

阿拉善北部杭乌拉地区早二叠世火山岩地球化学、Nd-Hf 同位素特征及其构造意义

李润武¹, 张鑫², 石强¹, 陈万峰¹, 安屹³, 黄尧燊¹, 刘懿馨¹, 王金荣¹
LI Runwu¹, ZHANG Xin², SHI Qiang¹, CHEN Wanfeng¹, AN Yi³, HUANG Yaoshen¹,
LIU Yixin¹, WANG Jinrong¹

1. 兰州大学地质科学与矿产资源学院/甘肃省西部矿产资源重点实验室, 甘肃 兰州 730000;
2. 宁夏大学资源环境学院, 宁夏 银川 750021;
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640

1. Key Laboratory of Mineral Resources in Western China/School of Earth Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. College of Resources and Environmental Science, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China;
3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China

摘要:位于阿拉善恩格尔乌苏蛇绿岩带北侧的珠斯楞-杭乌拉构造带,分布较完整的早二叠世方山口组火山岩,对解析阿拉善地块晚古生代晚期的构造演化具有重要意义。方山口组以灰绿色安山岩、安山质角砾熔岩为主,局部含集块。安山岩 SiO₂ 含量为 54.23%~60.81%, Al₂O₃ 为 13.67%~15.96%, MgO 为 4.26%~5.76%, Mg[#] 值为 42~50; Na₂O 含量(2.21%~3.48%)与 K₂O (2.51%~3.49%) 相当, 具有较高的 TFe₂O₃ (7.98%~11.24%), 低的 CaO (2.52%~3.36%) 和 TiO₂ (0.75%~1.32%), 为过铝质钙碱性安山岩; 安山岩在稀土元素球粒陨石标准化配分图上, 轻稀土元素略富集, (La/Yb)_N = 3.73~9.86, 具负 Eu 异常 (δEu = 0.52~0.75); 在微量元素原始地幔标准化蛛网图上, 富集 Rb、K, 亏损 Nb、Ta、Ti 等; 变化范围非常大的 ε_{Nd}(t) (-4.3~-14.2)、ε_{Hf}(t) (-19.8~+1.4)。上述特征表明, 安山岩属于壳幔物质混合的产物, 形成于板内裂谷环境。结合区域地质背景研究资料, 进一步指出, 恩格尔乌苏蛇绿岩带所代表的大洋在晚石炭世之前已经闭合; 晚石炭世—早二叠世北山-阿拉善-内蒙古中部地区已进入板内构造岩浆-沉积阶段。

关键词:方山口组; 火山岩; 早二叠世; 阿拉善地区; 古亚洲大洋

中图分类号: P534.46; P588.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)05-0647-12

Li R W, Zhang X, Shi Q, Chen W F, An Y, Huang Y S, Liu Y X, Wang J R. Geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Early Permian volcanic rocks in Hangwula of northern Alxa area and their tectonic significance. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(5): 647-658

Abstract: Volcanic rocks of Fangshankou Formation are widely distributed in Hangwula area on the northern side of Engger Us ophiolitic belt in the Alxa area. These rocks are very essential for interpreting tectonic evolution of the southern part of Central Asian orogenic belt. Early Permian rocks in this stratum mainly consist of grayish green andesite and andesitic breccia lava, partly with agglomerate. The andesite has SiO₂ content of 54.23%~60.81%, Al₂O₃ content of 13.67%~15.96%, MgO content of 4.26%~5.76%, and Mg[#] of 42~50 with the content of Na₂O (2.21%~3.48%) less than that of K₂O (2.51%~3.49%). These rocks also have high TFe₂O₃ (7.98%~11.24%) and low CaO (2.52%~3.36%) as well as TiO₂ (0.75%~1.32%). They should be peraluminous calc-alkaline

收稿日期: 2019-06-19; 修订日期: 2019-09-20

资助项目: 中国地质调查局项目《中国北方(天山-北山-阴山以北)中段石炭纪—二叠纪构造演化研究》(编号: 121201011000161111-01) 和中央高校基本科研业务费专项资金(编号: Lzujbky-2018-it20)

作者简介: 李润武(1995-), 男, 在读硕士生, 从事岩石圈演化与成矿研究。E-mail: 15621062532@163.com

通讯作者: 王金荣(1958-), 男, 教授, 博导, 从事岩石大地构造的教学科研工作。E-mail: jrwang@lzu.edu.cn

rocks. Andesite samples are enriched in light rare earth elements (LREE) and depleted in heavy rare earth elements (HREE). The differentiation between LREE and HREE is not obvious with $(La/Yb)_N$ equal to 3.73~9.86. Samples show negative Eu anomalies with δEu being 0.52~0.75. The chondrite-normalized REE patterns are similar to E-MORB. The samples of andesite are enriched in such elements as Rb and K and depleted in such elements as Nb, Ta and Ti. What's more, they have $\epsilon_{Nd}(t) = -4.3 \sim -14.2$ and $\epsilon_{Hf}(t) = -19.8 \sim +1.4$. These characteristics suggest that andesites were sourced from mixing of the mantle and the crust and formed in intraplate rift. Considering a lot of geological materials related to this area, the authors conclude that the branch of the PAO (Paleo-Asian Ocean) represented by Engger Us ophiolitic belt had been closed before Late Carboniferous, and that, during Late Carboniferous to Early Permian, magmatic activities in the study area occurred in an intraplate extensional setting.

Key words: Fangshankou Formation; volcanic rocks; Early Permian; Alxa area; Paleo-Asian Ocean

中亚造山带 (The Central Asian Orogenic Belt) 夹于东欧板块、西伯利亚板块、华北-塔里木板块之间, 由一系列微陆块、岛弧、蛇绿岩带、海底高原及增生杂岩体构成^[1], 是全球最大的增生型造山带之一, 也可称为阿尔泰构造拼合体 (The Altaids)^[2-3], 记录了古亚洲洋的形成、俯冲、闭合及陆壳增生过程^[4-8]。中亚造山带南缘的北山-阿拉善地区出露的古生代火成岩是反演古亚洲大洋-中亚造山带形成演化的重要依据之一, 近年已成为国内外学者研究的焦点^[9-23], 虽然许多学者基于火山-沉积建造、岩石地球化学、古生物、同位素年代学等研究对该区域进行了大量研究, 但古亚洲大洋最终闭合的时限仍存在较大的争议。

阿拉善地块隶属于中亚造山带南缘中段 (图 1), 是研究古亚洲洋闭合过程的关键区域。区内由北向南存在 3 条具有分区意义的断裂带: 雅干断裂带、恩格尔乌苏断裂带和霍尔森-查干楚鲁断裂带, 后 2 条为蛇绿混杂岩带^[10], 分别代表古亚洲大洋 (此处亦有称南蒙古大洋) 和弧后盆地残余体。据此可在阿拉善地块划分出 4 个构造单元: 雅干构造带、珠斯楞-杭乌拉构造带、沙拉扎山构造带和诺尔公-狼山构造带^[11]。前人对阿拉善地块的研究主要集中在沙拉扎山构造带和诺尔公-狼山构造带^[19-22]。恩格尔乌苏蛇绿岩带以北的珠斯楞-杭乌拉构造带的研究较薄弱^[24-30], 且主要侧重于亚干地区的中生代变质核杂岩与伸展构造研究^[31-33], 对区内分布的火山岩仅限于区域地质调查报告中的描述。少部分学者基于岩相学及岩石地球化学研究, 认为杭乌拉地区早二叠世构造背景为板内裂谷环境^[24-25, 30]或活动大陆边缘弧环境^[26-27, 29]。因此, 本文在野外地质调查的基础上, 通过下二叠统方山口组中安山岩 (图 2、图 3) 的元素地球化学及 Nd-Hf 同位素研究, 结合该区的火山-沉积建造特征综合

分析, 确定杭乌拉地区晚石炭世—早二叠世的构造背景, 进一步指出恩格尔乌苏蛇绿岩带所代表的古亚洲大洋的闭合时限。

1 地质背景

杭乌拉地区位于珠斯楞-杭乌拉构造带内 (图 1), 即雅干断裂带以南、恩格尔乌苏蛇绿岩带以北地区, 呈北东东向展布。该区地层时代跨度大, 太古宙—新生代地层均有分布。二叠纪地层主要有双堡塘组、金塔组及方山口组, 分布面积较广, 哈尔苏海组未见出露。分布在杭乌拉地区的方山口组呈北东向分布, 整合于双堡塘组碎屑岩之上, 与金塔组的基性火山岩常呈犬牙交错的过渡关系或叠覆其上, 与上覆白垩纪地层呈角度不整合, 向北延伸进入中蒙边境。研究区岩浆活动主要以小规模的石炭纪—二叠纪中酸性侵入岩及火山作用为主。区内构造主要表现为一系列古生代隆起的地质体与中生代的凹陷地层相间排列的特点, 研究区北部地质构造主要为北东向排列, 南部为近东西向展布, 其间分布一系列的褶皱与断裂构造^[34]。

珠斯楞-杭乌拉构造带向北与呼和套儿盖洋内弧带南北对峙, 王廷印^[14]推测二者之间存在一个早古生代的边缘海, 甘肃北山的横蛮山-洗肠井边缘海盆地^[11]被认为相当于其西延部分。其早古生代构造体制以拉伸作用为主, 下沉并接受从寒武系—志留系的连续沉积, 沉积地层以碎屑岩为主, 无火山活动, 应属被动大陆边缘^[11]。自石炭纪开始该构造带内岩浆活动频繁, 部分学者认为这与晚古生代该构造带被动陆缘转变为活动大陆边缘有关^[26, 29, 35]。然而, 从区域大地构造格架及构造演化过程看, 研究区南侧恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带所代表的古亚洲大洋始终向南俯冲, 直至闭合碰撞, 迄

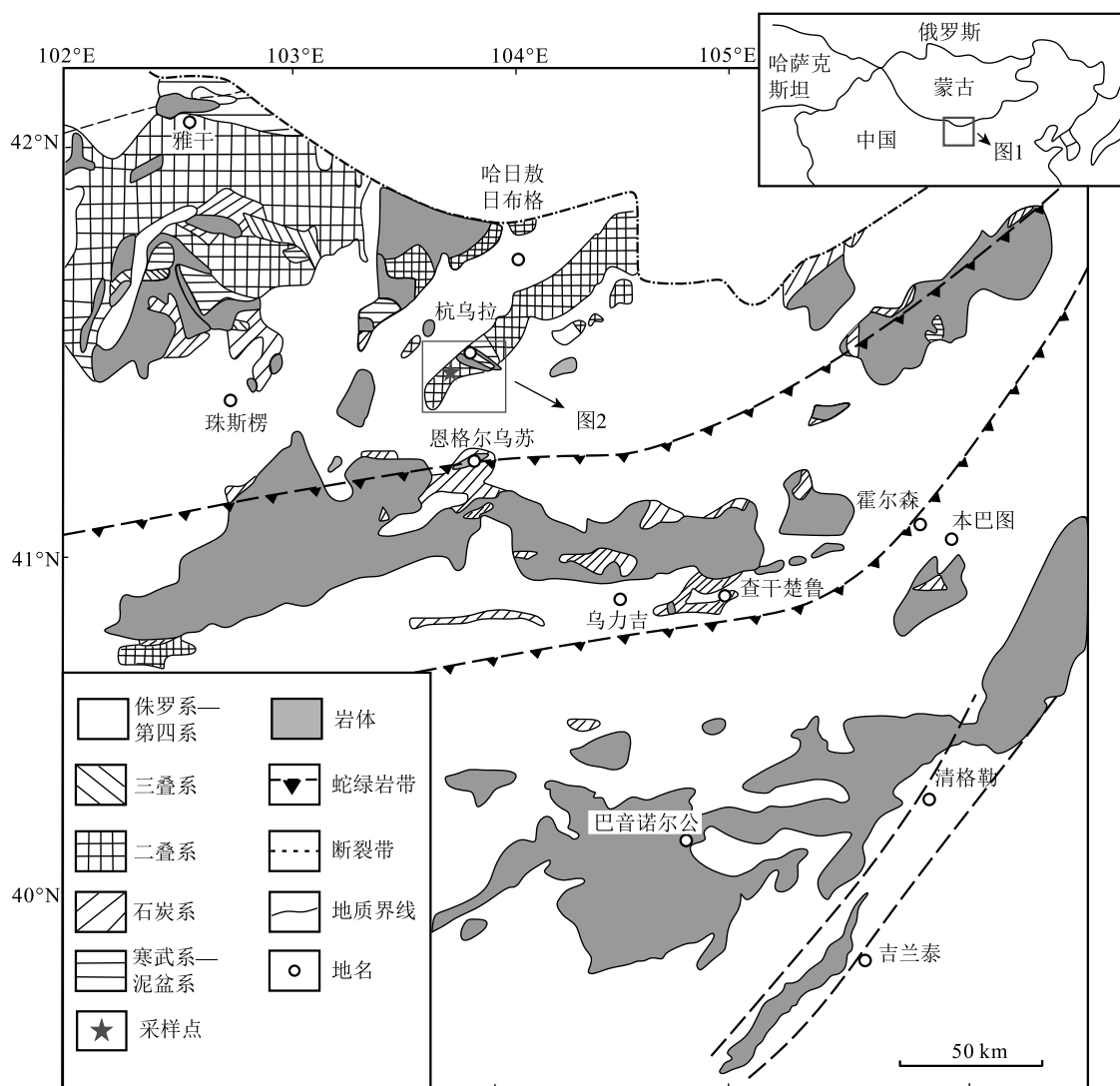


图 1 阿拉善地块构造略图

Fig. 1 Simplified tectonic map of Alxa area

今未见在珠斯楞—杭乌拉构造带内有晚古生代活动陆缘构造—岩浆—变质—沉积组合证据的报道。由此可以推测,珠斯楞—杭乌拉构造带晚古生代火山—沉积建造不是活动大陆边缘的产物,其形成应该与其他的构造动力学环境有关。

2 岩石学特征

方山口组以灰绿色(角闪)安山岩、安山质角砾熔岩为主,其次为灰褐色安山玄武岩、灰(绿)色英安岩、紫红色流纹岩、安山质凝灰岩、灰色英安质岩屑晶屑凝灰岩(图 3)。本次采集结构均匀、基本无风化的新鲜安山岩岩石样品进行分析测试,采样点

位置见图 2。安山岩呈灰绿色,斑状结构,块状构造。斑晶含量较少,主要为斜长石,占 10%,斜长石晶体发生绿帘石化,表面略显脏;基质具隐晶质结构,主要由微晶斜长石和角闪石组成,占 90%,斜长石呈定向—半定向排列,角闪石蚀变为绿泥石。

3 分析方法

岩石主量、微量及全岩 Nd-Hf 同位素测试均由甘肃省西部矿产资源重点实验室完成。主量元素采用硼酸锂(BLi_3O_3)碱熔法熔样,用 Leeman Prodigy 型电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测试,主量元素大部分测试精度优于 1.0%, TiO_2 测试精度优于

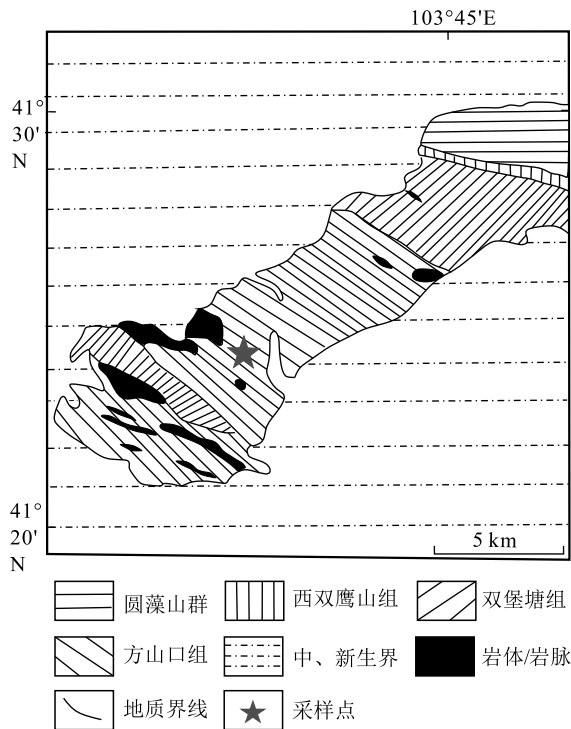


图2 杭乌拉地区地质简图及采样点位置
Fig. 2 Geological sketch map of Hangwula area

1.5%, P_2O_5 的测试精度为1.0%~1.5%;烧失量通过将样品放入坩埚,于1000℃下加热2 h称量样品损失质量并计算百分比而得。稀土及微量元素分析采用Agilent7700X电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),分析精度优于10%。同位素比值测定采用Nu Plasma II MC-ICP-MS(Nu instruments, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪完成,实验过程中的标样采用美国地质调查局研制的岩石标准样品:AGV-2、BCR-2,测试过程中分别采用JNDI及Alfa Hf标准溶液为外标,对Nd和Hf进行质量监控,详细的实验流程见参考文献[36]。主量、微量及Nd-Hf同位素测试结果分别见表1、表2。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

方山口组安山岩的 SiO_2 含量变化范围在54.23%~60.81%之间,具有较高的 Al_2O_3 (13.67%~15.96%)及 MgO (4.26%~5.76%)含量,较低的 CaO (2.52%~3.36%)含量,全碱(Na_2O+K_2O)为4.73%~6.50%, Na_2O (2.21%~3.48%)与 K_2O (2.51%~3.49%)含量相当,较高的铁(TFe_2O_3)含量(7.98%~11.24%),中等的

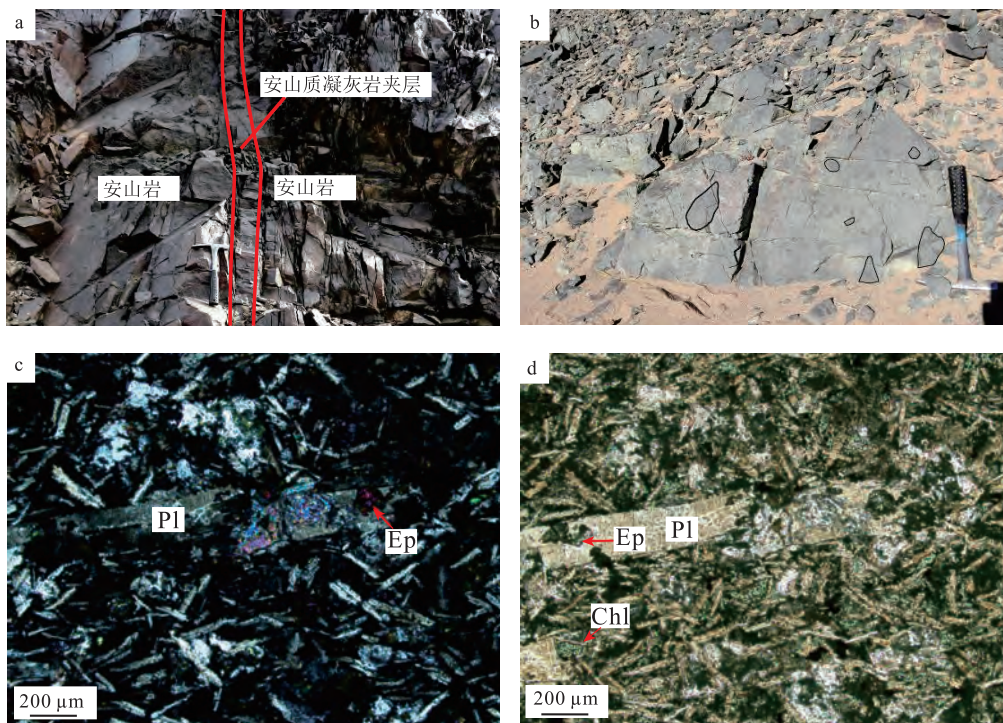


图3 方山口组安山岩野外及镜下照片

Fig. 3 Field and microscopic photos of andesites from Fangshankou Formation

a—安山岩夹凝灰岩;b—安山质角砾熔岩;c、d—安山岩显微照片(正交偏光和单偏光);Pl—斜长石;Ep—绿帘石;Chl—绿泥石

表 1 方山口组安山岩主量、微量及稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace and rare earth elements analytical results of andesites from Fangshankou Formation

样品号	16YG-80	16YG-81	16YG-82	16YG-83	16YG-84	样品号	16YG-80	16YG-81	16YG-82	16YG-83	16YG-84
SiO ₂	60.81	54.72	54.23	58.28	54.94	Ni	30.04	54.04	54.20	39.94	53.24
TiO ₂	0.75	1.10	1.15	1.46	1.32	Co	32.81	34.72	25.88	36.00	53.07
Al ₂ O ₃	13.67	15.46	15.96	15.85	14.88	V	76.43	129	135	127	135
TFe ₂ O ₃	7.98	10.11	10.49	8.12	11.24	Sc	13.71	22.40	23.29	21.42	23.45
MnO	0.08	0.06	0.07	0.05	0.06	Ga	22.49	20.30	21.19	20.58	21.95
MgO	4.42	5.64	5.76	4.26	4.62	La	25.01	14.82	14.89	22.72	15.75
CaO	2.60	2.52	2.52	2.81	3.36	Ce	40.38	24.22	24.11	35.86	27.44
Na ₂ O	2.21	2.71	2.89	3.48	3.00	Pr	6.02	3.90	3.89	5.55	4.55
K ₂ O	2.51	3.49	3.45	3.02	3.47	Nd	22.69	15.81	15.74	23.41	19.26
P ₂ O ₅	0.25	0.23	0.25	0.43	0.30	Sm	3.98	3.15	3.15	6.57	4.19
烧失量	4.85	2.93	3.03	1.77	3.00	Eu	0.63	0.69	0.70	1.69	1.02
总计	100.13	98.96	99.80	99.51	100.18	Gd	3.17	2.67	2.74	8.36	4.04
Mg [#]	49.70	49.86	49.46	48.31	42.27	Tb	0.52	0.41	0.42	1.62	0.63
Ba	579	148	156	175	159	Dy	3.07	2.58	2.66	10.37	4.01
Rb	104	231	230	184	242	Ho	0.60	0.54	0.54	1.81	0.81
Cs	1.41	17.68	17.88	14.24	23.33	Er	1.87	1.66	1.66	4.87	2.45
Th	9.01	5.44	5.81	7.54	5.32	Tm	0.26	0.26	0.27	0.69	0.36
U	1.16	3.29	4.25	4.87	1.94	Yb	1.82	1.85	1.92	4.37	2.50
Nb	11.57	7.78	8.42	13.06	10.51	Lu	0.29	0.29	0.30	0.54	0.39
Ta	0.49	0.42	0.44	0.65	0.55	Y	15.46	13.28	13.37	38.26	19.96
K	20872	28988	28666	25055	28802	ΣREE	110.32	72.85	72.97	128.44	87.40
Pb	2.70	7.43	7.08	16.56	3.12	LREE/HREE	8.51	6.10	5.96	2.93	4.75
Sr	133	149	155	174	170	δEu	0.52	0.71	0.71	0.70	0.75
Zr	174	145	148	166	145	δCe	0.78	0.76	0.76	0.76	0.78
Hf	4.99	3.79	3.89	4.60	3.88	(La/Yb) _N	9.86	5.75	5.57	3.73	4.53
P	1077	996	1095	1868	1305	(Gd/Yb) _N	1.44	1.19	1.18	1.58	1.34
Ti	4523	6580	6891	8724	7891	(La/Sm) _N	4.06	3.03	3.05	2.23	2.43
Cr	60.11	170	175	38.16	154						

注: 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 方山口组安山岩 Nd-Hf 同位素分析结果

Table 2 Whole-rock Lu-Hf isotope compositions of andesites from Fangshankou Formation

样品号	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd (2σ)	f _{Sm/Nd}	ε _{Nd} (t)	T _{DM(Nd)}/Ma}	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf (2σ)	f _{Lu/Hf}	ε _{Hf} (t)	T _{DM(Hf)}/Ma}
YG-80	0.106034	0.511742 ± 3	-0.46	-14.21	1990	0.008306	0.282079 ± 5	-0.75	-19.83	2044
YG-81	0.120526	0.512279 ± 3	-0.39	-4.25	1426	0.011053	0.282713 ± 4	-0.67	2.09	1041
YG-82	0.121058	0.512278 ± 3	-0.38	-4.28	1436	0.010897	0.282694 ± 6	-0.67	1.43	1072
YG-83	0.169614	0.512041 ± 3	-0.14	-10.66	3809	0.016918	0.282386 ± 5	-0.49	-10.58	2111

TiO₂(0.75%~1.32%)含量。在TAS图解(图4-a)中,样品点基本落入粗面安山岩区域;在Zr/TiO₂-SiO₂图解(图4-b)中,样品点均落入安山岩区域;在SiO₂-K₂O图解(图4-c)中,样品点均落在高钾钙碱性-钾玄系列区域;在A/CNK-A/NK图解(图4-d)中,样品点位于过铝质区域,指示安山岩属于过铝质高钾钙碱性-钾玄系列。

4.2 稀土和微量元素

方山口组安山岩的稀土元素总量(Σ REE)为 $72.85 \times 10^{-6} \sim 128.44 \times 10^{-6}$,平均 94.40×10^{-6} ;轻、重稀土元素比值(Σ LREE/ Σ HREE)介于2.93~8.51之间;(La/Yb)_N值为3.73~9.86,表示轻、重稀土元素

之间分异较弱;具负Eu异常($\delta Eu = 0.52 \sim 0.75$);球粒陨石标准化稀土元素配分图(图5-a)显示,轻稀土元素(LREE)与重稀土元素(HREE)之间具微弱分异,配分曲线呈右倾,类似于E-MORB(富集型洋中脊玄武岩)。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图5-b)显示,所有样品变化趋势一致,具大离子亲石元素(LILE)Rb、K等富集,高场强元素(HFSE)Nb、Ta、Ti等亏损的特征。

4.3 Nd-Hf 同位素

方山口组安山岩全岩Nd-Hf同位素组成变化范围较大,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd值为0.511742~0.512279,¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf值为0.282079~0.282713。根据尹海

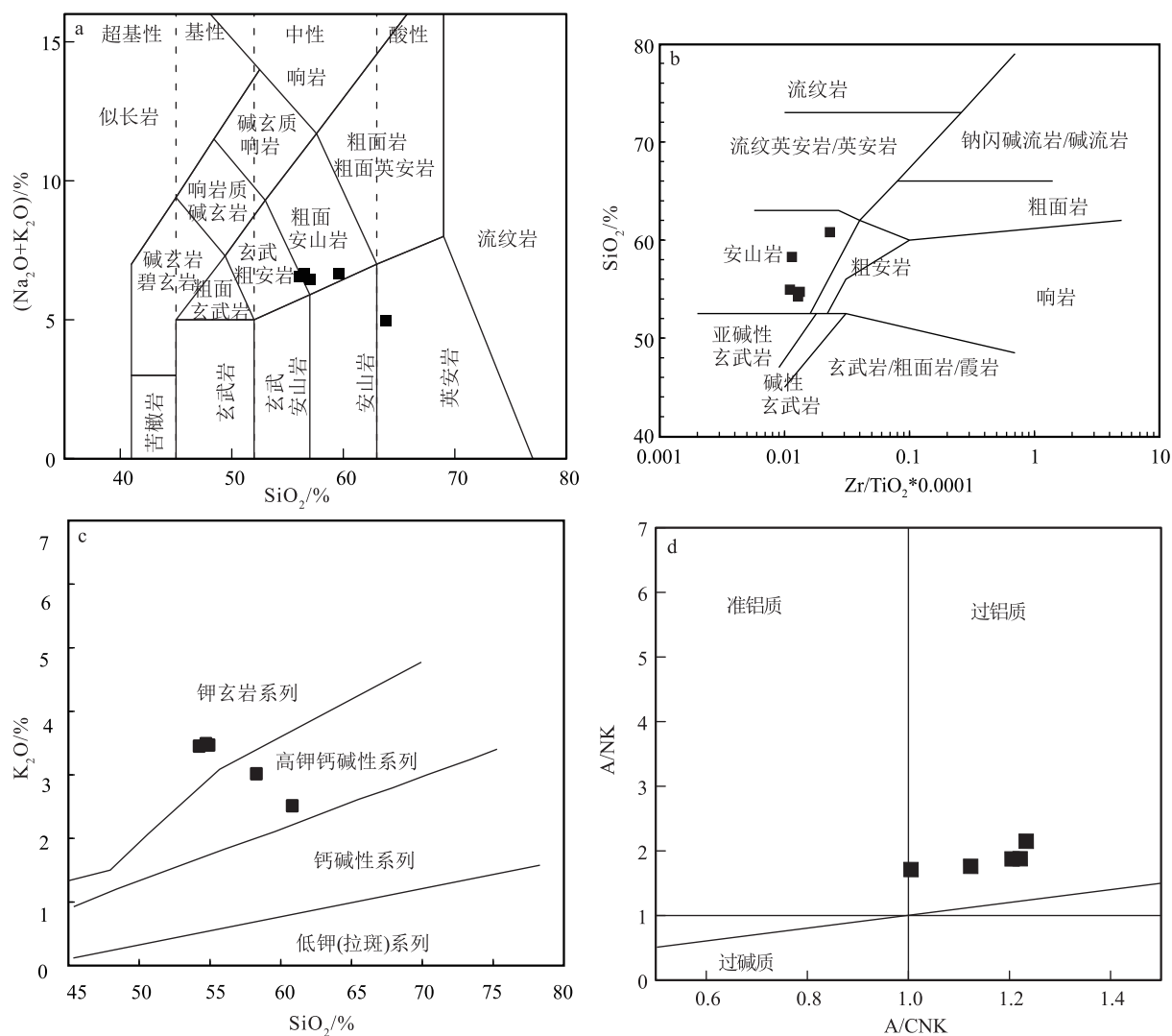


图4 方山口组安山岩TAS^[37](a)、Zr/TiO₂*0.0001-SiO₂^[38](b)、SiO₂-K₂O^[39](c)和A/CNK-A/NK^[40](d)图解

Fig. 4 TAS(a), Zr/TiO₂*0.0001-SiO₂(b), SiO₂-K₂O(c) and A/CNK-A/NK(d)

diagrams for andesites from Fangshankou Formation

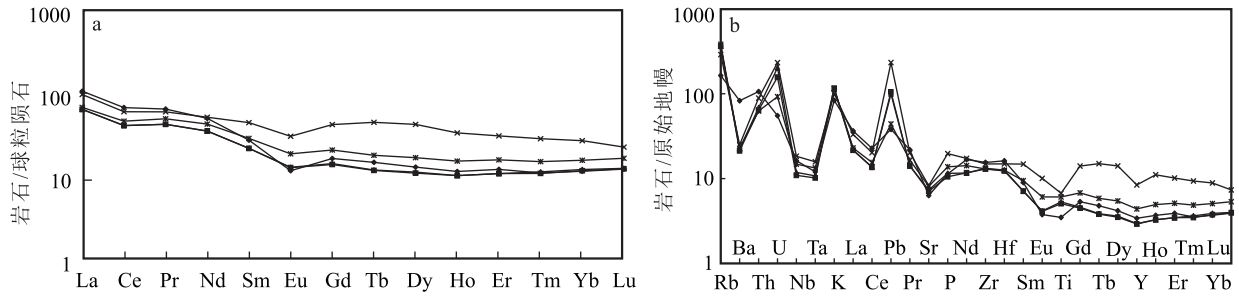


图 5 方山口组安山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)

(标准化值据参考文献[41])

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns(a) and primitive mantle-normalized trace element spider diagrams(b) for the andesites from the Fangshankou Formation

权^[27]获得的方山口组火山岩锆石 U-Pb 定年结果(284 Ma)计算, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值介于 $-4.2 \sim -14.2$ 之间; $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 $-19.8 \sim +1.4$ 之间。

5 讨论

5.1 岩石成因

作为中-上地壳重要组成部分的安山岩,其成因对解释地壳形成、生长及壳幔相互作用具有极重要的意义^[42-43]。目前关于安山岩的岩浆源区,主要存在 4 种认识:①幔源玄武质岩浆底侵导致下地壳物质的部分熔融^[44-45];②幔源玄武质岩浆的分离结晶作用^[46-47];③壳源长英质岩浆与幔源玄武质岩浆的混合作用^[48-50];④俯冲流体或熔体交代地幔楔的部分熔融^[51-53]。本文安山岩具有较明显的绿泥石化和绿帘石化作用,指示岩石遭受了一定程度的后期蚀变作用。高场强元素(Nb、Ta、Zr、Hf、Th)及重稀土元素地球化学行为不易受到后期热液蚀变和低于角闪岩相变质作用的影响^[38],因此可以利用这些元素对安山岩岩石成因及其大地构造背景作出准确的判别。

方山口组安山岩具较低的 SiO_2 含量(54.23%~60.81%),较高的 MgO 含量(4.26%~5.76%), $\text{Mg}^\# = 42 \sim 50$,明显不同于基性下地壳物质部分熔融产生的岩浆,其 $\text{Mg}^\#$ 值通常小于 40^[54];样品 Lu/Yb 值(0.12~0.16)明显低于壳源岩浆范围,而与幔源岩浆的 Lu/Yb 值(0.14~0.15)相近^[55],显示其具有明显的幔源特征,但具有较高的且与 Na_2O 相当的 K_2O 含量,指示幔源岩浆受到大量壳源物质的混合作用。稀土元素球粒陨石标准化配分图(图 5-a)显

示,LREE 富集,负 Eu 异常($\delta\text{Eu} = 0.52 \sim 0.75$),指示岩浆演化过程中有斜长石分离结晶或岩浆源区有斜长石残留。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 5-b)显示,安山岩富集 Rb、K、Pb、Th、U,弱富集 Zr、Hf,亏损 Ba、Sr、Nb、Ta、Ti。尽管上述地球化学特征类似于俯冲流体交代的软流圈地幔部分熔融形成的弧火山岩的 Nb、Ta、Ti 亏损特征,但明显富集 Th、U、Pb、K 和 Zr-Hf 弱富集则指示其具有壳源的亲缘性,仍显示大陆板内环境壳源岩浆作用的特点。夏林圻等^[56]认为,产于大陆板内裂谷环境的火山岩,当受到较大程度大陆地壳混染作用的影响时,某些地球化学特征与岛弧玄武岩相似;Wang 等^[57]也指出,形成于陆内伸展环境的火山岩的源区若受到地幔深部流体(地幔过渡带)的影响可以出现类似于弧火山岩 Nb、Ta、Ti 亏损的地球化学特征,但 Zr-Hf 会表现出略正异常的特点,不同于弧火山岩。

此外,安山岩样品中 Cr($38.2 \times 10^{-6} \sim 175.0 \times 10^{-6}$)、Ni($30.0 \times 10^{-6} \sim 54.2 \times 10^{-6}$)含量与大陆上地壳值接近($\text{Cr} = 35 \times 10^{-6}$, $\text{Ni} = 25 \times 10^{-6}$)^[58],其 Nb/U(1.98~9.99)、La/Nb(1.50~2.16)、Zr/Y(4.35~11.23)值均与大陆上地壳值相近^[58-59];根据总分配系数相同或相近、对同化混染作用敏感的元素比值(如 Ce/Yb、Th/Yb、La/Yb、Nb/Ta、Ta/Yb、Th/Zr 等)之间的相关关系,可以示踪岩浆是否经历过同化混染作用^[60-63]。在图 6 中,这些元素比值对之间呈现出良好的协变关系,进一步揭示岩浆演化过程中存在明显的混合作用;再者, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值可以示踪岩浆源区成分特征,正 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值指示源区为亏损地幔

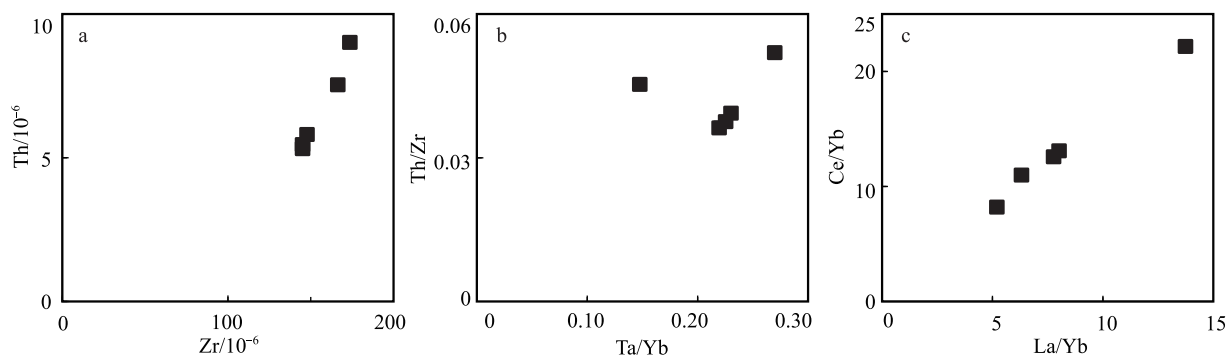


图6 方山口组安山岩 Zr-Th(a)、Ta/Yb-Th/Zr(b)和 La/Yb-Ce/Yb(c)图解

Fig. 6 Plots of selected trace elements for andesites of Fangshankou Formation

或新生地壳,负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值表明源区为古老的大陆地壳,而不均一的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 很可能与岩浆的混合作用有关^[64],研究区岩石全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-4.2 \sim -14.2$, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-19.8 \sim +1.4$,变化范围大,指示在岩浆作用过程中可能经历过强烈的地壳混染作用或壳幔混合过程。结合区域地质背景,认为方山口组安山岩应属于幔源玄武质岩浆与地壳物质发生强烈的混合作用的产物。

5.2 构造意义

目前对杭乌拉地区方山口组的形成时代及构造环境缺乏统一的认识。方山口组原始定义为一套厚逾 200 m 的酸性火山岩,底部碎屑岩含安哥拉型植物化石 *Callipteris altaica* 等,时代为晚二叠世晚期;前人在 1:20 万地质调查工作中在该地层剖面中发现大量腕足类化石,据此将其时代确定为早二叠世。杨立业^[34] 对该地层内的中粒岩屑长石砂岩碎屑锆石进行了 U-Pb 同位素定年,认为方山口组的沉积时限不应早于早二叠世;尹海权^[27] 通过高精度锆石 U-Pb 同位素定年方法获得该地层中火山岩的年龄为 284 Ma,笔者认为该年龄具有较高的可信度。

对于安山岩形成的构造环境的认识依然存在较大争议;党犇等^[25] 和姜亭等^[24] 基于沉积建造及岩石地球化学研究认为,研究区晚石炭世及二叠纪火山-沉积建造可归因于古亚洲大洋闭合后的伸展拉张构造体制下的板内裂谷环境;Fei 等^[30] 对珠斯楞-杭乌拉地区新发现的镁铁质和中-酸性侵入岩进行了主量、微量和锆石 U-Pb 年代学研究,认为该区域晚石炭世和早二叠世侵入岩均形成于后碰撞伸展构造背景。但是,部分学者认为,杭乌拉地区

二叠纪的火山活动与活动大陆边缘环境相关^[35];基于研究区晚古生代花岗质岩的地球化学及年代学证据,Liu 等^[29] 认为古亚洲洋闭合应在 280~265 Ma,且早二叠世岩浆活动与恩格尔乌苏蛇绿岩带代表大洋向北俯冲,使珠斯楞-杭乌拉构造带由早古生代的被动大陆边缘转化为活动陆缘有关。

本次研究表明,早二叠世方山口组安山岩应形成于古亚洲大洋闭合后的后碰撞板内裂谷环境。首先,野外地质调查发现,早二叠世方山口组以灰绿色安山岩、安山质角砾熔岩为主,局部含集块,系裂隙式喷发的产物,应与伸展拉张的构造背景有关;从区域大地构造背景看,杭乌拉地区南侧恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带所代表的古亚洲大洋始终是向南俯冲的直至闭合碰撞,形成了典型的陆缘弧岩浆岩带,即沙拉扎山岩浆弧,而在珠斯楞-杭乌拉构造带中至今未发现与俯冲作用有关的岩浆岩,同时也没有发育指示古大洋向北俯冲的相应的构造变形,仅存在与南向俯冲相关的倾向南、向北逆冲的冲断构造。因此,珠斯楞-杭乌拉构造带晚古生代火山-沉积建造不可能是活动大陆边缘的产物,而是在原被动陆缘环境下发育起来的,很可能意味着早二叠世研究区已进入后碰撞伸展的构造背景。刘欣雨等^[65] 通过大数据分析认为,常用的玄武岩微量元素判别图均在一定程度上适用于安山岩成因及构造环境判别。在 Hf/3-Th-Ta 判别图解(图 7-a)上,样品点全部落入火山弧区域,在 Ti-Zr 构造判别图解(图 7-c)中,部分样品点落入岛弧区域,这是由于大陆地壳的混染作用会降低岩浆中 Nb、Ta、Ti 元素的浓度,导致样品在相关地球化学图解中的投点向 Nb、Ta、Ti 含量降低的方向发生迁移,而落入

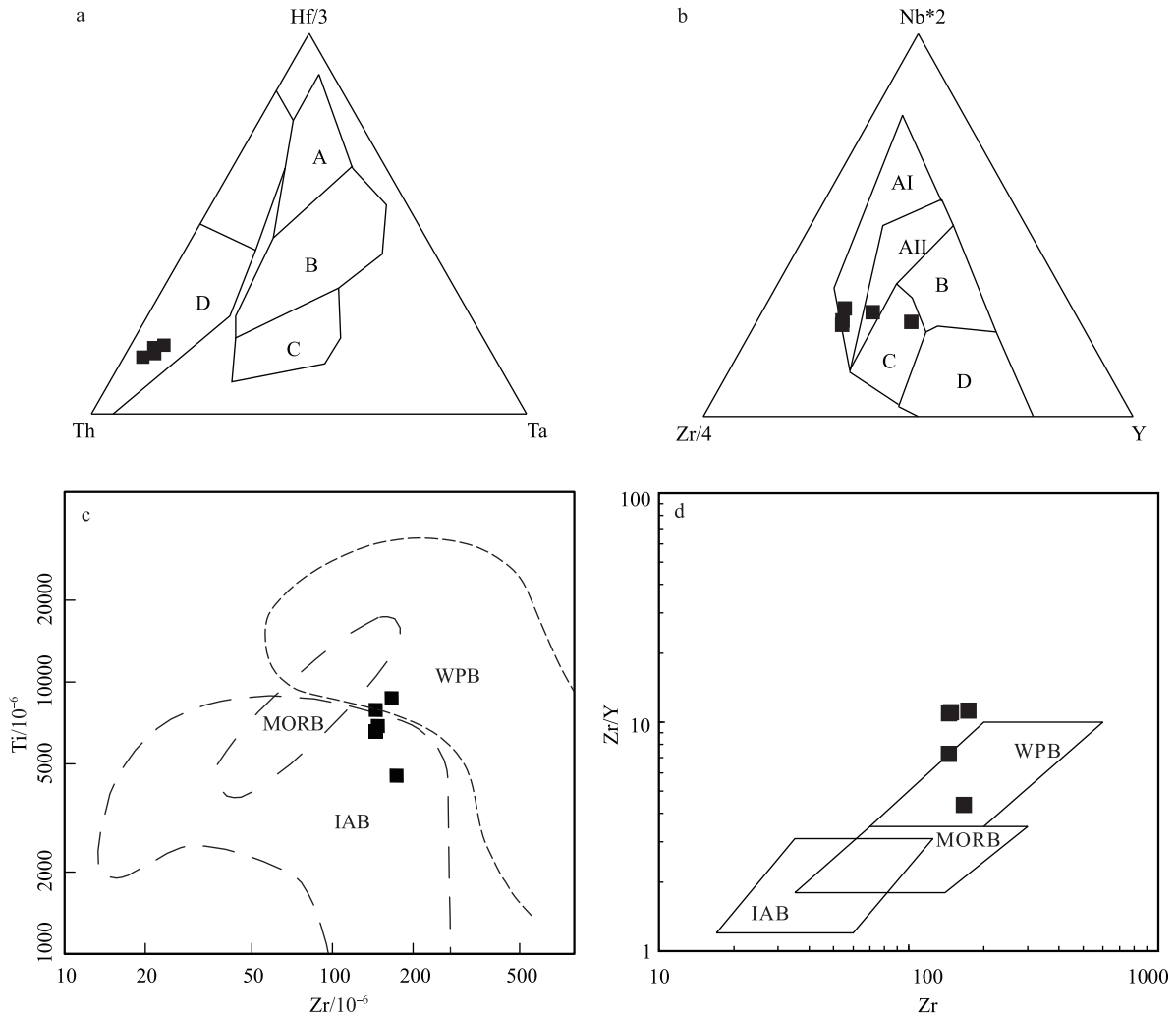


图 7 方山口组安山岩构造环境判别图解(a 据参考文献[66]; b 据参考文献[67]; c, d 图据参考文献[68])

Fig. 7 Diagrams of discriminating tectonic setting for andesites of Fangshankou Formation

a 图中: A—正常型洋中脊玄武岩; B—富集型洋中脊玄武岩; C—板内碱性玄武岩; D—火山弧玄武岩; b 图中: A I—板内碱性玄武岩; A II—板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B—富集型洋中脊玄武岩; C—板内拉斑玄武岩和火山弧玄武岩; D—正常型洋中脊玄武岩和火山弧玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; WPB—板内玄武岩; IAB—岛弧玄武岩

火山弧或岛弧岩浆岩区域^[56]。但是, 不管岩浆是否遭受大陆地壳的混染, 板内裂谷环境产出的玄武岩通常都具有较高的 Zr 含量(大于 70×10^{-6}) 和 Zr/Y 值(大于 3), 因此, 可以利用 Zr/Y-Zr 和 Nb * 2-Zr/4-Y 图解区别岛弧玄武岩与大陆板内玄武岩。结果表明, 所有样品点均落在板内火山岩区域。由此可见, 珠斯楞—杭乌拉地区安山岩应形成于与活动大陆边缘无关的板内伸展的裂谷环境。

前人对方山口组中其他岩石组合的研究也支持本文这一结论。尹海权^[27]认为, 该地层中流纹岩及安山岩为双峰式火山岩, 形成于陆内拉张的构造

演化阶段。此外, 北山地区同样出露有方山口组, 在碎石山、马鬃山和牛圈子一带有零星出露, 吴元伟^[69]对该地层中玄武岩的岩相学及岩石地球化学特征进行了研究, 该玄武岩具亏损 Nb、Ta 和 Ti, 轻稀土元素相对富集的特征, 且在 Zr/Y-Zr 和 Th/Zr-Nb/Zr 地球化学判别图解^[68, 70]中, 样品点均投入陆内裂谷玄武岩区域, 据此认为其形成于板内裂谷环境。综合以上研究, 该安山岩应形成于后碰撞板内裂谷环境, 早二叠世方山口组形成于古亚洲大洋闭合后的陆内伸展的构造背景, 是在原被动陆缘基础上发育的火山-沉积建造。

此外,党彝等^[71]对阿拉善北部地区石炭纪火山岩研究表明,该区域晚石炭世火山岩形成于板内裂谷环境;杭乌拉以西的额济纳旗地区不同程度地发育了晚石炭世—早二叠世阿木山组(北山地区干泉组)^[24, 72-73],其岩石组合以基性玄武岩类和酸性英安岩、流纹岩为主,姜亭等^[24]认为这种双峰式火山岩组合代表强烈的大陆裂谷拉张作用的产物,据此认为晚石炭世—早二叠世额济纳旗及邻区已进入陆内演化阶段;安屹^[73]认为,北山地区晚石炭世干泉组中安山岩与流纹岩具双峰式火山岩特征,形成于后造山板内裂谷环境;Su等^[74]和Li等^[75]认为,北山地区早二叠世火山岩及侵入岩形成于陆内裂谷环境。再者,Pang等^[76]对内蒙古中部晚石炭世本巴图组中玄武岩进行了详细的岩相学、岩石地球化学及Sr-Nd-Hf同位素研究,认为其形成于陆内伸展的构造背景;Wang等^[57]提出,内蒙地区320~270 Ma镁铁质岩浆活动应发育于后造山伸展的构造环境。

综上所述,阿拉善、北山及内蒙古中部地区晚石炭世—早二叠世为伸展拉张作用下的板内裂谷构造背景,揭示了古亚洲大洋南段最终闭合时限应在晚石炭世—早二叠世之前,在晚石炭世北山—内蒙古中部地区已进入陆内板块构造演化阶段,这对研究区(银额盆地)及其邻区的石炭纪—二叠纪油气资源勘探具有重要的指导意义。

6 结论

珠斯楞—杭乌拉地区早二叠世方山口组安山岩是幔源玄武质岩浆与地壳物质强烈混合作用的产物,形成于后碰撞板内裂谷背景,其火山—沉积建造是在原被动陆缘基础上发育起来的。结合区域地质背景及前人研究成果认为,古亚洲大洋南段(北山—阿拉善—内蒙古中部)最终闭合时限应在晚石炭世之前,晚石炭世—早二叠世北山—阿拉善—内蒙古中部地区已进入板内构造岩浆—沉积阶段,这对研究区(银额盆地)及其邻区的石炭纪—二叠纪油气资源勘探具有重要的指导意义。

致谢:感谢参加野外考察及取样工作的所有专家及同学,感谢甘肃省西部矿产资源重点实验室杨淑芬、熊聪慧及闫晓丽老师在实验过程中给予的指导和帮助,感谢审稿专家提出的宝贵意见。

参考文献

- [1] Wan B, Li S H, Xiao W J, et al. Where and when did the Paleo-Asian ocean form? [J]. *Precambrian Research*, 2018, 317: 241-252.
- [2] Windley B F, Alexeiev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the central asian orogenic belt [J]. *Geol. Soc. London*, 2007, 164: 31-47.
- [3] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 2000, 91: 181-193.
- [4] Sengör A M C, Natalin B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia [J]. *Nature*, 1993, 364: 299-307.
- [5] Badarch G, Dickson C W, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of Central Asia [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21: 87-110.
- [6] Lehmann J, Schulmann K, Lexa O, et al. Structural constraints on the evolution of the Central Asian orogenic belt in SW Mongolia [J]. *American Journal of Science*, 2010, 310: 575-628.
- [7] Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A tale of amalgamation of three Permo-Triassic collage systems in central Asia: oroclines, sutures, and terminal accretion [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2015, 43: 477-507.
- [8] Xiao W J, Windley B F, Han C M, et al. Late Paleozoic to early Triassic multiple roll-back and oroclinal bending of the Mongolia collage in Central Asia [J]. *Earth Science Reviews*, 2017, 186: 94-128.
- [9] 左国朝, 张淑玲, 何国琦, 等. 北山地区早古生代板块构造特征 [J]. *地质科学*, 1990, 4: 305-314, 411.
- [10] 吴泰然, 何国琦. 阿拉善地块北缘的蛇绿混杂岩带及其大地构造意义 [J]. *现代地质*, 1992, 6(3): 286-296.
- [11] 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, (2): 97-108.
- [12] 王廷印, 王金荣, 王士政. 阿拉善北部恩格尔乌苏蛇绿混杂岩带的发现及其构造意义 [J]. *兰州大学学报*, 1992, (2): 194-196.
- [13] 王廷印, 刘金坤, 王士政, 等. 阿拉善北部中蒙边界地区晚古生代拉伸作用及构造岩浆演化 [J]. *中国区域地质*, 1993, (4): 317-327.
- [14] 王廷印. 阿拉善地区古生代陆壳的形成和演化 [M]. 兰州: 兰州大学出版社, 1994.
- [15] Han B F, Wang S G, Jahn B M, et al. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth [J]. *Chemical Geology*, 1997, 138: 135-159.
- [16] Charvet J, Shu L S, Laurent-Charvet S, et al. Palaeozoic tectonic evolution of the Tianshan belt, NW China [J]. *Science in China*, 2011, 54: 166-184.
- [17] Han B F, He G Q, Wang X C, et al. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan-Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China [J]. *Earth Science Reviews*, 2011, 109: 74-93.

- [18] 张文,吴泰然,冯继承,等.阿拉善地块北缘古大洋闭合的时间制约:来自乌力吉花岗岩体的证据[J].地球科学,2013,43(8): 1299-1311.
- [19] Feng J Y, Xiao W J, Windley B F, et al. Field geology, geochronology and geochemistry of mafic-ultramafic rocks from Alxa, China: implications for Late Permian accretionary tectonics in the southern Altai[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 78: 114-142.
- [20] Zheng R G, Wu T R, Zhang W, et al. Late Paleozoic subduction system in the northern margin of the Alxa block, Altai: Geochronological and geochemical evidences from ophiolites [J]. Gondwana Research, 2014, 25(2): 842-858.
- [21] Liu Q, Zhao G C, Han Y G, et al. Timing of the final closure of the PaleoAsian Ocean in the Alxa Terrane: constraints from geochronology and geochemistry of Late Carboniferous to Permian gabbros and diorites[J]. Lithosphere, 2017, 274/275: 19-30.
- [22] Song D F, Xiao W J, Collins A S, et al. Final subduction processes of the Paleo-Asian Ocean in the Alxa Tectonic Belt (NW China): Constraints from field and chronological data of Permian arc-related volcano-sedimentary rocks[J]. Tectonics, 2018, 37: 1658-1687.
- [23] Cleven N, Lin S, Guilmette C, et al. Petrogenesis and implications for tectonic setting of Cambrian suprasubduction-zone ophiolitic rocks in the central Beishan orogenic collage, Northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 113: 369-390.
- [24] 姜亭,李玉宏,陈高潮,等.内蒙古西部额济纳旗及邻区上石炭统一二叠统阿木山组火山岩的地球化学特征[J].地质通报, 2011, 30(6): 932-942.
- [25] 党彝,赵虹,林广春,等.内蒙古西部银根-额济纳旗盆地及邻区二叠纪火山岩的地球化学特征和构造环境[J].地质通报, 2011, 30(6): 923-931.
- [26] 曾勇.内蒙古阿拉善哈日敖日布格气象一带晚古生代花岗岩地球化学特征及构造意义[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2014.
- [27] 尹海权.内蒙古阿拉善地区北部古生代沉积及其大地构造演化特征[D].中国地质大学(北京)博士学位论文, 2016.
- [28] 宋嘉佳.阿拉善地块北部雅干断裂带周缘晚古生代花岗岩体特征[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2017.
- [29] Liu Q, Zhao G C, Han Y G, et al. Geochronology and Geochemistry of Paleozoic to Mesozoic Granitoids in Western Inner Mongolia, China: Implications for the Tectonic Evolution of the Southern Central Asian Orogenic Belt[J]. The Journal of Geology, 2018, 126(4): 451-471.
- [30] Fei M M, Pan M, Xie C L, et al. Timing and tectonic settings of the Late Paleozoic intrusions in the Zhushileng, northern Alxa: implication for the metallogeny[J]. Geosciences Journal, 2019, 23(1): 37-57.
- [31] 郑亚东,张青.内蒙古亚干变质核杂岩与伸展拆离断层[J].地质学报, 1993, 67(4): 301-309.
- [32] Webb L E, Graham S A, Johnson C L, et al. Occurrence, age, and implications of the Yagan-Onch Hayrhan metamorphic core complex, southern Mongolia[J]. Geology, 1999, 27(2): 143-146.
- [33] 王涛,郑亚东,李天斌,等.中蒙边界区亚干变质核杂岩的组成与结构[J].地球科学, 2002, 37(1): 79-85.
- [34] 杨立业.内蒙古阿拉善北部二叠系地质特征与构造演化[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文, 2014.
- [35] Wu T R, He G Q, Zhang C. On Palaeozoic Tectonics in the Alxa Region, Inner Mongolia, China [J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(3): 256-263.
- [36] Bao Z A, Zong C L, Fang L R, et al. Determination of Hf-Sr-Nd isotopic ratios by MC-ICP-MS using rapid acid digestion after flux-free fusion in geological materials[J]. Acta Geochimica, 2018, 37(2): 244-256.
- [37] Lebas M J, Lemaitre R W, Strekeisen A, et al. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkalisilica diagram[J]. Journal of Petrology, 1986, 27(3): 745-750.
- [38] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series their differentiation products using immobile elements[J]. Chem. Geol., 1977, 20: 325-345.
- [39] Rickwood P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. Lithos, 1989, 22(4): 247-263.
- [40] Maniar P D, Piccolip M. Tectonic discrimination of granitoids. The Geological Society of America of Bulletin, 1989, 101(5): 635-643.
- [41] 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.
- [42] 唐功建,王强,赵振华,等.西天山东塔尔别克金矿区安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学、元素地球化学与岩石成因[J].岩石学报, 2009, 25(6): 1341-1352.
- [43] Chen L, Zhao Z F. Origin of continental arc andesites: The composition of source rocks is the key[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2017, 145: 217-232.
- [44] Petford N, Atherton M. Na-rich Partial Melts from Newly Underplated Basaltic Crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru[J]. Journal of Petrology, 1996, 37(6): 1491-1521.
- [45] Jung S, Hoernes S, Mezger K. Synorogenic melting of mafic lower crust: constraints from geochronology, petrology and Sr, Nd, Pb and O isotope geochemistry of quartz diorites (Damara orogen, Namibia) [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 2002, 143(5): 551-566.
- [46] Bonin B. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review[J]. Lithos, 2004, 78(1/2): 1-24.
- [47] Lee C T A, Lee T C, Wu C T. Modeling the compositional evolution of recharging, evacuating, and fractionating (REFC) magma chambers: Implications for differentiation of arc magmas [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2014, 143: 8-22.
- [48] Guo F, Nakamura E, Fan W M, et al. Generation of Palaeocene Adakitic Andesites by Magma Mixing: Yanji Area, NE China [J]. Journal of Petrology, 2007, 48(4): 661-692.
- [49] 卿敏,唐明国,葛良胜,等.内蒙古苏右旗毕力赫金矿区安山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、元素地球化学特征及其形成的构造环境[J].岩石学报, 2012, 28(2): 514-524.
- [50] 贺健,李龙明,任升莲,等.福建政和粗面安山岩的年代学、地球化学特征:对中国东南沿海晚中生代挤压-伸展构造的指示[J].地

- 质科学, 2017, 52(2): 592-615.
- [51] Kelemen P B. Genesis of high Mg[#] andesites and the continental crust[J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 1995, 120(1): 1-19.
- [52] 林木森, 彭松柏, 乔卫涛. 滇西腾冲更新世粗面安山岩 Ar-Ar 年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 2017, 33(10): 3137-3146.
- [53] 纪政, 葛文春, 杨浩, 等. 大兴安岭中段晚三叠世安第斯型安山岩: 蒙古-鄂霍茨克大洋板片南向俯冲作用的产物[J]. 岩石学报, 2018, 34(10): 2917-2930.
- [54] Atherton M P, Petford N. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust[J]. Nature, 1993, 362(6416): 144-146.
- [55] Rudnick R L, Gao S. Composition of the Continental Crust [J]. Treatise on Geochemistry, 2003, 3: 1-64.
- [56] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. 岩石矿物学杂志, 2007, (1): 77-89.
- [57] Wang X C, Wilde S A, Xu B, et al. Origin of arc-like continental basalts: Implications for deep-Earth fluid cycling and tectonic discrimination[J]. Lithos, 2016, 261: 5-45.
- [58] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution[J]. The Journal of Geology, 1986, 94(4): 632-633.
- [59] Fitton J G, Saunders A D, Norry M J, et al. Thermal and chemical structure of the Iceland plume [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1997, 153: 197-208.
- [60] Baker J A, Menzies M A, Thirlwall M F, et al. Petrogenesis of Quaternary Intraplate Volcanism, Sana'a, Yemen: Implications for Plume-Lithosphere Interaction and Polybaric Melt Hybridization[J]. Journal of Petrology, 1997, 38(10): 1359-1390.
- [61] Mcdonald R. Plume-Lithosphere Interactions in the Generation of the Basalts of the Kenya Rift, East Africa [J]. Journal of Petrology, 2001, 42(5): 877-900.
- [62] Campbell I H, Griffiths R W. The Changing Nature of Mantle Hotspots through Time: Implications for the Chemical Evolution of the Mantle[J]. Journal of Geology, 1992, 100(5): 497-523.
- [63] Campbell I H, Griffiths R W. The evolution of the mantle's chemical structure[J]. Lithos, 1993, 30(3/4): 389-399.
- [64] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, (2): 185-220.
- [65] 刘欣雨, 张旗, 张成立. 全球新生代安山岩构造环境有关问题探讨[J]. 地质科学, 2017, 52(3): 649-667.
- [66] Wood D A. The application of a Th, Hf, Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1980, 50(1): 11-30.
- [67] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. Chem. Geol., 1986, 56(3): 207-218.
- [68] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[J]. Orogenic Andesites and Related Rocks, 1982: 525-548.
- [69] 吴元伟. 北山与银额地区晚古生代构造-沉积背景对比研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2014.
- [70] 李永军, 李甘雨, 佟丽莉, 等. 玄武岩类形成的大地构造环境 Ta、Hf、Th、La、Zr、Nb 比值对比判别[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(3): 14-21.
- [71] 党彝, 赵虹, 林广春, 等. 阿拉善北部地区石炭纪火山岩岩石成因及构造意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(5): 963-974.
- [72] 郑荣国, 李锦轶, 刘建峰. 阿拉善地块北缘地区阿木山组火山岩时代: 锆石 U-Pb 定年证据[J]. 中国地质, 2017, 44(3): 612-613.
- [73] 安屹. 甘肃北山东部地区双峰式火山岩地球化学特征及构造意义研究[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2018.
- [74] Su B X, Qin K Z, Sakyi P A, et al. Geochemistry and geochronology of acidic rocks in the Beishan region, NW China: Petrogenesis and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-43.
- [75] Li S, Wilde S A, Wang T. Early Permian post-collisional high-K granitoids from Liuyuan area in southern Beishan orogen, NW China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. Lithos, 2013, 179: 99-119.
- [76] Pang C J, Wang X C, Xu B, et al. Late Carboniferous N-MORB-type basalts in central Inner Mongolia, China: Products of hydrous melting in an intraplate setting? [J]. Lithos, 2016, 261: 55-71.