

陈家富, 马旭, 李超, 等. 西准噶尔谢米斯台山西北段中志留世火山岩地球化学与 Sr - Nd - Os 同位素特征及其地质意义[J]. 岩矿测试, 2017, 36(3): 318 - 325.

CHEN Jia-fu, MA Xu, LI Chao, et al. Geochemical and Sr-Nd-Os Isotopic Characteristics of Middle Silurian Volcanic Rocks in Northwest of the Xiemisitai Mountains, West Junggar and Its Tectonic Implications[J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(3): 318 - 325. [DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201704060051]

## 西准噶尔谢米斯台山西北段中志留世火山岩地球化学与 Sr - Nd - Os 同位素特征及其地质意义

陈家富<sup>1,2</sup>, 马旭<sup>1</sup>, 李超<sup>3</sup>, 屈文俊<sup>3</sup>, 都厚远<sup>1</sup>, 赵然<sup>1</sup>, 韩宝福<sup>2</sup>

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;

3. 中国地质科学院 Re - Os 同位素重点实验室, 北京 100037)

**摘要:** 西准噶尔谢米斯台山火山岩近期报道形成于志留纪而非之前认为的中泥盆世, 但有关中志留世火山岩特征及构造意义研究较弱。本文对西准噶尔谢米斯台山西北段乌兰浩特中志留世玄武岩、玄武安山岩样品进行了系统的地球化学主量、微量元素与 Sr - Nd - Os 同位素特征分析。火山岩样品表现出高 MgO (5.15% ~ 7.81%)、镁值(56.0 ~ 60.7)和低 CaO(4.56% ~ 5.09%)、 $FeO_T/MgO$ (1.15 ~ 1.40)的特征, 属于高镁火山岩类。玄武岩的  $\epsilon Nd(t)$  值为 +2.65,  $^{87}Sr/^{86}Sr$  和  $^{187}Os/^{188}Os$  初始比值分别为 0.70439 和 0.4901。略显富集的同位素比值与高 Th/Yb 值(2.2 ~ 2.7)、低 Ba/La 值(17.4 ~ 33.4)表明其可能是受洋底沉积物熔体交代地幔部分熔融的产物, 并遭受了一定程度地壳混染。火山岩样品为钙碱性, 具有轻稀土和大离子亲石元素富集、Nb 和 Ta 亏损等弧岩浆特征, 推测乌兰浩特中志留世火山岩形成于与准噶尔洋板片由南向北俯冲有关的弧后环境。

**关键词:** 中志留世; 火山岩; Sr - Nd - Os 同位素; 弧后; 西准噶尔

**中图分类号:** P597.3; P588.14 **文献标识码:** A

虽然有关西准噶尔北部中古生代构造 - 岩浆演化研究取得了若干重要进展, 例如, 锆石 U - Pb 年代学研究表明谢米斯台地区火山岩主要形成于志留纪<sup>[1-5]</sup> 而非之前认为的中泥盆世, 地球化学研究表明早志留世岩浆活动具有典型的弧岩浆特征<sup>[4]</sup>, 而晚志留世发育 A 型花岗岩为代表的碱性岩浆<sup>[1]</sup>, 代表俯冲<sup>[3]</sup> 或后碰撞环境<sup>[5]</sup>, 但对于该区中志留世岩浆性质与构造背景仍缺乏必要讨论, 导致对于中亚造山带西南部中古生代增生造山过程认识仍不够系统、完整。

另外, 由于尚没有在西准噶尔地区发现古老的前寒武纪基底, 该区内的火山岩、侵入岩均具有类似

亏损地幔的 Sr、Nd、Hf 同位素特征, 其岩石成因被解释为可能源自幔源岩浆的直接分异<sup>[6]</sup> 或新生地壳 (或洋壳) 的重熔<sup>[7]</sup>, 但对于是否有地壳物质的混染或混合作用仍缺乏有效的同位素限定。Re - Os 不同于 Rb - Sr、Sm - Nd 等亲石元素构成的同位素体系, 在地幔部分熔融过程中, Re 作为中等不相容元素优先进入熔体相, Os 作为强相容元素则富集在残留相中。经过长期演化, 地幔与地壳储库的 Os 同位素组成差别巨大, 是研究幔源岩浆性质, 判别幔源岩浆有无古老地壳混染或壳源熔体混合的理想示踪剂<sup>[8-9]</sup>, 将为揭示西准噶尔古生代地幔性质与解决是否存在古老地壳等重要科学问题提供关键证据。

收稿日期: 2017 - 04 - 06; 修回日期: 2017 - 05 - 20; 接受日期: 2017 - 06 - 01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41202161, 41672217); 中央高校基本科研业务费项目(N140104003, N140104004)

作者简介: 陈家富, 副教授, 从事大地构造学教学与科研工作。E-mail: chenjiafu@mail.neu.edu.cn.

本文对研究程度较弱的西准噶尔谢米斯台山西北段中 - 基性火山岩进行全岩主微量元素与 Sr、Nd、Os 同位素比值的系统测试,试图准确限定其岩石成因与构造背景,加深对西准噶尔北部中生代构造 - 岩浆演化的理解。

## 1 地质背景与样品

西准噶尔作为中亚造山带西南部重要的增生型造山带,由一系列的岛弧、蛇绿岩、古海山及增生杂岩构成<sup>[10-12]</sup>。谢米斯台山位于西准噶尔北部,大地构造划隶属于博什库尔 - 成吉斯弧<sup>[1]</sup>(图 1a),广泛发育中生代基性 - 酸性火山岩、火山碎屑岩及侵入岩。最新锆石 U - Pb 测年结果表明谢米斯台山的岩浆活动主要形成于中志留世 - 中泥盆世<sup>[1-5]</sup>。中志留世火山岩及侵入岩为钙碱性,形成于俯冲环境<sup>[4]</sup>,晚志留世岩浆岩为高钾钙碱性 - 碱性,可能形成于后碰撞伸展环境<sup>[5]</sup>或俯冲环境<sup>[2,13]</sup>。

本文采集样品位于谢米斯台山西北段的乌兰浩特村东南约 1 km 处。该处主要出露志留纪火山角砾岩、凝灰岩、玄武岩及玄武安山岩,火山岩地层产状整体倾向北,倾角 40° ~ 50°,被晚志留世闪长岩侵入(图 1a)。最新在附近火山岩层位内得到的安山岩锆石 U - Pb 年龄为 429 Ma<sup>[14]</sup>。玄武岩样品(编号 08711B - 2)为黑色、块状,细粒结构、发育气孔构造、杏仁构造,中度蚀变(图 2b)。显微镜下显示斑状结构,见半自形的辉石、斜长石斑晶(含量约

20%),辉石斑晶边部绿泥石化,斜长石斑晶局部绢云母化。基质为微晶斜长石和辉石(含量约 80%,图 2b)。玄武安山岩样品(编号 08711B - 3)为灰绿色,致密块状,发育杏仁构造。显微镜下观察见半自形的辉石、斜长石斑晶(含量约 25%),部分绿泥石化、绢云母化蚀变,基质为微晶斜长石和辉石(含量约 75%)。

## 2 测试分析方法

全岩主要氧化物分析实验在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室的 ARL ADVANTXP + 扫描型波长色散顺序式 X 射线荧光光谱仪(XRF)上完成。准确称取 4 g 分析级助熔剂和烘干的 0.4 g 样品,置于铂金坩埚中搅拌均匀,再添加 3 ~ 4 滴溴化氢饱和溶液。在 1200°C 的高温下熔融,制成玻璃片后,采用 XRF 法测定主要氧化物组成,分析精度优于 5%。

全岩微量元素和稀土元素测试在西北大学大陆动力学国家实验室的 ICP - MS 上完成。样品粉末化学预处理采用两酸(硝酸 + 氢氟酸)高压反应釜溶样方法,详细的化学溶解方法和微量元素含量分析过程可参见 Qi 等<sup>[15]</sup>和贾双琳等<sup>[16]</sup>。通过标准样品 AGV - 1、BCR - 2、BHVO - 2 与 G - 2 监测溶样和分析过程,分析精度优于 10%。

全岩 Rb - Sr 同位素测试在中国地质科学院地质研究所的 MAT262 固体同位素质谱计上完成, Sr

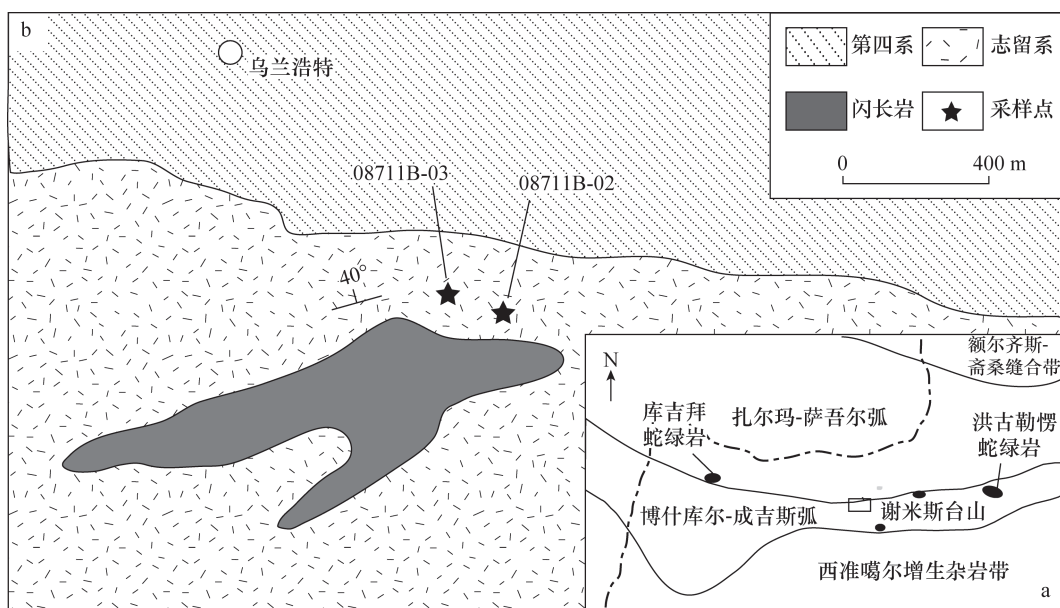


图 1 谢米斯台山西北段地质简图与采样点位置(修改自 Chen 等<sup>[5]</sup>)

Fig. 1 Simplified sampling location and geological map of northwestern Xiemisitai Mountains (Modified after Chen, et al. <sup>[5]</sup>)

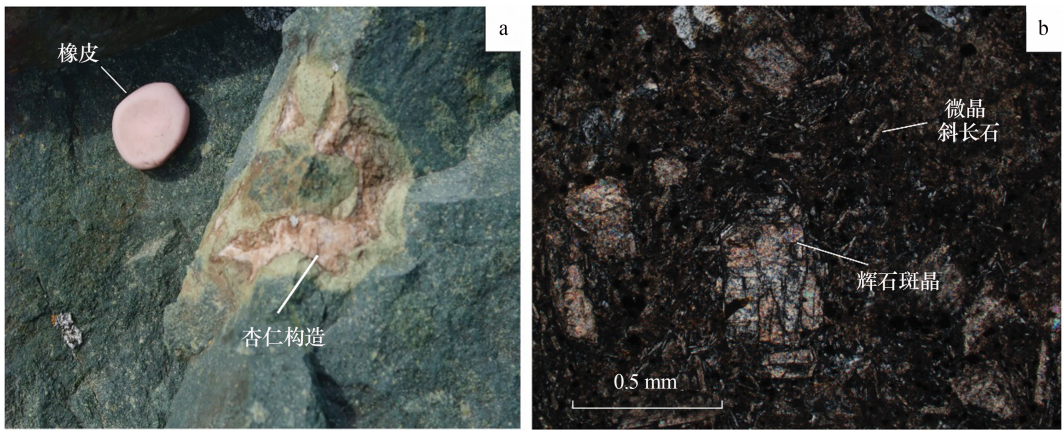


图2 玄武岩样品的(a)野外照片与(b)显微照片(正交偏光)

Fig. 2 (a) Outcrop photo of basalt and (b) its microscopic feature

同位素质量分馏采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$ 校正,标样SRM的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.710243 \pm 12(2\sigma)$ 。全岩Sm-Nd同位素测试在中国地质科学院地质研究所的Nu Plasam高分辨多接收器电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上完成,Nd同位素质量分馏采用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正,标样JMC的 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值为 $0.511127 \pm 10(2\sigma)$ 。详细的分析测试流程见何学贤等<sup>[17]</sup>和唐索寒等<sup>[18]</sup>。

全岩Os同位素测试在国家地质实验测试中心Re-Os重点实验室的Triton-Plus型热表面电离质谱仪上完成。样品的溶样、微蒸馏等前处理过程见李超等<sup>[19]</sup>,采用热表面电离质谱仪负离子模式(NTIMS法)测定同位素比值,采用SEM跳峰模式测定 $\text{OsO}_3$ 的7个质量数,积分时间为4 s。对测量数据利用仪器测量的氧同位素组成和统计学中的等概率模型采用逐级剥谱法进行氧同位素干扰扣除,迭代法质量分馏校正。 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 值的测量精度在0.2%以内。

### 3 测试结果

#### 3.1 主要氧化物地球化学特征

对火山岩样品的主要氧化物进行分析的结果表明:由于后期蚀变影响,样品的烧失量(LOI)较高(2.65%~4.41%),不适合进行TAS分类,在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 * 0.0001 - \text{Nb}/\text{Y}$ 火山岩微量元素分类图解(图3a)中,2个样品分别落于玄武岩和玄武安山岩区域内。 $\text{SiO}_2$ 含量为50.83%~56.23%, $\text{Na}_2\text{O}$ 含量为3.75%~3.78%, $\text{TiO}_2$ (0.63%~0.70%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (15.43%~16.49%)和 $\text{CaO}$ (4.56%~5.09%)的

含量较低, $\text{MgO}$ 含量非常高(5.15%~7.81%),同时具有高Mg值(-60.7~56.0)、低 $\text{FeO}_T/\text{MgO}$ 值(1.15~1.40)的特征(表1),属于比较典型的高镁火山岩类。

表1 火山岩的主要氧化物测试结果(单位为%)

Table 1 Major oxides compositions (%) of volcanic rocks

元素	玄武岩 (08711B-02)	玄武安山岩 (08711B-03)	元素	玄武岩 (08711B-02)	玄武安山岩 (08711B-03)
$\text{SiO}_2$	50.83	56.23	CaO	4.56	5.09
$\text{TiO}_2$	0.704	0.634	$\text{Na}_2\text{O}$	3.75	3.78
$\text{Al}_2\text{O}_3$	16.49	15.43	$\text{K}_2\text{O}$	0.94	2.55
$\text{Fe}_2\text{O}_{3T}$	10.00	8.00	$\text{P}_2\text{O}_5$	0.255	0.203
MnO	0.135	0.148	LOI	4.41	2.65
MgO	7.81	5.15	总计	99.88	99.86

#### 3.2 微量元素和稀土元素地球化学特征

火山岩样品的微量元素分析结果见表2。样品具有相似的稀土元素、微量元素含量与配分模式。稀土元素总含量偏低(85.6~88.1  $\mu\text{g}/\text{g}$ ),轻稀土元素富集, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为4.95~5.80, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为2.38~3.11,为显示明显的右倾配分模式。重稀土配分比较平坦, $(\text{Sm}/\text{Yb})_N$ 值为1.87~2.07。无明显Eu异常( $\text{Eu}^* = 0.94 \sim 1.02$ ,见图3c),指示没有发生斜长石的分异结晶。 $\text{Ni}$ (9.48~18.6  $\mu\text{g}/\text{g}$ )、 $\text{Cr}$ (8.93~36.1  $\mu\text{g}/\text{g}$ )含量相比典型的富镁安山岩略低, $\text{Sr}/\text{Y}$ 值( $\sim 20$ )低于典型的埃达克岩( $\text{Sr}/\text{Y} > 40$ )。在Y-Zr二元判别图解上(图3b)均落入钙碱性系列区域。在微量元素蛛网配分图上(图3d),大离子亲石元素(K、Rb、Ba、La)明显富集,Sr轻微富集,高场强元素(Nb、Ta)和Ti强烈亏损。

表 2 火山岩的微量元素和稀土元素含量(单位为  $\mu\text{g/g}$ )测试结果

Table 2 Compositions of trace elements and rare earth elements ( $\mu\text{g/g}$ ) of volcanic rocks

元素	玄武岩 (08711B-02)	玄武安山岩 (08711B-03)	元素	玄武岩 (08711B-02)	玄武安山岩 (08711B-03)
Li	28.9	12.9	Ce	30.7	33.2
Be	1.10	1.33	Pr	3.92	4.01
Sc	24.1	22.0	Nd	16.7	16.0
V	218	168	Sm	4.06	3.59
Cr	8.93	36.1	Eu	1.22	1.18
Co	26.0	20.3	Gd	3.77	3.42
Ni	9.48	18.6	Tb	0.60	0.53
Cu	64.9	75.1	Dy	3.74	3.29
Zn	79.7	81.5	Ho	0.82	0.74
Ga	18.0	16.3	Er	2.23	2.06
Ge	1.25	1.18	Tm	0.35	0.32
Rb	31.2	67.0	Yb	2.18	2.14
Sr	455	411	Lu	0.34	0.34
Y	22.3	20.4	Hf	2.25	3.72
Zr	89.4	173	Ta	0.31	0.39
Nb	5.09	6.02	Pb	12.3	26.7
Cs	2.24	1.27	Th	4.78	5.72
Ba	261	578	U	1.28	1.56
La	15.0	17.3			

### 3.3 Sr - Nd 同位素特征

对玄武岩样品(编号 08711B-2)进行全岩 Rb - Sr、Sm - Nd 同位素测试的结果见表 3。该样品的  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  比值为 0.19815,用 429 Ma 的成岩年龄计算得到  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  初始比值为 0.70439。 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$  比值为 0.14727,用 429 Ma 的成岩年龄计算得到  $\epsilon\text{Nd}(t)$  值为 +2.65,低于亏损地幔值(约 +9),Nd 模式年龄( $T_{\text{DM}}$ )为 1185 Ma。

表 3 火山岩样品 08711B-02 的同位素比值测试结果

Table 3 The isotopic data of the volcanic rock sample No. 08711B-02

参数	数值	参数	数值
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.70560	Re 含量 (pg)	39.4
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.1982	Os 含量 (pg)	13.472
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.70439	$^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$	14.962
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512635	$^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$	0.5975
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.14727	$(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$	0.4901
$\epsilon\text{Nd}(t)$	2.65	$\gamma\text{Os}(t)$	295
$T_{\text{DM}}(\text{Ma})$	1185	$T_{\text{MA}}(\text{Ga})$	1.91

注:同位素初始值计算应用的岩石年龄为 429 Ma<sup>[14]</sup>,计算公式同 Chen 等<sup>[5]</sup>。

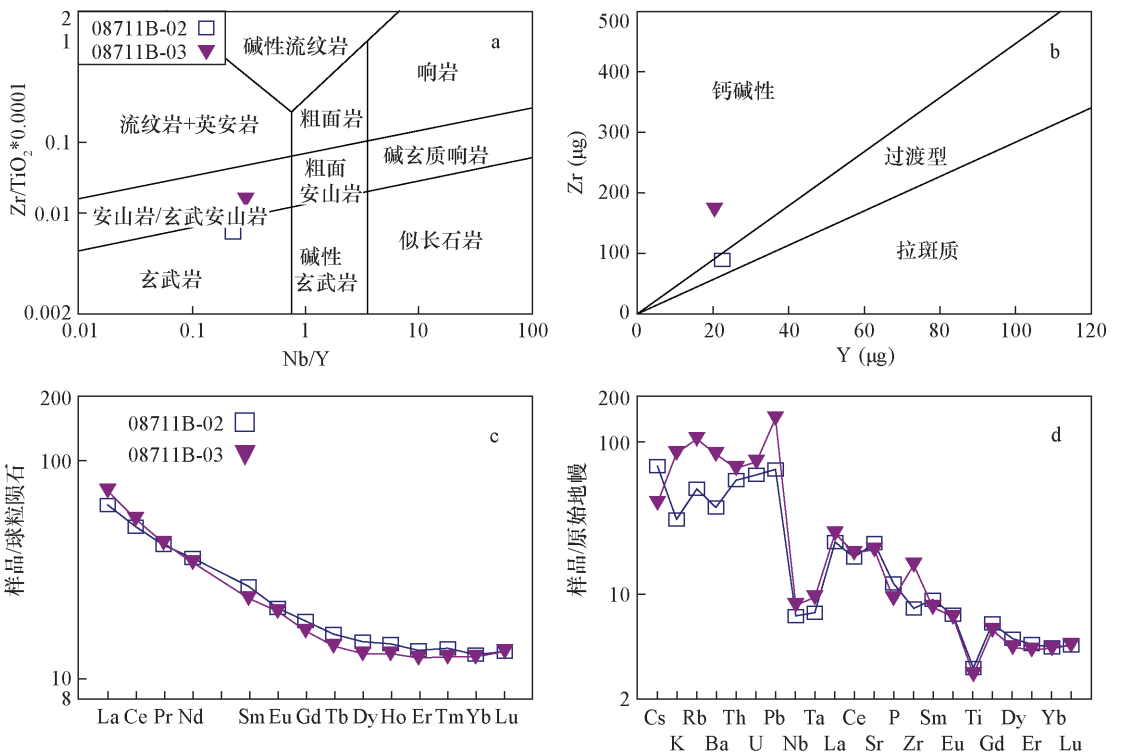


图 3 火山岩(a)微量元素分类图解、(b)Zr - Y 二元图解、(c)稀土配分图解和(d)微量元素蛛网图

Fig.3 (a) Trace element classification, (b) Zr-Y element plot, (c) REE patterns and (d) trace element spider diagrams of volcanic rocks

### 3.4 Os同位素特征

对玄武岩样品(编号08711B-2)进行全岩Re-Os同位素测试的结果见表3。该样品的Re和Os含量较低,分别为39.4 pg/g和13.5 pg/g, $^{187}\text{Re}/^{188}\text{Os}$ 比值为14.962,利用429 Ma的成岩年龄计算得到 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为0.4901, $\gamma\text{Os}(t)$ 值为294.9,模式年龄( $T_{\text{MA}}$ )为1.91 Ga。

## 4 岩石成因

玄武岩、玄武安山岩样品的地球化学特征表现为富MgO、低 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2$ ,符合富镁火山岩类的基本特征。有关富镁火山岩(尤其是富镁安山岩)的岩石成因争议较大,可能是俯冲板片熔体交代地幔橄榄岩而发生的部分熔融<sup>[20]</sup>,富水熔体或流体与地幔楔交代的结果<sup>[21-22]</sup>,也可能是几乎不含水的安山质熔体与橄榄石反应的结果<sup>[9,23]</sup>。由板片熔体交代地幔橄榄岩形成的高镁安山岩通常具有埃达克岩( $\text{Sr}/\text{Y} > 40$ )的地球化学特征<sup>[24]</sup>,而本文样品的 $\text{Sr}/\text{Y}$ 值仅 $\sim 20$ 。安山质熔体与橄榄石的反应过程中会生成石榴子石<sup>[23]</sup>,从而导致反应后熔体的重稀土元素和Y相对亏损,但本文样品均显示相对富集且平坦的重稀土配分模式。流体交代地幔形成的高镁安山岩一般具有富水的特征,以角闪石、黑云母矿物的大量出现为特征<sup>[22,25]</sup>,但样品中未发现含水的镁铁质矿物。

玄武岩样品的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值虽然为正值(+2.65),但明显低于当时亏损地幔平均值(约+9), $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始比值为0.70439,也略高于亏损地幔平均值(0.703~0.704),以上同位素特征表明发生了同位素富集特征的端元与母岩浆混合作用及(/或)古老地壳的混染。因为地幔橄榄岩中的Os同位素体系不会受到俯冲板片流体或熔体的影响<sup>[26]</sup>。样品的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值为0.4901,高于同区同时代的地幔橄榄岩的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值( $\sim 0.13$ ,作者未发布数据),表明岩石形成过程中遭受了地壳物质的混染。研究表明,谢米斯台中部晚志留世一早泥盆世辉长岩、花岗岩的成岩过程中也发生了地壳的混染,虽然它们的 $^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os}$ 初始比值较高(0.7887~2.125),但 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值也较高(+5~+6)<sup>[5]</sup>,说明该地区地壳混染对Nd同位素的影响较小。花岗质岩浆上升速度远远低于玄武质岩浆,其发生壳源同化混染的可能性及程度均应高于后者。本文玄武岩样品 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值仅为+2.65,远低于亏损地幔值和其他发生了地壳混染样品的花岗

质岩石的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(+5~+6,见图4),暗示中志留世玄武质岩石相对富集的同位素特征代表源区可能遭受了混合。实验岩石学表明洋底沉积物通常具有相对较高的Th/Yb值( $> 2$ )和低Ba/La值( $< 40$ ),其在一定条件下可以交代地幔生成类似Setouchi高镁安山岩的成分<sup>[24]</sup>。样品的Th/Yb值为2.2~2.7, Ba/La值为17.4~33.4,结合以上同位素特征,说明早期洋底沉积物熔体很可能对地幔进行了交代,之后又发生了地壳混染作用,从而形成了本文高镁火山岩样品。样品较低的Ni、Cr含量表明岩浆演化过程中大量橄榄石早期发生了分离结晶,无明显Eu负异常表明斜长石未发生明显的分离结晶作用。

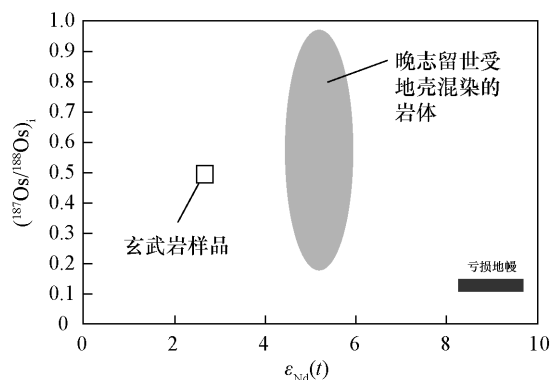


图4 玄武岩样品的Nd-Os同位素比值图(晚志留世受地壳混染的岩体数据据Chen等<sup>[5]</sup>)

Fig. 4 Nd-Os isotope data of basalt (data of Late Silurian plutons are from Chen, et al. <sup>[5]</sup>)

## 5 中志留世弧后伸展构造背景

西准噶尔谢米斯台山位于博什库尔—成吉斯弧的东端,普遍认为该弧的形成与早古生代准噶尔洋由南向北(当今方位)俯冲作用有关<sup>[27-28]</sup>。近期的年代学资料揭示谢米斯台地区志留纪—泥盆纪岩浆活动频繁<sup>[1-5]</sup>,从而为讨论该地区中古生代的构造演化提供了重要依据。目前已知谢米斯台最古老的岩浆活动发生在晚奥陶世—早志留世(约440~445 Ma),形成于准噶尔洋俯冲至博什库尔—成吉斯弧之下的岛弧环境(作者暂未发表数据)。中志留世(429 Ma)安山岩最近在谢米斯台以南的吾尔喀什尔山被发现,具有弧岩浆的地球化学特征<sup>[4]</sup>。本文的中志留世玄武岩、玄武安山岩样品出露于谢米斯台西北侧,表现出富集大离子亲石元素和轻稀土,亏损Nb、Ta的弧岩浆特征。其洋底沉积物熔体交代地幔的岩石成

因模式,也说明形成于与俯冲相关的环境。在 Hf/3-Th-Ta 微量元素构造判别图解中,样品均落入钙碱性火山弧区域内。值得一提的是,428 Ma 的I型、A型花岗岩同样出露于谢米斯台山北部,代表当时的伸展体制<sup>[29]</sup>。谢米斯台山西北部的火山碎屑岩夹碳酸盐岩地层中发现大量中志留世珊瑚和层孔虫等生物化石,反映一种开阔台地相沉积环境<sup>[30]</sup>。以上中志留世岩浆岩岩石组合、空间分布及沉积相特征说明中志留世谢米斯台山南段可能处于与俯冲相关的弧前-弧环境,而北段则处于与俯冲相关的弧后伸展环境。晚志留世地层出现的不整合面表明与周围块体拼贴事件的完成。志留纪末期(~420 Ma)谢米斯台山、萨吾尔山高钾钙碱性、碱性岩浆岩的大量涌现代表进入后碰撞伸展环境<sup>[5]</sup>。

## 6 结论

本研究对西准噶尔谢米斯台山西北段中志留世玄武岩、玄武安山岩进行主量、微量元素地球化学与全岩 Sr-Nd-Os 同位素比值系统测定,揭示其具有高镁火山岩类的典型地球化学特征,Sr、Nd、Os 略显富集的同位素特征表明其可能形成于俯冲板片沉积物熔体对上覆地幔的交代作用,随后经历了一定程度的地壳混染作用。在中志留世,谢米斯台地区发育于准噶尔洋由南向北俯冲有关的弧-弧后体系,北部地区的该期岩浆活动主要形成于弧后伸展的环境。

**致谢:**野外采样工作得到了中国地质科学院张磊博士、北京大学徐钊博士的帮助,全岩 Sr、Nd 同位素测试得到了中国地质科学院地质研究所唐索寒研究员的帮助,在此一并感谢。

## 7 参考文献

- [1] Chen J F, Han B F, Ji J Q, et al. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of paleozoic plutons in northern West Junggar, north Xinjiang, China [J]. *Lithos*, 2010, 115:137-152.
- [2] 孟磊,申萍,沈远超,等.新疆谢米斯台中段火山岩岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2010, 26(10):3047-3056.  
Meng L, Shen P, Shen Y C, et al. Igneous rocks geochemistry, zircon U-Pb age and its geological significance in the central section of Xiemisitai area, Xinjiang [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(10):3047-3056.
- [3] Shen P, Shen Y C, Li X H, et al. Northwestern Junggar basin, Xiemisitai mountains, China: A geochemical and

- geochronological approach [J]. *Lithos*, 2012, 140-141: 103-108.
- [4] Yang G X, Li Y J, Xiao W J, et al. Petrogenesis and tectonic implications of the middle silurian volcanic rocks in northern West Junggar, NW China [J]. *International Geology Review*, 2014, 56:869-884.
- [5] Chen J F, Han B F, Zhang L, et al. Middle paleozoic initial amalgamation and crustal growth in the West Junggar (NW China): Constraints from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-Os isotopes of calc-alkaline and alkaline intrusions in the Xiemisitai-Saier Mountains [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 113: 90-109.
- [6] Han B F, Wang S G, Jahn B M. 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.
- [7] Chen B, Jahn B M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2004, 23:691-703.
- [8] 史仁灯,支霞臣,陈雷,等. Re-Os 同位素体系在蛇绿岩应用研究中的进展 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1685-1695.  
Shi R D, Zhi X C, Chen L, et al. Comments on the progress on the applications of Re-Os isotopic study on the ophiolites [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1685-1695.
- [9] Chen B, Jahn B M, Suzuki K. Petrological and Nd-Sr-Os isotopic constraints on the origin of high-Mg adakitic rocks from the North China Craton: Tectonic implications [J]. *Geology*, 2013, 41:91-94.
- [10] Han B F, Guo Z J, Zhang Z C, et al. Age, geochemistry, and tectonic implications of a late paleozoic stitching pluton in the north Tian Shan suture zone, Western China [J]. *Geological Society of American Bulletin*, 2010, 122: 627-640.
- [11] Xiao W J, Huang B C, Han C M, et al. A review of the western part of the Altaids: A key to understanding the architecture of accretionary orogens [J]. *Gondwana Research*, 2010, 18:253-273.
- [12] Zhu Y F, Chen B, Xu X, et al. A new geological map of the western Junggar, north Xinjiang (NW China): Implications for paleoenvironmental reconstruction [J]. *Episodes*, 2013, 36:205-220.
- [13] Yin J, Chen W, Xiao W J, et al. Late silurian-early devonian adakitic granodiorite, A-type and I-type granites in NW Junggar, NW China: Partial melting of mafic lower crust and implications for slab roll-back [J]. *Gondwana Research*, 2015, [http://dx. doi. org/10. 1016/j. gr. 2015. 06. 016](http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.016).
- [14] 孙勇,李永军,杨高学,等.西准噶尔谢米斯台山西缘

- 中志留世火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及构造意义[J]. 新疆地质, 2015, 33(1): 27-32.
- Sun Y, Li Y J, Yang G X, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and tectonic settings implication of the middle silurian volcanic rocks in the west of Xiemisitai mountain, west Junggar [J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(1): 27-32.
- [15] Qi L, Hu J, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Talanta, 2000, 51: 507-513.
- [16] 贾双琳, 赵平, 杨刚, 等. 混合酸敞开或高压密闭溶样-ICPMS 测定地质样品中稀土元素 [J]. 岩矿测试, 2014, 33(2): 186-191.
- Jia S L, Zhao P, Yang G, et al. Quick determination of rare earth elements in geological samples with open acid digestion or high-pressure closed digestion by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2014, 33(2): 186-191.
- [17] 何学贤, 唐索寒, 朱祥坤, 等. 多接收器等离子体质谱 (MC-ICPMS) 高精度测定 Nd 同位素方法 [J]. 地球学报, 2007, 28(4): 405-410.
- He X X, Tang S H, Zhu X K, et al. Precise measurement of Nd isotopic ratios by means of multi-collector magnetic sector inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28(4): 405-410.
- [18] 唐索寒, 李津, 梁细荣, 等. 钕同位素比值  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  标准溶液研制 [J]. 岩矿测试, 2017, 36(2): 176-183.
- Tang S H, Li J, Liang X R, et al. Reference material preparation of  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$  isotope ratio [J]. Rock and Mineral Analysis, 2017, 36(2): 176-183.
- [19] 李超, 杨雪, 赵鸿, 等. pg-ng 级 Os 同位素热表明电离质谱高精度分析测试技术 [J]. 岩矿测试, 2015, 34(4): 392-398.
- Li C, Yang X, Zhao H, et al. High precise isotopic measurements of pg-ng Os by negative ion thermal ionization mass spectrometry [J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(4): 392-398.
- [20] Kelemen P B. Genesis of high Mg<sup>#</sup> andesites and the continental crust [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1995, 120: 1-19.
- [21] Tatsumi Y. Geochemical modeling of partial melting of subducting sediments and subsequent melt-mantle interaction: Generation of high-Mg andesites in the Setouchi volcanic belt, Southwest Japan [J]. Geology, 2001, 29: 323-326.
- [22] Ma X H, Cao R, Zhou Z H, et al. Early cretaceous high-Mg diorites in the Yanji area, Northeastern China: Petrogenesis and tectonic implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 97: 393-405.
- [23] 王明梁, 唐红峰. 英云闪长质熔体与地幔橄榄石反应的实验研究——对克拉通内部高镁安山岩成因的约束 [J]. 中国科学(地球科学), 2014, 44: 405-413.
- Wang M L, Tang H F. Reaction experiments between tonalitic melt and mantle olivine and their implications for genesis of high-Mg andesites within cratons [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 44: 405-413.
- [24] Kamei A, Owada M, Nagao T, et al. High-Mg diorites derived from Sanukitic HMA magmas, Kyushu Island, Southwest Japan Arc: Evidence from clinopyroxene and whole rock compositions [J]. Lithosphere, 2004, 75: 359-371.
- [25] Ma X, Chen B, Chen J F, et al. Petrogenesis and geodynamic significance of the late palaeozoic Dongwanzi complex, North China Craton: Constraints from petrological, geochemical, and Os-Nd-Sr isotopic data [J]. International Geology Review, 2014, 56: 1521-1540.
- [26] Chesley J, Righter K, Ruiz J. Large scale mantle metasomatism: A Re-Os perspective [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 219: 49-60.
- [27] Ren R, Han B F, Guan S W, et al. Linking the southern West Junggar terrane to the Yili block: Insights from the oldest accretionary complexes in West Junggar, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences (2017), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseas.2017.03.011>.
- [28] Liu B, Han B F, Xu Z, et al. The cambrian initiation of intra-oceanic subduction in the southern Paleo-Asian Ocean: Further evidence from the Barleik subduction-related metamorphic complex in the West Junggar region, NW China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 123: 1-21.
- [29] 杨刚, 肖龙, 王国灿, 等. 西准噶尔谢米斯台西段花岗岩年代学、地球化学、锆石 Lu-Hf 同位素特征及大地构造意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(3): 548-562.
- Yang G, Xiao L, Wang G C, et al. Geochronology, geochemistry and zircon Lu-Hf study of granites in western section of Xiemisitai area, western Junggar [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(3): 548-562.
- [30] 纵瑞文, 龚一鸣, 韩非. 新疆额敏东部志留纪化石的发现及其地质意义 [J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2015, 40(3): 563-572.
- Zong R W, Gong Y M, Han F. Discovery of silurian fossils and its geological significance in eastern Ermin, Xinjiang of NW China [J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 2015, 40(3): 563-572.

# Geochemical and Sr-Nd-Os Isotopic Characteristics of Middle Silurian Volcanic Rocks in Northwest of the Xiemisitai Mountains, West Junggar and Its Tectonic Implications

CHEN Jia-fu<sup>1,2</sup>, MA Xu<sup>1</sup>, LI Chao<sup>3</sup>, QU Wen-jun<sup>3</sup>, DU Hou-yuan<sup>1</sup>, ZHAO Ran<sup>1</sup>, HAN Bao-fu<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

3. Key Laboratory of Re-Os Isotope Geochemistry, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

## Highlights

- Middle Silurian basalt and andesite in the Xiemisitai Mountains exhibit high-Mg volcanic rocks affinities.
- These volcanic rocks are characterized by slightly enriched Sr-Nd-Os isotopic signatures.
- These Middle Silurian volcanic rocks were probably formed in a back-arc setting due to northward subduction of the Junggar Oceanic slab.

**Abstract:** Volcanic rocks in the Xiemisitai Mountains, in Northwest Junggar were recently considered to form in the Silurian rather than the Devonian period. However, the characteristic and tectonic setting of Middle Silurian volcanic rocks in this area are poorly constrained. In this study, major and trace elements and Sr-Nd-Os isotopic composition analyses were synthetically conducted on the Middle Silurian basalt and basaltic andesite in northwest of the Xiemisitai Mountains, West

Junggar. These volcanic samples are characterized by high MgO (5.15%–7.81%) with Mg of 56.0–60.7, low CaO (4.56%–5.09%) and  $\text{FeO}_T/\text{MgO}$  (1.15–1.40), similar to those of high-Mg volcanic rocks. Basalts have  $\epsilon\text{Nd}(t)$  of 2.65,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  of 0.70439, and  $(^{187}\text{Os}/^{188}\text{Os})_i$  of 0.4901. The slightly enriched isotopic signatures, high Th/Yb (2.2–2.7) and low Ba/La (17.4–33.4) indicate that they originated from depleted mantle metasomatized by melts from subducted sediments and suffered from crustal contamination. The volcanic rocks are calc-alkaline and exhibit arc-like geochemistry with the enrichment of light REE and large ion lithophile elements. It is suggested that these rocks were probably formed in a back-arc setting due to northward subduction of the Junggar Oceanic slab.

**Key words:** Middle Silurian; volcanic rocks; Sr-Nd-Os isotopes; back-arc; West Junggar

