩。拆沉下地壳部分熔融的熔体,在上升过程中不可避免会与上

图 10 雅布赖地区埃达克岩 SiO_2 - TiO_2 (a)^[50] 和 Zr/Sm - Nb/Ta (b)^[51] 图解Fig. 10 SiO_2 - TiO_2 (a) and Zr/Sm - Nb/Ta (b) diagrams for the Yabulai adakite

地幔相互作用,导致形成的岩浆具有较高的 MgO 、 Cr 、 Ni 含量^[49],而加厚下地壳部分熔融形成的埃达克岩往往具有较高的 SiO_2 、 K_2O 含量, Mg 、 Cr 、 Ni 含量较低。雅布赖地区埃达克岩具有变化范围较大的 Mg ($1.45\% \sim 3.06\%$)、 Cr ($6.70 \times 10^{-6} \sim 63.6 \times 10^{-6}$) 和 Ni ($5.53 \times 10^{-6} \sim 34.2 \times 10^{-6}$) 含量,部分样品的 $\text{Mg}^\#$ 值 ($38 \sim 53$) 也高于基性岩熔融实验得到的熔体 ($\text{Mg}^\# < 45$)^[54],反映其源区存在幔源组分的加入,应为拆沉下地壳部分熔融产生的流体与地幔橄榄岩相互作用形成的产物。

雅布赖地区埃达克岩样品中较高的 Sr 含量 ($572 \times 10^{-6} \sim 758 \times 10^{-6}$) 和微弱的负 Eu 异常 (δEu 值为 $0.81 \sim 1.04$, 平均值为 0.93) 表明,源区中斜长石的残留应较少。前人研究表明,岩浆源区中石榴子石或角闪石的残留对岩浆熔体的 HREE 配分模式及 Y/Yb 值具有显著影响,即当源区主要以石榴子石为残留相时,形成的熔体具有倾斜的 HREE 配分模式,且 Y/Yb 值明显大于 10 ; 而当角闪石为源区的主要残留相时,形成的熔体具有轻微向上凹的 HREE 配分模式,且 Y/Yb 值一般接近于 10 ^[8, 20, 55]。雅布赖地区埃达克岩的 Y/Yb 值为 $7.35 \sim 11.89$, 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线图解显示, HREE 配分曲线较平坦 (图 6-a), 表明岩浆源区残留相以角闪石为主。另外,在 $\text{Y}-\text{Sr}/\text{Y}$ 图解 (图 8-a) 和 $\text{Yb}_N-(\text{La}/\text{Yb})_N$ 图解 (图 8-b) 中,样品点主要落在残留组分为 10% 的石榴角闪岩部分熔融曲线处,因此,雅布赖地区埃达克岩的残留相以角闪石为主,石榴子石次之。

综上所述,雅布赖地区埃达克岩应为角闪石相的拆沉下地壳部分熔融产生的流体与地幔橄榄岩相互作用形成的产物。

4.3 构造背景

前人研究认为,雅布赖-诺日公-红古尔玉林构造带和宗乃山-沙拉扎山构造带之间的查干础鲁蛇绿岩可能是古亚洲洋俯冲期间形成的弧后盆地的残余,并提出该洋盆最终闭合于中二叠世 (273 Ma) 之后^[33, 35]。近年来,部分学者发现,2 个构造带中的岩浆岩具有截然不同的锆石 Hf 同位素特征,由此认为这 2 个构造带的基底具有不同的性质,并提出宗乃山-沙拉扎山构造带可能是中亚造山带的一部分^[37, 56-57],而不是在早古生代由阿拉善地块裂解出去的。雅布赖-诺日公-红古尔玉林构造带应是阿

拉善地块的北缘。2 个构造带内均出露晚石炭世—早二叠世阿木山组下段沉积地层^[21],且该地层的组成无明显差别,表明在阿木山组形成的晚石炭世之前,查干础鲁蛇绿岩代表的洋已经闭合。因此,在二叠纪,雅布赖-诺日公-红古尔玉林构造带可能处于碰撞或碰撞后伸展环境^[22]。

雅布赖地区埃达克岩具有 I 型花岗岩的特征。已有研究表明,雅布赖-诺日公-红古尔玉林构造带二叠纪 I 型花岗岩的形成与古亚洲洋的俯冲闭合或随后的碰撞等构造作用有关,形成于活动大陆边缘^[29]。此外,在微量元素蛛网图上,雅布赖地区埃达克岩富集 K 、 Rb 、 Ba 、 Sr 、 Th 等元素,亏损 Ta 、 Nb 、 Ti 、 P 、HREE 等元素,表现出岛弧岩浆岩的地球化学特征。同时,所有样品的 La/Nb 值介于 $2.54 \sim 9.04$ 之间,平均值为 4.89 ,而在活动大陆边缘,岩石的 La/Nb 值普遍大于 2 ^[51],表明该地区埃达克岩形成于陆缘火山弧环境。仵康林^[24]认为,阿拉善北部的花岗岩虽然总体上显示岛弧岩浆岩的部分地球化学特征,只是继承了源岩的特征,但区域地质特征和进一步的地球化学分析表明,这些岩体形成于板内环境,阿拉善北部华力西期的花岗岩形成于后碰撞的构造环境,是构造体制由挤压向拉张转化时期形成的。

笔者认为,雅布赖地区埃达克岩为拆沉下地壳部分熔融产生的流体和地幔橄榄岩相互作用形成的产物。拆沉作用一般发生在造山带去根或古老克拉通减薄过程中,这与前人认为的后碰撞的构造环境一致。结合区域前人研究成果,雅布赖地区埃达克岩可能形成于碰撞后伸展环境。

5 结 论

(1) 阿拉善地块雅布赖地区埃达克岩锆石 $\text{U}-\text{Pb}$ 定年结果为 $275 \pm 1 \text{ Ma}$ 、 $277 \pm 2 \text{ Ma}$, 时代归属为早二叠世。

(2) 雅布赖地区埃达克岩为 C 型埃达克岩,为角闪石相的拆沉下地壳部分熔融产生的流体与地幔橄榄岩相互作用形成的产物。

(3) 雅布赖地区埃达克岩具有 I 型花岗岩的特征,富集轻稀土元素和大离子亲石元素 K 、 Rb 、 Ba 、 Sr 等,亏损高场强元素 Ta 、 Nb 、 Ti 、 P 等,与弧花岗岩特征相似,结合区域研究成果,可能形成于碰撞后伸展环境。

致谢:在项目实施和成文过程中,天津地质调查中心辛后田教授级高工,滕学建、张永高级工程师给予大力支持,在此表示衷心感谢。

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(18): 662-665.
- [2] Rapp R P, Watson E B, Miller C F. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean trondhjemites and tonalities[J]. *Precambrian Research*, 1991, 51: 1-25.
- [3] Kay S M, Ramos V A, Marquez M. Evidence in Cerro Pampa volcanic rocks for slab-melting prior to ridge-trench collision in southern South America[J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(6): 703-714.
- [4] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. *Nature*, 1993, 362(6416): 144-146.
- [5] Atherton M P, Petford N. Plutonism and the growth of Andean crust at 9°S from 100 to 3 Ma[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 1996, 9(1): 1-9.
- [6] 王焰, 张旗, 钱青. 埃达克岩(adakite)的地球化学特征及其构造意义[J]. *地质科学*, 2000, 35(2): 251-256.
- [7] 张旗, 王焰, 钱青, 等. 中国东部燕山期埃达克岩的特征及其构造-成矿意义[J]. *岩石学报*, 2001, 17(2): 236-244.
- [8] 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.
- [9] 张旗, 王焰, 王元龙. 埃达克岩与构造环境[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(2): 101-108.
- [10] 王强, 许继峰, 赵振华. 一种新的火成岩——埃达克岩的研究综述[J]. *地球科学进展*, 2001, 16(2): 201-208.
- [11] 王强, 许继峰, 赵振华, 等. 埃达克岩的构造背景与岩石组合[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2008, 27(4): 344-350.
- [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] 罗照华, 柯珊, 谌宏伟. 埃达克岩的特征、成因及构造意义[J]. *地质通报*, 2002, 21(7): 436-440.
- [14] 董申保, 田伟. 埃达克岩的原义、特征与成因[J]. *地学前缘*, 2004, 11(4): 585-594.
- [15] 邱士东, 董增产, 辜平阳. 柴达木盆地北缘西端埃达克质花岗岩的发现及地质意义[J]. *地质学报*, 2015, 89(7): 1231-1243.
- [16] 翟明国. 埃达克岩和大陆下地壳重熔的花岗岩类[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 193-194.
- [17] Castillo P R. Adakite petrogenesis[J]. *Lithos*, 2012, 134(3): 304-316.
- [18] Muir R J, Ireland T R, Weaver S D, et al. Ion microprobe dating of Paleozoic granitoids: Devonian magmatism in New Zealand and correlations with Australia and Antarctica[J]. *Chemical Geology*, 1996, 127(1/3): 191-210.
- [19] 张旗, 许继峰, 王焰, 等. 埃达克岩的多样性[J]. *地质通报*, 2004, 23(9): 959-965.
- [20] 唐卓, 王国强, 李向民, 等. 北祁连走廊南山山西水地区加里东期大野口埃达克质闪长玢岩的成因及其地质意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(4): 716-723.
- [21] Feng J Y, Xiao W J, Brian Windley, et al. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic-ultramafic rocks from Alxa, China: Implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altaids[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 78(78): 114-142.
- [22] 叶珂, 张磊, 王涛, 等. 阿拉善雅布赖山二叠纪中酸性岩浆岩年代学、地球化学、锆石 Hf 同位素特征及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2016, 35(6): 901-928.
- [23] 王凯垒, 张家兴, 张学萌, 等. 阿拉善地块北缘西段雅布赖岩体暗色微粒包体的岩浆混合成因[J]. *地质论评*, 2020, 66(1): 13-34.
- [24] 作康林. 阿拉善地区华力西晚期花岗岩类岩石地球化学特征及其构造意义[D]. 长安大学硕士学位论文, 2011.
- [25] 张建军, 张磊, 王涛, 等. 内蒙古阿拉善地区二叠纪曼德林乌拉岩体年龄、成因及其地质意义[J]. *地质通报*, 2019, 38(10): 1675-1690.
- [26] 史兴俊, 童英, 王涛, 等. 内蒙古西部阿拉善地区哈里努登花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地质通报*, 2012, 31(5): 662-670.
- [27] Dan W, Li X H, Wang Q, et al. An Early Permian (ca. 280 Ma) silicic igneous province in the Alxa Block, NW China: A magmatic flare-up triggered by a mantle plume?[J]. *Lithos*, 2014, 204: 144-158.
- [28] Dan W, Wang Q, Wang X C, et al. Overlapping Sr-Nd-Hf-O isotopic compositions in Permian mafic enclaves and host granitoids in Alxa Block, NW China: Evidence for crust-mantle interaction and implications for the generation of silicic igneous Provinces[J]. *Lithos*, 2015, 230: 133-145.
- [29] 张建军. 阿拉善地块北部二叠纪花岗岩类成因及地质意义[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2015.
- [30] 肖进, 孙萍, 徐琳. 阿拉善北部诺尔公地区早二叠世辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及成因[J]. *西部资源*, 2016, (4): 55-60.
- [31] 张磊, 史兴俊, 张建军, 等. 内蒙古阿拉善北部陶豪托西圈辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地质通报*, 2013, 32(10): 1536-1547.
- [32] 王延印, 王金荣, 刘金坤, 等. 宗乃山-沙拉扎山陆壳基底火山弧火成岩组合及地球化学特征[J]. *地球化学*, 1994, 23(S1): 162-172.
- [33] 吴泰然, 何国琦. 内蒙古阿拉善地块北缘的构造单元划分及各单元的基本特征[J]. *地质学报*, 1993, 67(2): 97-108.
- [34] 田健, 滕学建, 刘洋, 等. 内蒙古狼山地区早石炭世石英闪长岩 U-Pb 年龄、地球化学特征及其对古亚洲洋俯冲的指示[J]. *地质通报*, 2020, 39(7): 1035-1045.
- [35] Zheng R G, Wu T R, Zhang W, et al. Late Paleozoic subduction system in the northern margin of the Alxa block, Altaids: Geochronological and geochemical evidences from ophiolites[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(2): 842-858.
- [36] 耿元生, 周喜文. 阿拉善变质基底中的早二叠世岩浆热事件——来自同位素年代学的证据[J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2667-2685.
- [37] Zhang J J, Wang T, Zhang L, et al. Tracking deep crust by zircon xenocrysts within igneous rocks from the northern Alxa, China:

- Constraints on the southern boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 108(108): 150–169.
- [38] 张家兴, 王凯垒. 阿拉善地块北缘雅布赖地区辉长岩的锆石 U–Pb 定年及地球化学特征[J]. *地质学刊*, 2021, 45(1): 13–20.
- [39] 王德滋, 谢磊. 岩浆混合作用: 来自岩石包体的证据[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(1): 16–21.
- [40] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling–induced melt–peridotite interactions in the Trans–North China Orogen: U–Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537–571.
- [41] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, et al. A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2033–2048.
- [42] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- [43] Boynton W V. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies [C]//Henderson P. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 1984: 63–114.
- [44] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- [45] 葛小月, 李献华, 陈志刚, 等. 中国东部燕山期高 Sr 低 Y 型中酸性火成岩的地球化学特征及成因: 对中国东部地壳厚度的制约[J]. *科学通报*, 2002, 47(6): 474–480.
- [46] Prouteau G, Scaillet B, Pichavant M, et al. Evidence for mantle metasomatism by hydrous silicic melts derived from subducted oceanic crust[J]. *Nature*, 2001, 410: 197–200.
- [47] 王文龙, 滕学建, 刘洋, 等. 内蒙古狼山地区中三叠世早期 C 型埃达克岩的发现及其构造意义[J]. *地球科学*, 2019, 44(1): 220–233.
- [48] Wang Q, McDermott F, Xu J F, et al. Cenozoic K–rich adakitic volcanic rocks in the Hohxil area, northern Tibet: Lower–crustal melting in an intracontinental setting[J]. *Geology*, 2005, 33(6): 465–468.
- [49] 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.
- [50] 霍腾飞, 杨德彬, 师江朋, 等. 徐淮地区早白垩世丰山和蔡山高镁埃达克质岩: 拆沉下地壳熔融的熔体与地幔橄榄岩的反应[J]. *岩石学报*, 2018, 34(6): 1669–1684.
- [51] 黄雄飞, 莫宣学, 喻学惠, 等. 西秦岭印支期高 Sr/Y 花岗岩类的成因及动力学背景——以同仁地区舍哈力吉岩体为例[J]. *岩石学报*, 2014, 30(11): 3255–3270.
- [52] He Y S, Li S G, Hoefs J, et al. Post–collisional granitoids from the Dabie orogen: New evidence for partial melting of a thickened continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(13): 3815–3838.
- [53] Kay R W, Kay S M. Delamination and delamination magmatism[J]. *Tectonophysics*, 1993, 219(219): 177–189.
- [54] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust–mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891–931.
- [55] 赵宏刚, 梁积伟, 王驹, 等. 甘肃北山算井子埃达克质花岗岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(2): 329–352.
- [56] 史兴俊, 张磊, 王涛, 等. 内蒙古阿拉善盟北部宗乃山中酸性侵入岩年代学、地球化学及构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2014, 33(6): 989–1007.
- [57] Shi X J, Wang T, Zhang L, et al. Timing, petrogenesis and tectonic setting of the Late Paleozoic gabbro–granodiorite–granite intrusions in the Shalazhashan of northern Alxa: Constraints on the southernmost boundary of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Lithos*, 2014, 208/209(208/209): 158–177.