鄂尔多斯地块西南缘中元古代玄武安山岩 地球化学特征及其构造意义

高山林¹),刘七林¹),张仲培²)

1) 中国石油化工股份有限公司油田事业部.北京.100728:

2) 中国石化石油勘探开发研究院,北京,100083

内容提要:铁马河玄武安山岩位于鄂尔多斯地块西南缘,沿六盘山东麓断裂带出露。岩石发育气孔和杏仁状构造,具有斑状结构—间隐结构,斑晶主要为长条状斜长石和少量蚀变暗色矿物。岩石地球化学呈现富 Na₂O、FeO^T、Al₂O₃,贫 MgO、TiO₂、K₂O 的特点,稀土配分曲线为右倾轻稀土富集型,LREE/ HREE=6.50~7.01,(La/Yb)_N为5.62~7.14,富集 Ba、Th、U、K 等大离子亲石元素,Nb、Sr 和 Ti 相对亏损, δ Eu = 0.69~0.91。样品 [$n(^{87}Sr)/n(^{86}Sr)$]_i为0.70587~0.70934, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 介于-6.9~-4.8, T_{DM} 为2562~2730 Ma,Nb/Ta(6.60~8.25)低于大陆地壳的平均值,指示了受俯冲流体改造的古老富集地幔参与了岩浆形成。SHRIMP 锆石 U-Pb 定年结果显示铁马河玄武安山岩形成于中元古代早期(~1740 Ma),其形成与研究区中元古代早期陆内伸展作用引起的古老岩石圈地幔减压熔融有关,是华北克拉通陆内裂谷发育过程在鄂尔多斯地块西南缘的体现。

关键词:鄂尔多斯地块西南缘;铁马河玄武安山岩;中元古代;地球化学特征;陆内伸展

古元古代晚期至中元古代早期华北克拉通发 育多个裂谷带 (Zhao Taiping et al., 2002; Zhao Taiping and Zhou Meifu, 2009; Wang Yuejun et al., 2008; Hou Guiting et al., 2006; Zhang Shuanghong et al., 2007; Peng Peng et al., 2008; Zhai Mingguo et al., 2015; Xu Chenghan et al., 2020), 并伴有大规 模性火山活动,如南部裂谷带熊耳群火山岩及碱性 花岗岩等(Zhao Taiping et al., 2002;柳晓艳等, 2011; Cui Minli et al., 2013; Deng Xiaoqin et al., 2016; Xue Shuo et al., 2018)、中部造山带基性岩墙 群、中基性喷发岩和花岗岩(徐勇航等,2007; Wang Yuejun et al., 2008; 胡国辉等, 2010; Zhao Jiao et al., 2018),东部燕辽裂谷带岩墙群和斜长岩杂岩 体(Hou Guiting et al., 2006;杨进辉等, 2005; Zhang Shuanghong et al., 2007; Zhao Taiping et al., 2009; Yang Qiongyan et al., 2014),北部渣尔泰—白云鄂 博裂谷带 1750 Ma 中基性火山岩(刘超辉和刘福来, 2015)。鄂尔多斯地块西部发育贺兰—六盘山、银 川—杭锦旗、环县—定边、晋—豫—陕等数条不同规 模的裂谷,沉积厚度不等的长城系展布受同沉积伸 展断层控制(陈友智等,2016;包洪平等,2019)。对 现今覆盖区裂谷带的确认主要基于重磁资料、区域 性地震剖面和少量钻井资料,以及相继发现的1.85 ~1.75 Ga 的泾源花岗斑岩、陇县白家沟花岗斑岩及 保家山铁马河剖面安沟钾长花岗岩等的地球化学特 征分析(高山林等,2013;徐欢等,2014;尤佳等, 2014; Wang Xingying et al., 2020; Pang Lanvin et al., 2021)(图1)。徐欢(2019)在铁马河剖面发现 了约 2018±16 Ma 的辉绿岩,但小于 1.85 Ga 的中基 性喷出岩未见报道。本文报道的玄武质安山岩位于 贺兰—六盘山裂谷带南段宝鸡市陇县新集川乡以西 大约 17 km 的铁马河村二线子附近(N35°02'46.7", E106°35′07.0″),空间上与前人报道的1.85~1.75 Ga 花岗岩处于同一断裂带。文章对该处玄武质安 山岩进行了岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 年代学 分析,探讨了其成因与构造背景,为进一步完善华北 克拉通西部鄂尔多斯地块元古代构造演化认识提供 了新的证据。

1 地质背景与岩石学特征

研究区位于鄂尔多斯地块西南缘(图1),与祁 连造山带以宝鸡—固关断裂为界。该断裂以西为陇



注:本文为国家油气专项(编号:2017ZX05005-002)的成果。

收稿日期:2022-03-07;改回日期:2022-08-10;网络首发:2022-08-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.08.025 作者简介:高山林,男,1966年生,教授级高级工程师,主要从事含油气盆地分析;Email: gaoshanlin@ sinopec.com。



图 1 鄂尔多斯地块西南缘铁马河及邻区地质构造简图(a)和铁马河玄武安山岩露头区地质简图(b) (据 1:20 万陇县幅和香泉幅地质矿产图简化)

Fig. 1 Sketch map showing geology of Tiemahe area in southwestern margin of the Ordos Block and adjacent areas (a) and locations of basaltic andesites (b) (simplified after 1: 200,000 Geological and Mineral Maps of the Longxian and Xaingquan sheets)

山岩群变质杂岩,属西秦岭—祁连造山带的组成部 分(徐可心,2018;付长垒等,2019)。以东为鄂尔多 斯地块,其基底岩性和时代与华北克拉通主体区的 基本一致。地球物理资料揭示,六盘山—宝鸡地区 中—新元古界厚度超过 4000 m,且由南向北、由西 向东逐渐减薄,地层分布与厚度明显受同沉积正断 层控制。露头显示,中—新元古界为一套陆内裂 谷—被动大陆边缘沉积。其中长城纪沉积主要为一 套海相长石石英砂岩,厚度 300~500 m,夹多层凝灰 岩(谭聪等,2019);蓟县系—南华系以夹硅质条带 或团块的被动大陆边缘碳酸盐岩沉积为主,厚度 1000~2500 m;震旦纪早期沉积了—套厚度超过 1000 m 的石英砂岩夹泥页岩,晚期沉积为中厚层硅 质碳酸盐岩。

铁马河中基性火山岩与白垩系砂岩、蓟县系硅 质白云岩间均呈断层接触,受第四系沉积及植被覆 盖的影响,在野外未能观察到中基性火山岩与早— 中元古代花岗岩体、辉绿岩之间的接触关系。岩石 表面风化较严重,呈灰黄色-灰褐色(图 2a),沿人 工揭露断面出露的岩石相对较新鲜,呈灰褐色、灰黑 色,气孔和杏仁构造发育,肉眼可见长石斑晶。镜下 显示斑状结构—间隐结构,斑晶含量约10%,主要 以斜长石为主(图 2b),次为暗色矿物,粒径 0.5~ 3.2 mm。斜长石斑晶呈板状自形晶,偶见聚斑晶或 联斑晶,普遍发生了绿泥石化、绢云母化蚀变。暗色 矿物斑晶呈半自形--它形,具绿泥石化、绿帘石化等 蚀变,根据形态和蚀变矿物推测原矿物可能为辉石。 基质具间隐结构,由斜长石微晶、暗色矿物微晶和玻 璃质构成,粒径一般<0.5 mm。斜长石微晶呈板条 状,偶见聚片双晶,同样发生绢云母化蚀变,含量约 占基质的 50%~60%。暗色矿物微晶呈近半自形— 它形粒状,约占10%~15%,蚀变特征同斑晶。黑褐 色玻璃质 20% 左右, 充填于基质矿物微晶间, 多脱 玻为隐晶质及纤柱状、发状雏晶,并析出少量铁质。 气孔或杏仁体大小0.8~1.8 mm,多被绿泥石、硅质 或方解石充填,多为由硅质构成的杏仁体(图 2b)。



图 2 鄂尔多斯地块西南缘中元古代铁马河火山岩野外露头及显微组构照片 Fig. 2 Photographs showing the outcrop (a), compositions and texture (b) of the Tiemahe basaltic andesite in southwestern margin of the Ordos Block Pl=斜长石; Px=辉石; Q=石英 Pl=plagioclase; Px=pyroxen; Q=quartz

根据构造、结构及矿物组分,定名为玄武质安山岩。

2 分析方法

锆石分选工作均在河北省廊坊区域地质调查所 实验室完成。制靶和锆石阴极发光照相均在北京离 子探针中心进行。锆石 U-Pb 测年利用北京离子探 针中心的 SHRIMP-II采用标准测定程序进行,详细 的分析流程和原理见宋彪等(2002)。应用澳大利 亚国家地质调查局标准锆石 TEMORA(417 Ma)进 行元素间的分馏校正,测试过程中每3个样品点测 定一次标样。用澳大利亚国立大学地学院标准锆石 SL13(572 Ma,U=238 μg/g)标定样品的 U、Th 及 Pb含量。数据处理采用 Isoplot 软件。普通 Pb 由实 测²⁰⁴Pb 校正。所有测点的误差均为 2σ,所采用 的²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄具 95%的置信度。铁马 河火山岩样品 TMH 的 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结



图 3 鄂尔多斯地块西南缘中元古代铁马河玄武安山岩锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images showing appearances and internal textures of zircon grains from the Thiemahe basaltic andesite in

southwestern margin of the Ordos Block

果见表1。

全岩主量、微量元素 和同位素分析均在核工业 北京地质研究院分析测试 研究中心完成。主微量元 素测试方法依据《GB/ T14506. 28-93 硅酸盐岩 石化学分析方法》和《DZ/ T0223-2001 电感耦合等离 子体质谱(ICP-MS)方法 通则》。主量元素使用 PW2404 X 射线荧光光谱 仪(XRF)分析,实验流程 依据国家标准 GB/ T14506.14-2010,精度优 于5%:微量元素采用采用 ELEMENTXR 型电感耦合 等离子质谱仪(ICP-MS). 执行标准 GB/T14506.30-2010。分析结果见表 2。

Block

southwestern margin of the Ordos

果

测年!

U-Ph

石 the 铅

铁

元古代(

缘 惬

66)

影 of

表

Ë. 丱

basaltic andesite 马河火山

Tiemahe Ŧ

from ' 围 斯地块函

zircons

Table 1 U–Pb analytic results

Rb-Sr 和 Sm-Nd 同位 素采用 ISOPROBE-T 热电 离质谱仪(TIMS) 计, Sr、 Sm、Nd 同位素组成分别采 用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr = 0.119400. 149 Sm/ 152 Sm = 0.516858, 146 Nd/ 144 Nd = 0.721900 进 行质量分馏校正,分析精 度优于 0.002%。元素、同 位素详细的流程和计算见 李增达等(2018)。CIPW 标准矿物计算、主微量元 素及同位素计算和图件编 制均在 Geokit 软件上完成 (路远发,2004)。分析结 果见表3。

锆石 U-Pb 年代 3 学特征

铁马河火山岩样品的 锆石粒径为 50~250 μm。 阴极发光图像(图3)显示 锆石呈短柱状,个别呈浑 圆状,少量锆石中具有包

hits	Ĵ	元素	:含量(×11	0_e)					同位素比1	值				同位素年	:龄(Ma)		
<u>8</u> 40	dd 907	206*	E	-	Th/U	$n(^{207} \text{Pb}^*)/$	$n(^{206} {\rm Pb}^{*})$	$n(^{207} Pb^*)$.	$/n(^{235}U)$	$n(^{206} {\rm Pb}^{*})$	$/n(^{238}U)$	误差相关系数	$n(^{207}{ m Pb})/$	$n(^{206}\mathrm{Pb})$	$n(^{206}{\rm Pb})/$	'n(²³⁸ U)	不谐和
þ	()	d J	4	⊃		测值	7%	测值	7%	测值	7%		测值	%∓	测值	∓%	度(%)
1.1	I	45.2	66	106	0.64	0.1671	1.2	11.4	2.1	0.4960	1.7	0.825	2596	37	2529	20	-3
2.1	1.74	2.48	2	6	0.80	0.1100	9.5	4.56	11	0.3020	4.6	0.434	1699	68	1792	170	5
3.1	0.54	8.29	18	31	0.62	0.1143	7.4	4.94	8.1	0.3132	3.1	0.380	1757	47	1869	130	9
4.1	0.86	10.8	42	39	1.10	0.1078	4.7	4.69	5.3	0.3156	2.4	0.451	1768	37	1762	87	0
5.1	0.74	15.9	45	59	0.79	0.1050	4.3	4.51	4.7	0.3114	2.0	0.432	1748	31	1713	79	-2
6.1		12.8	31	46	0.71	0.1073	2.3	4.85	3.2	0.3277	2.2	0.688	1827	35	1754	42	-4
7.1	0.67	13.0	48	49	1.01	0.1032	2.4	4.32	3.2	0.3037	2.1	0.653	1710	31	1681	44	-2
8.1	0.34	5.69	25	22	1.19	0.1056	3.7	4.45	4.8	0.3054	3.1	0.641	1718	46	1725	68	0
9.1	0.20	26.8	104	76	1.11	0.1070	1.7	4.71	2.5	0.3190	1.8	0.714	1785	28	1748	32	-2
10.1	0.00	4.00	10	15	0.71	0.1251	3.6	5.28	5.1	0.3060	3.6	0.712	1722	55	2030	63	15
11.1	0.25	16.4	43	62	0.71	0.1091	2.6	4.60	3.2	0.3062	2.0	0.611	1722	30	1784	47	б
12.1	0.45	22.1	80	85	0.98	0.1077	3.3	4.48	3.7	0.3017	1.7	0.465	1700	26	1761	60	б
13.1	0.72	14.7	47	56	0.87	0.1054	4.1	4.43	4.7	0.3049	2.3	0.485	1715	35	1720	76	0
14.1	1.18	4.36	12	16	0.77	0.1059	4.7	4.70	5.9	0.3220	3.6	0.608	1799	56	1729	86	-4
15.1		18.5	70	72	1.00	0.1158	1.9	4.77	2.6	0.2988	1.8	0.685	1685	27	1893	35	11
16.1	6.11	2.41	9	~	0.69	0.0630	40	2.70	41	0.3090	6.0	0.145	1737	88	705	870	-147
17.1	3.56	5.73	15	21	0.72	0.1000	13	4.18	13	0.3030	3.5	0.260	1708	51	1622	240	-5
18.1	ļ	3.03	8	11	0.76	0.1326	7.1	6.08	8.4	0.3330	4.5	0.538	1851	72	2133	120	13
19.1	0.91	8.67	21	32	0.69	0.1062	6.9	4.57	7.5	0.3125	2.7	0.367	1753	41	1734	130	-
20.1	0.41	13.1	38	50	0.79	0.1042	3.5	4.37	4.2	0.3044	2.3	0.556	1713	35	1701	64	-
21.1	0.88	14.9	51	53	0.98	0.1044	5.4	4.62	6.0	0.3212	2.5	0.415	1796	39	1703	100	-5
22.1	0.20	28.5	73	108	0.70	0.1070	1.6	4.50	2.4	0.3054	1.8	0.746	1718	27	1749	29	2
世世	序通铅根 机	民实测 ²⁰⁴ 1	っh 洪行校	正, ²⁰⁶ Pb.	和 ²⁰⁶ Pb [*]	、分别表示普	通铅和放射	性成因铅疗	旱差为 1σ.								

注:普通铅根据实测***Pb 进行校正; ***Pb, 和***Pb * 分别表示普通铅和放射性成因铅;误差为







体和明显的裂隙(如图 3 中锆石 1.1)。内部结构清 楚,具有明显的震荡环带结构,个别具有扇形分带, 暗示为岩浆成因的锆石。

锆石的 U、Th 和²⁰⁶Pb*含量分别为 8.44×10⁻⁶~ 108×10⁻⁶、5.61×10⁻⁶~104×10⁻⁶ 和 2.41×10⁻⁶~45.2 ×10⁻⁶, Th 和 U 含量较低, Th/U=0.62~1.19(表1)。 对 22 粒锆石进行了 U-Pb 测年,207 Pb/206 Pb 年龄大 体可分为3个年龄群:2529~2030 Ma(表1中的 1.1、10.1 和 18.1)、1893~1869 Ma(表1中的 3.1 和 15.1) 和 1792~1622 Ma(主群)。锆石或测点 16.1的不谐和度达-147%(表1),可能是由于包体 或裂隙引起的²⁰⁴Pb 较高所致,该测点未参与加权平 均年龄计算和做图。锆石 2.1 和 17.1 因²⁰⁷Pb/²³⁵U 误差(分别为11%和13%:表1)向右稍稍偏离谐和 线,但在谐和图上并未偏离主群(图4),本文用其参 与了加权平均年龄计算。即除2群较老锆石和高不 谐和度的 16.1 外,其余 16 粒锆石给出的²⁰⁷ Pb/²⁰⁶ Pb 加权平均年龄值为 1740 ± 14 Ma (MSWD = 1.12),²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄值为1727±15 Ma (MSWD=2.9), 二者在误差范围内一致, 表明铁马 河基性火山岩喷出时代为中元古代早期。本文获得 的铁马河基性火山岩年龄与研究区北部约 30 km 马 峡镇高山河组下部凝灰岩(1759±17 Ma, LA-ICP-

表 2 鄂尔多斯地块西南缘铁马河中元古代玄武安山岩主量(%)和微量($\mu g/g$)元素组成 Table 2 Concentrations of major and trace elements of the Tiemahe basaltic andesite in

	TM-1	TM-2	TM-3	TM-4	TM-5	TM-6	TM-7		TM-1	TM-2	TM-3	TM-4	TM-5	TM-6	TM-7
SiO_2	54.23	52.88	53.63	48.04	51.29	55.00	54.19	Tm	0.70	0.72	0.67	0.68	0.68	0.66	0.66
TiO_2	1.55	1.51	1.56	1.74	1.57	1.53	1.54	Yb	3.90	4.18	3.96	4.08	4.00	3.74	4.07
Al_2O_3	15.21	15.48	15.13	17.50	15.28	14.97	15.35	Lu	0.70	0.75	0.73	0.75	0.75	0.71	0.73
$\mathrm{Fe}_2\mathrm{O}_3$	8.62	9.91	5.35	5.42	4.10	7.15	4.14	ΣREE	217.46	234.43	204.5	213.12	209.06	220.71	205.13
FeO	3.36	2.26	6.71	7.28	7.46	4.15	7.56	L/HREE	6.50	6. 59	6.52	6.58	6.79	7.01	6.68
MnO	0.12	0.10	0.18	0.19	0.18	0.16	0.17	(La/Yb) _N	7.28	8.27	6.65	7.01	7.51	8.27	6.96
MgO	3.89	3.50	4.93	4.23	4.20	3.97	4.58	(Gd/Yb) _N	1.81	1.82	1.63	1.64	1.56	1.83	1.54
CaO	2.80	5.03	2.22	3.61	4.54	2.87	2.32	δEu	0.69	0.91	0.75	0.75	0.74	0.85	0.82
Na_2O	3.96	3.62	3.89	5.35	4.60	4.21	4.33	Ba	1210	731	1135	267	212	1133	687
K_2O	1.01	0.68	0.96	0.47	0.22	0.97	0.65	Rb	10.2	5.54	10.6	10.71	2.96	9.29	6.17
P_2O_5	0.47	0.47	0.45	0.49	0.45	0.45	0.44	Sr	391	694	168	563	434	281	277
烧失	4.51	4.33	4.77	5.49	5.96	4.33	4.53	Y	41.9	46.7	38.8	39.6	38.7	39.2	37.7
总和	99.72	99.78	99.77	99.82	99.85	99.75	99.80	Zr	215	207	207	230	215	210	218
$Mg^{\#}$	47	54	36	31	30	42	32	Hf	5.94	6.68	5.75	7.01	5.90	6.24	5.96
La	39.6	48.2	36.7	39.9	41.9	43.1	39.5	Nb	8.37	10.1	9.69	11.37	8.85	8.30	8.43
Ce	77.5	82.3	76.9	79.1	76.9	81.5	75.8	Pb	5.28	11.8	4.51	7.31	16.7	18.9	7.24
Pr	11.8	11.9	10.3	10.9	10.5	11.4	10.3	Th	1.55	2.13	1.48	1.34	1.35	1.46	2.28
Nd	48.3	49.1	43.2	44.5	42.9	46.1	42.4	U	0.63	1.14	0.75	1.00	0.42	0.58	0.63
Sm	9.23	9.27	8.20	8.56	8.10	8.66	8.24	Та	1.26	1.51	1.46	1.72	1.31	1.01	1.14
Eu	2.03	2.77	2.00	2.06	1.92	2.40	2.17	Ga	15.8	24.7	18.9	25.5	18.5	16.8	18.9
Gd	8.55	9.18	7.79	8.08	7.54	8.27	7.60	Cr	127	144	103	154	95.0	108	102
Tb	1.48	1.53	1.34	1.39	1.29	1.37	1.30	Co	31.9	31.9	41.7	47.6	38.9	31.7	36.7
Dy	7.82	8.34	7.17	7.49	7.15	7.32	7.01	Ni	43.7	46.5	45.8	58.9	44.2	39.8	42.8
Ho	1.52	1.63	1.45	1.46	1.40	1.41	1.38	Ti/Zr	43.21	43.72	45.17	45.35	43.77	43.67	42.34
Er	4.33	4.56	4.09	4.17	4.03	4.07	3.97	La/Sm	4.29	5.20	4.48	4.66	5.17	4.98	4.79

the southwestern margin of the Ordos Block

MS)及相邻的元古代 A 型花岗岩时代相近(高山林 等,2013;谭聪等,2019;Pang Lanyin et al., 2021), 也与华北克拉通南缘熊耳群火山岩系和 A 型花岗 岩、流纹岩、中部造山带基性岩墙等年龄基本一致 (Zhao Taiping et al., 2004;Zhao Taiping and Zhou Meifu,2009;He Yanhong et al., 2009;柳晓艳等, 2011;Peng Peng et al., 2012;Cui Minli et al., 2013; Yang Qiongyan et al., 2014;Wang Changming et al., 2016;Zhao Jiao et al., 2018)。两群较老锆石年龄 (2529~2030 Ma 和 1893~1869 Ma)在鄂尔多斯盆 地基底均有记录(Zhang Chengli et al., 2015),可能 是铁马河火山岩喷发或其岩浆侵位过程中从古老地 壳中捕获的。

4 地球化学特征

由于岩石蚀变较强,引起样品的烧失量较大 (4.33%~5.96%),文中主量元素为烧失量校正后 数据,以用不活动元素含量、比值及其相互关系讨论 岩浆源区及岩石成因等特征。

4.1 主量元素特征

铁马河火山岩的 SiO₂ 含量为 50.93%~ 57.64%, TiO₂(1.58%~1.85%)、K₂O(0.24%~ 1.06%)含量低, Na₂O/K₂O 值为 3.92~20.45, Al₂O₃ (15.69%~18.55%)和 FeO^T(10.58%~12.17%)含 量高(表 2)。在 Nb/Y—Zr/TiO₂ 图解中, 所有样品 均落入玄武质安山岩区域(图 5a), 与显微岩相学特 征揭示的岩石类型一致。在 Zr—Y 图解中,铁马河 火山岩落入过渡—拉斑玄武岩区域(图 5b)。MgO 为 3.66%~5.19%,Mg[#]为 38~46,平均 42,接近 40, 指示岩浆形成可能与下地壳玄武质岩石局部熔融有 关(Atherton and Petford,1993)。

4.2 微量元素特征

铁马河火山岩的稀土元素总量为 204~234× 10⁻⁶,LREE/HREE=6.50~7.00,(La/Yb)_N=5.62~ 7.14,(La/Sm)_N= 2.27~3.36,(Gd/Yb)_N= 1.55~ 1.82,轻稀土元素富集且轻重稀土元素之间存在着 较强的分馏作用。在球粒陨石标准化稀土元素配分 曲线图上(图 6a),呈右倾式配分曲线分布, δ Eu = 0.69~0.91,平均值为 0.79,具弱的 Eu 负异常。在 原始地幔标准化微量元素配分图上(图 6b),富集 Ba、U、Nd、Pb、K 等大离子亲石元素,Th、Nb、Sr 和 Ti 相对亏损,Zr、Hf 弱富集,显示源区应为岩石圈地 幔,与吕梁地区元古界小两岭组、豫西熊耳山北岭金 矿区马家河组等同期的安山岩特征基本一致(徐勇 航等,2007;赵太平等,2007;李肖龙等,2019)。

4.3 Sr-Nd 同位素地球化学

铁马河火山岩全岩 Sr—Nd 同位素分析结果见 表 3,利用 Geokit 软件计算初始 Sr 和 Nd 同位素比 值(路远发,2004)。结果显示, $[n(^{87}Sr)/n^{86}Sr)]_i =$ 0.70587 ~ 0.70934, $[n(^{143}Nd)/n(^{144}Nd)]_i =$ 0.510037 ~0.510142, $\varepsilon_{Sr}(t) =$ 49.0~98.4, $\varepsilon_{Nd}(t) =$ -6.9 ~ -4.8, $f_{Sm/Nd} =$ -0.45 ~ -0.43,单阶段模式



图 5 鄂尔多斯地块西南缘中元古代铁马河玄武安山岩 Nb/Y—Zr/TiO₂图解(a)(底图据 Winchester and Floyd, 1977)和 Zr—Y 判别图(b)(底图据 Barrett and Maclean, 1999) Fig. 5 Discrimination diagrams of Nb/Y—Zr/TiO₂₍a)(after Winchester and Floyd, 1977) and Zr—Y(b)(after Barrett

and Maclean, 1999) for the Tiemahe basaltic andesites in southwestern margin of the Ordos Block



图 6 鄂尔多斯地块西南缘中元古代铁马河玄武安山岩球 粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a)和初始地幔标准 化微量元素蛛网图(b)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a) and Primitive mantle-normalized multi-trace element spider diagrams (b) of the Tiemahe basaltic andesites in southwestern margin of the Ordos Block (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

年龄 T_{DM} = 2562 ~ 2730 Ma,平均 2631 Ma, T_{DM2} = 2630~2794 Ma,平均 2701 Ma,表明岩浆形成过程有 古老地壳物质的参与。在 $[n(^{87}Sr)/n^{86}Sr)]_i$ — $\varepsilon_{Nd}(t)$ 图解上,数据点全部落在富集地幔区(图7), 其同位素特征与熊耳群火山岩及同期基性岩墙群相 似,均有古老地壳物质参与了富集地幔的形成(徐 勇航等,2007;赵太平等,2007;胡国辉等,2010;Han Shuxiang et al., 2020),可能反映了相近的源区富集 过程。

- 5 讨论
- 5.1 岩浆演化与源区特征



图 7 鄂尔多斯地块西南缘中元古代铁马河玄武安山岩 $({}^{87}Sr/{}^{86}Sr)_i - \varepsilon_{Nd}(t)$ 关系图 (地幔端元投影区域引自 Zindler and Hart, 1986; Basin and Range 区域引自 Hawkesworth et al., 1995)

Fig. 7 Plot of $\varepsilon_{\rm Nd}(t)$ vs $[n(^{87}{\rm Sr})/n^{86}{\rm Sr})]_{\rm i}$ of the Tiemahe basaltic andesites in southwestern margin of the Ordos Block (the fields of mantle end-members all from Zindler and Hart, 1986; the fields of Basin and Range from Hawkesworth et al., 1995)

5.1.1 结晶与分离作用

铁马河玄武安山岩平均 Mg[#]值为 42,相容元素 Cr 和 Ni 分别为 94.6×10⁻⁶~154×10⁻⁶ 和 39.8×10⁻⁶ ~58.8×10⁻⁶,远低于原始岩浆的参考数值 250×10⁻⁶ 和 300×10⁻⁶(Wendlandt et al., 1995),部分样品的 MgO 与 TiO₂、FeO^T、Cr 与 Ni、Dy 和 Er 之间表现出正 相关趋势,表明存在铁镁质矿物分离结晶,SiO₂ 与 Al₂O₃ 负相关及 Sr 相对亏损、Eu 负异常与岩浆演化 过程中斜长石的结晶分异有关(王刚等,2019)。样 品的 Th、Nd、La、Y 等不相容元素比值之间显示较好 的正相关、La/Sm 与 Sm 之间正相关(图 8a),表明岩 浆演化以部分熔融为主(李壮等,2019),同时也经 历了一定程度的分异结晶作用,与薄片中含有少量 斜长石和暗色矿物斑晶所反映的特征相一致。

5.1.2 地壳混染

源区或上升过程中地壳的混染会导致岩浆成分的变化。研究区样品的 $\varepsilon_{M}(t)$ 平均为-5.33, (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)_i平均0.7071, (Th/Nb)_{PM}平均为1.52 (>1, Saunders et al., 1992), (Nb/La)_{PM}平均为0.22(<1),存在大于2.0 Ga 锆石,指示古老地壳物质参与了岩浆的形成(图 8b)(夏林圻等,2007; 王刚等,2019)。大部分样品 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 与La/Nb间不具有明显的相关性, $[n(^{143}Nd)/n(^{144}Nd)]_i$ 值、 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值

表 3 鄂尔多斯地块西南缘中元古代铁马河玄武安山岩全岩 Sm-Nd 同位素分析结果 Table 3 Sm and Nd isotopes of the Tiemahe basaltic andesites in the southwestern margin of the Ordos Block	$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$	10.4 57.3 0.1297 0.709738 0.000009 0.7106493 0.1101 0.511313 0.000010 0.510053 -0.44 58 -6.5 2692 2770	10.9 59.4 0.0542 0.710696 0.000010 0.70934 0.1108 0.511359 0.000006 0.510091 -0.44 98 -5.8 2642 2710	9.45 52.0 0.3246 0.715353 0.00009 0.707233 0.1099 0.511339 0.00007 0.510081 -0.44 68 -6.0 2649 2725 9.91 53.6 0.0900 0.708123 0.000013 0.705872 0.1118 0.511317 0.000013 0.510037 -0.43 49 -6.9 2730 2794	9.70 52.8 0.0389 0.707594 0.000008 0.71110 0.511407 0.000007 0.510137 -0.44 60 -4.9 2577 2638	9.49 52.6 0.1662 0.711730 0.000011 0.707572 0.1090 0.511383 0.000007 0.510136 -0.45 73 -4.9 2563 2640	9.45 51.9 0.1174 0.709832 0.000011 0.706895 0.1101 0.511402 0.000022 0.510142 -0.44 64 -4.8 2562 2630	$ \begin{split} & \hat{\Phi}$ (力 μg/g; $ \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n)^{144} \text{ Nd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n)^{144} \text{ Nd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n)^{144} \text{ Nd} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n)^{14} \text{ Nd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n)^{14} \text{ Nd} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n)^{164} \text{ Nd} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^{143} \text{ Nd}/n)^{164} \text{ Nd} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n(^$	6 (a) mS/gT a 4 35 a a b a c a a c a c a a c a c a c a c a
表 ble 3 Sm and	Nd $\frac{n(^{87}\text{Rb})}{n(^{86}\text{Sr})}$	57.3 0.1297	59.4 0.0542	52.0 0.324(53.6 0.0900	52.8 0.0389	52.6 0.1662	51.9 0.117	$\mu g/g;$ $\exists i = 1740 Ma(# \pi / n = 1740 Ma(# Nd)]_{CHU}h m = 0.2137; [n nair et al. 1978)nair et al. 1978)h = 1000 Ma(+ 1000 Ma) = 1000 Ma(+ 1000 Ma)$	以及 La/Nb、La La 与 La/Sm、S 等,2015),表明 映了源区的地
Tal	年龄 Ma) Rb Sr Sm	1740 20.22 451 10.4	1740 11.91 636 10.9	1740 18. 13 161 9. 45 1740 16. 32 525 9. 91	1740 6.37 474 9.70	1740 17.61 307 9.49	1740 12.54 307 9.45) Rb, Sr, Sm, Nd 的单位为 μ) 样品数据校正年龄值采用) 计 算 参 数: [n ⁽¹⁴⁷ Sm)/ 38; [n ⁽¹⁴⁷ Sm)/n ⁽¹⁴⁴ Nd)], 8); Å _{Sm} = 6.54×10 ⁻¹² (Lugm) 计算公式: (1) = 10000 ([n ⁽¹⁴³ Nd/n ¹)	晴区的地域 晴区的地域 晴亮混染。Nb/T 岩岩浆源区地域 献(朱弟成等, 着大陆岩石圈 。)、 △□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□
	 # ↓	TM-1	TM-2	TM-3 TM-4	TM-5	TM-6	TM-7	送明:(1 (2) (3 (3 (3 (3 (3 (3 (4 (4 (4) (4))	9a),个别点靠 浆的混染主要



图 8 鄂尔多斯地块西南缘中元古代铁马河玄武安山岩 La—Sm 关系图(a)(底图据张辉善等,2020)和(Th/ Nb)_{PM}—Nb/La 图解(b)底图据王刚等,2019)

Fig. 8 Discrimination diagrams of La—Sm (a) (after Zhang Huishan et al., 2020) and $(Th/Nb)_{PM}$ —Nb/La (b) for the Tiemahe basaltic andesites in southwestern margin of the Ordos Block (after Wang Gang et al., 2019) for basaltic andesites

以及 La/Nb、La/Sm 值随 SiO₂含量变化很小,Nb/ La 与 La/Sm、Sm/Nd 之间无明显相关性(张若飞 等,2015),表明样品的元素与同位素特征主要反 映了源区的地球化学性质(赵太平等,2007;骆文 娟等,2018),岩浆上升过程中同时伴有较弱的地 壳混染。Nb/Th—Ti/Yb 图解能够有效判别玄武 岩岩浆源区地壳物质和陆下岩石圈地幔物质的贡 献(朱弟成等,2006),铁马河玄武岩多数样品点沿 着大陆岩石圈地幔物质(SCLM)趋势线分布(图 9a),个别点靠近下地壳物质加入趋势线,指示岩 浆的混染主要源于岩石圈地幔物质,其次为下 地壳。





图 9 鄂尔多斯地块西南缘中元古代玄武安山岩 Nb/Th—Ti/Yb 图解(a) (底图据朱弟成等,2006)和 (La/Sm)_N—(Tb/Yb)_N 图解(b) (底图据 Furman et al., 2004)

Fig. 9 Discrimination diagrams of Nb/Th—Ti/Yb (a) (after Zhu Dicheng et al. , 2006) and (La/Sm) $_{\rm N}$ —(Tb/Yb) $_{\rm N}({\rm b})$

(after Furman et al., 2004) for the Tiemahe basaltic andesites in southwestern margin of the Ordos Block



图 10 鄂尔多斯地块西南缘中元古代铁马河玄武安山岩 La/Sm—Lu/Hf 图解(a) (底图据 Regelous et al., 2003)和 Ce/Pb—Th/La 图解(b) (底图据 Stolz et al., 1996)

Fig. 10 Discrimination diagrams of La/Sm—Lu/Hf(a) (after Regelous et al. , 2003) and Ce/Pb—Th/La (b) (after Stolz et al. , 1996) for the Tiemahe basaltic andesites in southwestern margin of the Ordos Block

5.1.3 源区特征

在(Tb/Yb)_N—(La/Sm)_N图解上(图9b),所 有样品落在尖晶石稳定域内,岩浆起源深度可能小 于 80 km(Furman et al., 2004)。Sm/Yb 和 La/Yb 值分别为 2.02~2.37 和 9.28~11.5,Nb/Y 小于 1, 在 La/Sm—Lu/Hf 图解上样品落入尖晶石二辉橄榄 岩线上(Regelous et al., 2003)(图 10a),表明部分 熔融发生在深度较浅的尖晶石稳定区域(王刚等, 2019),岩浆的形成与岩石圈地幔源区减压熔融密 切相关。

Nb/Ta 值在岩浆形成后基本保持不变,能够较 好地反映源区的特征。本区玄武安山岩具有较低的 Nb/Ta 值(6.6~8.3,平均6.99),低于大陆地壳的平均值(12~13),也低于下地壳(~8)(Gao Shan et al., 2004),低 Nb/Ta 值往往与源区经历过俯冲流体的交代作用密切相关(Stolz et al., 1996)。岩石 具有较高的 Ba/La(平均 18.86)、Ce/Pb(平均 9.84)和Ce/Th(平均49.38)、低Th/Yb(平均0.41)和Th/U(平均0.6),Th/Yb介于0.33~0.56,远小于2,也反映了源区曾遭受过俯冲板片析出流体的改造(图 10b)(赵太平等,2007;魏瑞华等,2008;管 琪等, 2010;纪政等,2018)。 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 与Th/Nb的正 相关、较高的 La/Nb 值(3.51~5.19)、低的 La/Ba 值(0.03~0.19),岩石富集轻稀土和大离子亲石元



图 11 郭尔多别地英西南缘中几百代铁马河玄武安田石构追环境判别图 (a) Ta/Yb—Th/Yb 图解(据 Pearce, 1982); (b) Hf/3—Th—Ta 图解(据 Wood, 1980)

Fig. 11 Discrimination diagrams for tectonic settings of the Tiemahe basaltic andesites in southwestern margin

of the Ordos Block: (a) Ta/Yb—Th/Yb (after Pearce, 1982); (b) Hf/3—Th—Ta (after Wood, 1980) (a)SHO-岛弧橄榄玄粗岩系列;ICA-岛弧钙碱性系列;IAT-岛弧拉斑系列;WPB-板内玄武岩;MORB-大洋中脊玄武岩;TH-拉斑玄武岩; TR-过渡性玄武岩;ALK-碱性玄武岩;(b) N-MORB-亏损型洋中脊玄武岩;E-MORB+WPT-富集型洋中脊玄武岩和板内玄武岩;WPAB-板内碱性玄武岩;CAB-钙碱性玄武岩;

(a) SHO-island arc shoshonite series; ICA-island arc calc-alkaline series; IAT- island arc tholeiite series; WPB-within plate basalts; MORB-mid -ocean ridge basalts; TH- tholeiite series; TR-transitional basalts; ALK-alkali basalts. (b) N-MORB depleted mid-ocean ridge basalts; E-MORB+WPT-enrichment type mid-ocean ridge basalts; WPAB- within plate alkali basalts; CAB- calc-alkaline basalts

素等地球化学指示着俯冲流体改造过的岩石圈地幔 参与了铁马河玄武安山岩的形成(王团华等,2008; Marschall and Schumacher,2012;陈言飞等,2020)。 岩浆源区受俯冲作用改造的特征在华北克拉通南部 的熊耳群火山岩、中条一嵩山基性岩墙群及小两岭 组火山岩的源区均有体现(Wang Yuejun et al., 2008;徐勇航等,2007;胡国辉等,2010)。研究区的 俯冲作用改造过程可能与鄂尔多斯地块西缘早元古 代规模性地壳增生密切相关,这已为采样点以西约 50 km 的铁佛寺剖面陇山杂岩群的变质事件所证实 (何艳红等,2005;徐可心,2018),这个过程中往往 存在年轻和古老地壳物质(2529±20 Ma)的再造和 富集岩石圈地幔的形成(Zhao Zifu et al., 2013; Zheng Yongfei et al., 2015)。

5.2 构造背景与地质意义

铁马河玄武安山岩富集轻稀土元素和大离子亲 石元素、亏损高场强元素,具有相对低的 Sr、Nb、Ti, 总体显示了岛弧及活动大陆边缘具有的地球化学特 征(Pearce,1982),与熊耳群安山岩地球化学特征非 常相似(Zhao Taiping et al., 2002;徐勇航等,2007; 柳晓艳等,2011;Yang Qiongyan et al., 2014)。夏林 圻等(2007)指出受到了较为明显地壳混染作用的 板内火山岩也会表现出岛弧火山岩类似特征。铁马 河玄武质安山岩 Zr 为 206.65~230.16×10⁻⁶, Hf 为 5.75×10⁻⁶~ 6.68×10⁻⁶,明显高于火山弧拉斑玄武 岩的 Zr 和 Hf 值 (分别为 40×10⁻⁶ 和 1.17×10⁻⁶) (张运强等,2014)。岛弧安山岩大于5,而铁马河火 山岩 Th/Ta 为 0.78~2.0,小于 5,Zr/Y 值为 4.43~ 5.81(大于4), TiO, 含量为1.58%~1.84%, 平均 1.65%,远高于岛弧和活动大陆边缘的 TiO, 含量 (小于1.25%,夏林圻等,2007),均表现出板内中基 性喷发岩的特征(汪云亮等,2001;张辉善等, 2020)。对全球 10930 个岛弧玄武岩数据进行了深 入分析后,杨婧等(2016)提出 Hf/3-Th-Ta 及 Ta/ Yb—Th/Yb 构造环境图解对区分岛弧与板内玄武 岩较为有效,铁马河玄武安山岩相关元素数据均投 点于板内玄武岩区内(图 11a、b),在 Ba/La—Nb/La 图解中大部分数据点与美国盆岭构造的基性岩区范 围重叠,表明其形成于大陆板内伸展环境。

在 1.95~1.85 Ga 间,包括鄂尔多斯地块在内的华北地区各陆块碰撞拼贴并完成了最终的克拉通化,是哥伦比亚或奴娜(Nuna)造山事件的记录

(Rogers and Santosh, 2002; Zhao Guochun et al., 2005; Santosh, 2010; Zhang Chengli et al., 2015). 1.85~1.60 Ga 华北克拉通进入造山后伸展演化期, 南缘的熊耳群火山岩及同期基性岩墙群和 A 型花 岗岩、中部的太行基性岩墙群和环斑花岗岩、北部的 喷发岩、镁铁质岩墙和 A 型花岗岩等以及伴随的巨 厚沉积物是该期伸展事件的重要标志或记录(Zhao Taiping et al., 2002; Peng Peng et al., 2008; Yang Qiongyan et al., 2014; Deng Xiuqin et al., 2016; Xue Shuo et al., 2018; Han Shuxiang et al., 2020; 康健丽 等,2020; Pang Lanvin et al., 2021)。据已有的研究 成果分析,华北克拉通 1.85~1.60 Ga 伸展裂解大 体上可分为两个阶段。第一阶段为碰撞后由挤压向 伸展的转换阶段(1.85~1.80 Ga),该阶段主要是由 于早期俯冲板片断裂和快速构造折返引起岩石圈地 幔上涌提供熔融热源,诱发上覆古老基底岩石减压 熔融(Zhao Jiao et al., 2018),熔体上升就位形成了 A型或I型钾质花岗岩,如克拉通南部华阳川A型 花岗岩(1829.5±2.5 Ma; Xue Shuo et al., 2018)、上 店花岗斑岩和登封正长花岗岩(师江朋等,2017)及 小秦岭地区的二长斑岩和煌斑岩(1836.0±6.8 Ma、 1841.0±2.6 Ma;Li Chao et al., 2020),中部吕梁地 区的惠家庄花岗岩、西榆皮花岗岩脉(1854±20 Ma、 1830±21 Ma; Zhao Jiao et al., 2018)和芦芽山二长 岩等(1800~1820 Ma;耿元生等,2006)、北部大青山 长胜渠 A 型花岗岩(1846 ± 11 Ma、1812.0 ± 8.6 Ma; Xu Chenghan et al., 2020) 和东沟子超镁铁岩体 (1849~1845 Ma, Han Shuxiang et al., 2020)等。这 一阶段地壳厚度仍较大,在地壳尺度往往伴有规模 性的走滑韧性剪切及岩石退变质作用(Zhang Huafeng at al., 2016; Wang Wei et al., 2017; Wu Jialin et al., 2017; Xiao Linglinet al., 2017; Xu Chenghan et al., 2020),未发育较大面积的火山喷 出,个别地区沿断裂带有基性岩侵入。1.8~1.6 Ga 为第二阶段,随着伸展作用的持续增强,受俯冲作用 改造的岩石圈地幔减压部分熔融,由于华北克拉通 各区地壳厚度、断裂发育程度及地壳——地幔地球化 学组成的差异,在多处形成了规模不等、结构各异的 中基性喷发岩、花岗岩、基性岩墙群等,并发育了以 长城系为代表的火山—沉积组合(Zhao Taiping and Zhou Meifu, 2009; Wang Changming et al., 2016; Xue Shuo et al., 2018; Zhao Jiao et al., 2018; HanShuxiang et al., 2020; Xu Chenghan et al., 2020)。铁马河玄武安山岩形成时代为 1740±14 Ma,空间上与同期的 A 型花岗岩相邻(高山林等, 2013;徐欢等, 2014;尤佳等, 2014; Wang Xingying et al., 2020; Pang Linyan et al., 2021),表明鄂尔多斯地块西南缘中元古代早期进入了裂谷发育阶段,是中元古代华北克拉通南缘裂谷系的组成部分。

6 结论

(1)鄂尔多斯地块西南缘铁马河玄武安山岩形 成于中元古代早期,其锆石 U-Pb 年龄为 1740±14 Ma。

(2)铁马河玄武安山岩为钙碱性—拉斑质过渡 岩类,富集轻稀土元素和 Rb、Ba、Pb 等大离子亲石 元素,亏损 Nb、Ti 等高场强元素,具有低的 Nb/Ta 值,岩浆源区深度较浅,为受俯冲流体改造的岩石圈 地幔区减压熔融的产物。

(3)铁马河玄武安山岩是鄂尔多斯地块西南缘 中元古代早期的陆内伸展环境下的产物,记录了华 北克拉通或哥伦比亚超大陆古元古代晚期—中元古 代早期的裂解事件。

致谢:感谢审稿专家们的宝贵修改意见!赵太 平研究员对初稿进行了审阅并提出建设性修改意 见,闫全人教授在年龄数据处理与解释中给与了帮 助,在此一并表示感谢!

参考文献 / References

(The literature whose publishing year followed by a "&" is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a "#" is in Chinese without English abstract)

- 包洪平, 邵东波, 郝松立, 章贵松, 阮正中, 刘刚, 欧阳征健. 2019. 鄂尔多斯盆地基底结构及早期沉积盖层演化. 地学前缘, 26 (1): 33~43.
- 陈言飞,张泽明,陈宣华,田作林,邵兆刚,康东艳,江媛媛. 2020. 藏东类乌齐地区晚三叠世基性岩浆作用与构造意义. 岩石学 报,36(9):2701~2713.
- 陈友智, 付金华, 杨高印, 肖安成, 孙六一, 徐波, 包洪平, 毛黎光. 2016. 鄂尔多斯地块中元古代长城纪盆地属性研究. 岩石学 报, 32(3): 856~864.
- 付长垒,闫臻,王秉璋. 2019. 秦祁结合部清水—张家川基性岩形 成时代和构造归属探讨. 岩石学报,35(10):3141~3160.
- 高山林,林晋炎,陆彦俊. 2013. 宁夏泾源石咀子古元古代 A 型花 岗岩的形成时代及其地质意义. 岩石学报,29(8):2676~ 2684.
- 耿元生,杨崇辉,万渝生.2006. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作用——来自同位素年代学的证据. 岩石学报,22(2):305~314.
- 管琪,朱弟成,赵志丹,张亮亮,刘敏,李小伟,于枫,莫宣学. 2010. 西藏南部冈底斯带东段晚白垩世埃达克岩:新特提斯洋 脊俯冲的产物? 岩石学报,26(7):2165~2179.
- 何艳红, 孙勇, 陈亮, 李海平, 袁洪林, 柳小明. 2005. 陇山杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 21(1):

125~134.

- 胡国辉,胡俊良,陈伟,赵太平. 2010. 华北克拉通南缘中条山—嵩山地区 1.78Ga 基性岩墙群的地球化学特征及构造环境. 岩石 学报,26(5):1563~1576.
- 纪政, 葛文春, 杨浩, 毕君辉, 于倩, 董玉. 2018. 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. 岩石学报, 34(10): 2917~2930.
- 康健丽,王惠初,任云伟,,肖志斌,相振群,曾乐. 2020. 内蒙古 固阳地区白云常合山 A 型花岗岩:年代学、地球化学、Hf 同位 素研究及其对 Columbia 超大陆裂解的响应. 岩石学报,36(8): 2431~2446.
- 李肖龙,申硕果,黄丹峰,李敏,叶萍,茹朋,程国安. 2019. 豫西 熊耳山北岭金矿区马家河组安山岩地球化学特征及其地质意 义. 岩石矿物学杂志,38(3):287~302.
- 李增达,于晓飞,王全明,杜泽忠,曹强,师明元,王然. 2018. 胶 东三佛山花岗岩的成因:成岩物理化学条件、锆石 U-Pb 年代学 及 Sr—Nd 同位素约束. 岩石学报,34(2):447~468.
- 李壮,郎兴海,章奇志,何亮. 2019. 西藏浦桑果铜多金属矿床中酸 性岩石成因及动力学背景:年代学、地球化学及 Sr—Nd—Pb— Hf 同位素约束. 岩石学报,35(3):737~759.
- 刘超辉,刘福来. 2015. 华北克拉通中元古代裂解事件:以渣尔 泰—白云鄂博—化德裂谷带岩浆与沉积作用研究为例. 岩石学 报,31(10):3107~3128.
- 柳晓艳, 蔡剑辉, 阎国翰. 2011. 华北克拉通南缘熊耳群眼窑寨组 次火山岩岩石地球化学与年代学研究及其意义. 地质学报, 85 (7):1134~1145.
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. 地球化学, 33(5): 459~464.
- 骆文娟,张作衡,段士刚,蒋宗胜,王大川,陈杰. 2018. 新疆西天山备战基性—超基性岩年代学和岩石地球化学研究及其对铁成 矿背景的制约. 矿物岩石学杂志, 37(5): 733~753.
- 彭澎,刘富,翟明国,郭敬辉. 2011. 密云岩墙群的时代及其对长城 系底界年龄的制约. 科学通报,56:2975~2980.
- 师江朋,杨德彬,霍腾飞,杨浩田,许文良,王枫. 2017. 华北克拉 通南缘 A 型花岗岩的年代学和 Nd—Hf 同位素组成:对古元古 代晚期伸展事件的制约. 岩石学报,33(10):3042~3056.
- 宋彪,张玉海,万渝生,简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年 龄测定及有关现象讨论. 地质论评,48(S1):26~30.
- 谭聪, 卢远征, 宋昊南, 吕奇奇, 邓胜徽, 王华建, 苏玲. 2019. 华 北克拉通西南缘高山河组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意 义. 地质学报, 93(5): 1113~1124.
- 王刚,张晗,王宗起,武昱东,王东升,王嘉玮. 2019. 武当山十堰 地区二叠纪 E-MORB 型玄武岩识别及构造意义. 地质论评,65 (1):65~84.
- 王团华,毛景文,谢桂青,叶安旺,李宗彦. 2008. 小秦岭—熊耳山 金矿区中基性岩墙的岩石化学研究. 地学前缘,15(1):250~ 266.
- 汪云亮,张成江,修淑芝. 2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf—Ta/Hf图解判别. 岩石学报, 17(3): 413~421.
- 魏瑞华,高永丰,侯增谦,孟祥金,杨竹森. 2008. 冈底斯新近纪钾 质火山作用:消减沉积物折返的地球化学与 Sr—Nd—Pb 同位 素证据. 岩石学报,24(2):359~367.
- 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.
- 徐欢,赵慧,罗金海,程佳孝,尤佳,王师迪. 2014. 华北地块西南 缘陇县保家山古元古代花岗岩及其构造意义研究. 地质论评, 60(6):1284~1296.

- 徐欢. 2019. 鄂尔多斯地块西南部古元古代中—晚期构造岩浆作 用. 博士学位论文. 西安: 西北大学, 46~63.
- 徐可心. 2018. 秦祁结合部位前寒武纪年代学和地球化学研究:来 自陇山岩群的证据. 硕士学位论文. 西安:西北大学,21~73.
- 徐勇航,赵太平,彭澎,翟明国,漆亮,罗彦. 2007. 山西吕梁地区 古元古界小两岭组火山岩地球化学特征及其地质意义. 岩石学 报,23(5):1123~1132.
- 杨进辉,吴福元,柳小明,谢烈文. 2005. 北京密云环斑花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义. 岩石学报,21(6):1633 ~1644.
- 杨婧,王金荣,张旗,陈万峰,潘振杰,杜雪亮,焦守涛,王淑华. 2016. 全球岛弧玄武岩数据挖掘-在玄武岩判别图上的表现及 初步解释. 地质通报,35(12):1937~1949.
- 尤佳,罗金海,程佳孝,王师迪,徐欢,赵慧. 2014. 华北地块西南 缘古元古代花岗斑岩及其构造意义. 高校地质学报,20(3): 368~377.
- 张辉善, 计文化, 马中平, 高晓峰, 孙超, 洪俊, 吕鹏瑞. 2020. 甜水海地块寒武纪安山岩的地球化学和年代学研究: 对西昆仑— 喀喇昆仑造山带原特提斯洋演化的启示. 岩石学报, 36(1): 257~278.
- 张若飞,袁峰,周涛发,邓宇峰,张达玉,许超,赵冰冰. 2015.西 准噶尔塔尔巴哈台—谢米斯台地区火山热液型铜矿床(点)地 质及含矿火山岩年代学、地球化学特征.岩石学报,31(8): 2259~2276.
- 张运强,陈海燕,李先,魏文通,张振利,许洪才,刘增校,彭芊芃. 2014. 华北陆块北部燕山地区中元古代辉绿岩地球化学特征及 成因意义.中国地质,41(2):351~360.
- 赵太平,徐勇航,翟明国.2007.华北陆块南部元古宙熊耳群火山 岩的成因与构造环境:事实与争议.高校地质学报,13(2): 191~206.
- 赵子福,戴立群,郑永飞. 2013. 大陆俯冲带壳幔相互作用的碰撞 后镁铁质岩浆岩记录.科学通报,58(23):2310~2315.
- 郑永飞,陈伊翔,戴立群,赵子福. 2015. 发展板块构造理论:从洋 壳俯冲带到碰撞造山带.中国科学:地球科学,45(6):711~ 735.
- 朱弟成,潘桂棠,莫宣学,王立全,赵志丹,廖忠礼,耿全如,董国 臣. 2006. 青藏高原中部中生代 OIB 型玄武岩的识别:年代学、 地球化学及其构造环境. 地质学报,80(9):1312~1328.
- Atherton M P, Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. Nature, 362(6416): 144~146.
- Barrett T J, Maclean W H. 1997. Volcanic sequences, lithogeochemistry, and hydrothermal alteration in some bimodal volcanic-associated massive sulfide systems. In: Volcanic-Associated Massive Sulfide Systems: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings: Reviews in Economic Geology. Society of Economic Geologists, Inc., 8: 101~131.
- Cui Minli, Zhang Lianchang, Zhang Bolin, Zhu Mingtian. 2013. Geochemistry of 1. 78 Ga A-type granites along the southern margin of the North China Craton: Implications for Xiong 'er magmatism during the break-up of the supercontinent Columbia. International Geology Review, 55(4): 496~509.
- Deng Xiaoqin, Peng Touping, Zhao Taiping. 2016. Geochronology and geochemistry of the late Paleoproterozoic aluminous A-type granite in the Xiaoqinling area along the southern margin of the North China Craton: Petrogenesis and tectonic implications. Precambrian Research, 285: 127~146.
- Fu Changlei, Yan Zhen, Wang Bingzhang. 2019&. Discussion on the age and tectonic affinity of the mafic rocks in Qingshui—

Zhangjiachuan of the conjunction area between the Qinling and Qilian orogenic belts. Acta Petrologica Sinica, 35(10): $3141 \sim 3160$.

- Furman T, Bryce J G, Karson J, Iotti A. 2004. East African rift system (EARS) plume structure: Insights from Quaternary mafic lavas of Turkana, Kenya. Journal of Petrology, 45(5): 1069~1088.
- Gao Shan, Rudnick R L, Yuan Hongling, Liu Xiaoming, Liu Yongsheng, Xu Wengliang, Ling Wenli, Ayers J, Wang Xuanche, Wang Qinghai. 2004. Recycling lower continental crust in the North China Craton. Nature, 432(7019): 892~897.
- Han Shuxiang, Wu Chen, Zhou Zhiguang, Wang Guosheng. 2020. Geology, geochemistry, and geochronology of the paleoproterozoic Donggouzi mafic—ultramafic complex: Implications for the evolution of the North China craton. Lithos, 366~367: 105567.
- Hawkesworth C, Turner S, Gallagher K, Hunter A, Bradshaw T, Rogers N. 1995. Calc- alkaline magmatism, lithospheric thinning and extension in the Basin and Range. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 100(B7): 10271~10286.
- He Yanhong, Sun Yong, Chen Liang, Li Haiping, Yuan Honglin, Liu Xiaoming. 2005&. Zircon U-Pb chronology of Longshan complex by LA-ICP-MS and its geological significance. Acta Petrologica Sinica, 21(1): 125~134.
- He Yanhong, Zhao Guochun, Sun Min, Xia Xiaoping. 2009. SHRIMP and LA-ICP-MS zircon geochronology of the Xiong'er volcanic rocks: Implications for the Paleo—Mesoproterozoic evolution of the southern margin of the North China Craton. Precambrian Research, 168(3~ 4): 213~222.
- Hou Guiting, Liu Yulin, Li Jianghai. 2006. Evidence for -1.8 Ga extension of the Eastern Block of the North China Craton from SHRIMP U-Pb dating of mafic dyke swarms in Shandong Province. Journal of Asian Earth Sciences, 27(4): 392~401.
- Hu Guohui, Hu Junliang, Chen Wei, Zhao Taiping. 2010&. Geochemistry and tectonic setting of the 1.78 Ga mafic dyke swarms in the Mt. Zhongtiao and Mt. Song areas, the southern Margin of the North China Craton. Acta Petrologica Sinica, 26(5): 1563 ~ 1576.
- Kang Jianli, Wang Huichu, Ren Yunwei, Xiao Zhibin, Xiang Zhenqun, Zeng Le. 2020&. The Baiyunchanghe A type granites in Guyang area, Inner Mongolia: Age, geochemistry, Hf isotope and response to the breakup of Columbia supercontinent. Acta Petrologica Sinica, 36(8): 2431~2446.
- Li Chao, Li Lin, Li Shengrong, Santosh M. 2020. Late Paleoproterozoic mafic—intermediate dykes from the southern margin of the North China Craton; Implication for magma source and Columbia reconstruction. Precambrian Research, 347; 105837.
- Li Xiaolong, Shen Shuoguo, Huang Danfeng, Li Min, Ye Ping, Ru Peng, Cheng Guoan. 2019&. Geochemical characteristics of andesites from the Majiahe Formation in the Beiling gold deposit and their geological significance. Acta Petrologica et Mineralogica, 38 (3): 287~302.
- Liu Chaohui, Liu Fulai. 2015&. The Mesoproterozoic rifting in the North China Craton: A case study for magmatism and sedimentation of the Zhaertai—Bayan Obo—Huade rift zone. Acta Petrologica Sinica, 31 (10): 3107~3128.
- Liu Xiaoyan, Cai Jianhui, Yan Guohan. 2011&. Lithogeochemistry and Geochronology of Xiong' er Group Yanyaozhai subvolcanics in the southern margin of the North China Craton and their geological significance. Acta Geologica Sinica, 85(7): 1134~1145.
- Marschall H R, Schumacher J C. 2012. Arc magmas sourced from mélange diapirs in subduction zones. Nature Geoscience, 5(12):

862~867.

- Pang Lanyin, Zhou Yanyan, Deng Xiaoqin, Zhao Junhong, Zhao Taiping. 2021. Petrogenesis and tectonic implications of the late Paleoproterozoic A-type rhyolites at the southwestern North China Craton. Lithos, 390~391; 106095.
- Pearce J A. 1982. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: Thorpe R S (ed.). Orogenic Andesites and Related Rocks. Chichester, England: John Wiley and Sons: 528~ 548.
- Peng Peng, Zhai Mingguo, Ernst R E, Guo Jinghui, Liu Fu, Hu Bo. 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China craton: The Xiong´er Volcanic Province and the North China dyke swarm. Lithos, 101(3~4): 260~280.
- Peng Peng, Liu Fu, Zhai Mingguo, Guo Jinghui. 2011#. Age of the Miyun dyke swarm: Constraints on the maximum depositional age of the Changcheng System. China Science Bulletin, 56: 2975 ~2980.
- Regelous M, Hofmann A W, Abouchami W, Galer S J G. 2003. Geochemistry of lavas from the emperor seamounts, and the geochemical evolution of Hawaiian magmatism from 85 to 42 Ma. Journal of Petrology, 44(1): 113~140.
- Rogers J J W, Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. Gondwana Research, 5(1): 5 ~ 22.
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction. Precambrian Research, 178(1~4): 149~167.
- Saunders A D, Storey M, Kent R W, Norry M J. 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: Storey BC, Alabaster T, Pankhurst RJ (eds.). Magmatism and the Causes of Continental Break-up. Geological Society, London, Special Publications, 68 (1): 41~60.
- Shi Jiangpeng, Yang Debin, Huo Tengfei, Yang Haotian, Xu Wenliang, Wang Feng. 2017&. The geochronology and Nd—Hf isotope compositions of A-type granites on the southern margin of North China Craton: Constraints on the Late Paleoproterozoic extensional events. Acta Petrologica Sinica, 33(10): 3042~3056.
- Stolz A J, Jochum K P, Spettel B, Hofmann A W. 1996. Fluid- and melt-related enrichment in the subarc mantle: Evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts. Geology, 24(7): 587~590.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313~345.
- Tan Cong, Lu Yuanzheng, Song Haonan, Lü Qiqi, Deng Shenghui, Wang Huajian, Su Ling. 2019&. Zircon U-Pb dating of the Gaoshanhe Formation tuff in the southwestern margin of the North China craton, and its geological significance. Acta Geologica Sinica, 93(5): 1113~1124.
- Wang Changming, Lu Yogjun, He Xinyu, Wang Qionghui and Zhang Jing. 2016. The Paleoproterozoic diorite dykes in the southern margin of the North China Craton: Insight into rift-related magmatism. Precambrian Research, 277: 26~46.
- Wang Wei, Gao Shanlin, Liu Xiaochun, Hu Jianmin, Zhao Yue, Wei Chunjing, Xiao Wenjiao, Guo Hu, Gong Wangbin. 2017. Prolonged anatexis of Paleoproterozoic metasedimentary basement: First evidence from the Yinchuan Basin and new constraints on the evolution of the Khondalite Belt, North China Craton. Precambrian Research, 302: 74~93.
- Wang Xingying, Qin Jiangfeng, Lai Shaocong, Long Xiaoping, Ju

Yinjuan, Zhang Zezhong and Zhu Renzhu. 2020. Paleoproterozoic A-type granite from the southwestern margin of the North China block: high temperature melting of tonalitic crust in extensional setting. International Geology Review, $62(5): 614 \sim 629$.

- Wang Yuejun, Zhao Guochun, Cawood P A, Fan Weiming, Peng Touping, Sun Linhua. 2008. Geochemistry of Paleoproterozoic (~ 1770 Ma) mafic dikes from the Trans-North China Orogen and tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 33(1~2): 61~77.
- Wei Ruihua, Gao Yongfeng, Hou Zengqian, Meng Xiangjin, Yang Zhusen. 2008&. The Eocene potassic volcanism in the Gangdese: Geochemical and Sr—Nd—Pb isotopic evidences for recycling of subducted sediments. Acta Petrologica Sinica, 24(2): 359~367.
- Wendlandt R F, Alther R, Neumann E R, Baldridge W S. 1995. Petrology, geochemistry, isotopes. In: Qlsen KH (ed.). Continental Rifts: Evolution, Structure, Tectonics. Amsterdam: Elsevier, 47~60.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20: 325~343.
- Wood D A. 1980. 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. Earth and Planetary Science Letters, 50(1): 11~30.
- Wu Jialin, Zhang Huafeng, Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Li Rongxi, Wang Haozheng, Zhao Lei, Jia Xiaoliang, Wang Luojuan, Hu Bo, Zhang Haidong. 2017. Paleoproterozoic high- pressure—hightemperature pelitic granulites from Datong in the North China Craton and their geological implications: Constraints from petrology and phase equilibrium modeling. Precambrian Research, 303: 727 ~ 748.
- Xiao Lingling, Clarke G, Liu Fulai, Wu Chunming. 2017. Discovery of mafic granulite in the Guandishan area of the Lüliang complex, North China Craton: Age and metamorphic evolution. Precambrian Research, 303: 604~625.
- Xu Chenghan, Sun Fengyue, Fan Xingzhu, Li Liang, Liu Jinlong, Yu Lu. 2020. Late Paleoproterozoic crustal evolution in the Daqingshan area: Evidences from adakitic and A-type granitoids in the Guyang Changshengqu goldfield, Khondalite Belt, North China Craton. Precambrian Research, 345: 105761.
- Xu Huan, Zhao Hui, Luo Jinhai, Cheng Jiaxiao, You Jia, Wang Shidi. 2014&. Paleoproterozoic Granite and Its Tectonic Significances in Southwestern Margin of North China Plate, Baojiashan Section in Longxian County. Geological Review, 60(6): 1284~1296.
- Xu Yonghang, Zhao Taiping, Peng Peng, Zhai Mingguo, Qi Liang, Luo Yan. 2007&. Geochemical characteristics and geological significance of the Paleoproterozoic volcanic rocks from the Xiaoliangling Formation in the Lüliang area, Shanxi Province. Acta Petrologica Sinica, 23(5): 1123~1132.
- Xue Shuo, Xu Yang, Ling Mingxing, Kang Qingqing, Jiang Xiaoyan, Sun Saijun, Wu Kai, Zhang Zejun, Luo Zebin, Liu Yulong, Sun Weidong. 2018. Geochemical constraints on genesis of Paleotroterozoic A-type granite in the south margin of North China Craton. Lithos, 304~307: 489~500.
- Yang Jinghui, Wu Fuyuan, Liu Xiaoming, Xie Liewen. 2005&. Zircon U-Pb ages and Hf isotopes and their geological significance of the Miyun rapakivi granites from Beijing, China. Acta Petrologica Sinica, 21(6): 1633~1644.
- Yang Qiongyan, Santosh M, Rajesh H. M, Tsunogae T. 2014. Late Paleoproterozoic charnockite suite within post-collisional setting from

the North China Craton: Petrology, geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopes. Lithos, 208~209: 34~52.

- Zhai Mingguo, Hu Bo, Zhao Taiping, Peng Peng, Meng Qingren. 2015. Late Paleoproterozoic— Neoproterozoic multi-rifting events in the North China Craton and their geological significance: A study advance and review. Tectonophysics, 662: 153~166.
- Zhang Chengli, Diwu Chunrong, Kröner A, Sun Yong, Luo Jinglan, Li Qiuli, Gou Longlong, Lin Hongbin, Wei Xinshan, Zhao Jiao. 2015. Archean—Paleoproterozoic crustal evolution of the Ordos Block in the North China Craton: Constraints from zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes for gneissic granitoids of the basement. Precambrian Research, 267: 121~136.
- Zhang Huafeng, Wang Haozheng, Santosh M, Zhai Mingguo. 2016. Zircon U-Pb ages of Paleoproterozoic mafic granulites from the Huai 'an terrane, North China Craton (NCC): Implications for timing of cratonization and crustal evolution history. Precambrian Research, 272: 244~263.
- Zhang Shuanhong, Liu Shuwen, Zhao Yue, Yang Jinhui, Song Biao, Liu Xiaoming. 2007. The 1. 75 ~ 1. 68Ga anorthosite—mangerite alkali granitoid—rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a Paleoproterozoic orogen. Precambrian Research, 155(3~4): 287~312.
- Zhang Yunqiang, Chen Haiyan, Li Xian, Wei Wentong, Zhang Zhenli, Xu Hongcai, Liu Zengxiao, Peng Qianpeng. 2014&. Geochemistry of the Mesoproterozoic diabase sills from Yanshan Mountain area in the northern part of North China plate. Geology in China, 41(2): 351~360.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, Li Sanzhong. 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited. Precambrian Research, 136(2): 177~202.
- Zhao Jiao, Zhang Chengli, Guo Xiaojun, Liu Xinyu. 2018. The Late-Paleoproterozoic I- and A-type granites in Lüliang Complex, North China Craton: New evidence on post-collisional extension of Trans-North China Orogen. Precambrian Research, 318: 70~88.
- Zhao Taiping, Zhou Meifu, Zhai Mingguo, Xia Bin. 2002. Paleoproterozoic rift-related volcanism of the Xiong' er Group, North China Craton: Implications for the breakup of Columbia. International Geology Review, 44(4): 336~351.
- Zhao Taiping, Zhai Mingguo, Xia Bin, Li Huimin, Zhang Yixing, Wan Yusheng. 2004 #. Zircon U-Pb SHRIMP dating for the volcanic rocks of the Xiong' er Group: Constraints on the initial formation age of the cover of the North China Craton. China Science Bulletin, 49: 2495~2502.
- Zhao Taiping, Xu Yonghang, Zhai Mingguo. 2007&. Petrogenesis and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong ´er Group in the southern part of the North China Craton: A review. Geological Journal of China Universities, 13(2): 191~206.
- Zhao Taiping, Zhou Meifu. 2009. Geochemical constraints on the tectonic setting of Paleoproterozoic A-type granites in the southern margin of the North China Craton. Journal of Asian Earth Sciences, 36(2~3): 183~195.
- Zhao Taiping, Chen Wen, Zhou Meifu. 2009. Geochemical and Nd—Hf isotopic constraints on the origin of the ~ 1. 74Ga Damiao anorthosite complex, North China Craton. Lithos, 113(3~4): 673 ~690.
- Zhao Zifu, Dai Liqun, Zheng Yongfei. 2013 #. Postcollisional mafic igneous rocks record crust—mantle interaction during continental deep subduction. China Science Bulletin, 58: 2310~2315.
- Zheng Yongfei, Chen Yixiang, Dai Liqun, Zhao Zifu. 2015 #. Developing plate tectonics theory from oceanic subduction zones to

collisional orogens. Science China: Earth Sciences, $58\colon 1045 \sim 1069$

Zindler A, Hart S. 1986. Chemical geodynamics. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 14: 493~571.

Geochemical characteristics of Mesoproterozoic basaltic andesite in southwestern margin of Ordos Block and its tectonic implication

GAO Shanlin¹⁾, LIU Shilin¹⁾, ZHANG Zhongpei²⁾

1) Petroleum Exploration and Production Branch of SINOPEC, Beijing, 100728;

2) Petroleum Exploration and Production Research Institute of SINOPEC, Beijing, 100083

Abstract: Southwestern margin of the Ordos Block in the Paleo-Mesoproterozoic is a part of the rifts of the southern margin of the North China Craton, previous studies mainly focus on the 1.85~1.75 Ga granites exposed in the research area, but later than 1.85 Ga intermediate-basic eruptive rock in the Proterozoic has not been reported. Basaltic andesite at the Tiemahe section is exposed in the Liupanshan faults zone in the southwestern margin of the Ordos Block with amygdaloid structure and porphyritic texture. The phenocrysts are mainly composed of plagioclase and small amount of mafic minerals. SHRIMP zircon U-Pb dating results show that the Tiemahe basaltic andesite was erupted in the early Mesoproterozoic (ca. 1740±14 Ma). Geochemically, the rock samples show low SiO₂, TiO₂, K₂O, and high Na₂O, FeO^T and Al₂O₃. and display LREE-enrichment patterns, with LREE/HREE ratios of 6.50~7.00, (La/Yb)_N of 5.62~7.14, and δ Eu of 0.69~0.91. In the spider diagrams, they are enriched in large ion lithophile elements (e.g., Ba, Th, U, K) and relatively depleted in Nb, Sr and Ti. The values of $({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})_i(0.70587 \sim 0.70934)$, $\varepsilon_{Nd}(t)(-6.9 \sim -4.8)$, Nb/Ta(6.6 ~ 8.3) and T_{DM}(2562 ~ -4.8)) 2730 Ma) suggest that the Tiemahe basaltic andesite was originated from enriched lithospheric mantle that had been metasomatized by subducted slab derived fluids, which may be related with late Paleoproterozoic orogeny in the western margin of the Ordos Block. This paper suggests that the Tiemahe volcanic rocks were generated by decompression melting under intracontinental extension, which reverify that the western Ordos Block was involved in tectonic processes of the intracontinental extension of the NCC in the Mesoproterozoic.

Keywords: southwestern Ordos Block; Tiemahe basaltic andesite; Mesoproterozoic; geochemistry characteristics; intracontinental extension

Acknowledgements: This paper was supported by Special Scientific Project "Petroleum accumulation systems and exploration evaluation of medium to large marine carbonate fields in Tarim and Ordos basin (No. 2017ZX05005-002) ". Professor ZHAO Taiping and YAN Quanren gave helpful suggestions in manuscript revision, I would express my heartfelt thanks to all the people who helped me for the paper.

First author: GAO Shanlin, male, born in 1966, doctor, professor, maily engaged in analysis of petroliferous basins; Email: gaoshanlin@sinopec. com

 Manuscript received on: 2022-03-07; Accepted on: 2022-08-10; Network published on: 2022-08-20

 Doi: 10.16509/j.georeview. 2022. 08.025
 Edited by: ZHANG Yuxu