

西准噶尔“滞后型”弧岩浆作用 ——来自西准东部乌尔禾早二叠世中基性岩墙群的证据

晁文迪, 李永军, 王 冉, 杨高学, 向坤鹏, 刘 佳, 徐 倩

(长安大学 地球科学与资源学院, 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘 要: 西准噶尔东部哈拉阿拉特山南麓的乌尔禾地区新发现大量中基性岩墙群。岩墙群侵位于早二叠世佳木河组磨拉石建造中, 展布方向与达尔布特大断裂延伸方向相一致。岩墙群岩性为辉绿岩、辉绿玢岩和辉长闪长岩, 地球化学特征显示其具有低钾钙碱性玄武岩-安山岩特征。稀土总量偏低($34.53 \times 10^{-6} \sim 82.43 \times 10^{-6}$), δEu (0.74~0.98) 和 δCe (0.98~1.15) 负异常不明显, 稀土元素分配模式皆呈 LREE/HREE 富集 (LREE/HREE = 2.47~7.18) 的右倾型配分型式, 富集 K、Rb、Ba、Sr 等大离子亲石元素, 而高场强元素 Nb、Ta 强烈亏损, Zr、Hf 适度亏损, 具有岛弧俯冲作用的地球化学特征。正的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 (5.51~5.71) 和相对低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值 (0.703 802~0.704 223) 表明亏损地幔是岩墙群的源区。岩浆来自于亏损的地幔楔, 且受到俯冲组分的改造。该岩墙群表明在早二叠世地表完成汇聚造山后, 深部的弧岩浆作用仍在进行, 所代表的“滞后型”弧岩浆作用晚于西准中西部的俯冲增生作用, 表明整个西准地区俯冲造山作用结束的最终时限应在早二叠世晚期。

关键词: 中基性岩墙群; 地球化学; 滞后型弧; 西准噶尔

中图分类号: P585; P595

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2015)02-0171-13

Lagged arc magmatism in Western Junggar: Evidence from early Permian intermediate to mafic dyke swarms in Urho area, east of Western Junggar

CHAO Wen-di, LI Yong-jun, WANG Ran, YANG Gao-xue, XIANG Kun-peng, LIU Jia and XU Qian
(Earth Science & Resources College, Chang'an University, Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

Abstract: Intermediate to mafic dyke swarms were newly discovered in Urho area in the south of the Hala'alat Mountain which is located in the east of Western Junggar. The dyke swarms intruded into the Permian Jiamuhe molasse formation. The nearly NE-SW-trending dyke swarms are parallel to Darbut Fault. The rocks are mainly composed of diabase, diabase porphyrite and gabbro-diorite, which have features of low K calc-alkaline basalt to andesite series, as shown by geochemical analyses. The dyke swarms have low REE ($34.53 \times 10^{-6} \sim 82.43 \times 10^{-6}$) and the anomalies of δEu (0.74~0.98) and δCe (0.98~1.15) are not obvious. REE distribution patterns are of the right-oblique type (LREE/HREE = 2.47~7.18). All samples are characterized by the enrichment of LILEs (K, Rb, Ba, Sr) and depletion of HFSE (especially Nb, Ta), showing the characteristics of island-arc zone. Positive $\epsilon\text{Nd}(t)$ values (5.51~5.71) and relatively low initial Sr isotopic ratios (0.703 802~0.704 223) indicate the depleted mantle-related source. The source was the depleted mantle wedge and the

收稿日期: 2014-11-13; 修订日期: 2015-01-22

基金项目: 中国地质调查局地质矿产调查评价专项(1212011220619); 国家自然科学基金(41303027); 中央高校基本科研业务费专项资金(2014G1271058)

作者简介: 晁文迪(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 构造地质学, E-mail: 462668301@qq.com; 通讯作者: 李永军(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 从事构造地质学、区域地质调查研究, E-mail: yongjunl@chd.edu.cn.

magma was genetically influenced by the subduction components. The dyke swarms in Urho area suggest that the subduction between plates still went on after the completion of the compressional orogeny in early Permian. The lagged arc magmatism occurred later than the subduction in the west and middle of Western Junggar, suggesting that the final completion of the subduction in Western Junggar was in late Early Permian.

Key words: intermediate to mafic dyke swarms; geochemistry; lagged arc; Western Junggar

作为中亚造山带的重要组成部分(Jahn *et al.*, 2000),西准噶尔地区发生了多次俯冲增生后,最终于晚古生代完成了造山,进入陆内演化阶段(舒良树等,2001;李锦轶等,2006;徐学义等,2014)。此前,报道本区最晚期的俯冲增生的研究成果多集中于西准西部和中部,俯冲作用的主要地质记录为岛弧火山岩(西准西部:Shen *et al.*, 2008;西准中部:Geng *et al.*, 2011)、埃达克岩(西准西部:赵振华等,2006)和富铌玄武岩(西准西部:田陟贤等,2013;李永军等,2014),其地质时代均为早石炭世。相对而言,西准东部的研究程度较低,报道极少,因而众多学者以为,西准东部可能与西准中西部同步完成俯冲增生和造山作用。本文作者们于西准东部乌尔禾一带新发现了早二叠世“滞后型”中基性岩墙群,其时代及岩石类型均有别于西准中西部的火成

岩,具有鲜明的与岛弧俯冲作用有关的地球化学信息,因而是西准东部俯冲增生造山的地质记录。乌尔禾早二叠世“滞后型”基性岩墙群的发现,至少说明:或是西准东部的俯冲增生时限要推迟至早二叠世,或是西准东部与西准西部的俯冲造山作用的结束时限明显不同,即西准东部的俯冲造山作用明显滞后于西准西部。这一发现为西准地区俯冲造山作用结束的最终时限和西准东部与西部的差异演化提供了重要佐证。

1 区域地质概况

新发现的中基性岩墙群出露于西准噶尔东部的乌尔禾地区(图1a),区内地质体展布受NNE向的达尔布特断裂控制,出露的地层主要为石炭系和二叠

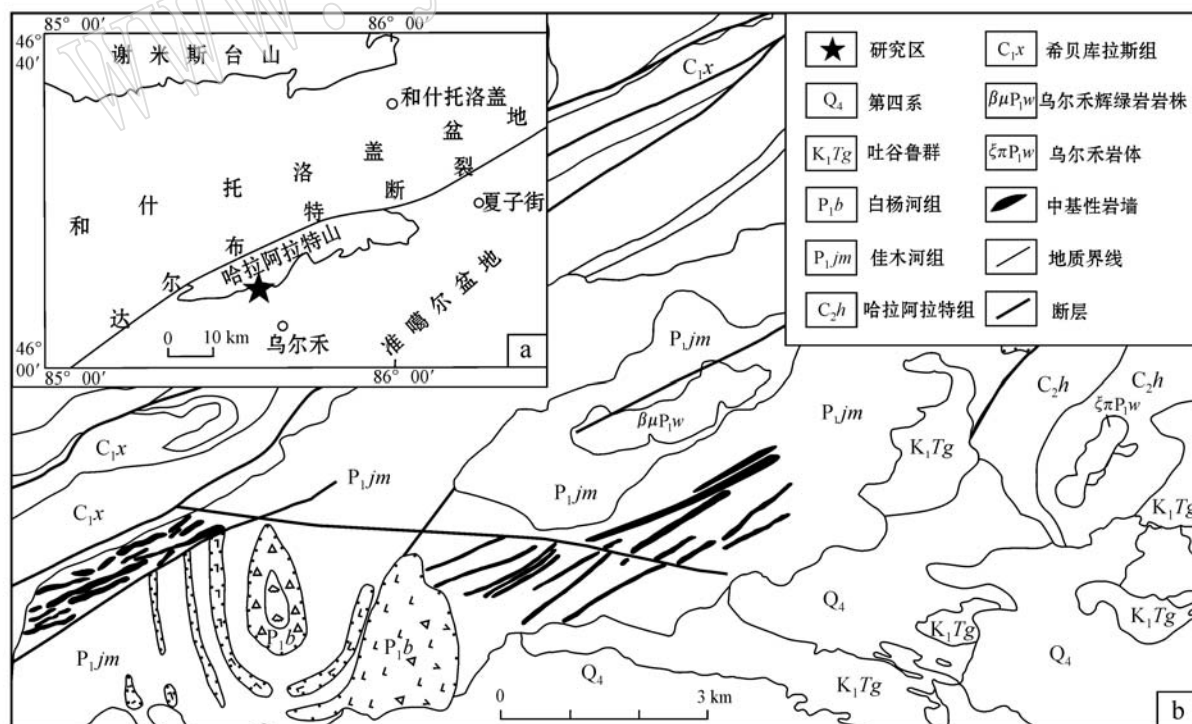


图1 研究区位置略图(a)和地质简图(b)

Fig. 1 Location (a) and geological sketch map of the study area (b)

系(图1b)。石炭系上、下统均有产出,总体为一套海相火山-沉积建造,火山岩主要呈夹层产出,岩性为安山岩、英安岩、流纹岩,沉积建造及火山岩地球化学特征显示其为陆缘弧构造环境产物。石炭系整体变形强烈,褶皱及劈理发育,是挤压造山作用的产物(Choulet *et al.*, 2012)。二叠系仅有下二叠统产出,不整合于石炭系之上,归属佳木河组。作者在该组中采集到大量植物化石,鉴定有 *Paracalamites stenocostatus*(细肋副芦木),时代为早二叠世。佳木河组总体为一套陆相磨拉石建造,厚度较大,层理不规则,磨拉石中的砾石大小悬殊,显示了其近原地快速堆积的特点,是本区造山作用晚期的构造-沉积组合。佳木河组整体呈带状产出,表现为一北陡南缓的向斜,局部地层变形强烈,陡倾达 80° ,显示了与石炭系相近的变形样式。表明本组沉积之后经历过强烈的挤压和褶皱变形,也是本区造山作用的记录。整个西准噶尔地区在早二叠世之后,进入陆内造山阶段(龚一鸣等, 2013)。中、新生代以来,西准地区构造活动明显减弱,无火山活动和岩浆作用记录,地层产状近于水平,未发现较强烈褶皱。

乌尔禾中基性岩墙群侵位于早二叠世佳木河组磨拉石建造中,展布方向和达尔布特断裂延伸方向相一致,走向多为 $55^{\circ}\sim 60^{\circ}$,延伸稳定,未发生明显的变形和变质(图2a)。岩墙群中出露面积最大者为乌尔禾辉绿岩岩株,出露面积约 1.4 km^2 ,大体呈NE-SW向展布,最长约3 km,最宽约0.75 km。其外围发现近30条岩墙(脉)与其共生,长者可达数公里,短者仅为50~60 m,一般宽0.5~2 m。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄显示岩墙群侵位时间为 $285.7\pm 3.3\text{ Ma}$ ($n=30$, MSWD=0.24),据此确认其形成于早二叠乌拉尔世(Cisuralian)萨克马尔期(Sakmarian)(另文讨论)。岩墙在剖面上产状比较平直,平面上的延伸稳定,产状受地形影响较小。岩墙与围岩接触面一般比较平直,少数围岩具有挤压片理化构造。出露宽度较宽的岩墙与围岩的接触面上可见2 cm左右的冷凝边,围岩与岩墙接触部位可见0.5~1 cm的黄褐色烘烤边,说明裂隙形成时间与岩浆侵位时间接近,冷却速度较快。部分岩墙由于遭受风化剥蚀,形成线性沟谷(图2b)。



图2 乌尔禾中基性岩墙群宏观(a)和野外露头特征(b)

Fig. 2 Macroscopic (a) and field (b) characteristics of Urho dyke swarms

2 岩石学特征

样品采自基岩露头,采集时尽量避开接触带、蚀变带和断裂破碎带等,在岩墙的中部取样,以保证样品新鲜具有代表性。

根据野外观察和室内薄片鉴定,岩墙群主要有三种岩性:灰绿色辉绿岩、辉绿玢岩和暗灰色辉长闪

长岩。辉绿岩具有块状构造(图3a),斜长石主要为钠长石(70%),半自形板条状,长径 $0.1\sim 0.5\text{ mm}$,聚片双晶发育,中度绿泥石化、隐晶帘石化、泥化;普通辉石(30%)他形粒状、柱状,粒径 $0.1\sim 0.3\text{ mm}$,干涉色达Ⅱ级中部黄色,具辉石式解理。辉绿岩薄片下具典型的辉绿结构(图3b),斜长石杂乱分布,表面蚀变较严重,三角架孔隙中充填他形辉石颗粒。

辉绿玢岩具有块状构造和斑状结构(图3c)。岩

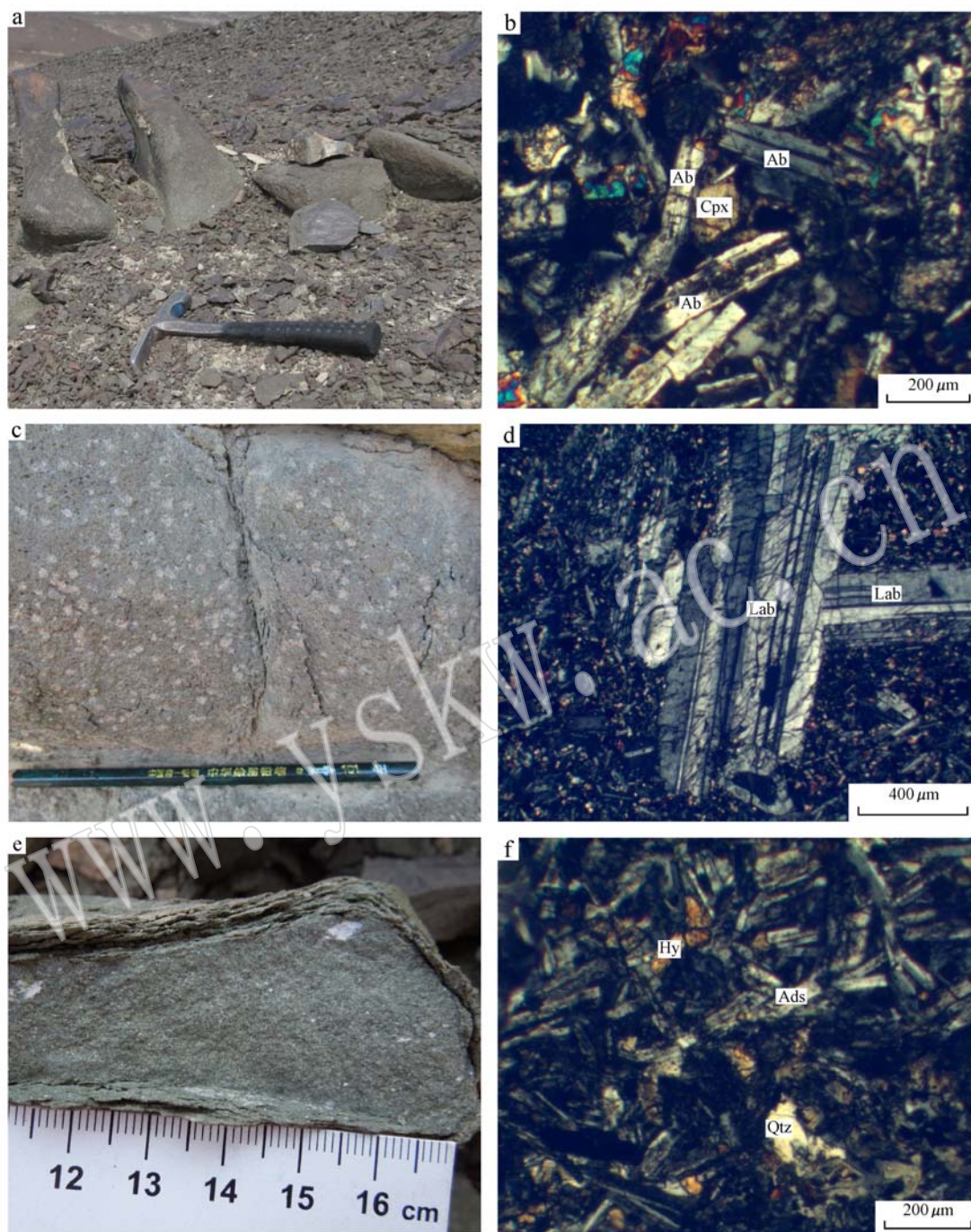


图 3 乌尔禾中基性岩墙群岩石手标本和正交偏光显微照片

Fig. 3 Photographs of rocks and petrographic sections of Urho dyke swarms (crossed nicols)

- a—辉绿岩; b—辉绿结构; c—辉绿玢岩; d—拉长石斑晶; e—辉长闪长岩; f—辉绿结构与他形粒状石英; Ab—钠长石; Cpx—单斜辉石;
Lab—拉长石; Ads—中长石; Hy—紫苏辉石; Qtz—石英
a—diabase; b—diabasic texture; c—diabase porphyrite; d—labradolite phenocrysts; e—gabbro-diorite; f—diabase texture and xenomorphic
quartz; Ab—albite; Cpx—clinopyroxene; Lab—labradolite; Ads—adesine; Hy—hypersthene; Qtz—quartz

石由斑晶(30%)和基质(70%)组成。斑晶主要为拉长石(图 3d),半自形板状,长轴最长可达 1 mm,其环带构造,聚片双晶发育,绿泥石化轻。基质具有辉绿

结构,主要由微粒拉长石(45%)和辉石(25%)组成,拉长石粒径 0.08~0.37 mm,环带构造,聚片双晶发育,泥化中度,杂乱分布,格架间嵌布了普通辉石颗

粒,普通辉石呈他形粒状,粒径 $<0.16\text{ mm}$ 。

辉长闪长岩与辉绿岩相似,也具有辉绿结构,块状构造(图 3e),与辉绿岩的主要区别在于矿物组成中出现了石英(图 3f)。斜长石(64%)半自形板条状,长径 $0.1\sim0.4\text{ mm}$,聚片双晶发育,中度绿泥石化、绢云母化、泥化,长轴大致平行定向排列,主要为中长石;辉石(35%)他形粒状,粒径 $0.1\sim0.3\text{ mm}$,淡黄绿色,具辉石式解理,经电子探针分析,主要为紫苏辉石;石英他形粒状,粒径 $0.03\sim0.1\text{ mm}$,波状消光,含量较少,约1%。

3 样品分析方法

共选取15件有代表性的较新鲜样品进行主量元素和微量元素分析,4件样品进行 Sr-Nd 同位素分析。主量和微量元素分析都在长安大学成矿作用及其动力学实验室完成。其中主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法(XRF)完成,所用主要仪器为日本岛津顺序扫描 LAB CENTER XRF-1800 型波长色散 X 射线荧光光谱仪,分析精度优于1%。烧失量(LOI)在烘箱中经 1000°C 高温烘烤 90 min 后称重获得。微量元素和稀土元素分析用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)完成,所用主要仪器为美国热电 X-7 型、安捷伦 7700E 型电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)分析仪,样品测试经 BHVO-2、AGV-1、BCR-2 国际标样监控,分析方法详见 Liang 等(2000),多数微

量元素分析精度优于5%。

Sr-Nd 同位素测试分析工作在核工业北京地质研究所分析测试研究中心完成。主要测试仪器为热电质谱仪,仪器型号为 ISOPROBE-T,样品测试经国际标样 NBS987 和实验室标样 SHINESTU 进行监控。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值用 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$ 校正, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。

4 地球化学特征

4.1 主量元素

乌尔禾中基性岩墙群的主量元素分析结果及相关参数见表1,样品已按 SiO_2 含量由低到高排序。从表1可以看出,样品 SiO_2 含量为 $45.95\% \sim 56.02\%$,平均 52.49% ,大部分属于基性岩范畴; Al_2O_3 含量中等,为 $14.86\% \sim 17.96\%$,平均 16.71% ,与岛弧拉斑玄武岩的16%和板内溢流玄武岩的 17.08% 类似; MgO 含量为 $4.00\% \sim 8.01\%$,平均 5.10% , $\text{Mg}^{\#} = 48.55 \sim 68.06$,平均 60.61 ,低于原生岩浆(Wilson, 1989)($\text{Mg}^{\#} = 68 \sim 75$),指示了岩浆分异程度较低。去除烧失量后,对样品测试数据按照侵入岩的相关标准进行了铁调整,在重新百分化后进行相关指数计算和投图。全碱 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 3.02\% \sim 7.24\%$,平均为 5.05% ,所有样品均表现为 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$,大部分样品表现为中钾(图 4a)。在 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图(Cox *et al.*, 1979; Wilson,

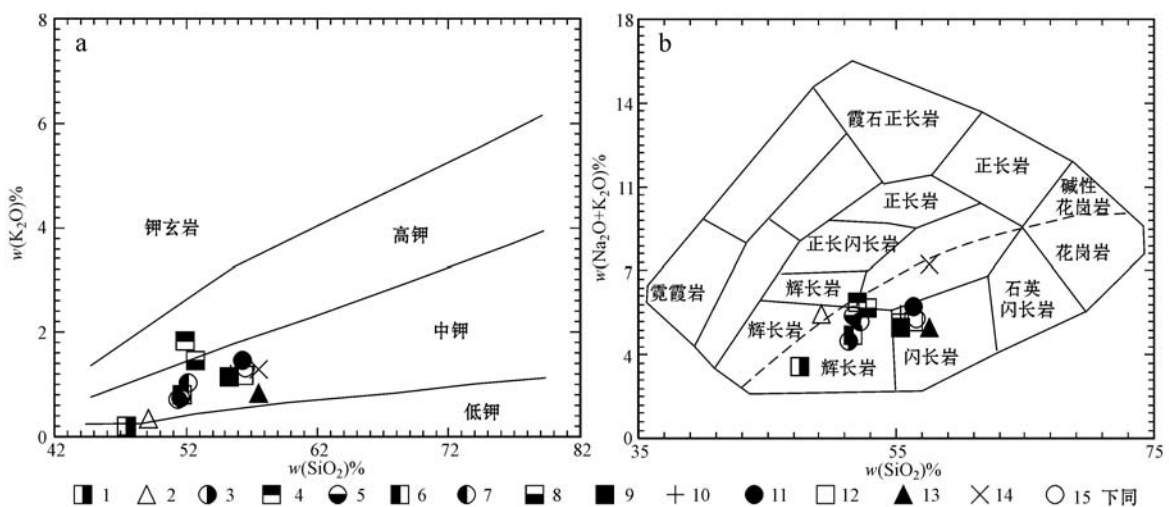


图4 乌尔禾中基性岩墙群 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解(a 据 Tatsumi and Eggins, 1995)和 $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 图解(b 据 Cox *et al.*, 1979; Wilson, 1989)

Fig. 4 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ diagram (modified after Tatsumi and Eggins, 1995) and $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ diagram (modified after Cox *et al.*, 1979; Wilson, 1989) of Urho dyke swarms

表 1 乌尔禾中基性岩墙群样品主量元素分析结果($w_B/\%$)及主要参数Table 1 Major elements ($w_B/\%$) concentrations of samples from Urho dyke swarms

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
样号	15-1	12-1	90-1	73-1	85-1	86-1	83-1	89-1	20-7	20-8	16-4	20-5	16-3	16-1	20-3
岩性	辉绿岩	辉绿岩	辉绿玢岩	辉绿岩	辉绿玢岩	辉绿玢岩	辉绿岩	辉绿玢岩	辉长闪长岩						
SiO ₂	45.95	47.32	50.39	50.68	51.05	51.42	51.43	52.34	53.95	54.55	55.39	55.61	55.63	55.65	56.02
TiO ₂	1.01	0.93	1.02	0.86	1.61	1.29	1.16	1.71	0.81	0.91	0.97	0.91	0.95	0.94	0.96
Al ₂ O ₃	17.96	17.10	17.75	15.44	14.95	17.04	16.44	14.86	17.07	17.18	16.99	16.98	17.33	16.74	16.80
TFe ₂ O ₃	10.59	10.34	10.01	10.43	13.08	11.30	10.69	12.95	7.74	8.13	8.04	8.07	7.80	7.90	8.19
MnO	0.18	0.16	0.17	0.19	0.20	0.17	0.18	0.20	0.11	0.13	0.12	0.12	0.11	0.12	0.12
MgO	8.01	7.62	5.97	5.74	4.82	4.35	5.00	4.09	4.61	4.54	4.60	4.40	4.00	4.39	4.35
CaO	9.56	7.09	8.23	8.01	7.23	8.89	8.19	6.71	8.06	7.24	6.04	7.03	5.65	3.12	6.85
Na ₂ O	2.81	4.85	3.42	3.96	4.50	3.65	3.91	4.14	3.54	4.09	4.15	3.81	3.80	5.99	3.83
K ₂ O	0.21	0.33	0.69	1.80	0.73	0.80	1.03	1.46	1.12	1.20	1.46	1.16	0.80	1.25	1.30
P ₂ O ₅	0.18	0.16	0.21	0.11	0.29	0.23	0.22	0.34	0.26	0.30	0.34	0.32	0.34	0.30	0.32
LOI	2.99	3.79	2.65	2.65	1.77	1.30	1.56	2.14	1.90	1.11	2.44	1.22	3.95	4.16	1.11
Total	99.45	99.70	100.50	99.87	100.23	100.44	99.81	100.94	99.17	99.37	100.53	99.62	100.37	100.56	99.86
σ	2.16	4.70	2.10	3.89	3.24	2.30	2.74	3.27	1.85	2.33	2.44	1.90	1.56	3.85	1.97
Mg [#]	66.76	68.06	62.67	62.24	51.88	52.34	57.66	48.55	63.71	62.68	63.70	62.05	60.47	64.80	61.59

注: TFe₂O₃ 表示全铁; LOI 为烧失量; σ 为里特曼指数, $(K_2O + Na_2O)^2 / (SiO_2 - 43)$; $Mg^{\#} = 100 * MgO / (MgO + FeO)$, 这里的 FeO 是在去过烧失量后, 按照侵入岩相关标准铁调整计算所得。

1989)(图 4b)上, 大部分样品投在了辉长岩和闪长岩区域, 为亚碱性。除烧失量较大的 12-1 外, 样品里特曼指数均小于 4($\sigma = 1.56 \sim 3.85$), 为钙碱性。样品 16-1 的 Na₂O 值偏大, 为 5.99%, 且其烧失量达 4.16%, 结合镜下观察到的绿泥石化现象, 应是蚀变作用中 K、Na 等活泼元素发生了一定程度迁移的缘故。

4.2 稀土元素和微量元素

乌尔禾中基性岩墙群的微量元素和稀土元素分析结果见表 2, 15 个样品的稀土元素总量为 $34.53 \times 10^{-6} \sim 82.43 \times 10^{-6}$, 稀土总量总体偏低。 δEu 和 δCe 分别为 $0.74 \sim 0.98$ 和 $0.98 \sim 1.15$, δEu 和 δCe 负异常不明显, 反映出在岩浆演化过程中, 斜长石的分离结晶作用并不明显。样品对球粒陨石标准化后所得稀土元素分配模式(图 5a)变化规律基本一致, 皆呈 LREE/HREE 富集的右倾型配分型式, La 和 Lu 的含量相差一个数量级, LREE/HREE = $2.47 \sim 7.18$ 。 $(La/Sm)_N$ 和 $(Gd/Yb)_N$ 相对较小且稳定, 平均值分别为 1.65 和 2.43, 表明轻稀土和重稀土内部馏较小。各样品 REE 配分曲线基本平行, 只有相对位置的高低, 显示同源岩浆演化的特征。

将 15 个样品的微量元素含量对原始地幔的相对丰度进行标准化, 所得蛛网图各样品分配曲线协调一致(图 5b), 大离子亲石元素(LILE)K、Rb、Ba、

Sr 相对富集, 皆高出原始地幔数十倍。Sr 具有明显的正异常, 其含量为 $334.30 \times 10^{-6} \sim 949.30 \times 10^{-6}$, 平均为 592.75×10^{-6} , 但在稀土配分曲线上并无 Eu 的明显异常, 表明其并非斜长石分离结晶的结果。高场强元素(HFSE)相对亏损, 尤其是出现 Nb、Ta 强烈亏损, Zr、Hf 适度亏损, 具有与俯冲带相关的火山岩相似的地球化学特征, 基本位于俯冲带玄武岩范围之内(图 5b)。不相容元素 Cr($9.63 \times 10^{-6} \sim 235.92 \times 10^{-6}$)与 Ni($8.66 \times 10^{-6} \sim 98.75 \times 10^{-6}$)的含量变化大, 并且与 MgO 含量呈明显的正相关(图 6), 指示一定程度单斜辉石和橄榄石的分离结晶, 这种镁铁质矿物的分离结晶, 有从基性向中性结晶分异演化的趋势。

4.3 Sr-Nd 同位素地球化学

乌尔禾中基性岩墙群的 Sr-Nd 同位素分析结果见表 3。岩墙群具有相对较一致的 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值 ($0.512794 \sim 0.512860$) 和初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值 ($0.703802 \sim 0.704223$), 正的 $\epsilon Nd(t)$ 值和相对低的初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值表明亏损地幔是岩墙群的源区。所有样品都投在了西准噶尔早石炭世岛弧火山岩范围内(图 7), 其初始 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值和 $\epsilon Nd(t)$ 值变化范围明显小于西准噶尔早石炭世岛弧火山岩, 暗示着岩墙群的源区和早石炭世岛弧火山岩源区类似。

表 2 乌尔禾中基性岩墙群样品稀土元素和微量元素分析结果

 $w_B/10^{-6}$

Table 2 REE and trace elements concentrations of samples from Urho dyke swarms

序号 样号	1 15-1	2 12-1	3 90-1	4 73-1	5 85-1	6 86-1	7 83-1	8 89-1	9 20-7	10 20-8	11 16-4	12 20-5	13 16-3	14 16-1	15 20-3
Li	40.93	58.09	21.90	14.96	22.46	15.62	24.97	17.74	12.22	7.84	22.32	8.01	21.05	34.73	9.77
Be	0.49	0.58	0.44	0.18	0.87	0.56	0.59	0.65	0.81	0.55	0.82	0.67	0.91	0.76	0.58
Sc	27.74	26.66	26.21	35.53	32.78	29.85	29.29	34.73	17.03	16.95	17.4	16.49	17.3	17.3	17.33
V	245.6	248.2	268.2	334.4	352.8	369	304.1	369.9	164.1	192.4	189.1	188.9	192.3	160.8	183.1
Cr	235.9	223.7	84.95	192.3	47.95	34.99	61.69	9.63	109.2	112.2	87.86	93.05	91.86	91.58	92.12
Co	34.82	32.44	29.84	32.37	26.72	23.69	25.12	26.70	20.63	21.28	19.90	20.45	19.76	20.33	20.14
Ni	98.75	93.11	42.73	74.43	27.42	15.31	24.37	8.66	47.83	53.30	43.50	45.50	44.62	44.31	44.01
Cu	79.69	53.56	112.20	17.74	152.0	136.8	138.6	172.0	50.52	68.86	51.32	39.88	86.79	33.98	52.78
Zn	68.70	66.30	68.37	68.26	90.17	79.61	76.05	99.11	70.74	77.44	73.23	75.00	74.84	80.98	75.85
Ga	18.43	16.66	17.36	15.42	17.71	18.94	16.74	19.41	19.09	19.06	19.15	18.87	19.28	17.22	18.51
Rb	2.29	3.90	7.61	17.67	9.76	7.05	10.58	19.69	16.17	17.78	16.45	15.13	9.81	16.41	16.52
Sr	529.2	586.3	552.6	334.3	357.6	549.7	461.1	419.7	708.1	764.7	949.3	734.9	678.1	518.6	747.0
Y	11.51	10.54	12.81	14.11	21.78	16.82	16.79	25.79	10.12	11.11	11.43	11.31	11.76	10.16	11.71
Zr	56.60	42.26	56.18	40.30	93.67	72.10	77.66	117.8	86.54	98.05	100	99.68	102.9	95.34	105.4
Nb	1.87	1.41	1.48	0.75	2.08	1.51	1.74	2.55	2.72	3.18	3.50	3.19	3.25	3.04	3.27
Cd	0.087	0.081	0.067	0.11	0.089	0.10	0.071	0.14	0.11	0.10	0.094	0.10	0.065	0.071	0.091
Cs	0.26	0.15	0.25	0.29	0.16	0.11	0.17	0.21	0.23	0.19	0.56	0.23	0.66	0.80	0.26
Ba	119.4	138	253.7	464.9	313.0	301.7	413.1	341.3	396.9	405.6	645.0	407.9	332.7	693.2	436.9
La	4.84	4.16	5.76	3.53	8.53	6.70	6.52	9.67	9.61	10.37	11.37	10.34	10.88	9.82	10.73
Ce	11.95	10.16	13.84	8.83	23.35	16.3	15.94	26.24	24.25	26.71	28.69	26.92	27.68	24.86	27.62
Pr	1.69	1.47	1.94	1.38	2.96	2.32	2.23	3.39	2.87	3.07	3.34	3.14	3.26	2.94	3.30
Nd	9.37	8.26	10.28	8.00	16.32	12.68	12.11	18.61	14.12	15.16	16.14	15.49	16.16	14.37	16.10
Sm	2.42	2.08	2.58	2.33	4.18	3.31	3.27	4.82	3.00	3.17	3.47	3.29	3.42	3.00	3.37
Eu	0.81	0.71	0.80	0.71	1.15	0.96	0.86	1.25	0.85	0.90	0.93	0.92	0.95	0.81	0.92
Gd	2.61	2.4	2.87	2.74	4.74	3.57	3.53	5.43	2.81	3.11	3.17	3.16	3.18	2.85	3.17
Tb	0.36	0.32	0.40	0.40	0.66	0.51	0.49	0.75	0.35	0.37	0.39	0.39	0.40	0.35	0.39
Dy	2.45	2.26	2.78	2.90	4.57	3.62	3.48	5.49	2.23	2.44	2.54	2.53	2.59	2.29	2.62
Ho	0.44	0.41	0.48	0.55	0.83	0.65	0.65	0.99	0.38	0.42	0.44	0.42	0.45	0.39	0.44
Er	1.23	1.13	1.40	1.59	2.34	1.84	1.80	2.82	1.05	1.16	1.18	1.15	1.24	1.09	1.22
Tm	0.17	0.16	0.20	0.23	0.32	0.25	0.25	0.40	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17
Yb	0.97	0.86	1.14	1.41	1.92	1.60	1.60	2.18	0.79	0.85	0.88	0.86	0.94	0.82	0.93
Lu	0.16	0.15	0.19	0.22	0.32	0.25	0.25	0.39	0.14	0.15	0.15	0.16	0.16	0.14	0.16
Hf	1.20	1.04	1.30	1.14	2.37	1.77	1.87	2.80	1.80	2.04	2.09	2.09	2.14	2.03	2.23
Ta	0.11	0.076	0.087	0.055	0.12	0.085	0.10	0.15	0.15	0.17	0.19	0.17	0.17	0.16	0.17
Pb	2.83	2.29	2.37	1.04	3.28	2.76	2.36	3.72	3.66	3.72	4.00	3.88	4.26	6.03	4.04
Th	0.27	0.23	0.55	0.29	1.22	1.00	1.00	1.50	1.01	1.05	1.26	1.10	1.13	1.03	1.17
U	0.11	0.10	0.24	0.18	0.36	0.32	0.33	0.45	0.38	0.41	0.45	0.42	0.45	0.40	0.46
Σ REE	39.47	34.53	44.66	34.82	72.19	54.56	52.98	82.43	62.59	68.03	72.85	68.93	71.47	63.89	71.14
Σ LREE	31.08	26.84	35.20	24.78	56.49	42.27	40.93	63.98	54.70	59.38	63.94	60.10	62.35	55.80	62.04
Σ HREE	8.39	7.69	9.46	10.04	15.70	12.29	12.05	18.45	7.89	8.65	8.91	8.83	9.12	8.09	9.10
Σ L/ Σ H	3.70	3.49	3.72	2.47	3.60	3.44	3.40	3.47	6.93	6.86	7.18	6.81	6.84	6.90	6.82
δ Eu	0.98	0.97	0.89	0.86	0.79	0.85	0.77	0.74	0.88	0.87	0.84	0.86	0.87	0.83	0.85
δ Ce	1.02	1.01	1.01	0.98	1.14	1.01	1.02	1.12	1.12	1.15	1.13	1.15	1.13	1.12	1.13
(La/Yb) _N	3.58	3.47	3.62	1.80	3.19	3.00	2.92	3.18	8.73	8.75	9.27	8.62	8.30	8.59	8.28
(La/Sm) _N	1.29	1.29	1.44	0.98	1.32	1.31	1.29	1.30	2.07	2.11	2.12	2.03	2.05	2.11	2.06
(Gd/Yb) _N	2.23	2.31	2.08	1.61	2.04	1.85	1.83	2.06	2.94	3.03	2.98	3.04	2.80	2.88	2.82

注: 比值中的下标 N 为球粒陨石标准化值, 标准化值引自 Henderson(1984)。

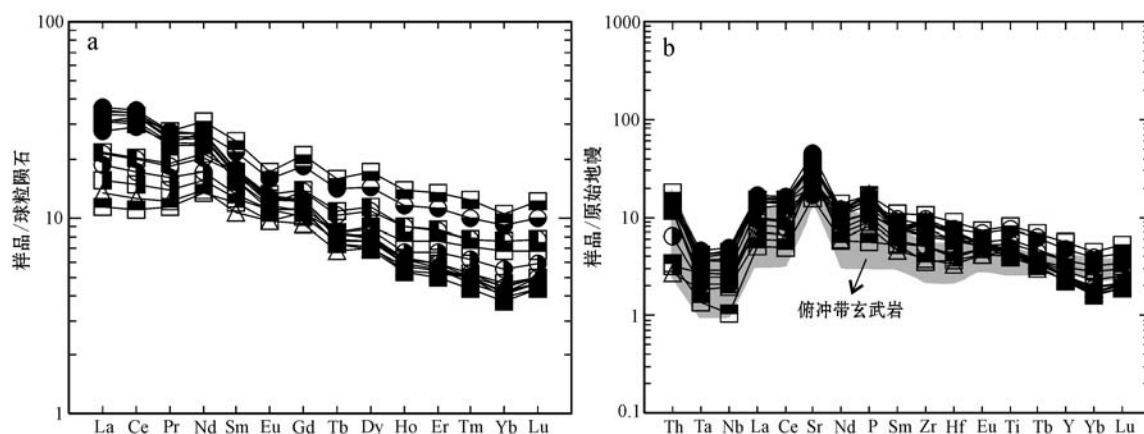


图 5 乌尔禾中基性岩墙群球粒陨石标准化稀土元素配分曲线(a, 据 Henderson, 1984)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b, 据 Sun and McDonough, 1989, 俯冲带玄武岩数据引自 Tatsumi and Eggins, 1995)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized trace element diagram (b) of Urho dyke swarms (chondrite-normalized values after Henderson, 1984, primitive mantle-normalized values after Sun and McDonough, 1989, subduction basalts value after Tatsumi and Eggins, 1995)

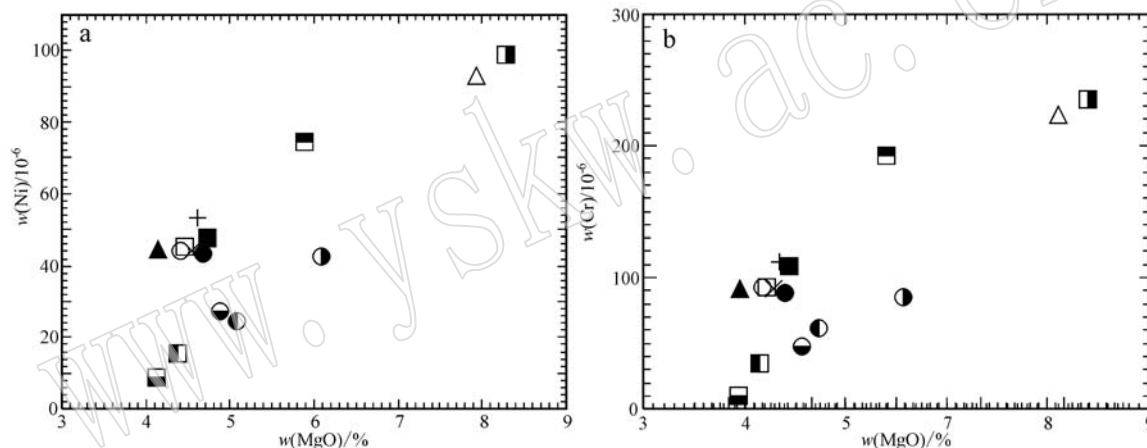


图 6 乌尔禾中基性岩墙群 Ni-MgO 相关图解(a)和 Cr-MgO 相关图解(b)

Fig. 6 Ni-MgO diagram (a) and Cr-MgO diagram (b) of Urho dyke swarms

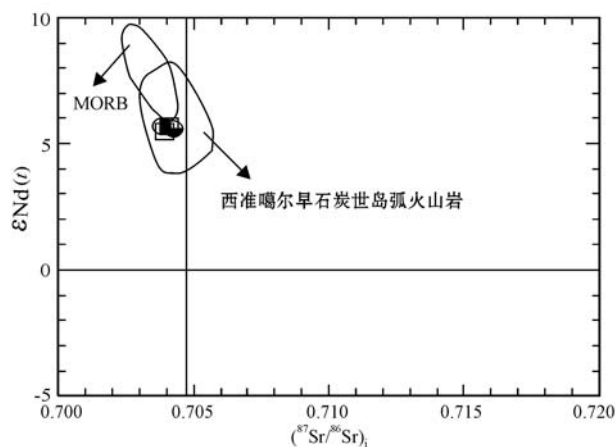


图 7 乌尔禾中基性岩墙群 $\epsilon Nd(t)-(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ 图解(西准噶尔早石炭世岛弧火山岩数据引自 Geng *et al.*, 2011)

Fig. 7 $\epsilon Nd(t)-(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$ diagram of Urho dyke swarms (early Carboniferous volcanic rocks value from Western Junggar after Geng *et al.*, 2011)

5 讨论

5.1 构造环境与岩浆源区分析

中基性岩墙群是玄武质岩浆及其分异的岩浆从深部快速侵位的产物,携带了大量岩石成因与地球动力学方面的信息。研究表明,La/Sm 值随着地壳混染程度的增大而显著增高(张招崇等,2004),一般在 5 以上,而样品的 La/Sm 最高值为 3.27,平均仅为 2.56。样品 Th/La 比值较低,平均值仅为 0.11,接近球粒陨石和原始地幔(Th/La $\approx$ 0.12)(Sun and McDonough, 1989),远小于陆壳(Th/La $\approx$ 0.3)(Plank, 2005)。另外,各样品谱线基本平行,不相容元素未见总体升高,Nd 和 Sr 同位素比值变化范围也较小。这些都与野外观察到的较薄的冷凝边相符

表3 乌尔禾中基性岩墙群样品 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotope compositions of samples from Urho dyke swarms

样品号	RZ20-3	RZ20-5	RZ85-1	RZ86-1
Rb($\times 10^{-6}$)	16.52	15.13	9.76	7.05
Sr($\times 10^{-6}$)	747.00	734.90	357.60	549.70
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.064 0	0.059 6	0.079 0	0.037 1
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_n$	0.704 062	0.704 165	0.704 544	0.704 196
$\pm 2\sigma$	0.000 016	0.000 014	0.000 009	0.000 013
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	0.703 802	0.703 923	0.704 223	0.704 045
$\epsilon\text{Sr}(t)$	-9.58	-7.86	-3.60	-6.13
Sm($\times 10^{-6}$)	3.37	3.29	4.18	3.31
Nd($\times 10^{-6}$)	16.1	15.49	16.32	12.68
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.127 4	0.129 3	0.155 9	0.158 9
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_n$	0.512 799	0.512 794	0.512 849	0.512 860
$\pm 2\sigma$	0.000 006	0.000 006	0.000 006	0.000 006
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	0.512 561	0.512 552	0.512 557	0.512 563
$\epsilon\text{Nd}(t)$	5.67	5.51	5.61	5.71

注: 比值中的下标 *n* 表示测定值, 下标 *i* 表示初始值, 岩墙群的锆石 U-Pb 年龄为 285.7 ± 3.3 Ma, 故采用 $t = 285.7$ Ma。计算参数: $\lambda_{\text{Sr}} = 1.42 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$; $\lambda_{\text{Nd}} = 0.654 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$; $[n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})]_{\text{CHUR}} = 0.704 5$; $[n(^{143}\text{Nd})/n(^{144}\text{Nd})]_{\text{CHUR}} = 0.512 638$ 。

合, 岩墙边部的快速冷凝阻止了岩浆与围岩的进一步接触(李宏博等, 2012), 岩墙在侵位时未受围岩混染。

前已述及, 样品具有与俯冲相关玄武岩相似的地球化学特征, 将其进一步与世界上典型的岛弧玄武岩进行对比可以发现, 除 Ba、P 值偏高, Yb 值偏低外, 样品的原始地幔标准化微量元素蛛网图基本与新西兰 Kermadec 岛弧钙碱性玄武岩(Ewart *et al.*, 1998)重合; 除 Yb、Lu 值偏低外, 样品的原始地幔标准化微量元素蛛网图基本处于 Sunda 岛弧钙碱性玄武岩(Turner *et al.*, 2003)和汤加岛弧拉斑玄武岩(Ewart *et al.*, 1998)范围之内(图 8)。乌尔禾中基性岩墙群仅显示了较低程度的结晶分异和堆晶作用, 进一步应用玄武岩类的构造环境判别图解来确定其构造环境是可行的。样品 Nb、Ta 普遍强烈亏损, 部分样品 Nb、Ta 值甚至低于典型岛弧玄武岩, 显然不是地壳混染的结果, 使用 Condie 提出的 Th/Ta-La/Yb 图解(Condie, 1997)是合适的。在图解中所有样品均投入了岛弧火山岩(ARC)范围内(图 9), 3 个样品在投入岛弧火山岩区的同时, 也具有大陆溢流玄武岩(CFB)的特征。

乌尔禾中基性岩墙群 Nb、Ta 强烈亏损和 LILE 富集的地球化学特征与岛弧火山岩相似, 总体显示存在岛弧俯冲作用的影响。高 $\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 是富 H_2O

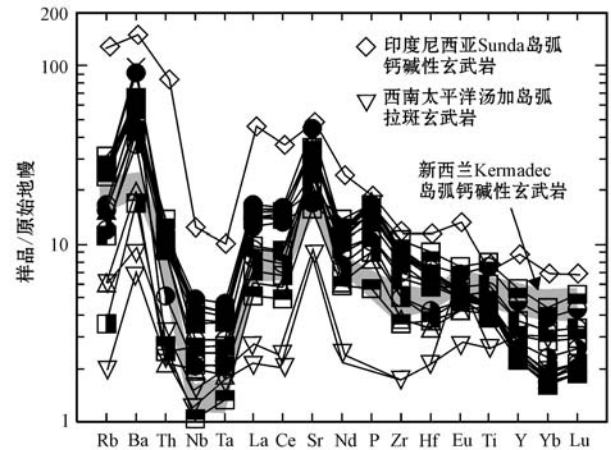


图8 乌尔禾中基性岩墙群与世界典型岛弧玄武岩微量元素蛛网图的对比

Fig. 8 Comparison of trace elements between Urho dyke swarms and typical island-arc volcanic rocks

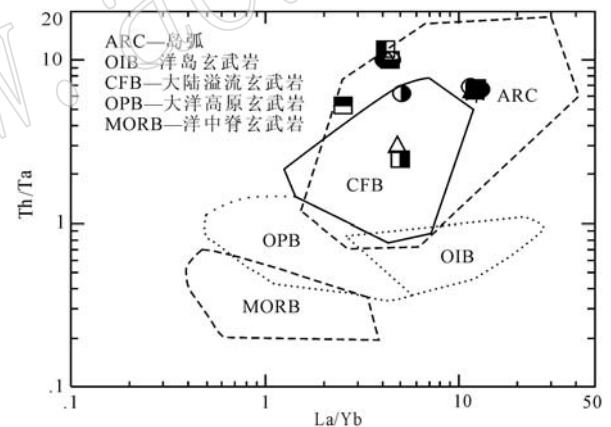


图9 乌尔禾中基性岩墙群 Th/Ta-La/Yb 图解 (Condie, 1997)

Fig. 9 Th/Ta-La/Yb diagram of Urho dyke swarms (modified after Condie, 1997)

的典型特征, 且 Zr/Ba 比值越小, 岩浆越亏损 HFSE (Ormerod *et al.*, 1988), 在 $\text{Zr/Ba}-\text{K}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 图解中(图 10), 负相关性明显, 也就是说, 含 H_2O 流体的特征随 Zr/Ba 比值的增加和岩浆源区富集组分的降低而越来越不明显, 暗示俯冲板片经历了一个脱水的过程, 而这种脱水作用与板片俯冲深度的增加有关。由于富大离子亲石元素的流体与上覆地幔楔的交代作用, 使地幔楔的地幔橄辉岩部分熔融, 形成岛弧岩浆源区。乌尔禾中基性岩墙群正的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值和相对低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值表明亏损地幔是岩墙群的源区, 而这个源区正是亏损的地幔楔。

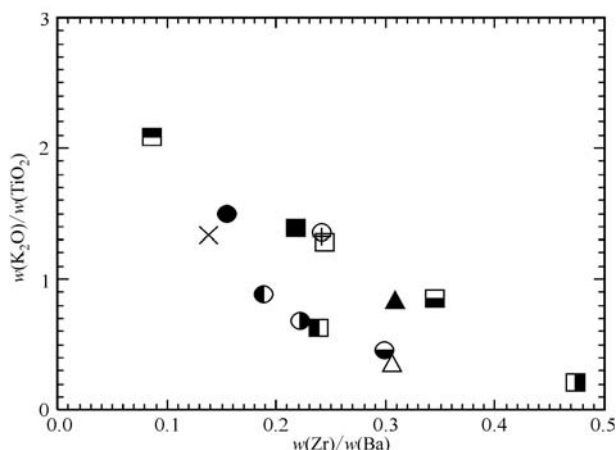


图 10 乌尔禾中基性岩墙群 $K_2O/TiO_2 - Zr/Ba$ 图解
(Ormerod *et al.*, 1988)

Fig. 10 $K_2O/TiO_2 - Zr/Ba$ diagram of Urho dyke swarms
(modified after Ormerod *et al.*, 1988)

在 $Ce/Nb - Th/Nb$ 图解 (Song *et al.*, 2004) 中 (图 11), 样品显示了俯冲组分逐渐增加的正相关性, 且其源区明显有洋壳物质加入, 说明除流体与地幔楔的交代作用外, 板片熔体与地幔楔可能也发生了交代作用。目前西准地区有报道的赞岐岩和富镁闪长岩, 正是形成于俯冲板片熔体在上升过程中与地幔楔的反应 (尹继元等, 2009; Yin *et al.*, 2013)。Th/Yb 比值在岛弧岩浆中反映了消减沉积物或其形成的熔体加入的程度, Ba/La 比值反映了俯冲板片流体加入的程度 (Woodhead *et al.*, 2001), 样品 Th/Yb 比值很低 (0.21~1.43, 平均 0.85), 而 Ba/La 比

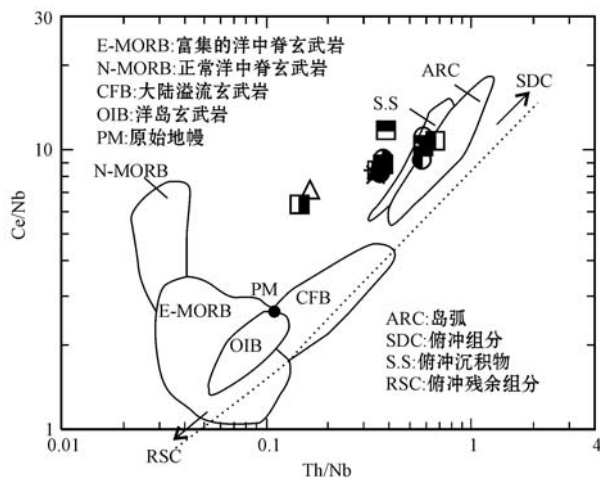


图 11 乌尔禾中基性岩墙群 $Ce/Nb - Th/Nb$ 图解
(Song *et al.*, 2004)

Fig. 11 $Ce/Nb - Th/Nb$ diagram of Urho dyke swarms
(modified after Song *et al.*, 2004)

值很高 (24.67~131.70, 平均 48.83), 说明俯冲物质中的普通沉积物对岩浆成分贡献很小, 成岩过程中消减板块的主要端员组分应该是流体, 流体与上覆地幔楔的交代作用才是地幔橄榄岩部分熔融, 岩浆源区形成的主要因素。

5.2 构造意义

西准噶尔地区在古生代经历了洋内俯冲增生、洋陆转化和后期陆内演化, 部分学者基于晚石炭世-早二叠世大量出现的 A 型花岗岩, 认为西准噶尔地区在晚石炭世后期进入后碰撞环境, 且该构造背景一直持续到早二叠世 (Zhou *et al.*, 2008; Chen *et al.*, 2010; 高睿等, 2013)。

然而, 早二叠世佳木河组褶皱变形强烈, 翼部最大倾角达 80° , 很难在伸展环境下形成, 与石炭系相近的变形样式更有可能是在前陆盆地形成发展下的挤压背景中形成的 (冯建伟等, 2009)。区域大地构造研究也表明, 新疆北部地区在晚石炭世-二叠纪早期仍存在活动陆缘 (肖文交等, 2006), 局部地区仍然可能存在一定规模的俯冲作用。

乌尔禾中基性岩墙群具有鲜明的与岛弧俯冲作用有关的地球化学信息, 是西准东部俯冲增生造山的地质记录。但是佳木河组磨拉石建造的存在表明此时地表已完成汇聚造山, 即将进入造山后环境。岩墙群侵位于陆相盆地中, 说明完整的沟弧盆体系在地表已经消亡的同时, 深部仍在进行板块间的俯冲作用, 深部的弧岩浆作用仍在持续, 显示了“滞后”的特征。达尔布特断裂为深部岛弧岩浆的侵位提供了有利通道, 形成了与大断裂方向一致的岩墙群。这表明西准东部的俯冲增生作用要推迟至早二叠世, 而整个西准地区俯冲造山作用结束的最终时限应在早二叠世晚期。从乌尔禾中基性岩墙群构造环境模式图 (图 12) 可以看出, 该模式主要特征在于:

(1) 地壳层次已发生碰撞, 洋盆已经闭合, 此时地表已经出现了陆相盆地。这也是该模式与经典的岛弧俯冲模式最大的差别, 也是“滞后型”弧岩浆滞后性所在。

(2) 岩浆来自于亏损的地幔楔, 是地幔橄榄岩部分熔融的产物, 且受到俯冲组分的改造, 交代作用主要发生在流体与地幔楔之间, 部分熔体与地幔楔之间可能也发生了交代作用。

西准中西部的俯冲增生作用主要发生在早石炭世, 而西准东部乌尔禾“滞后型”中基性岩墙群 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄显示其侵位时间为早二叠

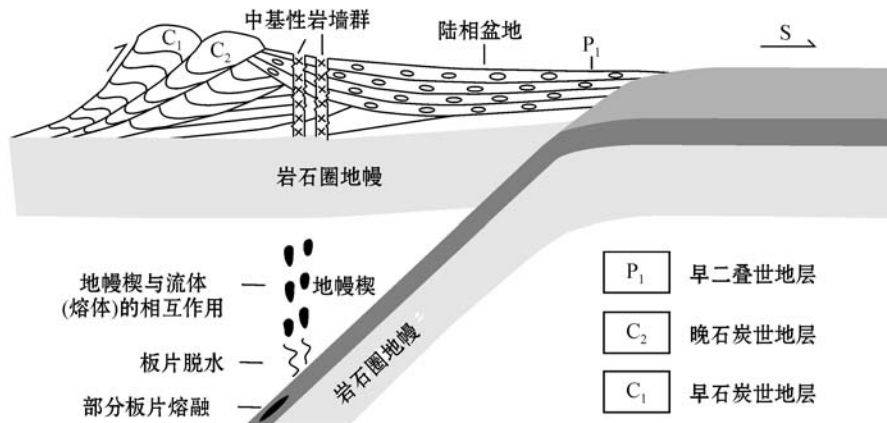


图12 乌尔禾中基性岩墙群构造环境模式图

Fig. 12 Environmental pattern for the tectonic setting of Urho dyke swarms

世,时代明显晚于西准中西部早石炭世火成岩,表明西准东部的俯冲造山作用明显滞后于西准西部,西准东部和西部具有差异演化特征。纵观整个新疆北部,乌尔禾早二叠世“滞后型”中基性岩墙群的出现绝非偶然。东准噶尔东北缘的三塘湖盆地、陆东-五彩湾地区、扎河坝西北地区、陆梁隆起以及卡拉麦里地区,早石炭世-早二叠世火山岩都显示陆内岩浆演化特征,又具有弧火山岩地球化学痕迹(郝建荣等, 2006; Zhou *et al.*, 2006; 赵霞等, 2008; 杨高学等, 2010),而且这些火山岩时代由西向东逐渐变新(吴小奇等, 2009),表明东准东部的俯冲造山作用晚于东准西部。西准与东准的这种相似性表明这些“滞后型弧火山岩”可能是板块间最后碰撞增生的记录,代表着地表完成汇聚造山之时深部仍然存在的俯冲带岩浆作用,其产出位置正是古俯冲带存在的位置。

6 结论

(1) 西准噶尔东部哈拉阿拉特山南麓乌尔禾中基性岩墙群岩石类型为辉绿岩、辉绿玢岩和辉长闪长岩,地球化学特征显示其属于低钾钙碱性玄武岩-安山岩,稀土元素配分模式为右倾型,配分曲线基本平行, δEu 负异常不明显。

(2) 岩墙群岩石富集大离子亲石元素(LILE), Sr 具有明显的正异常,亏损高场强元素(HFSE), Nb、Ta 具有明显的负异常,具有岛弧俯冲的地球化学特征。正的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值(5.51~5.71)和相对低的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.703 802~0.704 223)表明亏损地幔是岩墙群的源区。岩浆来自于亏损的地幔楔,

是地幔橄榄岩部分熔融的产物,且受到俯冲组分的改造。

(3) 乌尔禾中基性岩墙群侵位于早二叠世佳木河组磨拉石建造中,展布方向和达尔布特断裂延伸方向一致,是在地表已完成汇聚造山时,深部弧岩浆作用的产物,表明西准东部在早二叠世时仍存在俯冲增生,而且西准东部的俯冲造山作用滞后于西准西部,整个西准地区俯冲造山结束的最终时限应在早二叠世晚期。

致谢 审稿专家为本文提出了宝贵的意见和建议,并斧正了文中疏误,编辑部老师亦给予了热情帮助,谨致衷心感谢!

References

- Chen J F, Han B F, Ji J Q, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of Paleozoic plutons in northern West Junggar, North Xinjiang, China [J]. *Lithos*, 115(1): 137~152.
- Choulet F, Faure M, Cluzel D, *et al.* 2012. From oblique accretion to transpression in the evolution of the Altaid collage: New insights from West Junggar, northwestern China[J]. *Gondwana Research*, 21: 530~547.
- Condie K C. 1997. Sources of Proterozoic mafic dyke swarms: constraints from Th/Ta and La/Yb ratios[J]. *Precambrian Research*, 81: 3~14.
- Cox K G, Bell J D and Pankhurst R J. 1979. *The Interpretation of Igneous Rocks*[M]. London: Allen and Unwin.
- Ewart A, Collerson K, Regelous M, *et al.* 1998. Geochemical evolution

- within the Tonga-Kermadec-Lau arc-back-arc systems: the role of varying mantle wedge composition in space and time[J]. *Journal of Petrology*, 39: 331~368.
- Feng Jianwei, Dai Junsheng, Yan Jihua, *et al.* 2009. Sedimentary response to permian structural movements in Wuxia foreland thrust belt of Junggar basin[J]. *Acta sedimentologica Sinica*, 27(3): 494~502(in Chinese with English abstract).
- Gao Rui, Xiao Long, Wang Guocan, *et al.* 2013. Paleozoic magmatism and tectonic setting in West Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(10): 3 413~3 434(in Chinese with English abstract).
- Geng H, Sun M, Yuan C, *et al.* 2011. Geochemical and geochronological study of early Carboniferous volcanic rocks from the West Junggar: Petrogenesis and tectonic implications[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42: 854~866.
- Gong Yiming, Zong Ruiwen, Wang Guocan, *et al.* 2013. Regionalization of Paleozoic strata and palaeogeography in West Junggar[J]. *Journal of Stratigraphy*, 37(4): 590~592(in Chinese).
- Hao Jianrong, Zhou Dingwu, Liu Yiqun, *et al.* 2006. Geochemistry and tectonic settings of Permian volcanic rocks in Santanghu basin, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 189~198(in Chinese with English abstract).
- Henderson P. 1984. General Geochemical Properties and Abundances of the Rare Earth Element[M]. *Rare Earth Element Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 63~114.
- Jahn B M, Griffin W and Windley B. 2000. Continental growth in the Phanerozoic: evidence from Central Asia [J]. *Tectonophysics*, 328: vii-x.
- Li Hongbo, Zhang Zhaochong, Lü Linsu, *et al.* 2012. Petrological, geochemical and geometric characteristics of dyke swarms and their tectonic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 31(1): 91~103(in Chinese with English abstract).
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, *et al.* 2006. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148~168(in Chinese with English abstract).
- Li Yongjun, Shen Rui, Wang Ran, *et al.* 2014. Discovery and significance of Early Carboniferous Nb-Enriched basalts in Barnuke, West Junggar, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12): 3 501~3 511(in Chinese with English abstract).
- Liang Q, Jing H and Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. *Talanta*, 51: 507~513.
- Ormerod D S, Hawkesworth C J, Rogers N W, *et al.* 1988. Tectonic and magmatic transitions in the Western Great Basin, USA[J]. *Nature*, 333: 349~353.
- Plank T. 2005. Constraints from thorium/lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents[J]. *Journal of Petrology*, 46: 921~944.
- Shen P, Shen Y, Liu T, *et al.* 2008. Geology and geochemistry of the Early Carboniferous Eastern Sawur caldera complex and associated gold epithermal mineralization, Sawur Mountains, Xinjiang, China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 259~279.
- Shu Liangshu, Lu Huafu, Yin Donghao, *et al.* 2001. Late Paleozoic continental accretionary tectonics in northern Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 19(1): 59~63(in Chinese with English abstract).
- Song X Y, Zhou M F, Cao Z M, *et al.* 2004. Late Permian rifting of the South China Craton caused by the Emeishan mantle plume? [J]. *Journal of the Geological Society*, 161: 773~781.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[C]. *Geol Soc. Spec. Pub.*, London, 42: 313~345.
- Tatsumi Y and Eggins S. 1995. *Subduction Zone Magmatism*[M]. Blackwell Science Cambridge.
- Tian Zhixian, Yan Jun, Li Yongjun, *et al.* 2013. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age, Geochemistry and Tectonic Setting of the Volcanic Rocks in the Heishatou Formation from the Area of Barleik, West Junggar[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 87(8): 343~352 (in Chinese with English abstract).
- Turner S, Foden J, George R, *et al.* 2003. Rates and processes of potassic magma evolution beneath Sangeang Api volcano, East Sunda arc, Indonesia[J]. *Journal of petrology*, 44: 491~515.
- Wilson B M. 1989. *Igneous Petrogenesis a Global Tectonic Approach* [M]. Springer.
- Woodhead J D, Hergt J M, Davidson J P, *et al.* 2001. Hafnium isotope evidence for conservation element mobility during subduction zone processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 192: 331~346.
- Wu Xiaoqi, Liu Deliang, Li Zhensheng, *et al.* 2009. Post-collisional volcanism of suture zone[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 220~230(in Chinese with English abstract).
- Xiao Wenjiao, Han Chunming, Yuan Chao, *et al.* 2006. Unique Carboniferous-Permian tectonic-metallogenic framework of Northern Xinjiang(NW China): Constraints for the tectonics of the southern Paleasian Domain[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 062~1 076(in Chinese with English abstract).
- Xu Xueyi, Li Rongshe, Chen Junlu, *et al.* 2014. New constrains on the Paleozoic tectonic evolution of the northern Xinjiang area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(6): 1 521~1 534(in Chinese with English abstract).
- Yang Gaoxue, Li Yongjun, Li Zhucang, *et al.* 2010. Genesis and tec-

- tonic settings of post-collision volcanic in north aestern margin of East Junggar, Xinjiang[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(1): 49~60(in Chinese with English abstract).
- Yin J Y, Long X P, Yuan C, *et al.* 2013. Late Carboniferous-Early Permian slab window in the West Junggar of NW China: Geochronological and geochemical evidence from mafic to intermediate dykes[J]. *Lithos*, 175~176: 146~162.
- Yin Jiyuan, Yuan Chao, Sun Min, *et al.* 2009. Sanukitic dykes in West Junggar, Xinjiang: Geochemical features, petrogenesis and links to Cu-Au mineralization[J]. *Geochimica*, 38(5): 123~132(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Wang Fusheng, Hao Yanli, *et al.* 2004. Geochemistry of the Picrites and Associated Basalts from the Emeishan Large Igneous Basalt Province and Constrains on Their Source Region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 78(2): 171~180(in Chinese with English abstract).
- Zhao Xia, Jia Chengzao, Zhang Guangya, *et al.* 2008. Geochemistry and tectonic settings of Carboniferous intermediate-basic volcanic rocks in Ludong-Wucaiwai, Junggar basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 15(2): 272~279(in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhenhua, Wang Qiang, Xiong Xiaolin, *et al.* 2006. Two types of adakites in north Xinjiang, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1 249~1 265(in Chinese with English abstract).
- Zhou D W, Liu Y Q, Xing X J, *et al.* 2006. Formation of the Permian basalts and implications of geochemical tracing for paleo-tectonic setting and regional tectonic background in the Turpan-Hami and Santanghu basins, Xinjiang[J]. *Science in China: Series D Earth Sciences*, 49(6): 584~596.
- Zhou T F, Yuan F, Fan Y, *et al.* 2008. Granites in the Sawuer region of the west Junggar, Xinjiang Province, China: geochronological and geochemical characteristics and their geodynamic significance [J]. *Lithos*, 106(3): 191~206.
- 冯建伟, 戴俊生, 鄯继华, 等. 2009. 准噶尔盆地乌夏前陆冲断带构造活动-沉积相应[J]. *沉积学报*, 27(3): 494~502.
- 高 睿, 肖 龙, 王国灿, 等. 2013. 西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景[J]. *岩石学报*, 29(10): 3 413~3 434.
- 龚一鸣, 纵瑞文, 王国灿, 等. 2013. 西准噶尔古生代地层区划及古地理格局[J]. *地层学杂志*, 37(4): 590~592.
- 郝建荣, 周鼎武, 柳益群, 等. 2006. 新疆三塘湖盆地二叠纪火山岩岩石地球化学及其构造环境分析[J]. *岩石学报*, 22(1): 189~198.
- 李宏博, 张招崇, 吕林素, 等. 2012. 岩墙群的岩石学、地球化学和几何学特征及其大地构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 31(1): 91~103.
- 李锦轶, 何国琦, 徐 新, 等. 2006. 新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨[J]. *地质学报*, 80(1): 148~168.
- 李永军, 沈 锐, 王 冉, 等. 2014. 新疆西准噶尔巴尔努克早石炭世富 Nb 岛弧玄武岩的发现及其地质意义[J]. *岩石学报*, 30(12): 3 501~3 511.
- 舒良树, 卢华复, 印栋浩, 等. 2001. 新疆北部古生代大陆增生构造 [J]. *新疆地质*, 19(1): 59~63.
- 田陟贤, 阎 军, 李永军, 等. 2013. 西准噶尔巴尔雷克一带石炭系黑山头组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及构造环境[J]. *地质学报*, 87(8): 343~352.
- 肖文交, 韩春明, 袁 超, 等. 2006. 新疆北部石炭纪二叠纪独特的构造-成矿作用对古亚洲构造域南部大地构造演化的制约[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 062~1 076.
- 吴小奇, 刘德良, 李振生. 2009. 卡拉麦里缝合带后碰撞期火山活动 [J]. *地学前缘*, 16(3): 220~230.
- 徐学义, 李荣社, 陈隽璐, 等. 2014. 新疆北部古生代构造演化的几点认识[J]. *岩石学报*, 30(6): 1 521~1 534.
- 杨高学, 李永军, 李注苍, 等. 2010. 东准噶尔东北缘后碰撞火山岩成因与构造环境[J]. *地学前缘*, 17(1): 49~60.
- 尹继元, 袁 超, 孙 敏, 等. 2009. 新疆西准噶尔地区赞岐岩(Sanukite)的地球化学特征、成因机制及其与铜金矿化的关系 [J]. *地球化学*, 38(5): 413~423.
- 张招崇, 王福生, 郝艳丽, 等. 2004. 峨眉山大火成岩省中苦橄岩与其共生岩石的地球化学特征及其对源区的约束[J]. *地质学报*, 78(2): 171~180.
- 赵振华, 王 强, 熊小林, 等. 2006. 新疆北部的两类埃达克岩[J]. *岩石学报*, 22(5): 1 249~1 265.
- 赵 霞, 贾承造, 张光亚, 等. 2008. 准噶尔盆地陆东—五彩湾地区石炭系中、基性火山岩地球化学及其形成环境[J]. *地学前缘*, 15(2): 272~279.

附中文参考文献