

银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组火山岩 锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及构造意义

陈志鹏,任战利,祁凯,于春勇,任文波

西北大学地质学系,大陆动力学国家重点实验室,西安,710069

内容提要:本文对银额盆地苏红图坳陷钻井揭示的火山岩进行同位素地质年代学和岩石地球化学研究,以揭示该组火山岩的形成年代,探讨其岩石成因和构造环境。通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年,获得火山岩形成年龄为 $131.8 \pm 5.9 \sim 132.6 \pm 0.7$ Ma,时代为早白垩世早期;其年龄与查干凹陷巴音戈壁组火山岩年龄相近或略晚,而与区域内下白垩统苏红图组火山岩年龄差异较大,表明银额盆地早白垩世存在多期火山喷发,且沿着恩格尔乌苏断裂同时发生或向西南延伸,与阿尔金断裂向东北延伸无直接关系。研究区巴音戈壁组火山岩以亚碱性玄武安山岩为主($\text{SiO}_2 = 55.97\% \sim 56.37\%$),表现为主量元素高 TiO_2 ($2.10\% \sim 2.35\%$)、低 MgO ($0.93\% \sim 1.47\%$) 和低 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ($3.17\% \sim 6.49\%$);稀土元素含量高 ($\text{REE} = 352.39 \times 10^{-6} \sim 555.5 \times 10^{-6}$),轻重稀土元素强烈分异,弱 Eu 负异常 ($\delta\text{Eu} = 0.78 \sim 0.85$);富集 Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素 (LILE),亏损 Nb、Ta、Ti 等高场强元素 (HSFE) 以及 Ni、Cr 等相容元素等特征,具有板内和活动大陆边缘的双重特点,与苏红图组板内玄武质火山岩的地球化学特征截然不同。结合区域构造演化及火山岩时空分布分析,认为巴音戈壁组和苏红图组火山岩均为中生代银额盆地陆内伸展、岩石圈减薄和恩格尔乌苏断裂重新活动的产物,但两期火山岩来源于不同的岩浆源区。巴音戈壁组火山岩表现出的岛弧火山岩特征可能是由于地幔源区受到早期俯冲消减事件带来的流体影响。两期火山岩岩浆在上升过程中均未受到明显的地壳物质混染,但巴音戈壁组火山岩存在明显的镁铁质矿物和一定的斜长石结晶分离,结晶分异程度远高于苏红图组火山岩。

关键词:巴音戈壁组火山岩;恩格尔乌苏断裂带;岩石圈伸展;银额盆地;早白垩世

银额盆地构造上位于塔里木、哈萨克斯坦、西伯利亚和华北四大地块结合部位,是中亚造山带南缘天山—兴安造山系的重要组成部分 (Dobretsov et al., 1995; Ren Jishun et al., 1999; Zheng Rongguo et al., 2016),也是研究古亚洲洋闭合及板块拼合的重要区域 (Wu Tairan et al., 1992; Li Jingyi et al., 2009)。银额盆地特殊的大地构造位置决定其构造演化的复杂性,在经历海西期板块碰撞及造山作用后,中、新生代的构造格局发生了巨大转变,伸展与挤压环境循环往复,这期间常伴随有剧烈的岩浆活动,岩浆侵入与喷发作用多期次交替发生。开展火成岩的研究对于该区构造演化历史重建

和地球动力环境分析有着重要意义 (Wang Tinyin et al., 1998; Yang Jingsui et al., 2009)。

银额盆地中生代火山喷发期次按时代可划分为印支期、燕山早期和晚期 3 期;其中燕山晚期的早白垩世是银额盆地岩浆活动比较强烈的时期,以多旋回的基性、中基性火山活动为主,可以分为早白垩世早期和晚期两个活动期 (Zhang Aiping, 2003; Zhong Fuping et al., 2011)。早白垩世晚期的苏红图组火山岩分布相对广泛,前人对其进行过较为细致的研究 (Wu Shaobo et al., 1999; Ren Shoumai et al., 2002; Zhong Fuping et al., 2011),但早白垩世早期的火山岩仅在查干凹陷少数钻井见到,地表未

注:本文为国家自然科学基金(编号 41630312)、“十三五”国家重大专项(编号 2017ZX05005002-008)、延长油田科研项目(编号 KT2016SF0001)资助的成果。

收稿日期:2018-03-02;改回日期:2018-04-10;网络发表时间:2018-12-10;责任编辑:黄敏。

作者简介:陈志鹏,男,1987 年生。博士研究生,主要从事盆地沉积、构造演化及油气勘探研究。Email: chenzipeng305@163.com。通讯作者:任战利,男,1961 年生。研究员,博士生导师;长期从事盆地构造—热演化史和油气地质研究与教学。Email: renzhanli@nwnu.edu.cn。

引用本文:陈志鹏,任战利,祁凯,于春勇,任文波. 2019. 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及构造意义. 地质学报, 93(2): 353~367, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019020.
Chen Zhipeng, Ren Zhanli, Qi Kai, Yu Chunyong, Ren Wenbo. 2019. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of volcanic rocks of early Cretaceous Bayingebi Formation in Suhongtu depression of the Ying'e basin, and their tectonic implications. Acta Geologica Sinica, 93(2): 353~367.

见出露的地质剖面,对该期火山岩的构造背景和成因研究较为薄弱。鉴于此,笔者通过整理该地区研究资料^{①②},对银额盆地苏红图坳陷钻井揭示的早白垩世巴音戈壁组火山岩进行了锆石 U-Pb 年代学和岩石地球化学研究,明确其火山岩时代和地球化学特征,并与查干凹陷巴音戈壁组火山岩年龄进行了对比,分析盆内断裂的活动时期与延伸方向,同时与研究区苏红图组火山岩的地球化学参数进行对比,分析了两期火山岩的成因、岩浆演化及构造背景的异同。

1 区域地质与火山岩特征

银额盆地是在前寒武纪结晶地块和古生代褶皱基底之上,通过北东向基底构造伸展断陷作用而发育起来的中、新生代陆相断陷盆地(Zuo Yinhui et al., 2015)。苏红图坳陷位于银额盆地中北缘,构造上位于塔里木板块与华北板块碰撞形成的缝合带—恩格尔乌苏断裂带附近(图 1);主体由哈日凹陷、巴北凹陷、艾西凹陷和艾东凹陷组成,凹陷间为凸起所隔,呈现“凹隆相间”的构造格局。本文采样点哈日

凹陷为一东断西超的中新生代箕状断陷,凹陷东部为控制断陷发育的同沉积正断层。研究区中生界以白垩系为主,缺失三叠系和侏罗系;白垩系自下而上可划分为下白垩统巴音戈壁组(K_1b)、苏红图组(K_1s)和银根组(K_1y)及上白垩统乌兰苏海组(K_2w)。

研究区在中生界底部钻遇一套断陷内连续分布的火山岩,其上覆为下白垩系巴音戈壁组湖相碎屑岩沉积,下伏为石炭—二叠系的海相沉积地层,根据地层接触关系及锆石测年结果,笔者将其定名巴音戈壁组火山岩。巴音戈壁组火山岩平面分布较为局限,主要沿断陷东部边界断裂呈扇形展布,厚度自断陷深部向浅部逐渐减薄,最厚可达 320m。岩心样品呈深灰色、灰色,块状构造、斑状结构,气孔杏仁发育(图 2a)。斑晶约占 10%~20%,多呈自形,粒径介于 0.15~0.4mm 之间,以透长石和斜长石为主,镜下可见气孔和裂缝被多期矿物充填,早期多为微晶状和隐晶状硅质,晚期以方解石为主,亦可见白云石、玉髓、石英和伊利石等充填(图 2b、c)。基质具有交织结构,约占 80%~90%,主要由微晶针状斜

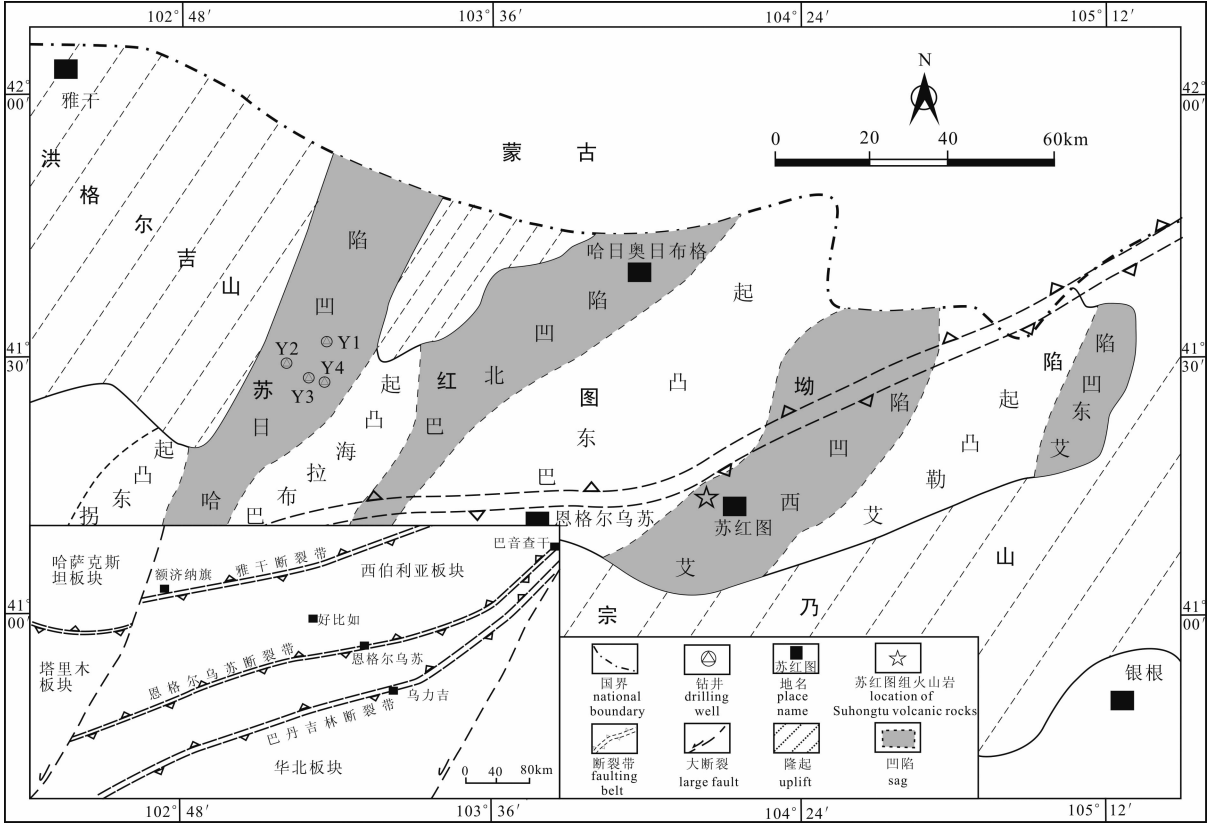


图 1 银额盆地苏红图坳陷及其邻区构造地质简图(修改自 Wu Tairan et al., 1992; Wang Tinyin et al., 1993)

Fig. 1 Tectonic and geological sketch map of the Suhongtu Depression, Ying'E Basin and its neighboring areas (modified according Wu Tairan et al., 1992; Wang Tinyin et al., 1993)

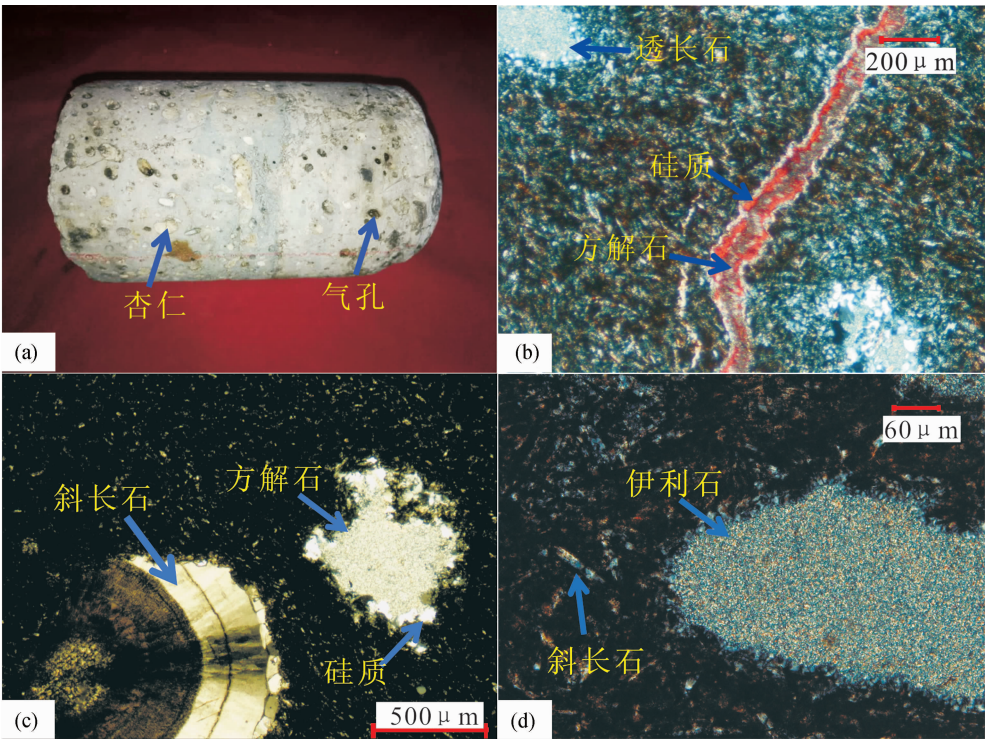


图 2 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组火山岩岩石学特征

Fig. 2 Petrologic feature of Early Cretaceous Bayingebi volcanic rocks in Suhongtu Depression, Ying'E Basin

长石、钠长石以及部分隐晶质和暗色玻璃质组成,玻璃质已脱玻化呈雏晶状(图 2d)。

2 样品采集及分析方法

本文所有采集样品均来自于钻井岩心,分析前均进行了手标本和显微镜的岩石学鉴定和去杂质处理。火山岩样品在河北省廊坊区域地质调查研究所进行样品粉碎和锆石挑选,再将锆石颗粒固定在环氧树脂上进行抛光,然后对其进行透射光、反射光和阴极发光(CL)图像的采集。锆石的制靶、显微图像采集和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,详细的实验原理和流程见参考文献(Yuan Honglin et al., 2010)。测试结果通过 GLITTER 软件计算得出,实验获得的数据采用 Andersen(2002)的方法进行同位素比值的校正以扣除普通 Pb 的影响,谐和图的绘制采用 ISOPLLOT 4.0 完成。单个分析点的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)为 1σ。

主量和微量元素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。主量元素采用玻璃熔饼法,在 RIX 2100 型 X 荧光光谱仪上完成,经 BCR-2 和 GBW07105 标样监控,分析误差小于 5%。微量和

稀土元素在美国 Perkin Elmer 公司 Elan 6100DRC ICP-MC 上完成,实验用 AGV-2、BCR-2、GSP-2 和 BHV0-2 四个标样和空白样进行质量控制,Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Nb、Hf、Ta 和 REE 的分析误差小于 5%,其余元素小于 15%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年代学

火山岩锆石 U-Pb 同位素分析结果见表 1,为了提高火山岩年龄的准确度,本文补充了王香增等(2016 年)对巴音戈壁组火山岩的锆石 U-Pb 分析数据。Y1 样品为本次采集的巴音戈壁组火山岩,其锆石呈灰色—灰黑色;颗粒形状不规则,见椭圆形、半月形及短柱形;粒径较小,约为 50~150μm,长宽比约为 1.5:1~2.5:1。阴极发光(CL)图像显示大多数锆石具有明显的振荡生长环带结构(图 3),反映岩浆锆石特征。锆石的 Th 和 U 含量分别为 $60 \times 10^{-6} \sim 4343 \times 10^{-6}$ 和 $62 \times 10^{-6} \sim 2232 \times 10^{-6}$, Th/U 为 0.29~2.99,平均为 0.96,远大于变质锆石的 Th/U 比值(<0.1)(Griffin et al., 2004),表明其岩浆成因(Hoskin et al., 2003)。

分析数据显示 Y01 样品获得锆石 U-Pb 谐和年龄 12 个,根据锆石年龄分布可分为两组,第一组年

表 1 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组火山岩锆石 U-Pb 测年分析数据

Table 1 Zircon U-Pb dating results of Early Cretaceous Bayingebi volcanic rocks in Suhongtu Depression, Ying'E Basin

测点编号	Th/U	同位素比值						表面年龄(Ma)					
		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
H01:玄武安山岩													
Y01-1	1.12	0.05184	0.00815	0.13443	0.02091	0.01881	0.00043	278	325	128	19	120	3
Y01-2	1.19	0.05905	0.00622	0.15671	0.01625	0.01925	0.00036	569	239	148	14	123	2
Y01-3	0.71	0.04718	0.00334	0.12672	0.00875	0.01948	0.00030	58	157	121	8	124	2
Y01-4	2.99	0.05561	0.00152	0.15346	0.00339	0.02002	0.00025	437	28	145	3	128	2
Y01-5	0.24	0.05013	0.00065	0.14642	0.00210	0.02113	0.00014	201	21	139	2	135	1
Y01-6	1.97	0.04640	0.00294	0.13491	0.00844	0.02108	0.00021	19	139	128	8	135	1
Y01-7	0.28	0.05034	0.00100	0.21529	0.00420	0.03108	0.00027	211	29	198	4	197	2
Y01-8	0.74	0.05901	0.00139	0.25341	0.00418	0.03114	0.00037	567	17	229	3	198	2
Y01-9	0.56	0.05059	0.00122	0.21773	0.00531	0.03137	0.00034	222	36	200	4	199	2
Y01-10	0.29	0.05141	0.00086	0.27609	0.00475	0.03899	0.00032	259	24	248	4	247	2
Y01-11	0.78	0.05152	0.00418	0.27754	0.02208	0.03907	0.00063	264	186	249	18	247	4
Y01-12	0.64	0.05285	0.00050	0.37112	0.00409	0.05082	0.00035	322	13	320	3	320	2
H04:玄武安山岩													
H04-1	4.87	0.05697	0.00202	0.16365	0.00554	0.02084	0.00016	490	61	154	5	133	1
H04-2	3.53	0.05274	0.00177	0.15056	0.00484	0.02071	0.00015	318	60	142	4	132	1
H04-3	3.88	0.04866	0.00131	0.13911	0.00348	0.02074	0.00014	131	46	132	3	132	1
H04-4	0.10	0.13257	0.00204	7.38177	0.09555	0.40388	0.00326	2132	12	2159	12	2187	15
H04-5	0.95	0.05157	0.00223	0.29712	0.01244	0.04179	0.00038	266	80	264	10	264	2
H04-6	0.61	0.05150	0.00277	0.29618	0.01553	0.04172	0.00043	263	102	263	12	263	3
H04-7	1.01	0.05178	0.00573	0.30100	0.03298	0.04216	0.00065	276	219	267	26	266	4
H04-8	3.05	0.06202	0.00196	0.17757	0.00529	0.02077	0.00018	675	49	166	5	133	1
H04-9	1.05	0.05135	0.00195	0.29569	0.01073	0.04177	0.00039	257	66	263	8	264	2
H04-10	0.20	0.05158	0.00022	0.29669	0.01222	0.04172	0.00042	267	76	264	10	263	3
H04-11	3.73	0.05341	0.00219	0.15292	0.00607	0.02077	0.00018	346	74	144	5	133	1
H04-12	0.45	0.16581	0.00183	10.88636	0.07520	0.47622	0.00279	2516	5	2513	6	2511	12
H04-13	1.68	0.05083	0.00784	0.28460	0.04322	0.04061	0.00124	233	279	254	34	257	8
H04-14	0.21	0.08885	0.00096	3.00842	0.01927	0.24561	0.00134	1401	6	1410	5	1416	7
H04-15	4.09	0.04906	0.00153	0.13905	0.00413	0.02056	0.00014	151	57	132	4	131	1
H04-16	3.82	0.04903	0.00254	0.14194	0.00719	0.02100	0.00017	149	101	135	6	134	1
H04-17	1.01	0.04879	0.00465	0.13922	0.01300	0.02070	0.00039	138	174	132	12	132	2
H04-18	1.03	0.04910	0.00608	0.14066	0.01717	0.02078	0.00044	153	232	134	15	133	3
H04-19	0.33	0.08965	0.00097	3.03473	0.01969	0.24555	0.00135	1418	6	1416	5	1415	7

注: H04 样品的锆石 U-Pb 测年分析数据引用自 Wang Xiangzeng et al., 2016。

龄相对年轻, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为 120.0 ~ 135.0Ma(*n*=6), 加权平均年龄为 131.8±5.9Ma, MSWD=15, 对应于早白垩世早期; 第二组年龄相对较老, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为 197.0~320.0Ma(*n*=6), 对应于早侏罗世至晚石炭世。H04 样品共获得锆石测点 19 个, 可分为三组, 最年轻的一组锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为 130.5~137.0Ma(*n*=9), 加权平均年龄 132.6±0.7Ma, MSWD=0.67。第二组锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄为 256.5~271.5Ma(*n*=6), 加权平均年龄 132.6±0.7Ma, MSWD=0.67。第三组锆石年龄为 1418.0~2132.0Ma(*n*=4), 结合其低 Th/U 比值和内部结构特征, 被认为是变质成因锆石 (Wang Xiangzeng et al., 2016)。锆石年龄谐和图显

示所有数据点均位于谐和线上或附近(图 4)。

根据 Y01 和 H04 岩浆锆石 U-Pb 年龄分析认为, 两个样品较年轻的一组锆石年龄相近, 分别为 131.8±5.9Ma 和 132.6±0.7Ma, 代表火山岩的形成年龄, 即早白垩世早期; 而其他较老年龄(197.0~320.0Ma)与区域上侏罗系、二叠系和石炭系的火山岩形成时代一致, 可能是岩浆上升过程中从围岩中捕获的锆石年龄。

3.2 岩石地球化学特征

火山岩的主量、微量及稀土元素分析结果及相关参数见表 2。为了对巴音戈壁组火山岩有更全面的了解, 本文整理和补充了 Zhong Fuping et al. (2011)对邻区艾西凹陷苏红图组火山岩的地球化学

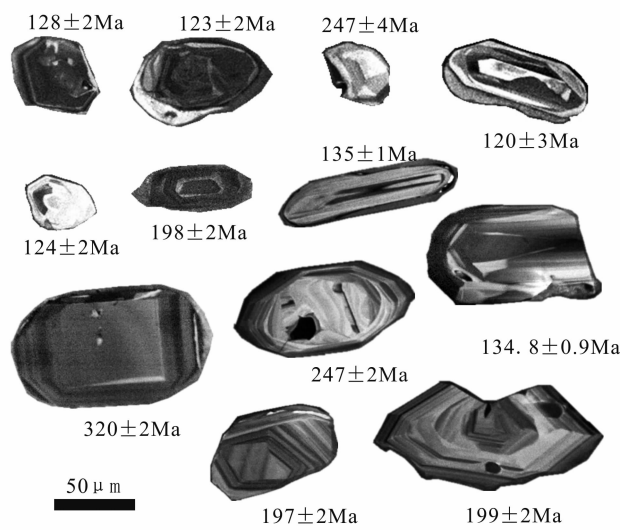


图 3 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组火山岩 Y1 样品锆石阴极发光图像

Fig. 3 Zircon CL images of Early Cretaceous Bayingebi volcanic rocks sample Y1 in Suhongtu Depression, Ying'E Basin

分析数据。

3.2.1 主量元素特征

巴音戈壁组火山岩 SiO_2 含量为 55.97% ~ 56.37%, 平均为 56.11%; 全碱($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$)含量较低, 介于 3.17% ~ 6.49% 之间, 平均 4.69%; K_2O 含量变化较大, 介于 0.101% ~ 4.39% 之间, 平均为 1.81%; Al_2O_3 含量为 13.04% ~ 15.09%, 平均为 14.41%; TiO_2 含量较高, 介于 2.10% ~ 2.35% 之间, 平均为 2.25%; MgO 含量较低, 介于 0.93% ~

1.47% 之间, 平均为 1.21%; CaO 含量为 3.16% ~ 3.80%, 平均为 3.39%。与苏红图组火山岩($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 平均为 6.37%; TiO_2 平均为 1.95%; MgO 平均为 5.27%)相比, 巴音戈壁组玄武安山岩表现出贫碱高钛低镁的特征。

巴音戈壁组火山岩的莱特碱度率 A.R. 介于 1.42 ~ 2.25 之间, 平均为 1.78; 里特曼指数 σ 介于 0.76 ~ 3.26 之间, 平均为 1.84; 镁指数 $\text{Mg}^\#$ 介于 7.64 ~ 13.58 之间, 平均为 10.8; 岩浆固结指数 SI 介于 5.70 ~ 11.46 之间, 平均为 8.56。相对苏红图组火山岩而言, 巴音戈壁组火山的 $\text{Mg}^\#$ 和 SI 更低, 指示其可能经历了更强烈的结晶分异作用。在 TAS 图解中, 巴音戈壁组火山岩落亚碱性的玄武安山岩中, 而苏红图组火山岩主要落在碱性的粗玄岩和玄武粗安岩中。在 SiO_2 - K_2O 图解中, 巴音戈壁组火山岩在钾玄质、高钾钙碱性和低钾拉斑性中均有分布(图 5); 而苏红图火山岩则更多的落在钾玄质系列。

3.2.2 稀土元素特征

巴音戈壁组火山岩的稀土总量 ΣREE 较高, 变化范围为 $352.39 \times 10^{-6} \sim 555.5 \times 10^{-6}$, 平均为 470.29×10^{-6} , 远高于上地壳平均值 146.37×10^{-6} ; LREE/HREE 值较为集中, 分布在 16.97 ~ 20.48 之间, 轻重稀土元素分异明显, LREE 富集 HREE 亏损; 轻稀土元素的分馏系数 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 35.30 ~ 44.24, 轻重稀土元素的分馏系数 $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 为 3.92 ~ 4.28, 重稀土元素的分馏系数 $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$

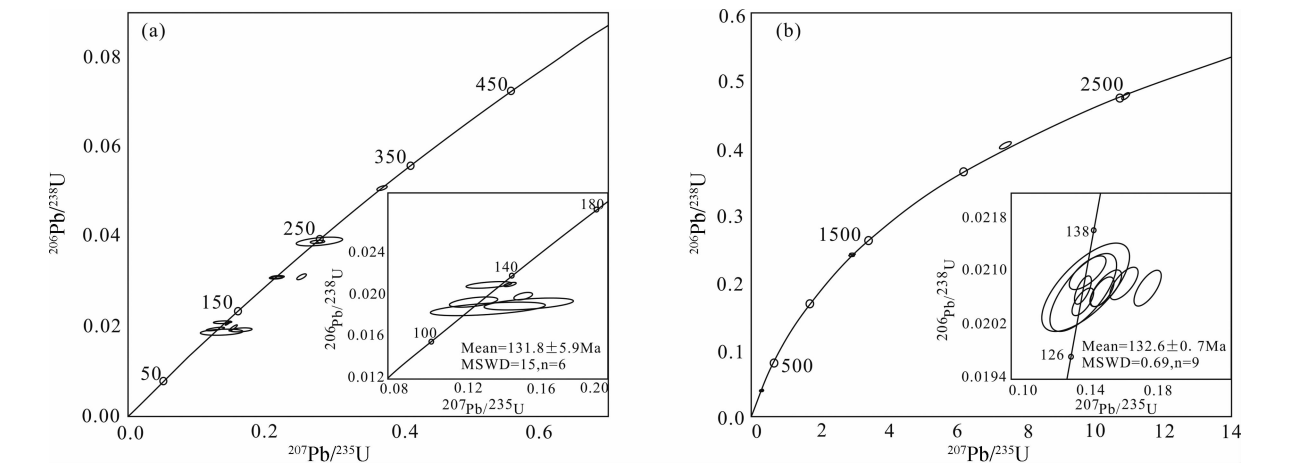


图 4 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

(a 为本文数据; b 据 Wang Xiangzeng et al., 2016)

Fig. 4 Zircon U-Pb concordia diagrams for Early Cretaceous Bayingebi volcanic rocks in Suhongtu Depression, Ying'E Basin(a data of this paper; b data cited from Wang Xiangzeng et al., 2016)

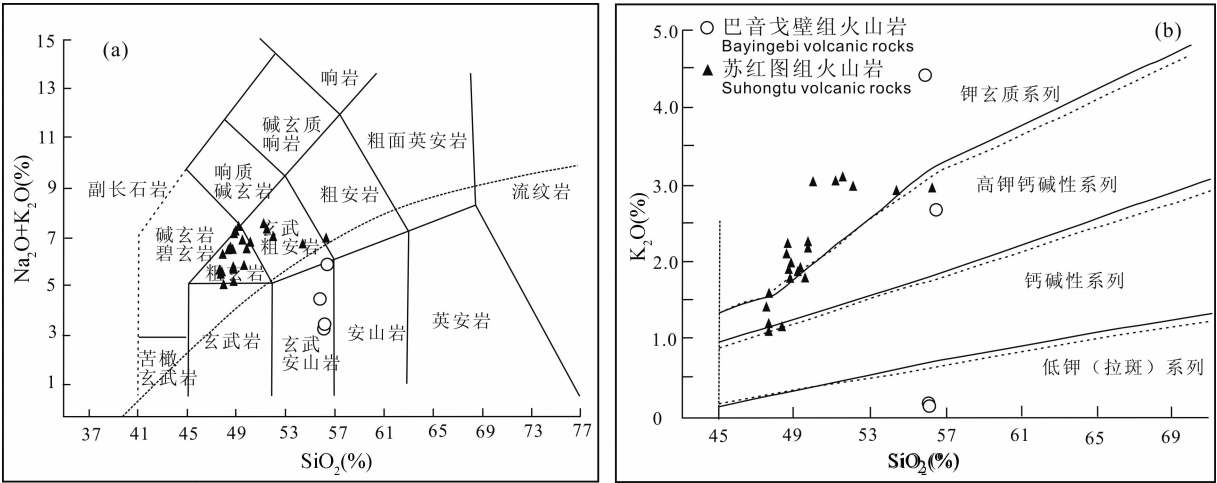


图 5 银额盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩 TAS(a 据 Rickwood, 1989)和 K_2O-SiO_2 (b 据 Peccerillo et al., 1976)图解
Fig. 5 TAS diagrams (a after Richwood, 1989) and K_2O versus SiO_2 diagrams (b after Peccerillo et al., 1976)
of Early Cretaceous volcanic rocks in Suhongtu Depression, Ying'E Basin

为 4.77~5.91,反映出 REE 分馏强烈,且 LREE 分馏程度较 HREE 更高。Eu 显示弱负异常($\delta Eu=0.78\sim0.85$,平均为 0.82),Ce 无明显异常($\delta Ce=0.93\sim0.99$,平均为 0.97)。

与巴音戈壁组火山岩相比,苏红图组火山岩稀土总量和轻重稀土元素分异程度相对较小(ΣREE 平均为 169.49×10^{-6} , LREE/HREE 平均为 7.11),且并无明显的 Eu 异常(δEu 平均为 1.0)。球粒陨石标准化稀土元素配分模式图显示(图 6),两者均显示右倾型模式,但巴音戈壁组火山岩的倾斜角度明显更大。

3.2.3 微量元素特征

根据表 2,巴音戈壁组玄武安山岩相容元素 Ni 和 Cr 含量较低,其平均含量分别为 10.46×10^{-6} 和

29.18×10^{-6} ,远低于原生玄武岩浆的 Ni 含量($300\times10^{-6}\sim400\times10^{-6}$)和 Cr 含量($300\times10^{-6}\sim500\times10^{-6}$)(Frey et al., 1978)和苏红图组火山岩(平均为 79.4×10^{-6} 和 174.42×10^{-6})。大离子亲石元素 Rb 和 Ba 等含量则相对较高,其平均含量分别为 120.88×10^{-6} 和 1798.46×10^{-6} ,远高于苏红图组火山岩(平均为 30.98×10^{-6} 和 782.30×10^{-6})。两者的原始地幔标准化微量元素蛛网图均呈右倾特征,但巴音戈壁组火山岩明显富集 Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素(LILE),亏损 Nb、Ta、Ti、P 等高场强元素(HFSE),使微量元素分布形式显示出“隆起”的特征,而苏红图组火山岩则无明显的 LILE 富集和 HFSE 亏损特征(图 7)。

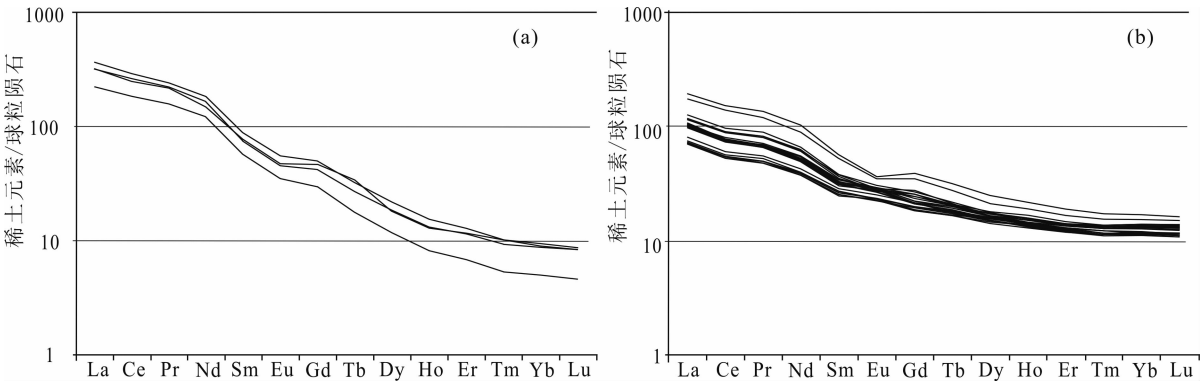


图 6 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组(a)及苏红图组(b)火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图
(球粒陨石标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns for Early Cretaceous volcanic rocks of Bayingebi Group (a) and Suhongtu Group (b) in Suhongtu Depression, Ying'E Basin (normalizing data after Sun et al., 1989)

表 2 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组及苏红图组火山岩主量(%)、微量及稀土元素 ($\times 10^{-6}$) 分析结果

Table 2 Major (%) and trace element ($\times 10^{-6}$) concentration of Early Cretaceous volcanic rocks of Bayingebi Group and Suhongtu Group in Suhongtu Depression, Ying'E Basin

样品	巴音戈壁组火山岩				苏红图组火山岩					
	玄武安山岩				粗玄岩和玄武粗安岩					
	H01	H02	H03	H04	SHT06	SHT08	SHT11	SHT18	SHT23	SHT28
SiO ₂	56.07	56.37	55.91	56.11	47.90	47.80	47.90	56.28	49.00	48.88
TiO ₂	2.35	2.13	2.10	2.40	1.77	1.79	1.75	1.89	2.04	2.02
Al ₂ O ₃	15.09	13.64	13.04	15.85	15.97	15.69	15.54	14.67	16.42	16.31
TFe ₂ O ₃	8.75	9.63	8.19	8.00	10.79	11.38	11.32	10.96	9.24	9.30
MnO	2.89	0.17	0.10	3.00	0.13	0.15	0.16	0.06	0.14	0.14
MgO	1.33	0.93	1.11	1.47	6.55	7.06	7.82	0.78	5.95	6.31
CaO	3.16	3.44	3.80	3.17	6.85	6.88	6.52	5.52	6.36	6.57
Na ₂ O	3.06	3.13	2.10	3.24	4.39	4.09	4.51	4.00	5.19	4.87
K ₂ O	0.11	2.63	4.39	0.10	1.03	1.47	1.17	2.95	1.87	1.74
P ₂ O ₅	1.01	0.90	1.06	1.04	0.44	0.43	0.44	0.72	0.61	0.58
LOI	6.77	6.99	7.71	6.11	4.24	3.16	3.06	2.04	2.68	2.74
TOTAL	100.60	99.96	99.51	100.48	100.06	99.91	100.18	99.89	99.50	99.46
Na ₂ O+K ₂ O	3.17	5.76	6.49	3.34	5.42	5.56	5.68	6.95	7.06	6.61
Mg [#]	11.54	7.64	10.43	13.59	34.22	34.72	37.19	5.75	35.56	36.77
δ	0.77	2.48	3.26	0.85	6.00	6.44	6.58	3.64	8.31	7.43
A. R.	1.42	2.02	2.25	1.43	1.62	1.65	1.69	2.05	1.90	1.81
SI	10.05	5.70	7.05	11.46	28.78	29.42	31.51	4.17	26.74	28.40
Sc	12.80	12.20	11.78	7.39	26.66	26.00	26.96	15.04	22.19	23.24
V	66.30	76.30	77.53	70.19	167.80	170.66	171.01	101.98	141.32	148.43
Cr	31.80	27.60	28.87	28.15	221.13	234.46	230.59	124.20	130.34	149.68
Co	8.94	17.00	15.24	12.38	39.49	41.20	43.52	13.62	30.77	32.53
Ni	11.10	10.40	7.81	12.52	109.12	114.76	119.61	27.84	78.89	85.09
Cu	7.79	10.50	22.20	11.17	46.19	48.22	38.77	26.60	32.47	31.67
Zn	129.00	172.00	148.88	116.84	95.83	98.33	99.44	50.23	98.94	89.86
Ga	25.40	22.40	22.71	16.89	18.71	18.98	17.84	18.34	19.04	18.65
Rb	125.00	78.40	185.19	94.91	6.87	25.27	9.54	58.25	12.03	15.88
Sr	280.00	516.00	387.61	531.14	406.24	447.89	324.93	642.72	554.08	574.73
Y	31.40	28.10	25.31	16.75	25.78	26.25	27.33	28.17	26.94	27.65
Zr	787.00	723.00	600.69	493.14	172.11	172.73	173.99	262.25	223.30	229.86
Nb	44.00	40.70	41.63	35.44	29.22	29.40	30.30	47.02	48.04	49.40
Cs	17.80	6.37	8.13	6.45	6.35	5.54	7.23	3.19	1.86	1.62
Ba	730.00	918.00	1852.01	3693.85	446.16	482.08	542.94	782.62	810.74	846.99
Hf	16.10	14.80	13.50	9.54	4.23	4.28	4.33	6.18	5.62	5.87
Ta	1.94	1.80	1.49	1.62	1.85	1.90	1.91	2.87	3.04	3.23
Pb	20.20	28.50	18.45	18.57	4.33	3.29	3.10	8.29	3.94	4.20
Th	9.91	8.67	7.53	5.44	2.31	2.40	2.34	3.84	3.35	3.65
U	2.89	2.36	1.57	1.20	0.59	0.54	0.60	1.13	0.94	1.03
La	119.00	104.00	104.24	72.87	23.10	23.58	24.27	38.03	32.43	34.20
Ce	244.00	222.00	208.44	155.15	45.30	45.97	47.40	75.49	62.00	63.77
Pr	28.80	26.50	25.92	18.81	5.68	5.90	6.22	9.73	7.75	8.07
Nd	113.00	102.00	91.71	75.19	23.04	24.29	24.44	38.48	30.27	31.63
Sm	17.50	14.80	15.35	11.33	5.06	5.40	5.39	7.25	6.01	6.27
Eu	4.14	3.40	3.53	2.63	1.67	1.74	1.73	2.04	2.07	2.00
Gd	13.40	11.30	12.53	8.00	5.23	5.32	5.02	6.88	5.74	5.74
Tb	1.58	1.32	1.66	0.87	0.84	0.86	0.82	0.97	0.86	0.89
Dy	7.38	6.27	6.13	3.98	5.04	5.29	5.27	5.53	5.09	5.33
Ho	1.16	0.99	0.97	0.61	1.03	1.06	1.06	1.13	0.99	1.04
Er	2.85	2.55	2.59	1.52	2.81	2.88	2.83	2.99	2.64	2.79
Tm	0.35	0.32	0.35	0.18	0.40	0.42	0.42	0.44	0.38	0.40
Yb	2.05	1.90	1.95	1.09	2.50	2.58	2.61	2.77	2.41	2.54

续表 2

样品	巴音戈壁组火山岩				苏红图组火山岩					
	玄武安山岩				粗玄岩和玄武粗安岩					
	H01	H02	H03	H04	SHT06	SHT08	SHT11	SHT18	SHT23	SHT28
Lu	0.29	0.28	0.28	0.15	0.38	0.39	0.38	0.42	0.36	0.39
Σ _{LREE}	555.50	497.63	475.65	352.39	122.08	125.68	127.86	192.15	159.00	165.06
Σ _{LREE} /Σ _{HREE}	18.12	18.96	16.98	20.48	5.70	5.69	5.95	8.09	7.61	7.63
δEu	0.84	0.81	0.79	0.85	1.01	1.01	1.03	0.89	1.09	1.03

注:TFe₂O₃代表全铁;镁指数 $Mg^{\#}=100\times(MgO/40.3044)/(MgO/40.3044+TFeO/71.844)$;里特曼指数 $\sigma=\omega(K_2O+Na_2O)/[\omega(SiO_2-43)]$;莱特碱度率 $A.R.=(Al_2O_3+CaO+K_2O+Na_2O)/(Al_2O_3+CaO-K_2O-Na_2O)$;固结指数 $SI=100\omega(MgO)/(\omega(MgO)+\omega(FeO)+\omega(Fe_2O_3)+\omega(Na_2O)+\omega(K_2O))$;ΣREE代表总稀土含量;LREE/HREE代表轻重稀土比值,LREE为轻REE,HREE为重REE;δEu=(Eu)_N/SQRT(Sm×Gd)_N,稀土元素球粒陨石标准化数据引自参考文献(Sun et al.,1989);苏红图组数据引自 Zhong Fuping et al.,2011。

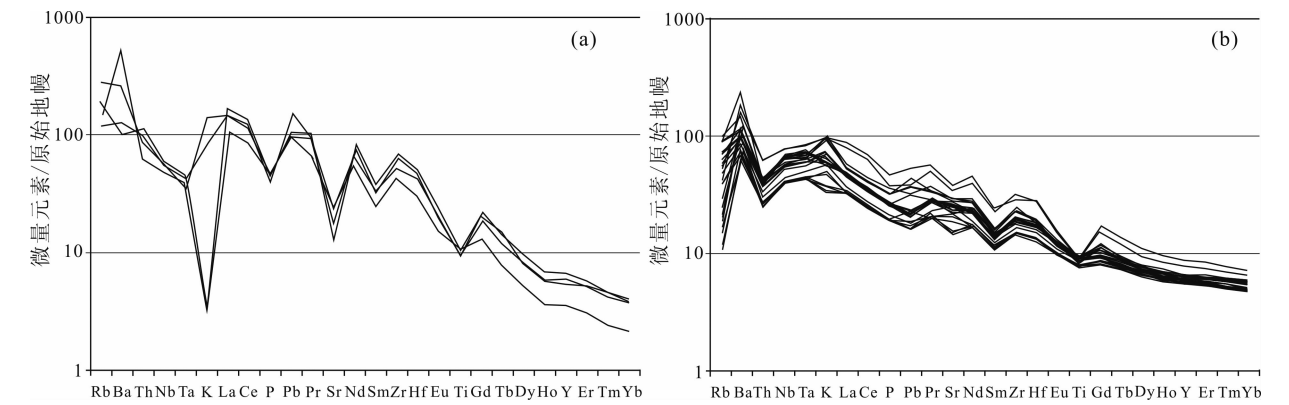


图 7 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组(a)及苏红图组(b)火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图
(原始地幔标准化值据 Sun et al.,1989)

Fig. 7 Primitive mantle-normalized trace element spider diagrams for Early Cretaceous volcanic rocks of Bayingebi Group (a) and Suhongtu Group (b) in Suhongtu Depression, Ying'E Basin (normalizing data after Sun et al.,1989)

4 讨论

4.1 火山岩形成时代及与断裂活动的关系

中国科学院北京地质研究在银额盆地东部查干德勒苏坳陷的查干凹陷利用³⁹K-⁴⁰Ar 同位素测年方法获得查参 1 井井段 1858~3034m 的火山岩年龄为 104.4±2.3~116.7±1.8Ma,对应于苏红图期;巴 1 井井段 1676~1942m 的火山岩年龄为 135.3±7.0~137.5±7.0Ma,对应于巴音戈壁期,并根据火山岩形成时代和与白垩纪地层的配套关系,将燕山晚期火山活动分为早白垩世早期、早白垩世晚期和晚白垩世三个活动期(Zhang Aiping,2003)。由于银额盆地早白垩世火山岩分布极不均一,且基于火山岩同位素年龄的精确分析数据较少,因此银额盆地其它地区早白垩世火山活动的时代和期次存在较大的不确定性。钟富平等对苏红图坳陷艾西凹陷地表出露火山岩测试获得其³⁹Ar-⁴⁰Ar 同位素测年年龄为 106.48±1.32~113.12±1.38Ma,而本次苏红图坳陷哈日凹陷钻井揭示火山岩锆石 U-Pb 同位

素年龄 131.8±5.9~132.6±0.7Ma。对比查干凹陷火山岩同位素年龄进行火山活动时代约束,证实在燕山晚期银额盆地中部也同样存在着早白垩世早期和早白垩世晚期两个期次的火山喷发。

目前已发现的早白垩世火山岩均位于恩格尔乌苏断裂带上,暗示着火山喷发与断裂活动存在密切的联系。前人研究认为恩格尔乌苏断裂是阿尔金断裂在东北方向的延伸(Wang Tinyin et al.,1993,1998),研究区早白垩世火山岩是阿尔金断裂在该时期再次走滑的产物(Zhong Fuping et al.,2011)。本次研究发现查干德勒苏坳陷和苏红图坳陷早白垩世火山岩的同位素年龄极为吻合,表明两地近乎同一时间发生了类似的岩浆活动,甚至前者略早于后者,暗示恩格尔乌苏断裂的重新活动是在区域构造应力作用下沿着原断裂带同时发生或是向西南延伸,因此不可能是阿尔金断裂向东北延伸造成。结合研究区巴音戈壁组火山岩与白垩纪地层和盆地基底的接触关系,认为研究区恩格乌苏断裂重新活动及断陷盆地形成并接受沉积的时间最早可追溯

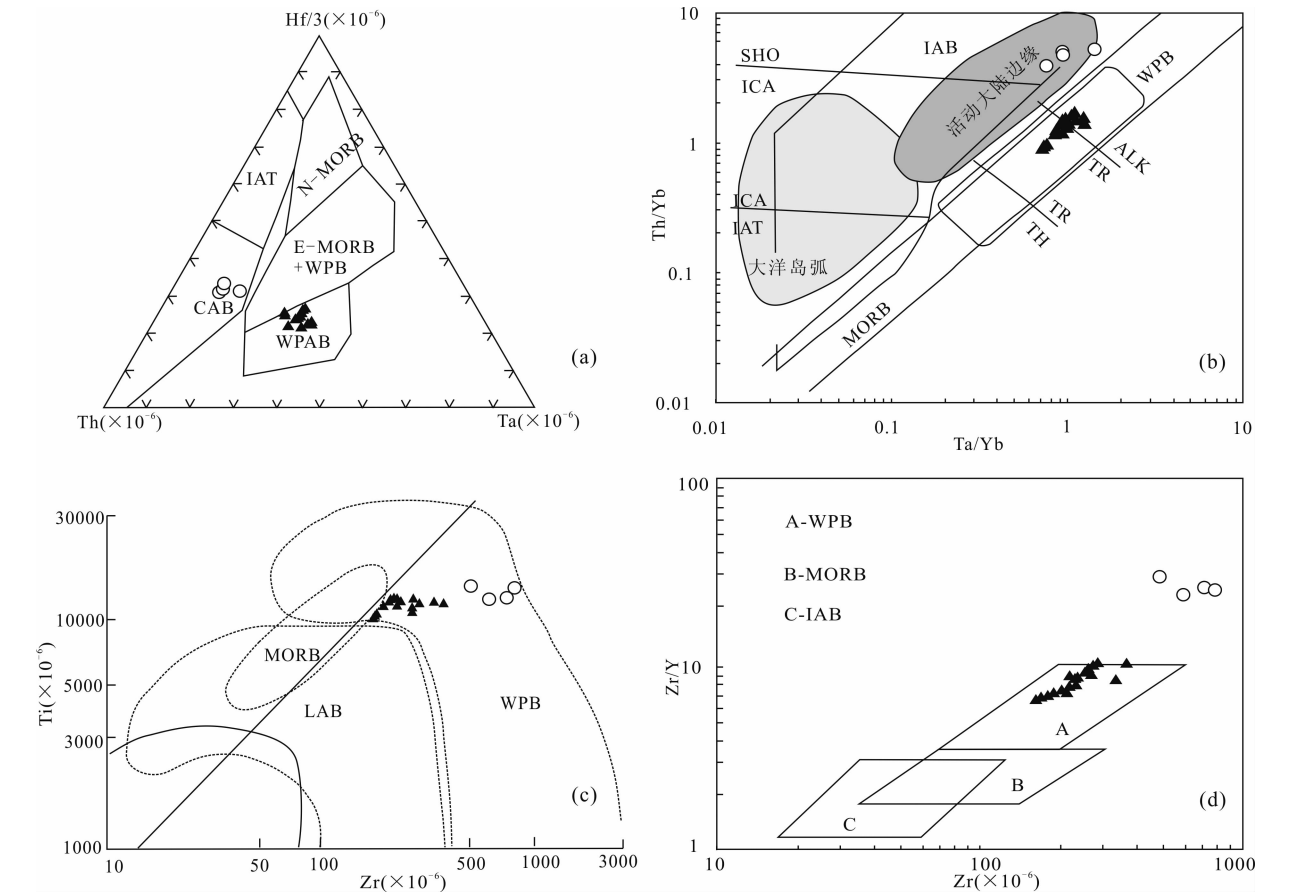


图 8 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组及苏红图组火山岩构造判别图
Fig. 8 Trace element diagrams for discriminate tectonic setting of Early Cretaceous volcanic rocks of Bayingebi Group and Suhongtu Group in Suhongtu Depression, Ying'E Basin
(a)—Th-Hf/3-Ta 图; (b)—Th/Yb-Ta/Yb 图; (c)—Ti-Zr 图; (d)—Zr/Y-Zr 图; (a)(b)(c)—据 Pearce et al., 1984; (d)—据 Wood, 1979
IAT—岛弧拉斑玄武岩; CAB—钙碱性玄武岩; N-MORB—正常型洋脊玄武岩; E-MORE—异常型洋脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; WPAB—碱性板内玄武岩; ICA—岛弧钙碱性玄武岩; SHO—钾玄岩; IAB—岛弧玄武岩; TH—拉斑玄武岩; TR—过渡性玄武岩; ALK—碱性玄武岩; MORB—洋脊玄武岩

(a)—Th-Hf/3-Ta diagram; (b)—Th/Yb-Ta/Yb diagram; (c)—Ti-Zr diagram; (d)—Zr/Y-Zr diagram;
(a)(b)(c)—after Pearce et al., 1984; (d)—after Wood, 1979
IAT— island arc tholeiite series; CAB— calc-alkali basalt series; N-MORB— normal mid-ocean ridge basalt; E-MORE— enriched mid-ocean ridge basalt; WPB— within plate basalt; WPAB— with plate alkali basalt; ICA— island arc calc-alkaline series; SHO— island arc shoshonite series; IAB— island arc basalt; TH— tholeiite series; TR— transitional basalt; ALK— alkali basalt; MORB— mid ocean ridge basalt

至 137.0Ma。

4.2 构造环境

对比分析研究区早白垩世巴音戈壁组和苏红图组两期火山岩的地球化学特征,可以看出两者在主量、微量及稀土元素特征上既有某些相似之处,又存在许多明显的区别,暗示两期火山岩的岩浆源区或是构造环境存在较大差异。目前关于银额盆地中生代岩浆岩形成的构造背景和成岩尚存在不同的认识,代表观点主要有以下几点:大陆深大断裂—裂谷环境(Li Wenhou et al., 1997);陆内挤压造山环境(Wu Shaobo et al., 1999);造山带伸展垮塌构造环

境(Zhang Aiping, 2003);板内裂谷拉张环境(Guo Yanru, 2003);塔里木板块与华北板块碰撞造山期后拉伸环境(Wang Tinyin et al., 1998)。

地球化学研究表明各种岩石中元素组合和比值变化是形成时所处大地构造环境的反映,产生于不同构造环境下的同一类岩石会因为其成岩过程中物理和化学条件的差异造成岩石中元素组合和比值的不同(Zhao Zhenhua, 2007)。基于对大地构造环境的认识及岩石化学元素分析数据的积累,国内外学者提出众多主微量元素图解用来判别岩石形成的大地构造环境。由于火山岩成因的多元性,火山岩地

球化学特征会受构造背景和源区性质共同控制,因此在分析火山岩形成的构造环境时不能仅依赖单一地球化学图解,必须采取多种方法并结合区域构造演化综合分析。本文采用被广泛应用的玄武岩类构造一岩浆判别图解 Th/Yb-Ta/Yb 、 Ti-Zr 、 Zr/Y-Zr (Pearce et al., 1984) 和 Th-Hf/3-Ta (Wood, 1979) 四种图解进行分析。在 Th-Hf/3-Ta 图上(图 8a), 巴音戈壁组火山岩落在岛弧钙碱性玄武岩(ICA)中,属于岛弧火山岩,苏红图组火山岩则落在板内玄武岩。在 Th/Yb-Ta/Yb 图上(图 8b),巴音戈壁组火山岩落在活动大陆边缘(陆缘弧)的岛弧玄武岩(IAB)内,而苏红图组火山岩落在板内玄武岩的碱性玄武岩和过渡性玄武岩内。在 Ti-Zr 图中(图 8c),巴音戈壁组和苏红图组火山岩均落在板内玄武岩内。在 Zr/Y-Zr 图中(图 8d),巴音戈壁组火山岩落在岛弧玄武岩(IAB)之外,苏红图组火山岩落在板内玄武岩内或附近。综合四种岩石微量元素构造环境判别图解,苏红图组火山岩始终落在板内玄武岩内,巴音戈壁组火山岩得出了大陆板块内部活动和大陆边缘的岛弧环境两种结果。

与苏红图组火山岩的主微量元素特征相比,巴音戈壁组火山岩还具有富集 Rb、Ba、Th、U 等大离子亲石元素(LILE)和轻稀土元素(LREE),亏损 Nb、Ta、Ti 和 P 等高场强元素(HFSE)及弱 Eu 负异常等特征,而这常被认为是典型的岛弧或活动大陆边缘火山岩的特征(Tatsumi et al., 2009; Dobretsov, 2010; Yang Huaben et al., 2016)。大量研究表明,当大陆玄武质熔岩受到地壳或岩石圈的混染作用也可以给出似消减带信号。 Zr 含量和 Zr/Y 比值被认为是判别这种带有消减带信号的玄武质熔岩是否真的属于岛弧或活动大陆边缘火山岩重要指标(Xia Linqi et al., 2007)。因为岛弧玄武岩通常以具有较低的 Zr 含量($<130 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 比值(<4)为特征;而大陆玄武岩,不管是否遭受地壳或岩石圈混染,它们都具有较高的 Zr 含量($>70 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 比值(>3)。巴音戈壁组火山岩的 Zr 含量($493.14 \times 10^{-6} \sim 787.00 \times 10^{-6}$)和 Zr/Y 比值(23.73~29.43),均远高于典型的岛弧玄武岩,而与大陆玄武岩相近。同时, La/Nb 、 La/Ta 被作为判定火山岩是否受到地壳或岩石圈混染的重要指数,当 $\text{La/Nb} < 1$ 、 $\text{La/Ta} < 22$ 时,地壳或岩石圈混染作用可以忽略不计,而高 La/Nb 比值、 Nb/La (<1)被认为是混染作用的鲜明特点(Saunders et al., 1992; Kieffer et al., 2004)。巴音戈壁组火山

岩的 La/Nb 值在 2.05~2.70,平均值为 2.45, La/Ta 值在 45.00~69.95,平均值为 58.52,表明其可能存在岩浆在上升过程与地壳物质发生混合或早期消减事件使地幔源区交代混染,使其主微量元素特征发生改变。

根据构造演化历史及岩石地层特征,恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带/断裂带是在二叠纪时期由塔里木地块与华北地块碰撞形成,在晚古生代末期两大板块已经完全闭合并融为一体(Wang Tinyin et al., 1993, 1998; Zheng Rongguo et al., 2016);且银额盆地中生界均为陆相沉积,即早白垩世火山活动发生时研究区早已处于大陆环境,因此基本上可以排除巴音戈壁组火山岩形成是受板块俯冲或火山弧控制的可能,而更可能是盆地内部古老断裂带重新活动发生伸展的产物,应归属板内火山岩。

4.3 岩浆来源及演化

Zhong Fuping et al. (2011) 研究表明研究区苏红图组火山岩没有经历明显的地壳物质混染,岩浆来源于对流软流圈地幔的熔融物质。巴音戈壁组火山岩的 Nb/Ta 与 Zr/Hf 比值(平均为 23.78 和 48.47)与苏红图组火山岩相当(平均为 16.10 和 41.02),与地壳的相应值 11.4 和 33 相差较大(Taylor et al., 1985),与原始地幔的相应值 17.8 和 37 更为接近(Sun et al., 1989);且 Rb/Sr 介于 0.15~0.47 之间(平均为 0.31, <0.50), Ti/Y 介于 454~860 之间(平均为 565, >100), Ti/Zr 介于 17.68~29.22 之间(平均为 21.45, >20),多位于壳源岩浆范围外(Pearce, 1983; Wilson, 1989),表明巴音戈壁组火山岩的岩浆也可能主要来源于地幔物质的部分熔融。

此外,研究区巴音戈壁组和苏红图组火山岩 TiO_2 含量(平均为 2.25% 和 1.95%),与大陆裂谷碱性玄武岩 TiO_2 含量(平均为 2.2%)相似(Pearce et al., 1984),均远高于地壳平均值(0.50%);且 La/Nb 和 Ba/Nb (平均为 2.45 和 46.97)也远高于地壳的平均值(1.15 和 21.15)。这显然是用简单的陆壳混染不能解释的,说明巴音戈壁组的岩浆源区本身具有亏损高场强元素、富集大离子亲石元素的特征,它与苏红图组火山岩可能来自不同的岩浆源区。研究表明,对于此类较为年轻的大陆,其岩石圈地幔中往往保留有早先俯冲消减事件的影响,因而年轻大陆上发育的玄武岩在受到岩石圈地幔组分混染的情况下,其元素地球化学特征会类似于消减带中岩石,即出现岛弧型信号(Hawkesworth et al.,

1988; Hooper et al. , 1993)。

除了岩浆源区不同外,巴音戈壁组和苏红图组火山岩在岩浆演化上也存在较大的区别。固结指数 SI 和镁指数 $Mg^\#$ 是用来分析岩浆演化的两个重要指标;通常,岩浆的分异程度越高,岩石的 SI 值和 $Mg^\#$ 往往越小,反之亦然。研究区巴音戈壁组火山岩的 SI(平均为 8.56)远低于上地幔的未经过变异的原始玄武岩岩浆(SI 在 40 左右或更大)和苏红图组火山岩(SI 平均为 23.71);巴音戈壁组火山岩的 $Mg^\#$ (平均 10.8)也远小于苏红图组火山岩($Mg^\#$ 平均为 30.07)。结合巴音戈壁组火山岩稀土元素的高含量和轻重稀土的强烈分异,表明巴音戈壁组火山岩明显不同于池际尚(1988)总结的玄武质火山岩原生岩浆特征,呈现强烈分异的进化岩浆属性。

巴音戈壁组火山岩 P、Ti 负异常、低 MgO 和低的相容元素,表明其母岩浆经历了显著的橄榄石、单斜辉石、角闪石以及铁钛氧化物等镁铁质矿物的分离结晶。角闪石的明显分离结晶,将会导致残余熔体更富集轻稀土元素(如 La),这与巴音戈壁组火山岩中较高的 La 含量相符(分布在 $72.87 \times 10^{-6} \sim 119 \times 10^{-6}$, 平均为 100.03×10^{-6})。同时,巴音戈壁组火山岩的 Eu 表现为较弱的负异常(δEu 平均为 0.82),说明源区存在少量斜长石残留,但岩浆演化过程中的斜长石分离结晶作用并不显著。巴音戈壁组玄武安山岩基质中见到的斜长石微晶也证实了这一点,这些斜长石微晶通常是岩浆在地表或近地表喷发时骤然降温冷却的结果。微量元素 Ba、Sr 的微弱亏损也可作为斜长石少量分离结晶的另一个重要证据。

4.4 地球动力学背景

大量的研究表明,银额盆地在中生代处于构造体制转换的关键时期。二叠纪末期,该地区经历了塔里木板块和华北板块的碰撞及古亚洲洋的闭合(Wu Xiaozhi et al. , 2016);三叠纪时期,转变为碰撞后拉张性构造环境,形成了大量侵入岩(Ren Kangxu et al. , 2005);侏罗纪时期,受燕山运动影响,由拉张环境向张扭性环境转换(Guo Yanru, 2003),并开始进入被动裂谷盆地演化阶段。至晚侏罗世一早白垩世,银额盆地及邻区,如酒泉盆地、花海盆地等,整体处在拉伸构造环境,发生明显的裂陷作用,地幔上隆、地壳减薄,形成一系列彼此分隔、呈北东方向展布的地堑、半地堑盆地(Ren Zhanli, 1998, 1999)。以钻井恢复的中生代晚期古地温梯度研究表明阿尔金断裂以西盆地地热梯度较低,阿

尔金断裂以东的河西走廊地区、华北地区及东北区盆地地热梯度普遍高于现今地热梯度,表明地壳深部热活动性较强,也指示中生代晚期存在明显的构造热事件作用(Ren Zhanli et al. , 2000, 2001)。在陆内岩石圈拉伸减薄的构造环境下,地球深部的软流圈地幔岩浆沿着被重新激活的缝合带断裂快速上涌,形成了研究区早白垩世的多期火山喷发。

研究表明巴音戈壁组和苏红图组火山岩形成于类似的构造环境,但两者岩浆来源差异表明缝合带北侧的塔里木俯冲板块和南侧的华北仰冲板块之下可能汇聚着各自不同的岩浆源区。Wang Tinyin et al. (1998)对恩格尔乌苏缝合带的中生代花岗岩对比研究也发现缝合带两侧分别发育着 As 和 Ai 两种不同类型的花岗岩,表现出不同岩浆成因。结合位于缝合带南侧的苏红图组火山岩亲华北型的研究认识,笔者认为位于缝合带北侧的巴音戈壁组火山岩可能更倾向于塔里木板块。从 Rb-Sr 丰度与地壳厚度关系图(Condie, 1973)上也可以看出(图 9),巴音戈壁组和苏红图组火山岩分别落在两个不同的区域,前者多位于地壳厚度 $>30\text{km}$ 、 $Rb/Sr > 0.1$ 的区间,而后者则多位于地壳厚度 $= 20 \sim 30\text{km}$ 、 Rb/Sr

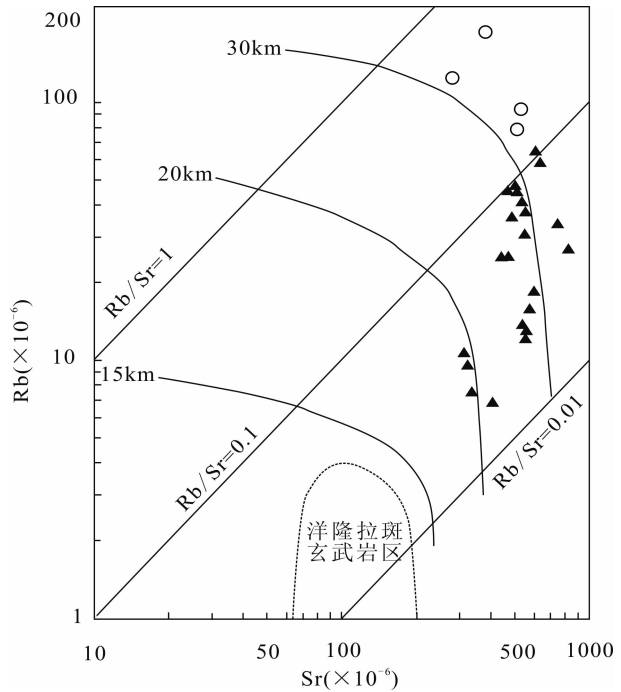


图 9 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组及苏红图组火山岩 Rb-Sr 丰度与地壳厚度关系图(据 Condie, 1973)
Fig.9 Rb-Sr vs. crustal thickness spider grams for Early Cretaceous volcanic rocks of Bayingebi Group and Suhongtu Group in Suhongtu Depression, Ying' E Basin (after Condie, 1973)

=0.01~0.1 的区间。这也进一步佐证了两期火山岩来自不同源区的观点。同时,缝合带北侧岩浆源区比南侧岩浆源区更深,也与塔里木板块俯冲于华北板块之下的认识相符。缝合带南北两侧的地壳厚度均大于平均地壳厚度(约为 17km)则反映其受到海西期板块汇聚碰撞及构造推覆致使地壳增厚的影响。

5 结论

(1)苏红图坳陷早白垩世存在两期火山岩,早期巴音戈壁组火山岩(131.0~133.0Ma)以亚碱性玄武安山岩为主,晚期苏红图组火山岩(104.0~107.0Ma)以粗玄岩和玄武粗安岩为主。两期火山喷发均与恩格尔乌苏断裂重新活动的密切相关,是陆壳加厚之后岩石圈伸展的产物,而与阿尔金断裂向东北延伸无明显联系。

(2)苏红图坳陷巴音戈壁组火山岩表现出与苏红图组火山岩截然不同的地球化学特征,具有板内和活动大陆边缘的双重地球化学特点。综合分析认为巴音戈壁组火山岩表现出岛弧火山岩特征是由于地幔源区受到早期俯冲消减事件带来的流体影响,两期火山岩均形成于大陆板内环境,反映了银额盆地中生代陆内伸展成因。

(3)苏红图坳陷巴音戈壁组和苏红图组火山岩均主要来源于地幔物质的部分熔融,但具有不同的岩浆源区和岩浆演化,哈日凹陷巴音戈壁组火山岩倾向于塔里木板块,经历了明显的镁铁质矿物和一定的斜长石结晶分离;而艾西凹陷苏红图组火山岩倾向于华北板块,以橄榄石或单斜辉石分离结晶为主。

致谢:感谢审稿专家和本刊编辑部对本文进行了细致的评审,提出了宝贵的修改意见。本文元素地球化学、锆石阴极发光和锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年等分析测试得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室刘晔、王建其和弓化栋老师的帮助。在此一并表示衷心感谢。

注 释

- ① 任战利,杨鹏,曹展鹏. 2016, 银额盆地哈日凹陷延哈参 1 井单井综合评价, 陕西延长石油(集团)有限责任公司油气勘探公司科研项目研究报告.
- ② 任战利,陈志鹏,祁凯. 2017, 银额盆地延长探区勘探潜力研究及目标优选, 陕西延长石油(集团)有限责任公司油气勘探公司重大科研项目研究报告.

References

- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ²⁰⁴Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59~79.
- Condie K C. 1973. Archean Magmatism and Crustal Thickening. *Bulletin of the Geological Society of America*, 84(9): 2991~2992.
- Dobretsov N L, Berzin N A, Buslov M M. 1995. Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean. *International Geology Review*, 37(4): 335~360.
- Dobretsov N L. 2010. Distinctive petrological, geochemical, and geodynamic features of subduction-related magmatism. *Petrology*, 18(1): 84~106.
- Frey F A, Green D H, Roy S D. 1978. Integrated models of basalt petrogenesis; a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data. *Journal of Petrology*, 19(3): 463~513.
- Griffin W L, Belousova E A, Shee S R, Pearson N J, O'Reilly S Y. 2004. Archean crustal evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons. *Precambrian Research*, 131(3/4): 231~282.
- Guo Yanru. 2003. Study on petroleum system based upon framework of sequence stratigraphy in Chagan fault-depressed lacustrine basin (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract)
- Hawkesworth C, Mantovani M, Peate D. 1988. Lithosphere remobilization during Paraná CFB magmatism. *Journal of Petrology*, Special_Volume, (1): 205~223.
- Hooper P R, Hawkesworth C J. 1993. Isotopic and geochemical constraints on the origin and evolution of the Columbia River Basalt. *Journal of Petrology*, 6(6): 1203~1246.
- Hoskin P W O, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 27~62.
- Kieffer B, Arndt N, Lapierre H, Bastien F, Bosch D, Pecher A, et al. 2004. Flood and shield basalts from Ethiopia: magmas from the African Superswell. *Journal of Petrology*, 45(4): 793~834(42).
- Li Wenhui, Zhou Lifa. 1997. Sedimentary facies and tectonic setting of the Cretaceous in the Suhongtu-Yingen Basin. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 387~396 (in Chinese with English abstract).
- Li Jingyi, Zhang Jin, Yang Tiannan, Li Yaping, Sun Guihua, Zhu Zhixin. 2009. Crustal tectonic division and evolution of the southern part of the North Asian orogenic region and its adjacent areas. *Journal of Jilin University*, 39(4): 584~605 (in Chinese with English abstract).
- Pearce J A. 1983. The role of sub-continental lithosphere in magma genesis at destructive plate margins // Hawkesworth C J and Norry M J. *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*. Nantwich Shiva; Academic Press; 230~249.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of

- granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956~983.
- Peccerillo A, Taylor S R, 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 58(1): 63~81.
- Ren Kangxu, Yan Guohan, Mu Baolei, Cai Jianhui, Tong Ying, Li Fengtang, Zhao Fengsan, Gu Libing, Yang Bin, Chu Zhuyn. 2005. Geochemistry and Nd, Sr, Pb isotopic characteristics of the alkali-rich intrusive rocks in Alxa Fault Block, Western Inner Mongolia and their implications. *Earth Science Frontiers*, 12(2): 292~302(in Chinese with English abstract).
- Ren Shoumai, Zhu Rixiang, Huang Baochun, Zhang Fuqin, Wang Hongqiang. 2002. Paleomagnetic research in orogenic belts—Take the early cretaceous volcanic rocks of Suhongtu as an example. *Science in China (Series D)*, 32(10): 799~804 (in Chinese).
- Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei. 1999. The Brief Specification for the Tectonic Map (1:5000000) of China and Adjacent Regions—A Global Look at Tectonics of China. Geology Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ren Zhanli. 1998. Study on recovery and comparative research of thermal history in Sedingmentary Basins of North China (Dissertation). Northwest University, China, Xi'an (in Chinese with English abstract)
- Ren Zhanli. 1999. Research on Tectonic Thermal Evolution in Sedingmentary Basins of North China. Petroleum Industry Press(in chinese).
- Ren Zhanli. 2000. Comparison of Thermal Evolution History in Sedimentary Basins, North China. *Oil & Gas Geology*, 21(1): 33~37. (in Chinese with English abstract)
- Ren Zhanli, Zhao Zhongyuan. 2001. Recovery and Comparison of Geothermal Gradient for the Late Mesozoic Sedimentary Basins in the Northern Part of China. *Petroleum Exploration & Development*, 28(6): 1~4. (in Chinese with English abstract)
- Rickwood P C. 1989. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22(4): 247~263.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, Norry M J. 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. *Geological Society of London Special Publications*, 68(1): 41~60.
- Sun S S, Mcdonough W F. 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts; Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society London Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tatsumi Y, Suzuki T. 2009. Tholeiitic vs Calc-alkalic Differentiation and Evolution of Arc Crust; Constraints from Melting Experiments on a Basalt from the Izu-Bonin-Mariana Arc. *Journal of Petrology*, 50(8): 1575~1603.
- Taylor S R., McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution, an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 94(4), 632~633.
- Wang Tinyin, wang Jinrong, Liu Jinkun, Wang Shizheng, Wu Jiahong. 1993. Relationships between the North China and Tarim plates. *Acta Geological Sinica*, (4): 287~300 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tinyin, Gao Junping, Wang Jinrong, Wu Jiahong. 1998. Magmatism of collision and post-orogenic period in Northern Alaxa region in Inner Mongolia. *Acta Geologica Sinica*, (2): 126~137 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiangzeng, Chen Zhijun, Ren Laiyi, Liu Huchuang, Gao Yiwen. 2016. U-Pb age of zircon and its geological significance in Suhongtu Depression, Yingen-Ejinaqi Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(5): 853~867 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. *Igneous Petrogenesis*. London: Unwin Hyman Press: 295~323.
- Wood D A. 1979. A variably veined suboceanic upper mantle—genetic significance for Mid-Ocean Ridge basalts from geochemical evidence. *Geology*, (7): 499~503.
- Wu Shaobo, Bai Yubao, Yang Youyun. 1999. The characteristics and tectonic setting of Early Cretaceous volcanic rocks, Yingen Basin. *Journal Petrol*, (1): 24~28 (in Chinese with English abstract).
- Wu Tairan, He Guoqi. 1992. Ophiolitic mélangé belt in the northern margin of the Alaxan Block. *Geoscience*, (3): 286~296 (in Chinese with English abstract).
- Wu Xiaozhi, Zhao Yumei, Wang Guijun, Zheng Min. 2016. Geological characteristics and tectonic evolution of Alxa terrane in the northern Qilian Mountain. *Chinese Journal of Geology*, 51(2): 547~560 (in Chinese with English abstract).
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping, 2007. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 26(1): 77~89 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huaben, Wang Wendong, Yan Yongsheng, Wei Xiaoyong, Geng Chengbao. 2016. Origin of Basalts of the Tamulangou Formation and Mantle Enrichment in Xinlin Area, Northern Greater Hinggan Mountains. *Geological Review*, 62(6), 1471~1486(in Chinese with English abstract).
- Yang Jingsui, Wu Cailai, Xia Linqin, Fan Qicheng, Xu Yigang, Xu Xisheng. 2009. A decade of progress and challenges for the future in igneous petrology. *Geological Review*, 55(3): 406~419 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H, Gao S, Liu X, Li H, Günther D, Wu F. 2010. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 28(3): 353~370.
- Zhang Aiping. 2003. Structural characteristics and the relation with the petroleum and gas in Chagan Depression of Yin-E Basin of Inner Mogolia (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua. 2007. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings. *Geotectonica Et Metallogenia*, 31(1): 92~103 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongguo, Li Jinyi, Xiao Wenjiao, Liu Jianfeng, Wu Tairan. 2016. Discovery of Silurian Pluton in the Enger Us region in

- the Northern Margin of Alxa block. *Acta Geologica Sinica*, 90 (8): 1725~1736 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Fuping, Zhong Jianhua, Wang Yi, You Weifeng, Yang Weili, Zheng Menglin. 2011. The Early Cretaceous volcanic rocks in Suhongtu depression in Yingen-Ejina Qi Basin: its scientific significance to the research of Altun fault. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 233~240 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Fuping, Zhong Jianhua, You Weifeng. 2011. Characteristics of the Early Cretaceous mantle-derived volcanic rocks in the Suhogntu depression of Inggen-Ejin Qi Basin. *Acta Geologica Sinica*, 85 (12): 2003 ~ 2013 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Y H, Qiu N S, Hao Q Q, Pang X Q, Gao X, Wang X J, et al. 2015. Geothermal regime and source rock thermal evolution in the Chagan Sag, Inner Mongolia, Northern China. *Marine & Petroleum Geology*, 59: 245~267.
- ### 参 考 文 献
- 郭彦如. 2003. 查干断陷湖盆层序地层框架中的含油气系统研究 (博士论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 李文厚, 周立发. 1997. 苏红图—银根盆地白垩纪沉积相与构造环境. *地质科学*, (3): 387~396.
- 李锦轶, 张进, 杨天南, 李亚萍, 孙桂华, 朱志新, 王励嘉. 2009. 北亚造山区南部及其毗邻地区地壳构造分区与构造演化. *吉林大学学报(地球科学版)*, 39(4): 584~605.
- 任收麦, 朱日祥, 黄宝春, 张福勤, 王红强. 2002. 造山带内古地磁研究——以苏宏图早白垩世火山岩为例. *中国科学(D辑)*, 32 (10): 799~804.
- 任康绪, 阎国翰, 牟保磊, 蔡剑辉, 痛英, 李凤堂, 赵凤三, 古丽冰, 杨斌, 储著银. 2005. 阿拉善断块富碱侵入岩岩石地球化学和 Nd、Sr、Pb 同位素特征及其意义. *地学前缘*, 12(2): 292~302.
- 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚. 1999. 从全球看中国大地构造: 中国及邻区大地构造图简要说明. 北京: 地质出版社.
- 任战利. 1998. 中国北方沉积盆地构造热演化史恢复及其对比研究. (Doctoral dissertation, 西北大学).
- 任战利. 1999. 中国北方沉积盆地构造热演化史研究. 北京: 石油工业出版社.
- 任战利. 2000. 中国北方沉积盆地热演化史的对比. *石油与天然气地质*, 21(1): 33~37.
- 任战利, 赵重远. 2001. 中生代晚期中国北方沉积盆地地热梯度恢复及对比. *石油勘探与开发*, 28(6): 1~4.
- 王廷印, 王金荣, 刘金坤, 王士政, 吴家弘. 1993. 华北板块和塔里木板块之关系. *地质学报*, (4): 287~300.
- 王廷印, 高军平, 王金荣, 吴家弘. 1998. 内蒙古阿拉善北部地区碰撞期和后造山期岩浆作用. *地质学报*, (2): 126~137.
- 王香增, 陈治军, 任来义, 刘护创, 高怡文. 2016. 银根—额济纳旗盆地苏红图坳陷 H 井锆石 La-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *沉积学报*, 34(5): 853~867.
- 吴少波, 白玉宝, 杨友运. 1999. 银根盆地早白垩世火山岩特征及形成的大地构造环境. *矿物岩石*(1): 24~28.
- 吴泰然, 何国琦. 1992. 阿拉善地块北缘的蛇绿混杂岩带及其大地构造意义. *现代地质*, (3): 286~296.
- 吴晓智, 赵玉梅, 王桂君, 郑民. 2016. 祁连山北阿拉善地体特征及其大地构造演化. *地质科学*, 51(2): 547~560.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 李向民, 马中平. 2007. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩. *岩石矿物学杂志*, 26(1): 77~89.
- 杨华本, 王文东, 闫永生, 魏小勇, 耿成宝. 2016. 大兴安岭北段新林区塔木兰沟组火山岩成因及地幔富集作用. *地质论评*, 62 (6), 1471~1486.
- 杨经绥, 吴才来, 夏林圻, 樊祺诚, 徐义刚, 徐夕生. 2009. 火成岩的 10 年研究进展和未来的挑战. *地质论评*, 55(3): 406~419.
- 张爱平. 2003. 内蒙古银额盆地查干凹陷构造特征及其与油气关系 (硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 赵振华. 2007. 关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题. *大地构造与成矿学*, 31(1): 92~103.
- 郑荣国, 李锦轶, 肖文交, 刘建峰, 吴泰然. 2016. 阿拉善地块北缘恩格爾烏蘇地区发现志留纪侵入体. *地质学报*, 90(8): 1725~1736.
- 钟福平, 钟建华, 王毅, 由伟丰, 杨伟利, 郑孟林. 2011. 银根—额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩对阿尔金断裂研究的科学意义. *地学前缘*, 18(3): 233~240.
- 钟福平, 钟建华, 由伟丰. 2011. 银根—额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩幔源特征. *地质学报*, 85(12): 2003~2013.

Zircon U-Pb chronology and geochemistry of volcanic rocks of early Cretaceous Bayingebi Formation in Suhongtu depression of the Ying'e basin, and their tectonic implications

CHEN Zhipeng, REN Zhanli, QI Kai, YU Chunyong, REN Wenbo

State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069

** Corresponding author: renzhanli@nwu.edu.cn*

Abstract

The study carried out the isotopic geochronology and geochemistry analysis of volcanic rocks revealed by the drilling in Suhongtu Depression Ying'e Basin to determine the formation age and the petro-genesis and tectonic environment. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating yields the age of $131.8 \pm 5.9 \sim 132.6 \pm 0.7$ Ma, indicating the rocks crystallized in Early Cretaceous. Its age is similar to or slightly later than that of the volcanic rocks of the Bayingebi Formation in the Chagan Sag, and different from that of the Suhongtu Formation of the Low Cretaceous in the region. This indicates that there were multiple periods of volcanic eruption in the Early Cretaceous, which occurred along Engerwusu fault at the same time or extended the southwest, were essentially independent of the northeastern extension of Altun fault. The Bayingebi Formation volcanic rocks in the study area are mainly sub-alkaline basaltic andesite (SiO_2 contents of $55.97\% \sim 56.37\%$), and characterized by high TiO_2 ($2.10\% \sim 2.35\%$), low MgO ($0.93\% \sim 1.47\%$) and low $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ($3.17\% \sim 6.49\%$). High ΣREE ($352.39 \times 10^{-6} \sim 555.5 \times 10^{-6}$), distinct high fractionation of LREE and HREE, weak Eu negative anomalies ($\delta\text{Eu} = 0.78 \sim 0.85$), enrichment of large ion lithophile elements (e.g. Rb, Ba, Th), depletion of high field strength elements (e.g. Nb, Ta, Ti) and compatible elements (e.g. Ni, Cr), suggest that the volcanic rocks are characteristic of continental intraplate and continent margin, which are different from those of the Suhongtu Group volcanic rocks. Combined with the regional tectonic evolution and spatial distribution of volcanic rocks, the study suggests that the volcanic rocks of Bayingebi Group and Suhongtu Group were generated in response to within-plate extension, lithosphere thinning and the reaction of the Engerwusu fault, but the two had different magmatic sources. The Bayingebi Formation volcanic rocks show the characteristic of island-arc basalts, and this may result from that mantle area was affected by fluids brought by the early subduction. The volcanic rocks of the Bayingebi and Suhongtu groups had not suffered the crustal contamination during the magma went up, but the Bayingebi Formation volcanic rocks are characterized by distinct crystallization fractionation between mafic minerals and plagioclase, with the degree of the crystallization fractionation higher than that of the Suhongtu Formation volcanic rock.

Key words: volcanic rocks of Bayingebi Formation; Engerwusu Fault; intra-continental extensional; Ying'E basin; early Cretaceous