

准噶尔盆地西缘下侏罗统 玄武岩地球化学特征及其地质意义

高山林

(中国石化 油田勘探开发事业部, 北京 100728)

摘要:对准噶尔盆地西缘下侏罗统火山岩的地球化学特征进行了分析, 主量、微量和稀土元素数据表明岩石为碱性玄武岩, 富集轻稀土、大离子亲石元素和高场强元素, 微量元素具有洋岛玄武岩(OIB)配分模式。玄武岩岩浆来源于未受明显地壳混染的亏损地幔, 具有与地幔柱活动有关的大陆板内裂谷火山岩的特征。西北地区吐哈、敦煌等盆地发育与西准噶尔具有类似成因的侏罗系玄武岩, 其形成与区域性软流圈界面上升和岩石圈的减薄有关, 为侏罗纪早中期伸展盆地的形成提供了动力学条件。西北地区侏罗纪盆地伸展作用具有西早东晚、南早北晚的特征, 是盆地烃源岩分布层位、成藏组合差异的基础原因之一。

关键词:碱性玄武岩; 地球化学; 伸展作用; 下侏罗统; 准噶尔盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Geochemical characteristics and geologic significance of the Lower Jurassic basalt on the western margin of Junggar Basin

GAO Shanlin

(Exploration and Development Affairs Department, SINOPEC, Beijing 100728, China)

Abstract: The geochemical characteristics of the Lower Jurassic volcanic rocks on the western margin of the Junggar Basin were analyzed. The main, trace and rare earth element data indicate that the rocks are alkaline basalts, enriched with light rare earth elements, large ion lithophile elements and high field strength elements. The trace elements show an ocean island basalt (OIB) distribution model. The basalt magma came from the depleted mantle that was not obviously contaminated by crust, and has the characteristics of continental intraplate rift volcanic rocks related to mantle plume activity. The Tubo-Hami, Dunhuang and other basins in the northwest developed Jurassic basalt of similar genesis with the western Junggar Basin. The basalt formation was related to the rising of regional asthenosphere interface and the thinning of lithosphere, providing dynamic conditions for the formation of extension basin during the early and middle Jurassic. The extension of the Jurassic basin took place earlier in the west and the south, which explained the difference of source rock distribution and hydrocarbon accumulation in the basin.

Key words: alkaline basalt; geochemistry; stretching; Early Jurassic; Junggar Basin

准噶尔盆地是中国西北地区大型的含油气盆地, 侏罗系是主要的含油气层系。目前对准噶尔侏罗纪原型盆地类型的观点主要有: 古造山带复活期前陆拗陷继承发展盆地^[1]、张性盆地^[2-3]、早—中侏罗世克拉通内盆地^[4]及陆内拗陷盆地^[5]等观点, 争议颇多。

准噶尔盆地西缘侏罗系火山岩早在 20 世纪 60 年代地质调查中就已发现, 地点为 45°32'22"N, 84°42'32"E 附近(图 1), 主要对火山岩的分布范

围、时代、宏观特征进行了描述^[6]。依据火山岩地层接触关系和 Ar-Ar 法测年认为, 其形成于早侏罗世中晚期普林斯巴—托阿尔期, 但有关其地球化学特征及盆地构造演化方面的研究鲜见报道。本文通过对准噶尔盆地西缘的侏罗系碱性玄武岩的地球化学特征分析, 结合野外及石油地球物理解释成果等资料, 进一步证实了侏罗纪早期准噶尔原型盆地为伸展性盆地, 并结合西北地区其他盆地的侏罗系火山岩资料, 对其区域构造和石油地

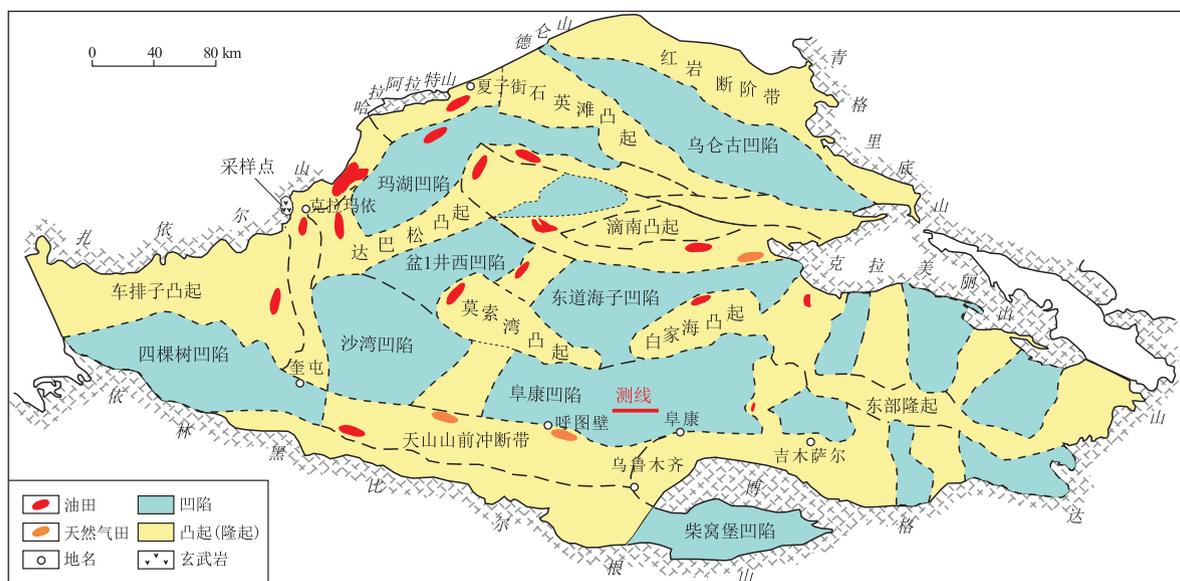


图1 准噶尔盆地构造单元划分及采样位置

Fig.1 Tectonic units and sampling position in Junggar Basin

质意义进行了探讨。

1 玄武岩的野外特征和岩石学特征

准噶尔盆地西缘火山岩底部为下侏罗统八道湾组砂砾岩,上覆为中侏罗统三工河组灰绿色粗—细粉砂岩;岩石以灰、灰黄色、紫灰色、黄褐色为主,肉眼观察具杏仁状构造,“杏仁体”大小相差悬殊,从1~10 cm 均有,一般2~5 cm,最大可达11 cm,局部含量可高达20%,并具有一定的定向排列,充填方解石和玉髓。

该火山岩镜下定名为杏仁状橄榄玄武岩,具有杏仁状构造和间隐、间粒结构。岩石中拉长石含量最高可达50%,半自形板条状,大小0.08~0.1 mm,发育聚片双晶,具环带构造,无定向杂乱分布;含钛普通辉石25%,呈淡紫色细柱状、粒状,大小0.08~0.1 mm,较均匀分布于斜长石格架间。基性玻璃质含量18%,分布于斜长石间隙中;蚀变橄榄石5%,粒柱状,0.1~0.7 mm,部分被皂石、伊丁石交代,稀疏分布于斜长石格架间。少量钛铁矿,呈细长板片状,稀疏分布。

2 地球化学特征

西准噶尔玄武岩有一定程度的风化,杏仁体均有一定程度的蚀变,发生不同程度的绿泥石化,为此从所采的15个样品中选取了8个较新鲜、且含杏仁体少的样品进行了岩石化学成分测试。测试工作在中国科学院地质与地球物理研究所完成,其中主量元素采用荧光光谱法测定,分析误差(相对于

标准值)一般小于1%,微量元素和稀土元素由ICP-MS分析测试,分析误差小于5%。从分析结果来看,烧失量相对高,因此本文主要以不活动元素含量、比值及其相互关系来讨论岩石的类型、成因。

2.1 主量元素

西准噶尔侏罗系火山岩8个样品的主量元素含量变化不大(表1), $w(\text{SiO}_2)$ 在44.95%~51.8%, $w(\text{TiO}_2)$ 为2.25%~2.57%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为13.31%~14.38%;里特曼指数(σ)为2.66~13.33,平均6.02;高钠, Na_2O 含量高于 K_2O , $w(\text{Na}_2\text{O})/w(\text{K}_2\text{O})$ 比值为1.91~3.34,平均2.36,大部分氧化物变化范围较窄。在 $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{TiO}_2$ 图解中,所有样品均落入了碱性玄武岩区域(图2)^[7]。 MgO 、 $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 TiO_2 等主量元素与 SiO_2 变化关系不明显,暗示该岩石结晶分异作用不强。岩石与正常的大洋中脊玄武岩相比明显富铁,同时 P_2O_5 (0.49%~0.55%)和 TiO_2 (2.25%~2.57%)的含量高,与俯冲消减作用有关的低钛玄武质岩石明显不同;具有相对低的 SiO_2 、相对高的 Na_2O ,同时 $w(\text{P}_2\text{O}_5)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 低,变化范围很窄(0.036~0.041),表明该玄武岩浆应是部分熔融的产物^[8]。

2.2 微量元素和稀土元素

西准噶尔侏罗系玄武岩的稀土元素含量差别不大(表2),稀土总量中等,轻稀土元素富集,重稀土元素亏损,轻重稀土元素分异明显,LREE为 $(84.27\sim 95.77)\times 10^{-6}$,HREE为 $(15.28\sim 17.08)\times 10^{-6}$,LREE/HREE为5.42~5.71; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为7.55~9.0, $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ 为6.23~7.51,稀土元素分馏明显;

表 1 西准噶尔侏罗系玄武岩主量元素分析
Table 1 Major elements in Jurassic basalt, western Junggar Basin %

主量元素	样品							
	Tgx-1	Tgx-2	Tgx-3	Tgx-4	Tgx-5	Tgx-6	Tgx-7	Tgx-8
SiO ₂	45.74	50.19	48.37	51.80	47.82	50.69	48.31	44.95
TiO ₂	2.25	2.34	2.28	2.40	2.43	2.41	2.57	2.42
Al ₂ O ₃	13.31	13.80	13.52	14.34	14.03	14.19	14.38	13.32
FeO	12.35	6.37	9.63	3.90	8.92	6.08	4.00	11.60
Fe ₂ O ₃	5.54	6.78	5.99	7.03	5.83	5.80	10.48	7.00
MnO	0.21	0.14	0.21	0.14	0.23	0.13	0.19	0.26
MgO	3.00	4.76	3.51	4.51	3.02	5.62	2.71	2.78
CaO	7.33	7.09	7.48	7.27	7.83	7.69	8.03	7.60
Na ₂ O	3.50	3.76	3.54	3.60	3.61	3.48	3.66	3.35
K ₂ O	1.60	1.66	1.45	1.68	1.37	1.04	1.84	1.75
P ₂ O ₅	0.52	0.51	0.49	0.52	0.55	0.52	0.53	0.55
LOI	6.17	3.48	4.67	3.06	5.06	2.77	3.55	5.55
合计	101.52	100.88	101.14	100.25	100.7	100.42	100.25	101.13

表 2 西准噶尔侏罗系玄武岩的微量、稀土元素分析结果
Table 2 Trace and rare earth element composition
of Jurassic basalt, western Junggar Basin ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)

微量、稀土元素	样品							
	Tgx-1	Tgx-2	Tgx-3	Tgx-4	Tgx-5	Tgx-6	Tgx-7	Tgx-8
Cr	132.7	126.9	117.0	131.5	132.6	136.8	129.0	120.4
Co	54.0	35.4	35.7	44.4	32.6	35.8	58.0	48.0
Ni	166.1	79.9	90.3	109.6	60.1	87.8	162.5	108.9
Cu	30.2	33.1	33.3	36.6	35.1	34.5	39.3	37.4
Ga	20.8	20.2	19.5	21.2	20.8	21.1	21.6	20.4
Rb	27.0	28.2	19.8	28.8	13.8	11.9	23.3	21.7
Sr	483	458	481	505	517	585	590	523
Y	19.1	18.9	18.5	20.0	20.6	20.4	21.5	21.9
Zr	163.3	164.9	158.0	170.2	172.3	181.1	179.5	179.2
Nb	35.4	35.1	34.0	37.2	36.9	39.3	41.1	40.1
Ba	372	310	370	328	381	406	399	394
Hf	4.18	4.26	4.38	4.73	4.43	4.56	4.98	4.66
Ta	2.08	2.13	2.00	2.18	2.11	2.24	2.39	2.25
Pb	1.66	1.61	1.74	1.81	1.88	1.99	2.12	2.02
Th	2.232	2.25	2.345	2.491	2.42	2.494	2.741	2.692
U	0.614	0.539	0.552	0.619	0.580	0.629	0.732	0.819
La	16.12	16.44	16.48	18.29	18.50	17.60	17.78	17.29
Ce	34.44	35.20	35.52	39.20	39.70	37.96	38.53	36.89
Pr	4.64	4.71	4.78	5.24	5.25	5.12	5.17	5.03
Nd	21.48	21.57	21.40	24.18	23.87	22.94	23.63	22.38
Sm	5.83	5.95	5.67	6.35	6.47	6.14	5.97	5.66
Eu	1.77	1.82	1.78	1.93	1.98	1.95	1.89	1.83
Gd	5.88	5.99	5.86	6.38	6.55	6.28	6.20	6.01
Tb	0.818	0.844	0.850	0.915	0.914	0.862	0.911	0.880
Dy	4.24	4.39	4.22	4.67	4.70	4.52	4.61	4.42
Ho	0.750	0.807	0.722	0.812	0.831	0.804	0.833	0.873
Er	1.78	1.86	1.90	1.97	2.06	1.88	2.10	2.11
Tm	0.225	0.246	0.237	0.245	0.269	0.252	0.256	0.273
Yb	1.38	1.42	1.36	1.48	1.53	1.40	1.52	1.64
Lu	0.203	0.193	0.191	0.216	0.228	0.201	0.224	0.226
ΣREE	99.55	101.44	100.96	111.88	112.85	107.91	109.62	105.50
δEu	0.91	0.92	0.94	0.92	0.92	0.95	0.94	0.95

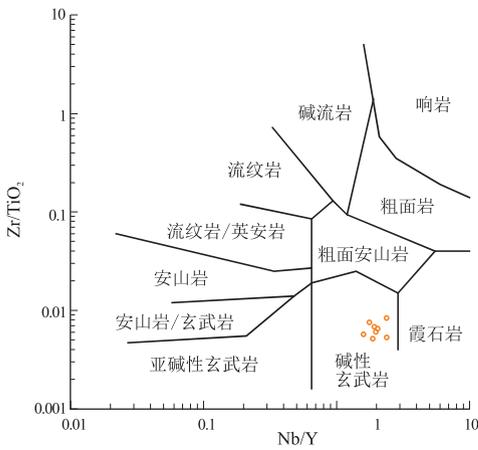


图2 西准噶尔地区侏罗系玄武岩 Nb/Y-Zr/TiO₂图解
据参考文献[7]修改。

Fig.2 Nb/Y-Zr/TiO₂TAS diagram of Jurassic basalt, western Junggar Basin

(La/Sm)_N 为 1.78~1.97, (Gd/Yb)_N 为 3.03~3.71, 表明了重稀土的分馏作用高于轻稀土的分馏作用; δEu 在 0.91~0.95, 钕为弱的负异常, 反映存在不明显的斜长石的分离结晶。

稀土配分显示为强烈右倾的轻稀土富集型模式(图3), 这种模式多出现于大陆拉斑玄武岩和洋岛玄武岩(OIB)中, 与洋中脊玄武岩(MORB)相比, 大陆溢流玄武岩几乎不出现 REE 平坦或亏损模式^[9]。在 La/Sm-La 图解中, 玄武岩大部分样品表现为正相关性, 少部分表现为明显分离结晶作用, 说明岩浆的形成以部分熔融为主, 但也存在一定的分离结晶作用。

该玄武岩相对富集 Sr、Rb、Ba、Th、Ta、Nb、Ce, 亏损 Y、Lu 和 Yb 等元素(图4), 与典型的大陆溢

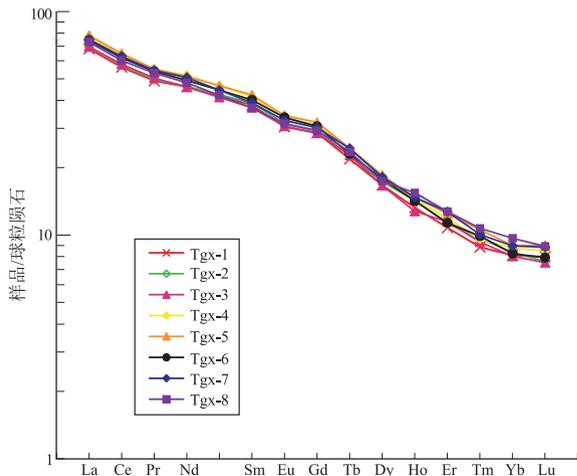


图3 西准噶尔侏罗系玄武岩稀土配分模式
球粒陨石标准化值据参考文献[10]。

Fig.3 Chondrite normalized REE distribution pattern of Jurassic basalt, western Junggar Basin

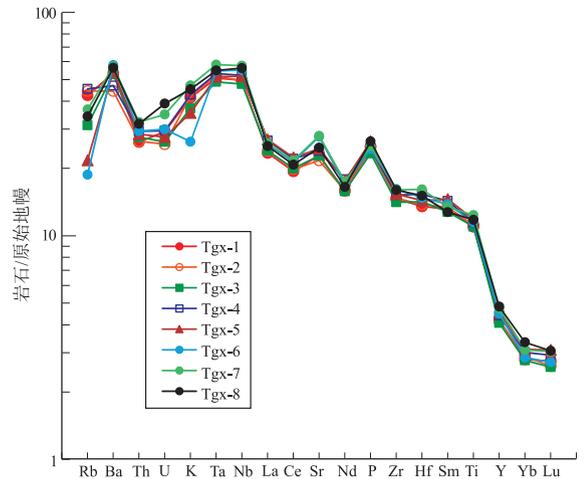


图4 西准噶尔侏罗系玄武岩原始地幔
标准化的微量元素蛛网图

原始地幔标准化值据参考文献[13]。

Fig.4 Primitive mantle-normalized trace element spider diagram of Jurassic basalt, western Junggar Basin

流玄武岩富集除 Y、Yb 等之外的所有不相容元素的配分模式类似。玄武岩表现出明显的 Sr 亏损, 为低压斜长石结晶分离作用的结果。富集高场强元素 Nb、Ta, 明显不同于俯冲带岛弧型玄武岩的“TNT”特征。Ba/La = 17.94~23.05, 低于岛弧火山岩 Ba/La 比值(>30)^[11]; La/Nb 为 0.43~0.51, 与岛弧玄武岩 La/Nb>1 具有明显差别。岛弧玄武岩 Zr 含量小于 130×10⁻⁶, Zr/Y 比值小于 4, 而大陆玄武岩, 不管是否遭受地壳或岩石圈混染, 它们的 Zr 含量均大于 70×10⁻⁶, Zr/Y 比值均大于 3^[12]。本区玄武岩 Zr 含量为 (158~179.5)×10⁻⁶, Zr/Y 为 8.17~8.88, 显示了大陆钙碱性玄武岩的特征; 在 Hf-Th-Ta 图解(图5)和 Zr/Y-Zr 图解中均显示

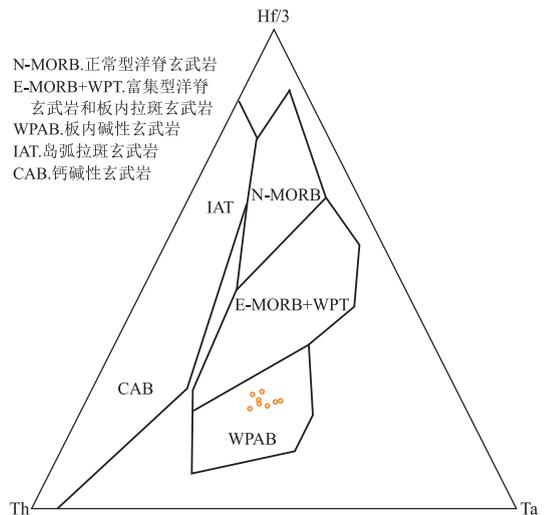


图5 西准噶尔侏罗系玄武岩 Hf-Th-Ta 图解^[15]
Fig.5 Hf-Th-Ta diagram of Jurassic basalt, western Junggar Basin

板内玄武岩的特征。

3 玄武岩岩浆源区地球化学性质

大洋玄武岩的研究发现 MORB 和 OIB 的 Nb/U 值高而均一 (47 ± 10)^[13-15], 而大陆地壳的 Nb/U 值通常很低 (约 9.7)^[16]。本区玄武岩的 Nb 值高为 35.1~41.1 $\mu\text{g/g}$, 而 U 的含量均很低, 多小于 0.8, 表明没有显著的地壳混染。一般来说, 岩浆同化地壳的过程中 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 的值和不相容元素 (Sr, Ba) 会明显地升高^[16]。本区的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值与 Sr, Ba 等不相容元素含量无明显的正相关关系, 同时本区较高的 Nb 含量和较低的 La/Nb 值 (小于 0.55) 也表明地壳物质的加入并不显著。分离结晶作用可导致岩浆中主要氧化物的变化, 但大离子亲石元素的比值一般不受其影响。如本区玄武岩的 Ce/Pb 在 18.2~21.9 之间, 远远大于下地壳岩石的 Ce/Pb 比值 3.3, 与 MORB 的 Ce/Pb 值 (25 ± 5) 接近, 也暗示着该玄武岩浆受地壳混染程度很低, 没有明显的陆壳混染现象。Ce/Y-Th/Nb 图解也表明其成分更接近富集型地幔低程度部分熔融产生的母岩浆, 而无明显的后期混染。

西准噶尔玄武岩 Nb/Ta 比值为 16.5~17.8, 平均 17.2, Zr/Hf 比值为 36.01~39.1, 平均 37.87, 分别与原始地幔 (Nb/Ta = 17.5 ± 2.0 ; Zr/Hf = 36.27) 相近并略高于原始地幔^[17], 远大于大陆地壳的平均值 (Nb/Ta = 12~13; Zr/Hf = 11)。Zr/Nb-La/Nb 和 Ba/La-Ba/Nb 比值图上, 火山岩基本都落在具有 OIB 特征区域内及其附近, 表明以亏损地幔为主。Th/Ta = 1.06~1.19, Ta/Hf = 0.46~0.5; Th/Hf-Ta/Hf 判别图上 (图 6) 投点落在地幔热柱玄武岩区^[18]。非地幔柱成因的玄武岩 Nb 含量小于 10 $\mu\text{g/g}$, 而与地幔柱有关的玄武岩含量总是大于 10 $\mu\text{g/g}$ ^[19], 本区的玄武岩 Nb 含量远远大于 10 $\mu\text{g/g}$, 表明该玄武岩的形成可能与地幔柱活动有关。玄武岩中较低的 Ce/Yb 比值说明有较高的熔融程度或尖晶石为主要残留相 (薄岩石圈), 而较高的 Ce/Yb 比值说明有较低的熔融程度或石榴石为主要残留相 (厚岩石圈)。本区玄武岩的 Ce/Yb 比值较高, 为 24.7~27.1, 说明玄武岩形成的深度较大, 可能为石榴石稳定区。

4 玄武岩形成的地球动力学环境与地质意义

地幔柱假说较好地解释了夏威夷群岛等岛链的成因, 对于大陆玄武岩的地幔柱成因与动力学研

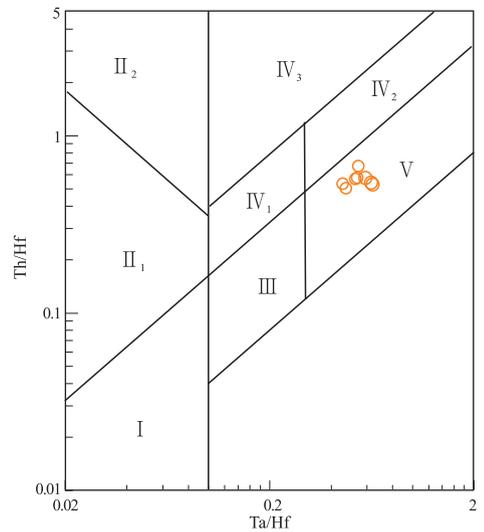


图 6 西准噶尔侏罗系玄武岩 Th/Hf-Ta/Hf 图解^[18]

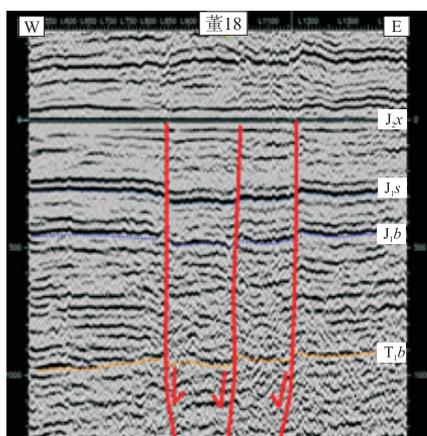
I. 板块发散边缘; II 1. 大洋岛弧玄武岩区; II 2. 陆源岛弧及火山弧玄武岩区; III. 大洋板内洋岛、海山玄武岩及 T-MORB, E-MORB; IV 1. 陆内裂谷及陆源裂谷拉斑玄武岩区; IV 2. 陆内裂谷碱性玄武岩; IV 3. 大陆拉张带 (初始裂谷) 玄武岩; V. 地幔热柱玄武岩

Fig. 6 Th/Hf-Ta/Hf diagram of Jurassic basalt, western Junggar Basin

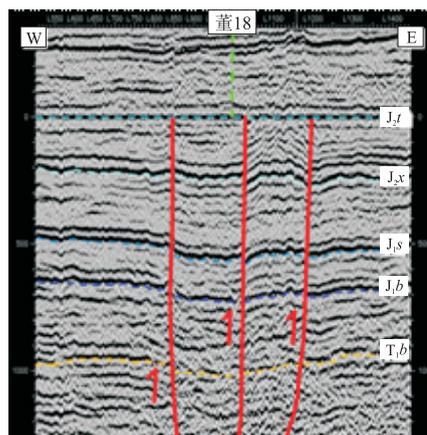
究近年来也取得了长足的进展^[17,19-20]。本区玄武岩微量元素高场强元素比值接近原始地幔, 具有 OIB 型配分和地幔柱的成因环境, 但并非直接由原始地幔岩浆直接形成, 而是软流圈地幔上涌导致深部部分熔融的结果。

准噶尔盆地侏罗系一直被认为是拗陷型盆地, 近年来随着盆地腹部勘探目的层向侏罗系及其以下转变, 精细地震解释发现盆地内中下侏罗统地层中存在着众多正断层, 形成大小不同的弱伸展断陷, 控制着侏罗系烃源岩的发育。在准噶尔盆地腹部及西北缘地区受基底性质、先期区域断裂的影响, 侏罗系伸展断层断距不一、倾角大小不同, 活动时间可从早侏罗世至中侏罗统三工河组沉积期, 在盆地边缘或缓或陡, 在盆地腹部如莫索湾地区、夏盐凸起、阜东斜坡区多数倾角较大甚至近乎直立 (图 7), 有利于沟通二叠系烃源岩, 促成了油气藏纵向多层系叠置、平面上多类型成带分布, 已为莫索湾、石西油田、北三台油田所证实。

西北地区, 无论是大型的塔里木、准噶尔、柴达木盆地, 还是小型的敦煌、潮水盆地等, 野外和井下的侏罗系火山岩地球化学分析均表明存在着早中侏罗世同沉积伸展作用, 如克拉玛依市以东的几个钻孔发现侏罗系火山岩, 其同位素年龄 170~190 Ma^[6]; 安西—敦煌地区托格、多坝沟和芦苇沟等地发育中侏罗统碱性玄武岩^[21], 潮水盆地侏罗系橄榄玄武岩、柴达木盆地侏罗系辉绿岩^[22]、东昆



a. 中侏罗统三工河组顶拉平, 早侏罗世到中侏罗世早期同沉积正断层



b. 中侏罗统头屯河组顶拉平, 中侏罗世晚期断层性质发生反转, 为压扭性断层

图7 准噶尔盆地阜东斜坡区过董18井三维层拉平地震剖面示断层性质变化
测线位置见图1。

Fig.7 Fault characteristics showed by 3D seismic profile crossing well Dong 18, Fudong Slope, Junggar Basin

仑地区发育同位素年龄为 (193 ± 0.9) Ma (U-Pb 锆石) 的基性岩墙群^[23] 及双峰式火山岩^[24] 等, 火山岩的分布大多位于盆地边缘或腹部大型基底断裂的交会处, 地球化学特征与大陆裂谷玄武岩相似, 为张性盆地的产物。火山岩时代和地震解释表明, 吐哈、准噶尔盆地及东昆仑山间盆地早侏罗世 (170~190 Ma) 伸展作用较为明显, 而北山地区在中侏罗世 (175~165 Ma) 较为强烈, 总体上具有西早东晚、南早北晚的趋势, 也造就了盆地烃源岩分布层位、成藏组合差异的基础。

早、中侏罗世, 区域性的构造背景决定了西北地区板内伸展构造环境。班公湖—怒江洋的俯冲发生在早、中侏罗世, 东北缘的蒙古—鄂霍茨克洋开始向西伯利亚大陆方向俯冲, 俯冲作用诱发了地幔柱的升降活动, 引起地幔岩浆的底辟作用, 导致软流圈界面的上升和岩石圈减薄, 在大型断裂交会部位, 首先形成地幔热点和岩浆上升以充填因拉张

而减薄的空间, 形成强烈的盆地沉降区, 也为盆地的侏罗系烃源岩发育提供了动力学条件。在准噶尔盆地南部、吐哈盆地、敦煌盆地、潮水盆地和雅布赖盆地等均已发现了来自于侏罗系烃源岩的油气, 在白垩系和第三系地层覆盖区, 尤其是中小型盆地残留凹陷中可以发育岩性或构造—岩性复合原生油气藏 (如吐哈盆地中北部、雅布赖盆地中部、柴达木盆地北缘等), 在盆缘带油气沿不整合面运移形成的白垩系和第三系次生地层岩性油气藏也是重要的勘探领域 (如准噶尔盆地四棵树凹陷北部、柴北缘第三系)。

5 结论

(1) 西准噶尔地区中下侏罗统玄武岩为碱性橄榄玄武岩, 其地球化学研究表明, 玄武岩形成于大陆板内伸展构造背景, 岩石稀土总量高, 轻稀土强烈富集, 富集大离子亲石元素和高场强元素, 具有 OIB 型微量元素配分模式, 源于较为均一的亏损型地幔源区。

(2) 侏罗系裂谷型玄武岩在西北地区众多盆地中均有发育, 主要位于大型的断裂交会处和深大断裂带, 可能受区域性软流圈界面的上升和岩石圈的减薄所控制, 为盆地伸展作用提供了动力学条件。西北地区盆地伸展作用具有西早东晚、南早北晚的趋势, 伸展盆地结构和发育时期决定了侏罗系良好烃源岩的空间分布, 为以侏罗系为源岩的不同类型油气藏形成奠定了良好的物质基础。

参考文献:

- [1] 马小伟, 朱传真, 林玉祥, 等. 准噶尔盆地温压系统演化与油气远源成藏[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 467-476.
MA Xiaowei, ZHU Chuanzhen, LIN Yuxiang, et al. Evolution of the temperature-pressure system and far-source hydrocarbon accumulation in Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(4): 467-476.
- [2] 刘和甫, 汪泽成, 熊保贤, 等. 中国中西部中、新生代前陆盆地与挤压造山带耦合分析[J]. 地质学前沿, 2000, 7(3): 55-72.
LIU Hefu, WANG Zecheng, XIONG Baoxian, et al. Coupling analysis of Mesozoic-Cenozoic foreland basin and mountain system in central and western China [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 55-72.
- [3] 李忠权, 陈更生, 张寿庭. 新疆准噶尔盆地南缘拉张伸展动力学环境的探讨[J]. 高校地质学报, 1998, 4(1): 73-78.
LI Zhongquan, CHEN Gengsheng, ZHANG Shouting. Discussion on the extensional dynamic setting in the south border of Junggar Basin, Xinjiang, China [J]. Geological Journal of China Universities, 1998, 4(1): 73-78.
- [4] 蔡忠贤, 陈发景, 贾振远. 准噶尔盆地的类型和构造演化[J]. 地

- 学前缘,2000,7(4):431-440.
CAI Zhongxian, CHEN Fajing, JIA Zhenyuan. Types and tectonic evolution of Junger Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(4):431-440.
- [5] 石好果. 准噶尔盆地腹部阜康深凹带侏罗系成藏规律[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(2):238-246.
SHI Haoguo. Jurassic reservoir development in Fukang Deep Sag, Central Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2017, 39(2):238-246.
- [6] 中国科学院地学部, 新疆石油管理局. 准噶尔盆地形成演化与油气形成[M]. 北京: 科学出版社, 1989:29-30.
Department of Geology of Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Petroleum Administration. Evolution and hydrocarbon formation in Junggar Basin [M]. Beijing: Science Press, 1989:29-30.
- [7] WINCHESTER J A, FLOYD P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 1997, 20:325-343.
- [8] 王岳军, 廖超林, 范蔚茗, 等. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义[J]. *地球化学*, 2004, 33(2):109-117.
WANG Yuejun, LIAO Chaolin, FAN Weiming, et al. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi Province and its tectonic implications [J]. *Geochimica*, 2004, 33(2):109-117.
- [9] 董云鹏, 周鼎武, 张国伟, 等. 秦岭造山带南缘早古生代基性火山岩地球化学特征及其大地构造意义[J]. *地球化学*, 1998, 27(5):432-441.
DONG Yunpeng, ZHOU Dingwu, ZHANG Guowei, et al. Geochemistry of the Caledonian basin volcanic rocks in the south margin of Qinling Orogenic Belt and their tectonic implications [J]. *Geochimica*, 1998, 27(5):432-441.
- [10] MASUDA A, NAKAMURA N, TANAKA T. Fine structures of mutually normalized rare-earth patterns of chondrites [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37(2):239-248.
- [11] AJAJI T, WEIS D, GIRET A, et al. Coeval potassic and sodic calc-alkaline series in the post-collisional Hercynian Tanncherfi intrusive complex, northeastern Morocco: geochemical, isotopic and geochronological evidence [J]. *Lithos*, 1998, 45(1/4):371-393.
- [12] 李昌年. 火成岩微量元素岩石学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992:85-113.
LI Changnian. Trace element petrology of igneous rocks [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992:85-113.
- [13] SUN S S, MC DONOUGH 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.
- [14] HOFMANN A W. Chemical differentiation of the earth; the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1988, 90(3):297-314.
- [15] 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 and Planetary Science Letters*, 1980, 50(1):11-30.
- [16] 吴昌志, 顾连兴, 任作伟, 等. 辽河盆地沙三期火山—侵入岩地球化学与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3):545-556.
WU Changzhi, GU Lianxing, REN Zuowei, et al. Geochemistry and petrogenesis of Eocene volcanic-intrusive rocks in Liaohé Basin, northeastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(3):545-556.
- [17] 贾大成, 丘学林, 胡瑞忠, 等. 北部湾玄武岩地幔源区性质的地球化学示踪及其构造环境[J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(2):30-39.
JIA Dacheng, QIU Xuelin, HU Ruizhong, et al. Geochemical nature of mantle reservoirs and tectonic setting of basalts in Beibu Gulf and its adjacent region [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(2):30-39.
- [18] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3):413-421.
WANG Yunliang, ZHANG Chengjiang, XIU Shuzhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3):413-421.
- [19] 王登红, 李建康, 刘峰, 等. 地幔柱研究中几个问题的探讨及其找矿意义[J]. *地球学报*, 2004, 25(5):489-494.
WANG Denghong, LI Jiankang, LIU Feng, et al. Some problems related to mantle plume and their significance in ore prospecting [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(5):489-494.
- [20] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 云南金平晚二叠纪玄武岩特征及其与峨眉山幔柱关系: 地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2003, 19(1):38-48.
XIAO Long, XU Yigang, MEI Houjun, et al. Late Permian flood basalts at Jinping area and its relation to Emei mantle plume: geochemical evidences [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19(1):38-48.
- [21] 张志诚, 郭召杰, 韩作振. 敦煌盆地中侏罗世火山岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(1):72-79.
ZHANG Zhicheng, GUO Zhaojie, HAN Zuozhen. Geochemistry and geological significance of the Mid Jurassic volcanic rocks in Dunhuang Basin [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 1998, 34(1):72-79.
- [22] 崔俊, 陈登钱, 姚熙海. 柴达木盆地冷湖地区侏罗纪火山活动浅析[J]. *青海石油*, 2004, 22(1):17-20.
CUI Jun, CHEN Dengqian, YAO Xihai. A brief analysis of Jurassic volcanic activities in Lenghu area of Qaidam [J]. *Qinghai Petroleum*, 2004, 22(1):17-20.
- [23] 李荣社, 杨永成, 孟勇. 青藏高原 1:25 万区域地质调查主要成果和进展综述(北区)[J]. *地质通报*, 2004, 23(5-6):421-426.
LI Rongshe, YANG Yongcheng, MENG Yong. Main results and progress in 1:250 000 regional geological survey of the northern Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Geological Bulletin of China*, 2004, 23(5-6):421-426.
- [24] 朱云海, 朱耀生, 林启祥, 等. 东昆仑造山带海德拉乌拉一带早侏罗世火山岩特征及其构造意义[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2003, 28(6):653-659.
ZHU Yunhai, ZHU Yaosheng, LIN Qixiang, et al. Characteristics of Early Jurassic volcanic rocks and their tectonic significance in Haidewula, East Kunlun Orogenic Belt, Qinghai Province [J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2003, 28(6):653-659.