

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2018.4.14

东天山卡拉塔格泥盆纪岩浆岩地球化学特征及成因

陈磊^{1,2,3}, 王京彬^{1,2,3,*}, 邓小华³, 吴湘滨^{1,2}, 邹海洋^{1,2}, 孙燕³,
许骏^{3,4,5}, 张文东^{1,2,3}

1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 湖南 长沙 410083
2. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室(中南大学), 湖南 长沙 410083
3. 北京矿产地质研究院, 北京 100012
4. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083
5. 四川省冶金地质勘查局 成都地质调查所, 四川 成都 610203

CHEN Lei^{1,2,3}, WANG Jingbin^{1,2,3,*}, DENG Xiaohua³, WU Xiangbin^{1,2}, ZOU Haiyang^{1,2},
SUN Yan³, XU Jun^{3,4,5}, ZHANG Wendong^{1,2,3}

1. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China
2. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha 410083, China
3. Beijing Institute of Geology for Mineral Resources, Beijing 100012, China
4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
5. Chengdu Geological Research Institute, Sichuan Metallurgical and Geological Exploration Bureau, Chengdu 610203, China

CHEN Lei, WANG Jingbin, DENG Xiaohua, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of Devonian magmatic rocks in the Kalatag district, eastern Tianshan, NW China. *Earth Science Frontiers*, 2018, 25(5): 051-068

Abstract: We conducted petrologic investigation and performed major and trace elemental and Sr-Nd isotopic analysis on magmatic rocks from the Kalatag district, eastern Tianshan in order to understand the petrogenesis and geodynamic setting of Devonian magmatic rocks. The results show that Devonian magmatic rocks were mainly composed of intermediate-basic rocks including gabbro, diorite, quartz diorite, monzonite and andesite. Gabbro was calc-alkaline to tholeiitic with high Al_2O_3 content (18.96%–19.06%) and $Mg^\#$ value (57.28–69.37), yielding A/CNK value of 0.73–0.88. Diorite, quartz diorite, monzonite and andesite were calc-alkaline to high-K calc-alkaline with high Al_2O_3 contents (15.02%–17.43%) and $Mg^\#$ values (53.67–72.91), and A/CNK values of 0.73–1.17. Sr-Nd isotopic analysis yielded positive $\epsilon_{Nd}(t)$ values ranging from 5.36 to 7.72 with low initial $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios of 0.70311 to 0.70518. Devonian magmatic rocks were enriched in large ion lithophile elements (Rb, Ba and K) while depleted in high field strength elements (Ta, Nb and Ti). These geochemical characteristics indicate that Devonian magmatic rocks were derived from the same magma chamber with an enriched mantle wedge metasomatized by subduction slab fluid and emplaced in an island arc setting during the northward subduction of the Kanggur Ocean.

Key words: geochemistry; petrogenesis; Devonian; Kalatag district; eastern Tianshan

摘要:文中对卡拉塔格地区泥盆纪岩浆岩进行了系统的岩相学、岩石地球化学研究,探讨其成因及形成构造背景。卡拉塔格地区泥盆纪火山岩主要为安山岩,并被同期一套成分连续的侵入体,包括辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、二长岩等侵入。其中,辉长岩为钙碱性-低钾系列准铝质岩石,具有较高的 Al_2O_3 含量(18.76%~19.06%) 和 $Mg^\#$ (57.28~69.37), 具有正 Eu 异常; 闪长岩、石英闪长岩、二长岩和安山岩为钙碱性-高钾钙碱

收稿日期:2018-02-08;修回日期:2018-06-12

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”项目(2014CB440803);国家自然科学基金项目(41572077,41602087);中国地质调查局项目(121201004000160901-66,12120114065801,DD20160071);国土资源部公益性行业科研专项(201411026)

作者简介:陈磊(1988—),男,博士,主要从事矿床学和成矿规律研究。E-mail:chenleicsu@163.com

* 通讯作者简介:王京彬(1961—),男,博士生导师,研究员,主要从事矿床学和找矿预测研究。E-mail:wjb@bigm.com.cn

性系列的准铝质-弱过铝质岩石,也具有较高的 Al_2O_3 含量(15.02%~17.43%)和 $Mg^\#$ (53.67~72.91), 具有较弱的 Eu 负异常或无 Eu 异常。这些岩岩都具有较低的初始 Sr 值(0.703 11~0.705 18)以及较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(5.36~7.72), 均富集轻稀土和大离子亲石元素 Rb、Ba、K 等, 亏损重稀土和高场强元素 Ta、Nb、Ti 等, 都具有岛弧岩岩的特征。相似的岩石地球化学特征显示它们可能为同源岩岩活动的产物, 可能是由俯冲洋壳形成的流体交代地幔楔岩石发生部分熔融而形成。泥盆纪岩岩形成于康古尔洋向卡拉麦里洋俯冲的岛弧背景。

关键词:地球化学;岩石成因;泥盆纪;卡拉塔格;东天山

中图分类号:P588.1;P595 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2018)05-0051-18

自早古生代以来,经历了从俯冲-碰撞到后碰撞-板内环境的完整造山演化过程^[1,3-6],发育强烈的构造-岩浆活动和显著的陆壳增生,并伴随大规模的成矿作用,是中国重要的铜、镍、金、铁、铅锌等大型矿床集中区^[7-9],也是研究构造、岩浆与成矿作用的理想地区,长期受到学者们的广泛关注^[10-11]。许多学者

0 引言

中亚造山带(CAOB)是世界上最大的显生宙增生造山带,东西长约 7 000 km^[1](图 1a)。东天山位于中亚造山带西南部,向东与北山相邻^[2](图 1b),

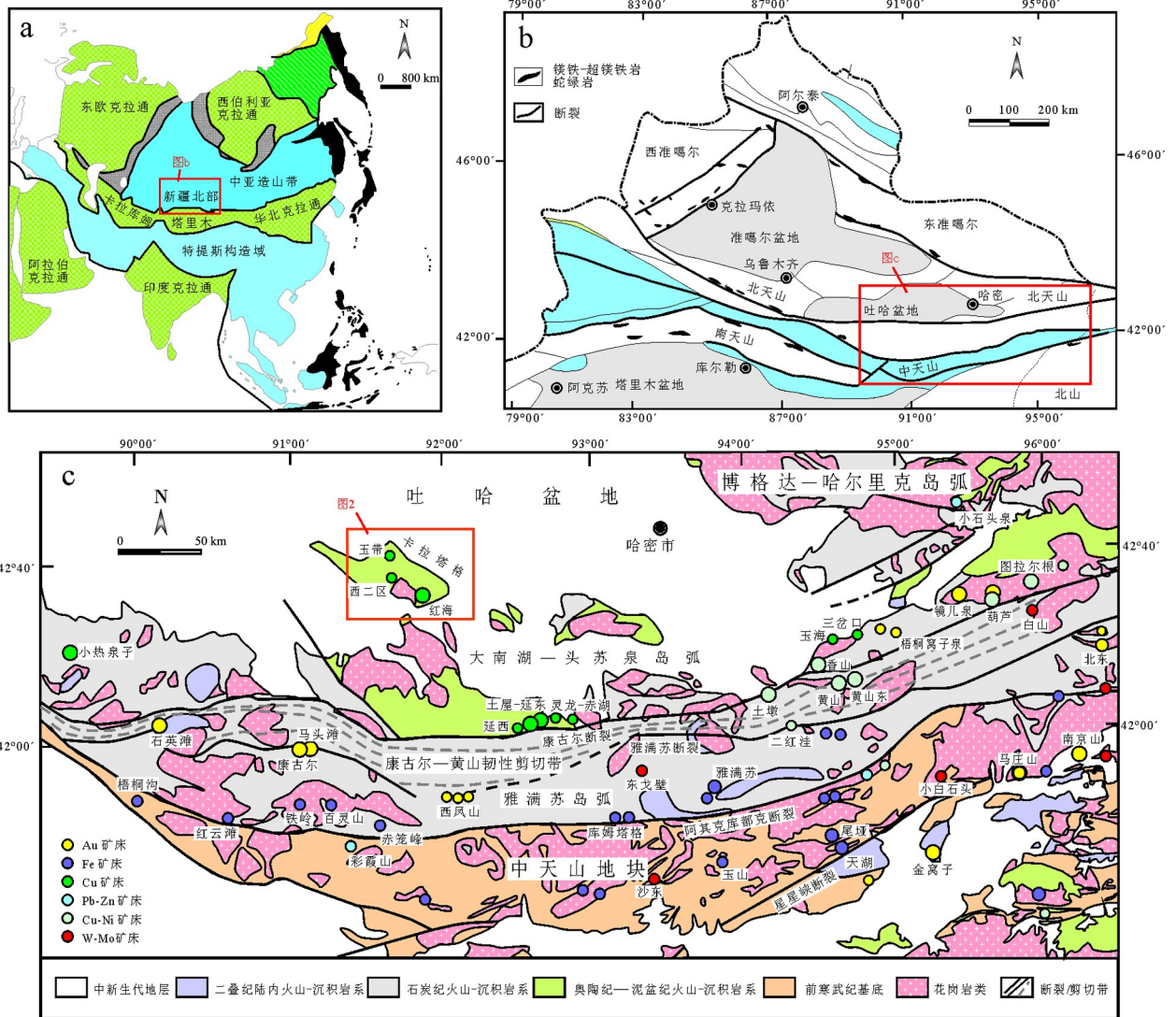


图 1 中亚造山带构造简图(a)^[1]、新疆北部构造纲要图(b)^[2]和东天山地质和矿产分布图(c)^[7,15]
(图 a 据文献[1]改编;图 b 据文献[2]改编;图 c 据文献[7,15]改编)

Fig.1 Simplified tectonic map of the Central Asia Orogenic Belt(a)^[1], sketch map showing the tectonic units of North Xinjiang(b)^[2] and geological map of eastern Tianshan and spatial-temporal distribution of ore deposits in the region(c)^[7,15]

对其奥陶纪、志留纪和石炭纪俯冲-增生形成的岛弧岩浆岩进行了大量研究^[12-14],然而,对泥盆纪岩浆岩的研究则鲜有报道^[6]。

卡拉塔格地区位于东天山大南湖—头苏泉古生代岛弧带北缘^[7,15](图1c),出露大量古生代岩浆-火山活动产物及其有关矿产,相继发现红海 VMS 型铜锌矿床、红石热液脉状铜矿床、玉带斑岩型铜矿床和西二区夕卡岩型铁铜矿床等矿床和矿点^[15-18]。前人对该地区岩浆岩进行过一些岩石学、地球化学、年代学研究,如:李文铅等^[19]认为卡拉塔格岩体为典型的岛弧钙碱性岩浆岩,来源于亏损地幔;唐俊华等^[20]指出卡拉塔格地区卡拉塔格组火山岩为一套钠质海相火山岩,其形成可能与富钠的俯冲洋壳熔体与地幔楔岩石反应的产物部分熔融有关;李玮等^[21]指出卡拉塔格地区出露的荒草坡群火山岩形成于洋内岛弧环境,安山岩和英安岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 434.8 和 438.4 Ma;Mao 等^[22]获得西二区石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 (382.1 ± 2.4) Ma。前人对卡拉塔格地区泥盆纪岩浆岩的研究则较少。由于泥盆纪岩浆岩,特别是侵入岩与新发现的西二区夕卡岩铁铜矿床关系密切,因此,亟须对卡拉塔格地区泥盆纪岩浆岩进行系统的研究。本文在已有工作基础上,通过详细的野外地质调查,对泥盆纪岩浆岩

进行了系统的岩石学和地球化学研究,在此基础上探讨岩浆岩的形成机制及产出的大地构造背景。

1 区域地质背景

东天山造山带由北向南被东西向的克拉麦里断裂和阿其克库都克断裂分为 3 个构造成矿单元:博格达—哈尔里克带、觉罗塔格带和中天山地块,各成矿单元的地层、构造变形强度、矿床类型等差异较大^[23-24](图1c)。博格达—哈尔里克带发育奥陶纪—石炭纪火山岩、花岗岩和基性—超基性杂岩体,带内发育少量的铜、金矿点^[13]。中天山地块主体出露前寒武纪结晶基底和部分早古生代岛弧火山岩,变质作用强烈,主要发育铁、铅、锌矿床^[25-26]。觉罗塔格带主要由古生代火山岩和沉积岩组成,带内发育大量铜、铁、金矿床,该带由北向南被东西向的康古尔断裂和雅满苏断裂分为 3 个构造成矿亚单元:大南湖—头苏泉岛弧带、康古尔—黄山韧性剪切带和雅满苏岛弧带^[23](图1c)。卡拉塔格隶属大南湖—头苏泉岛弧带,北部紧邻吐哈盆地。

卡拉塔格地区出露的地层有中奥陶统大柳沟组、下泥盆统大南湖组、上石炭统脐山组及下二叠统卡拉岗组^[15-18](图2)。大柳沟组为一套海相安山岩

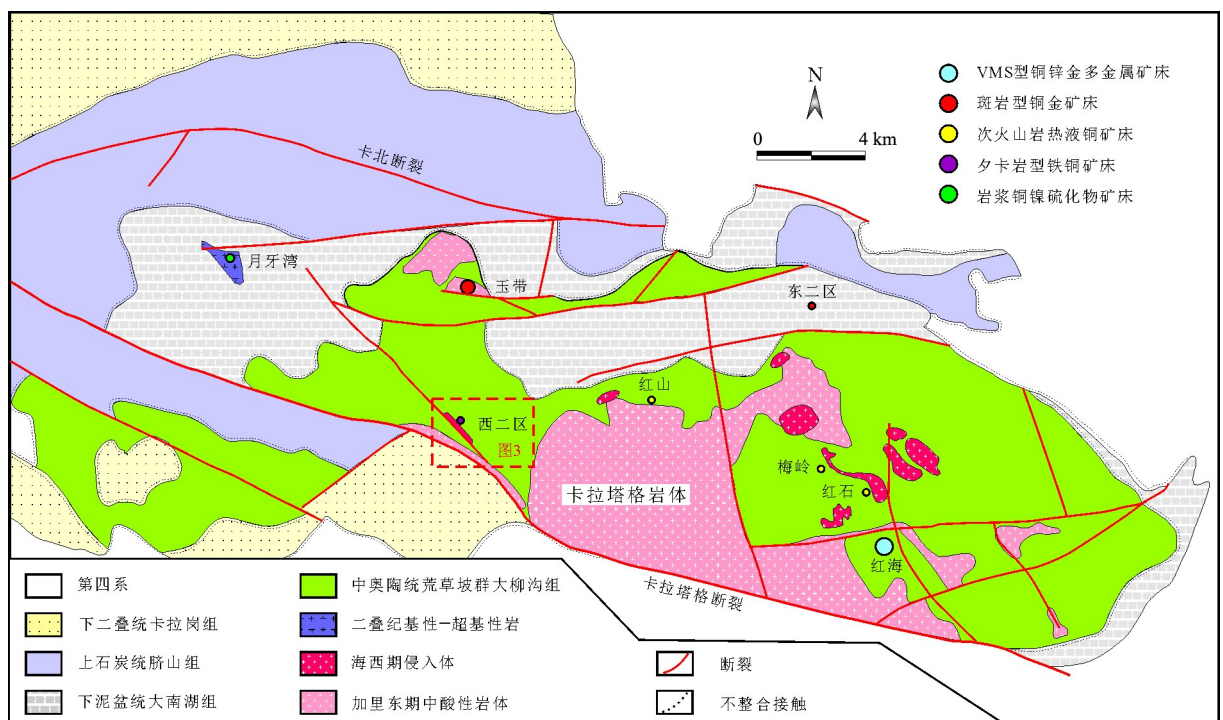


图2 卡拉塔格区域地质图^[15-18]

(据文献^[15-18]修编)

Fig.2 Regional geology of the Kalatag district^[15-18]

(>450 Ma)、凝灰岩(450~440 Ma)及英安岩(440~420 Ma)建造^[27];大南湖组为海相火山碎屑岩、碎屑沉积岩夹中基性火山熔岩及碳酸盐岩,不整合叠加于大柳沟组;脐山组为一套基性-中酸性火山碎屑岩夹中-基性火山熔岩;卡拉岗组为一套陆相火山熔岩夹少量火山碎屑岩建造。

卡拉塔格地区侵入岩较发育,时代主要为加里东期和海西期。其中,加里东期侵入体包括英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩等,测得它们的SIMS锆石U-Pb年龄为426~430 Ma^[27]。海西期侵入体主要于泥盆纪侵位,在卡拉塔格地区广泛发育,但侵入体规模相对较小,一般为 $n \times 10 \text{ m}^2 \sim n \text{ km}^2$ 不等,出露形式有岩株、岩脉和岩墙等,岩石类型包括辉长岩、闪长岩、石英闪长岩和二长岩等。

2 岩相学特征

本文研究的泥盆纪岩浆岩位于卡拉塔格西二区(图3),西二区主要为一套泥盆系大南湖组凝灰质砂岩、大理岩、安山岩和火山角砾岩建造。侵入岩以中性岩为主,包括辉长岩、闪长岩、石英闪长岩和二长岩,呈岩脉或岩株状产出,各岩石单元间不存在截然的接触关系,但空间上密切共生,均侵位于下泥盆

统大南湖组(图4)。

安山岩(图5a,b):深灰色—浅灰色,斑状结构,块状构造,斑晶占全岩约10%,主要由斜长石、辉石组成。斜长石占2%~7%,呈半自形晶,大小一般为0.3~0.5 mm;辉石占2%~5%,呈半自形晶,大小一般0.2~0.5 mm。基质为交织结构,主要由斜长石、辉石、磁铁矿组成。副矿物有磁铁矿、磷灰石。岩石蚀变以弱绢云母化为主。

辉长岩(图5c,d):深灰色,辉长结构,块状构造,岩石主要由斜长石、单斜辉石、橄榄石组成。斜长石占60%~65%,半自形板状,大小一般1~2 mm;单斜辉石占20%~25%,半自形柱状,大小一般0.2~0.5 mm,星散状分布在斜长石之间,可见板条状斜长石包体,构成嵌晶含长结构;橄榄石占10%~15%,它形粒状,大小一般0.1~0.3 mm。岩石蚀变以蛇纹石化、绢云母化为主。

闪长岩(图5e,f):灰绿色—浅灰红色,中细粒半自形粒状结构,块状构造,主要由斜长石、角闪石及少量石英组成。斜长石75%~80%,呈半自形板状,大小一般为1~2 mm;角闪石15%~20%,呈半自形柱状,大小一般0.5~1 mm;石英<5%,呈它形粒状,大小一般0.1~0.5 mm。副矿物有磁铁矿、锆石。岩石蚀变以绢云母化、绿帘石化、绿泥石化、阳起石化为主。

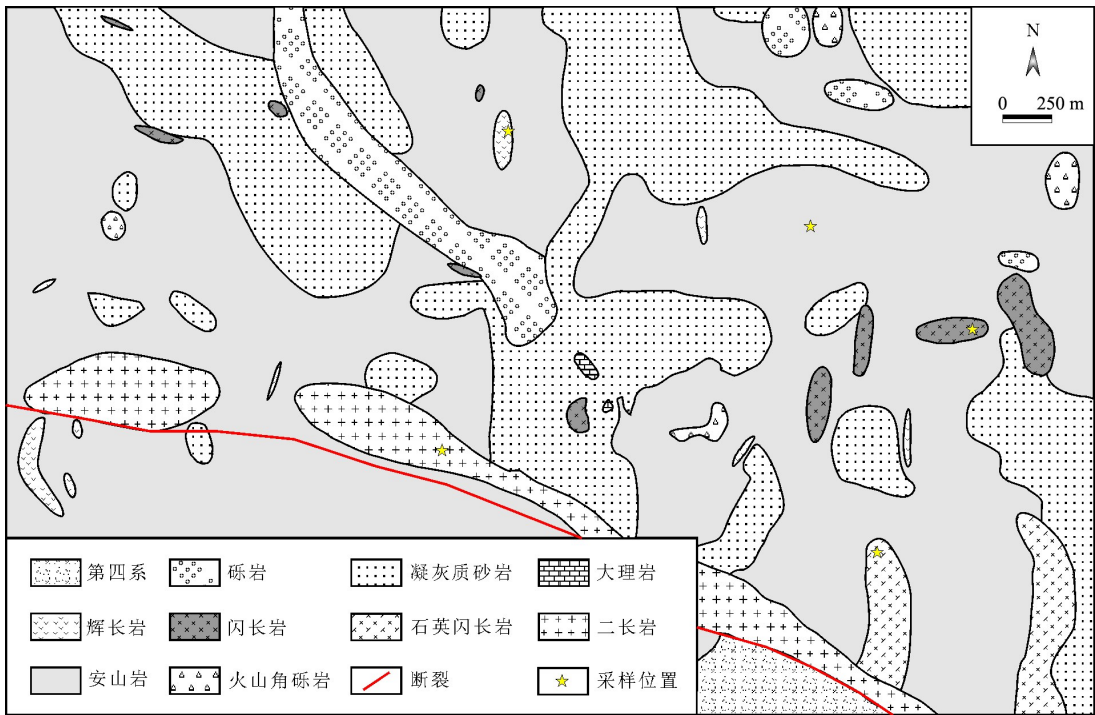
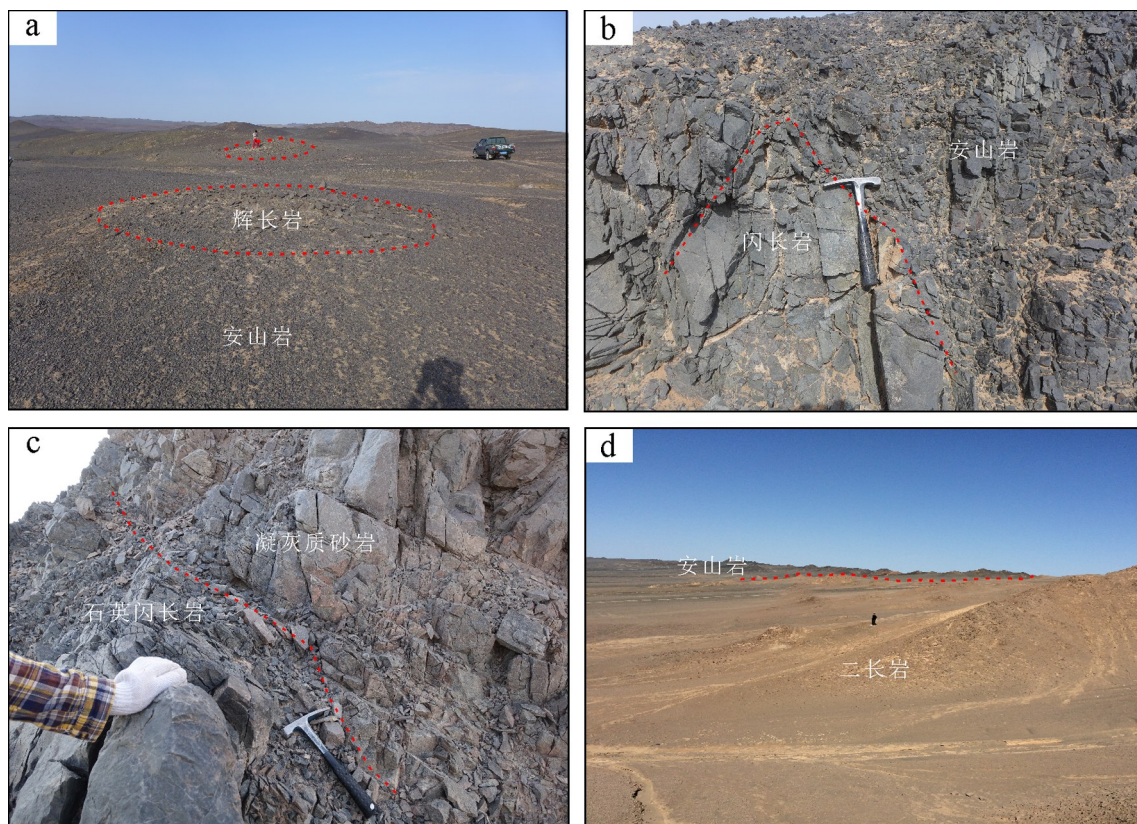


图3 卡拉塔格西二区矿区地质图

Fig.3 A sketch geological map of the Xierqu area



a—辉长岩侵入安山岩;b—闪长岩侵入安山岩;c—石英闪长岩侵入凝灰质砂岩;d—二长岩侵入安山岩。

图4 泥盆纪侵入岩与大南湖组地层野外交触关系照片

Fig.4 Photographs showing field occurrence of contact relationship between Devonian intrusions and the Dananhu Formation

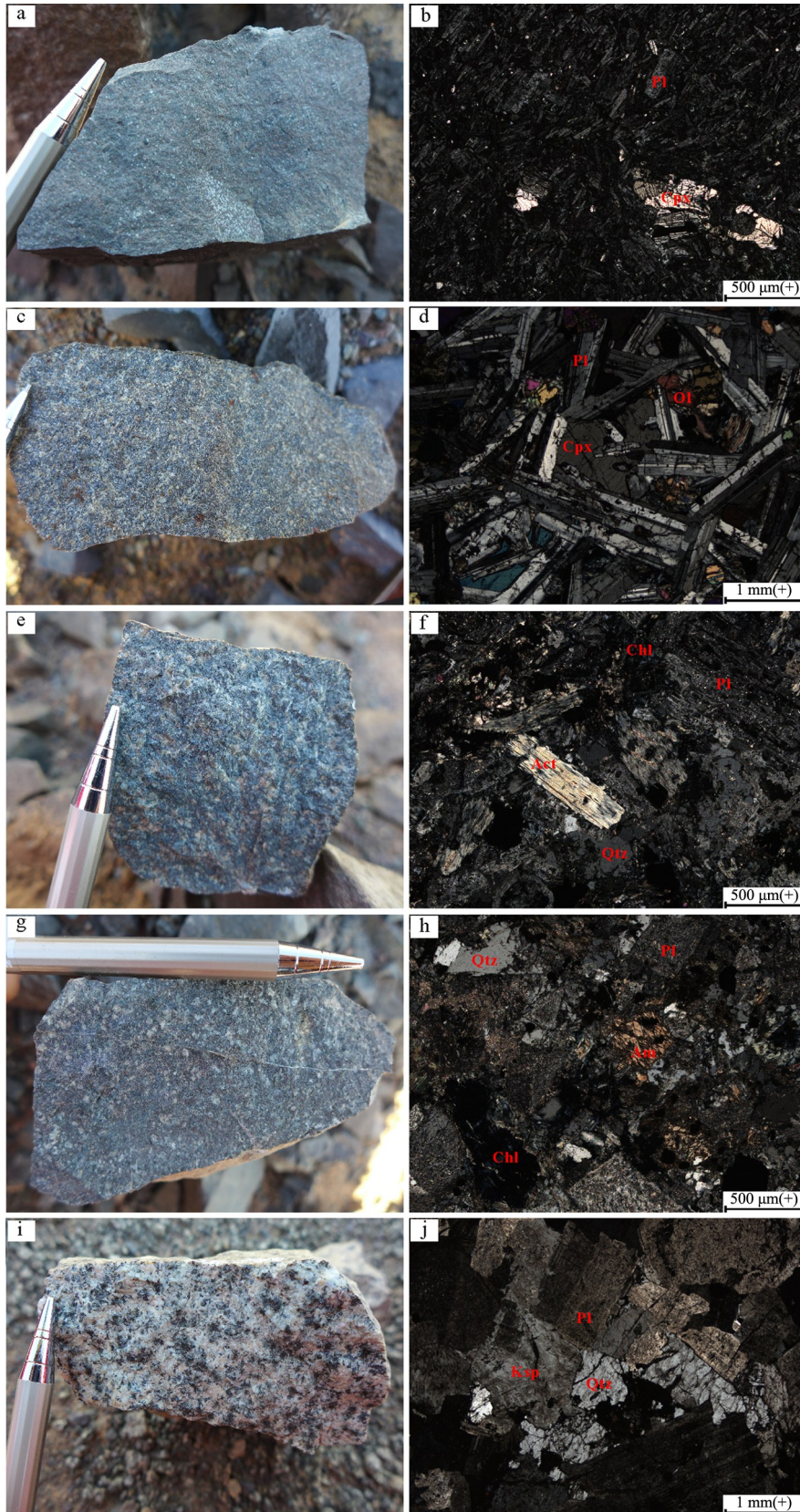
石英闪长岩(图 5g, h): 浅灰色—灰白色, 中细粒半自形粒状结构, 块状构造, 斑晶占全岩 30%~40%, 主要由斜长石、角闪石及石英组成。斜长石和角闪石均为半自形晶, 大小一般 1~2 mm, 部分 2~2.5 mm; 石英为它形晶, 大小一般 0.5~1 mm。基质为斜长石、角闪石、石英; 斜长石半自形—它形粒状, 大小一般 0.3~0.5 mm; 角闪石半自形柱状, 柱长 0.1~0.5 mm, 部分 0.5~1 mm; 石英它形粒状, 大小一般 0.1~0.5 mm。副矿物有磁铁矿、锆石。岩石蚀变以绢云母化、绿泥石化、绿帘石化为主。

二长岩(图 5i, j): 灰白色—浅肉红色, 细粒半自形粒状结构, 块状构造, 岩石主要由斜长石、钾长石、石英、角闪石、黑云母组成。斜长石占 35%~40%, 半自形板状, 大小一般为 1~2 mm; 钾长石占 20%~25%, 半自形板状, 大小一般为 1~2 mm; 石英占 25%~30%, 它形粒状, 大小一般为 0.5~1 mm; 角闪石占 5%~10%, 半自形柱状, 大小一般为 0.5~1 mm; 黑云母占 5%~10%, 直径 0.5~1 mm。副矿物有磁铁矿、磷灰石等。岩石蚀变以绢云母化、高

岭土化、绿泥石化、绿帘石化为主。

3 样品及分析方法

本次采自西二区的样品经显微镜下观察后, 选择蚀变相对较弱的 20 件样品进行主量元素和微量元素分析测试, 9 件样品进行 Sr-Nd 同位素分析测试。样品的全岩主量元素、微量元素和 Sr-Nd 同位素测试均在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成。其中, 主量元素采用 Philips PW2404 型 X 荧光光谱仪完成 (XRF), 分析精度优于 1%。微量元素分析仪器为 PerkinElmer Elan DCR-e 型等离子体质谱分析仪 (ICP-MS), 分析精度优于 3%。详细的分析方法及仪器参数见文献[28]。Sr-Nd 同位素分析仪器为 Phoenix 热表面电离质谱仪, 采用 Teflon 溶样器, 加入 HF、HNO₃ 和 HClO₄ 混合溶样, 通过专用的阳离子交换柱进行分离, 采用⁸⁶Sr/⁸⁸Sr=0.119 4 和¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 9 分别对 Sr 和 Nd 同位素比值进行标准化, 具体分析流程和仪器分析情况见文献[29]。



a, b—安山岩;c, d—辉长岩;e, f—闪长岩;g, h—石英闪长岩;i, j—二长岩。Act—阳起石;Am—角闪石;Chl—绿泥石;Cpx—单斜辉石;Ksp—钾长石;Ol—橄榄石;Pl—斜长石;Qtz—石英。+为正交偏光。

图5 泥盆纪岩浆岩照片及其显微特征

Fig.5 Photos and microphotographs illustrating the petrographic characteristics of Devonian magmatic rocks

4 分析结果

4.1 主量元素

泥盆纪岩浆岩的全岩主量元素分析结果见表1。在 $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 图解^[30] (图6a)中, 侵入岩显示主要由辉长岩、辉长闪长岩、闪长岩、二长岩和石英二长岩组成。

辉长岩 SiO_2 含量(质量分数)为 46.95%~47.97%, 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量为 3.03%~4.37%, Na_2O 含量高于 K_2O , 为富钠岩石; 具有较高的 Al_2O_3 含量(18.96%~19.06%), 铝饱和指数 A/CNK 为 0.73~0.88, 在 A/CNK - A/NK 图解^[31] (图6b)中, 均投入准铝质区域内; 其 MgO 、 FeO^{T} 含量及 $\text{Mg}^{\#}$ 值较高, 分别为 4.26%~9.11%、9.62%~9.80% 及 57.28~69.37; 里特曼指数 σ 为 2.33~3.84, 碱度率 AR 为 1.24~1.37, 在 AR - SiO_2 图解^[32] (图6c)和 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解^[33] (图6d)中, 投入钙碱性系列和低钾系

列岩石区域。

闪长岩、石英闪长岩 SiO_2 含量与全碱含量相对辉长岩增高, 分别为 54.17%~58.14%、4.31%~6.58%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 0.78~9.34, 除一件闪长岩样品(XEQ-5-2) K_2O 含量高于 Na_2O 外, 其余样品 Na_2O 含量均高于 K_2O , 表明为富钠岩石; 其 Al_2O_3 、 MgO 及 FeO^{T} 含量较辉长岩相对降低, 分别为 15.02%~17.43%、4.00%~5.48% 及 5.29%~8.64%; 铝饱和指数 A/CNK 为 0.73~1.17, 在 A/CNK - A/NK 图解(图6b)中, 投入准铝质-过铝质区域内; 里特曼指数 σ 为 1.52~3.30, 碱度率 AR 为 1.47~1.82, 显示钙碱性-高钾钙碱性系列岩石(图6c, d)。

二长岩 SiO_2 含量为 56.84%~61.99%, 相比闪长岩、石英闪长岩, 其全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)含量相对增高, 为 6.57%~9.10%, MgO 含量相对降低, 为 1.15%~3.00%, 而 Al_2O_3 与 FeO^{T} 含量相比变化不大, 分别为 16.57%~17.17% 与 5.13%~6.72%; $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值为 1.29~2.06, 与辉长岩、闪长岩和

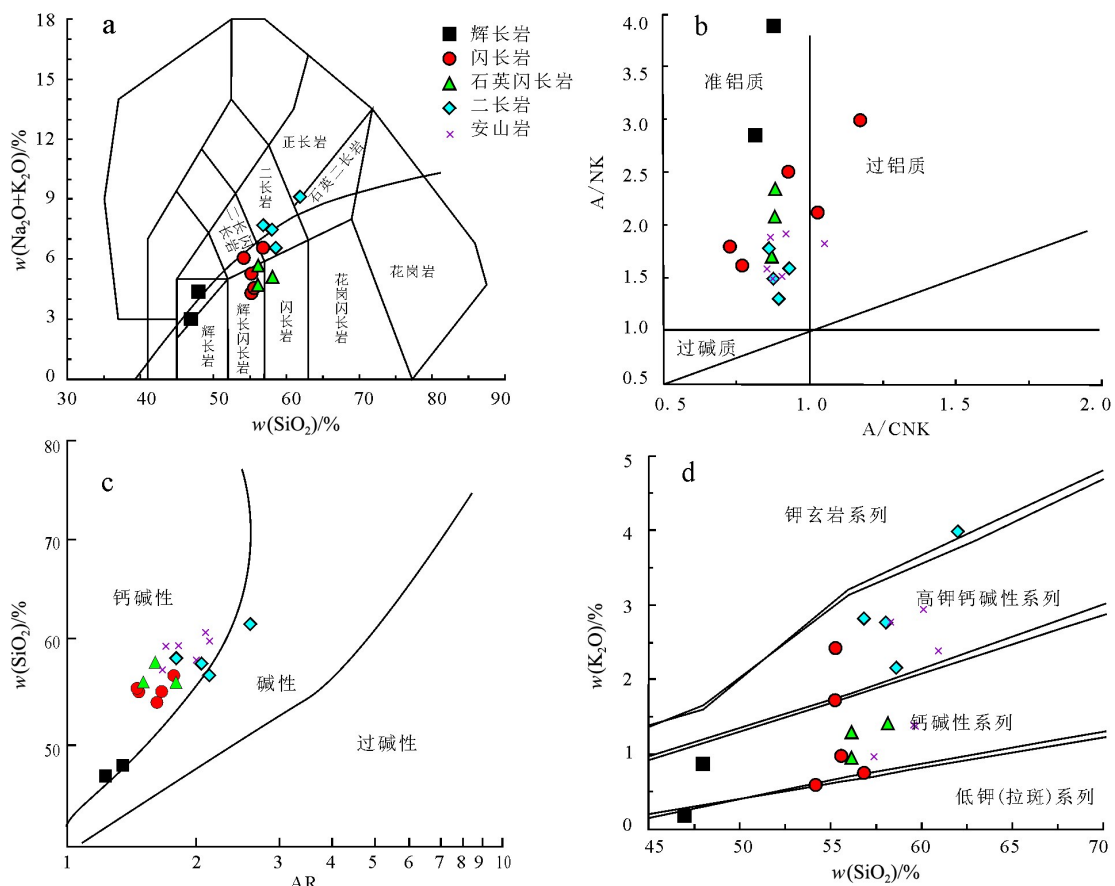


图6 泥盆纪岩浆岩 $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 图解(a)^[30]、A/CNK - A/NK 图解(b)^[31]、AR - SiO_2 图解(c)^[32] 和 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解(d)^[33]

(图a据文献[30];图b据文献[31];图c据文献[32];图d据文献[33])

Fig.6 Characteristics of major elements in Devonian magmatic rocks. $\text{SiO}_2 - \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ diagram(a)^[30], A/CNK - A/NK diagram(b)^[31], AR - SiO_2 diagram(c)^[32], and $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ diagram(d)^[33]

表 1 泥盆纪岩浆岩主量元素、微量元素和稀土元素分析结果

Table 1 Abundance of major, trace and rare-earth elements in Devonian magmatic rocks

岩性	样品号	$w_b/\%$														A/ CNK	A/ NK	σ	Mg [#]	AR
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ^T	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	LOI	Total	FeO						
辉长岩	XEQ-9	47.97	19.06	9.8	4.26	9.15	3.5	0.87	0.2	1.19	0.32	3.66	99.97	5.72	0.82	2.84	3.84	57.28	1.37	
	XEQ-18	46.95	18.96	9.62	9.11	9.17	2.86	0.17	0.14	1	0.11	1.87	99.97	7.24	0.88	3.87	2.33	69.37	1.24	
闪长岩	XEQ-4	55.23	16.29	8.25	5.48	4.46	3.54	1.73	0.13	0.74	0.16	3.98	99.99	4.63	1.03	2.12	2.27	68.06	1.68	
	XEQ-5-1	55.59	17.43	6.97	4	6.51	3.58	0.98	0.07	0.75	0.15	3.96	99.99	4.03	0.93	2.51	1.65	64.11	1.47	
	XEQ-5-2	55.26	17.14	7.29	4.43	4.87	1.89	2.42	0.06	0.7	0.15	5.77	99.98	4.92	1.17	2.99	1.52	61.84	1.49	
	XEQ-14-1	54.17	17.32	6.18	4.45	7.76	5.48	0.59	0.14	0.67	0.14	3.08	99.97	3.67	0.73	1.79	3.3	68.58	1.64	
	XEQ-14-2	56.84	16.87	5.29	4.28	6.31	5.83	0.75	0.11	0.66	0.13	2.9	99.98	2.96	0.77	1.62	3.13	72.24	1.79	
石英 闪长岩	XEQ-7	56.16	15.02	7.81	4.77	4.61	4.74	0.95	0.13	0.59	0.13	5.06	99.97	4.92	0.87	1.7	2.46	63.57	1.82	
	XEQ-12	58.14	15.86	7.64	4.32	5.69	3.71	1.41	0.14	0.61	0.14	2.3	99.96	5.8	0.88	2.08	1.73	57.28	1.62	
	XEQ-13	56.14	16.5	8.64	5.01	6.34	3.44	1.29	0.13	0.66	0.11	1.73	99.99	4.9	0.89	2.34	1.7	64.79	1.52	
二长岩	XEQ-23	58.06	17.17	6.72	3	4.2	4.73	2.76	0.15	0.86	0.31	2	99.96	3.28	0.93	1.59	3.73	62.21	2.08	
	XEQ-24	56.84	16.57	5.98	2.98	4.28	4.88	2.82	0.14	0.78	0.27	4.46	100	2.2	0.88	1.49	4.28	70.91	2.17	
	XEQ-25	61.99	16.61	5.13	1.15	3.17	5.12	3.98	0.09	0.68	0.21	1.81	99.94	1.42	0.9	1.3	4.36	59.31	2.7	
	XEQ-26	58.6	17.09	6.45	2.86	5.62	4.42	2.15	0.14	0.82	0.29	1.51	99.94	3.05	0.86	1.78	2.77	62.8	1.81	
	XEQ-2	60.05	16.01	5.96	3.2	4.09	4.27	2.94	0.12	0.77	0.27	2.29	99.96	2.96	0.91	1.57	3.05	66.06	2.12	
安山岩	XEQ-15-1	58.26	16.31	6.49	3.23	5.01	4.22	2.78	0.12	0.86	0.32	2.4	100	2.16	0.85	1.64	3.21	72.91	1.98	
	XEQ-16	60.87	16.19	5.45	2.76	4.36	4.81	2.38	0.09	0.73	0.24	2.1	99.99	2.51	0.88	1.54	2.89	66.43	2.08	
	XEQ-8	59.54	16.06	6.41	3.51	5.1	4.05	1.38	0.14	0.59	0.14	3.04	99.96	4.86	0.92	1.97	1.78	56.52	1.69	
	XEQ-11	59.63	16.66	6.29	3.27	3.82	4.5	1.36	0.22	0.67	0.15	3.37	99.95	5.08	1.05	1.88	2.06	53.67	1.8	
	XEQ-19	57.35	16.02	7.68	4.15	5.59	4.4	0.95	0.13	1.17	0.39	2.15	99.99	4.43	0.87	1.94	2	62.77	1.66	

岩性	样品号	$w_b/10^{-6}$																		
		Rb	Ba	Th	U	Sc	V	Cr	Co	Ni	Pb	Cu	Zn	Ga	Ta	Nb	Sr	Zr	Hf	Y
辉长岩	XEQ-9	18.6	245	0.71	0.27	25.5	313	23.6	30.8	17.2	3.96	141	107	21.5	0.19	3.19	713	65.8	1.96	20.4
	XEQ-18	1.44	57.4	0.11	0.05	19	124	226	57.1	156	1.07	39.3	74.2	17.1	0.1	1.29	409	64	1.71	15.7
闪长岩	XEQ-4	25.6	270	1.44	0.53	34.3	276	40.1	27.1	15.2	2	24.5	50.1	16.8	0.21	3.75	339	87.9	2.77	23.1
	XEQ-5-1	13.4	331	1.67	0.58	28.9	229	30	21.4	26.5	3.99	163	75.3	15.6	0.3	5.71	657	95	2.83	22
	XEQ-5-2	37.4	537	1.63	0.56	25.2	214	12.1	19.9	7.36	4.18	86.8	86.7	17	0.28	5.42	453	90.4	2.83	23.2
	XEQ-14-1	11.9	147	1.39	1.21	33.5	267	16.4	16.8	11.1	6.17	8.15	53.6	17.2	0.2	3.71	359	83.1	2.59	24.4
	XEQ-14-2	16.4	132	1.37	1.12	33.1	252	15.2	13.5	10.7	4.54	7.52	44.1	15.7	0.2	3.56	385	82.4	2.59	22.2
石英 闪长岩	XEQ-7	14.1	236	1.56	0.56	30.9	222	36.9	23.2	13.8	2.31	76	56.4	14	0.2	3.65	209	84.8	2.62	19.8
	XEQ-12	20.4	452	1.77	0.62	30.9	207	27.7	23.4	11.4	1.82	7.2	78.9	15.8	0.24	4.27	270	94.5	2.91	22.4
	XEQ-13	16.2	461	1.57	0.63	33.3	232	43.7	27.4	19	3.01	171	57.7	15.8	0.27	4.69	266	90.1	2.7	22
二长岩	XEQ-23	52.5	574	3.19	1.12	14.6	190	9.17	19.6	9.18	4.69	21.5	75.4	19.5	0.47	7.18	1071	132	3.99	20.4
	XEQ-24	50.9	622	2.91	1.07	15.3	178	12.4	17.9	12.3	6.37	70.3	70	20	0.43	7.19	874	153	4.48	19.2
	XEQ-25	91.1	498	4.39	1.59	10.9	119	8.61	13	6.19	6.3	92.7	64	20	0.57	7.82	623	163	4.71	18.6
	XEQ-26	38.2	437	3.7	1.11	13.8	183	9.24	18.3	7.94	4.42	71.9	74.1	20.8	0.48	7.02	792	118	3.67	19.7
	XEQ-2	56.9	737	2.64	1.09	18.5	146	36.9	19.6	27.4	7.28	58.9	75.4	17.3	0.36	5.84	989	184	5.01	25.4
安山岩	XEQ-15-1	51.4	772	2.24	0.89	19.9	154	74.9	20.8	41.3	5.19	52.4	80.5	18.6	0.36	6.14	904	184	4.92	25.9
	XEQ-16	49.9	601	2.84	1.15	17.6	140	32.4	16.9	27	6.46	47.4	95.9	18.8	0.36	5.76	958	181	4.94	25
	XEQ-8	23.4	532	2.63	1	20.1	137	22	20.3	10.7	9.92	44.9	55.8	16.7	0.32	4.5	288	101	2.96	18.7
	XEQ-11	23.2	488	3.56	1.25	18.7	161	19	15.4	12	52.4	37.3	168	17.6	0.41	5.75	271	127	3.65	20.2
	XEQ-19	13	370	2.07	0.78	18.6	151	109	25.9	46.6	5.39	72.1	89.8	19.6	0.42	6.76	813	229	5.86	28.4

(续表 1)

岩性	样品号	$w_B/10^{-6}$														(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N	δEu	δCe	
		La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu						ΣREE
辉长岩	XEQ-9	9.17	21.2	3.27	17	4.14	1.49	3.49	0.71	3.75	0.76	2.1	0.34	2.13	0.31	69.85	3.09	1.43	1.36	1.17	0.95
	XEQ-18	3.54	9.29	1.52	8.18	2.29	1.24	2.22	0.49	2.85	0.55	1.57	0.26	1.61	0.24	35.85	1.58	1	1.14	1.66	0.98
闪长岩	XEQ-4	10.6	21.9	2.91	13.4	3.14	0.91	3.04	0.67	3.84	0.81	2.38	0.41	2.57	0.38	66.96	2.96	2.18	0.98	0.89	0.95
	XEQ-5-1	11.7	22.8	2.93	13.2	3.02	0.91	3.01	0.62	3.64	0.79	2.32	0.39	2.51	0.39	68.24	3.34	2.5	0.99	0.91	0.93
	XEQ-5-2	12.2	24.6	3.13	13.9	3.13	0.95	3.14	0.63	3.78	0.78	2.3	0.4	2.64	0.4	71.98	3.31	2.52	0.98	0.92	0.95
	XEQ-14-1	8.9	18	2.42	11.1	2.72	0.93	2.72	0.61	3.79	0.85	2.47	0.43	2.8	0.41	58.14	2.28	2.11	0.8	1.03	0.93
	XEQ-14-2	7.12	15.3	2.13	10.4	2.62	0.88	2.66	0.59	3.67	0.79	2.31	0.39	2.49	0.36	51.71	2.05	1.75	0.88	1.01	0.95
石英闪长岩	XEQ-7	9.92	19.3	2.5	10.9	2.48	0.72	2.4	0.54	3.21	0.7	2.01	0.35	2.26	0.35	57.63	3.15	2.58	0.88	0.89	0.93
	XEQ-12	10.6	21.5	2.82	12.7	2.82	0.86	2.82	0.6	3.65	0.76	2.36	0.4	2.59	0.41	64.89	2.94	2.43	0.9	0.93	0.94
二长岩	XEQ-13	10.7	21.8	2.84	12.4	2.87	0.86	2.8	0.61	3.53	0.74	2.18	0.39	2.43	0.37	64.53	3.16	2.41	0.95	0.91	0.95
	XEQ-23	18.2	38.3	5.04	22.5	4.76	1.4	3.86	0.7	3.56	0.71	2.1	0.34	2.23	0.33	104.03	5.85	2.47	1.43	0.97	0.96
	XEQ-24	16.9	33.8	4.55	19.8	4.25	1.29	3.51	0.65	3.37	0.68	2	0.32	2.15	0.32	93.6	5.64	2.57	1.35	0.99	0.93
	XEQ-25	19.5	39.7	5.22	21.9	4.44	1.31	3.59	0.66	3.45	0.69	1.95	0.34	2.27	0.34	105.36	6.16	2.84	1.31	0.97	0.95
	XEQ-26	18.5	38.4	5.12	22.6	4.86	1.38	3.83	0.69	3.54	0.71	1.92	0.33	2.11	0.32	104.3	6.29	2.46	1.5	0.94	0.95
安山岩	XEQ-2	19.9	41.2	5.5	24.3	5.17	1.45	4.53	0.85	4.69	0.91	2.55	0.41	2.77	0.4	114.62	5.15	2.48	1.35	0.9	0.95
	XEQ-15-1	20.2	41.2	5.49	24.5	5.08	1.52	4.63	0.85	4.61	0.91	2.6	0.44	2.72	0.41	115.16	5.33	2.57	1.41	0.94	0.94
	XEQ-16	19.2	39.5	5.18	22.9	4.85	1.38	4.1	0.8	4.33	0.86	2.49	0.4	2.6	0.39	108.97	5.3	2.56	1.3	0.92	0.95
	XEQ-8	12.4	24.9	3.28	14.8	3.2	1.07	3.04	0.58	3.32	0.64	1.87	0.31	2.08	0.31	71.8	4.28	2.5	1.21	1.03	0.94
	XEQ-11	13.4	27.1	3.64	15.8	3.33	1.02	3.12	0.61	3.43	0.69	2.04	0.34	2.16	0.34	77.02	4.45	2.6	1.19	0.95	0.93
	XEQ-19	20.9	45.8	6.24	28.4	5.94	1.83	5.09	0.95	5.09	1.01	2.76	0.44	2.79	0.41	127.66	5.37	2.27	1.51	0.99	0.97

石英闪长岩一样,均为富钠岩石;铝饱和指数 A/CNK 为 0.86~0.93,里特曼指数 σ 为 2.77~4.36,碱度率 AR 为 1.81~2.70,为钙碱性-高钾钙碱性系列准铝质岩石(图 6b、c、d)。

安山岩 SiO₂ 含量为 57.35%~61.99%,全碱 (Na₂O+K₂O)含量为 5.35%~7.21%,Na₂O/K₂O 比值为 1.45~4.62,表明为富钠岩石;具有较高的 Al₂O₃ 含量(16.01%~16.66%),铝饱和指数 A/CNK 为 0.85~1.05,在 A/CNK-A/NK 图解(图 6b)中,投入准铝质-弱过铝质区域内;具较高的 Mg[#] (53.67~72.91)与中等的 MgO 含量(2.76%~4.15%);里特曼指数 σ 为 1.78~3.21,碱度率 AR 为 1.66~2.12,在 AR-SiO₂ 图解(图 6c)和 SiO₂-K₂O 图解(图 6d)中,投入钙碱性与高钾钙碱性系列岩石区域。

4.2 微量元素

泥盆纪岩浆岩的微量元素分析结果见表 1,微量元素标准化蛛网图和稀土元素球粒陨石标准化分配图见图 7^[34],由表 1 和图 7 可知,西二区泥盆纪岩浆岩普遍富集 Rb、Ba、K 等大离子亲石元素(LILE),而相对亏损 Ta、Nb、Ti 等高场强元素

(HFSE);稀土元素球粒陨石标准化分配图均呈右倾型,轻稀土富集而重稀土亏损(LREE/HREE 为 2.66~6.93)。

辉长岩的稀土总量较低,为(35.85~69.85)×10⁻⁶, (La/Yb)_N 为 1.58~3.09, (La/Sm)_N 为 1.00~1.43, (Gd/Yb)_N 为 1.14~1.36,轻稀土和重稀土分馏都不明显, δEu 为 1.17~1.66,具有正的 Eu 异常,可能与岩浆演化过程中斜长石堆晶作用有关,这与镜下观察的斜长石和辉石构成嵌晶含长结构一致(图 5d)。

闪长岩、石英闪长岩的稀土总量也较低,为(51.71~68.24)×10⁻⁶, (La/Yb)_N 为 2.05~3.34, (La/Sm)_N 为 1.75~2.58, (Gd/Yb)_N 为 0.80~0.99,轻稀土和重稀土分馏也都不明显, δEu 为 0.89~1.03,显示较弱的 Eu 负异常或无 Eu 异常。

二长岩的稀土总量相比闪长岩与石英闪长岩增高,为(93.60~105.36)×10⁻⁶, (La/Yb)_N 为 5.64~6.29,轻重稀土分馏较显著; (La/Sm)_N 为 2.46~2.84, (Gd/Yb)_N 为 1.31~1.50,轻稀土与重稀土内部分馏不明显, δEu 为 0.94~0.99,基本无 Eu 异常。

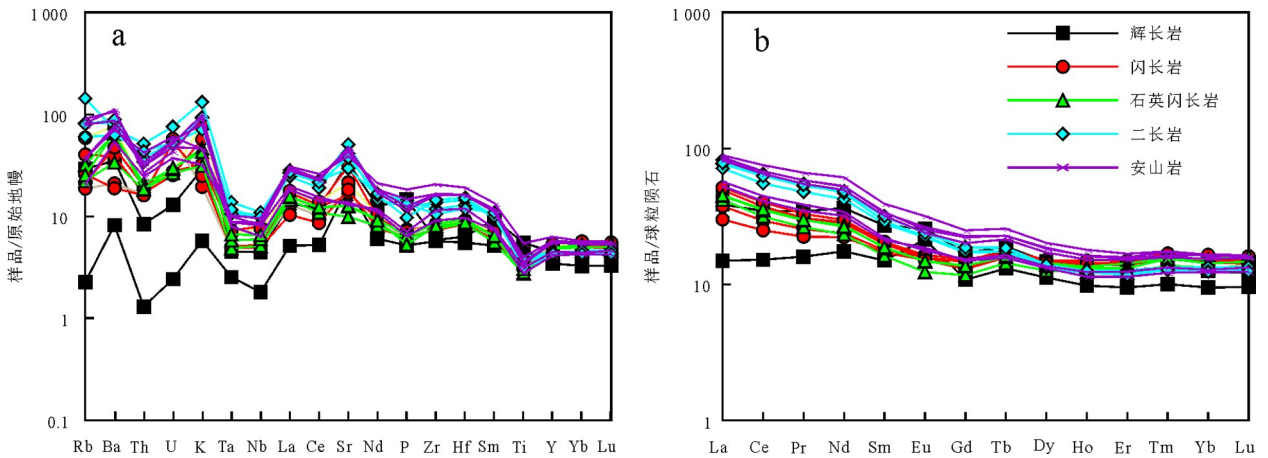


图7 泥盆纪岩浆岩微量元素原始地幔标准化蛛网图(a)和稀土元素标准化图解(b)
(标准化数据引自文献[34])

Fig.7 Primitive mantle normalized trace element patterns (a) and chondrite normalized REE patterns (b) for Devonian magmatic rocks

表 2 泥盆纪岩浆岩 Sr-Nd 同位素分析结果

Table 2 Results of Sr and Nd isotopic analysis for Devonian magmatic rocks

样品	$w_B/10^{-6}$		$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} \pm 2\sigma$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$w_B/10^{-6}$		$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$	$T_{2\text{DM}}/\text{Ma}$
	Rb	Sr				Sm	Nd					
XEQ-4	25.60	339.00	0.218 513	0.705 444±18	0.704 240	3.14	13.40	0.141 582	0.512 853±1	0.512 494	6.93	571
XEQ-5-1	13.40	657.00	0.059 017	0.705 503±2	0.705 178	3.02	13.20	0.138 235	0.512 833±13	0.512 483	6.70	589
XEQ-14-1	11.90	359.00	0.095 916	0.704 863±13	0.704 334	2.72	11.10	0.148 057	0.512 880±6	0.512 505	7.13	554
XEQ-2	56.90	989.00	0.166 477	0.705 869±11	0.704 952	5.17	24.30	0.128 549	0.512 822±9	0.512 496	6.97	568
XEQ-8	23.40	288.00	0.235 104	0.705 987±14	0.704 691	3.20	14.80	0.130 639	0.512 745±5	0.512 414	5.36	699
XEQ-11	23.20	271.00	0.247 717	0.704 474±23	0.703 109	3.33	15.80	0.127 342	0.512 751±11	0.512 428	5.64	676
XEQ-15-1	51.40	904.00	0.164 525	0.704 442±9	0.703 535	5.08	24.50	0.125 280	0.512 813±9	0.512 496	6.95	569
XEQ-16	49.90	958.00	0.150 720	0.704 523±11	0.703 692	4.85	22.90	0.127 965	0.512 805±7	0.512 481	6.66	593
XEQ-19	13.00	813.00	0.046 269	0.703 947±16	0.703 692	5.94	28.40	0.126 372	0.512 855±8	0.512 535	7.72	507

安山岩的稀土总量为 $(71.80 \sim 127.66) \times 10^{-6}$, 较为接近。
(La/Yb)_N 为 4.28~5.37, 轻重稀土分馏较显著;
(La/Sm)_N 为 2.27~2.60, (Gd/Yb)_N 为 1.19~1.51,
轻稀土和重稀土内部分馏不明显, δEu 为 0.90~
1.03, 显示较弱的 Eu 负异常或无 Eu 异常。

4.3 Sr-Nd 同位素

泥盆纪岩浆岩的 Sr-Nd 同位素分析结果见表 2, 闪长岩 Sr 同位素初始值 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.704 24~0.705 18, Nd 同位素初始值 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 为 0.512 48~0.512 51, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 6.70~7.13, 二阶段模式年龄 $T_{2\text{DM}}$ 为 554~589 Ma; 安山岩 Sr 同位素初始值 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 为 0.703 11~0.704 95, Nd 同位素初始值 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 为 0.512 41~0.512 54, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 为 5.36~7.72, 二阶段模式年龄 $T_{2\text{DM}}$ 为 507~699 Ma。在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解^[35] (图 8) 中, 泥盆纪岩浆岩 Sr 和 Nd 同位素组成与洋中脊玄武岩 (MORB)

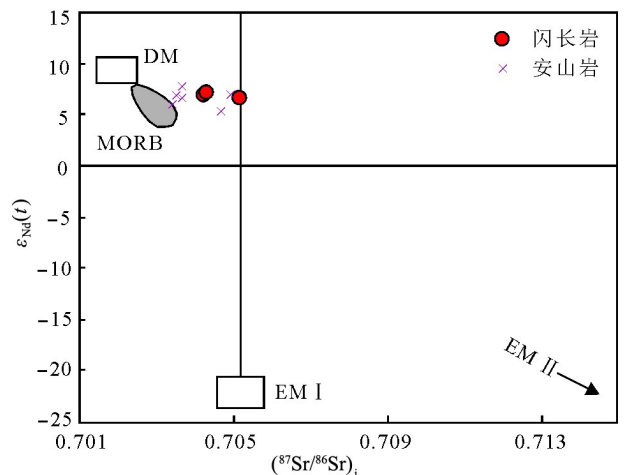


图 8 泥盆纪岩浆岩 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解^[35]

(DM, MORB, EM II 据文献^[35])

Fig.8 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i - \epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram for Devonian magmatic rocks^[35]

5 讨论

5.1 蚀变影响

本次研究中样品均遭受不同程度的蚀变影响,主要表现为具有较高的烧失量,LOI值为1.51%~5.77%。蚀变过程中容易改变一些大离子亲石元素的丰度,如Cs、Rb、Ba、K、Sr等,而高场强元素和稀土元素(如Ta、Nb、Zr、Hf、Th等)活动性弱,尤其Th和Zr的活动性最弱,因此,可以通过研究Th、Zr

与其他元素的关系,从而判断这些元素的活动性^[36-37]。在闪长岩、石英闪长岩、二长岩和安山岩中,Th与Nb、La及Zr与Nb、Sm间显示较好的相关性(图9);在辉长岩中相关性较弱,说明高场强元素和稀土元素在热液蚀变过程中基本不活动;而Th与Sr、Zr与Rb之间相关性不明显,表明Sr、Rb等大离子亲石元素在热液蚀变过程中较活泼。本区岩石普遍富集Rb、Sr应与岩石的蚀变相关,但蚀变作用对岩石中高场强元素与稀土元素的影响很小,它们的变化还是能反映岩浆演化过程和岩石成因等信息。

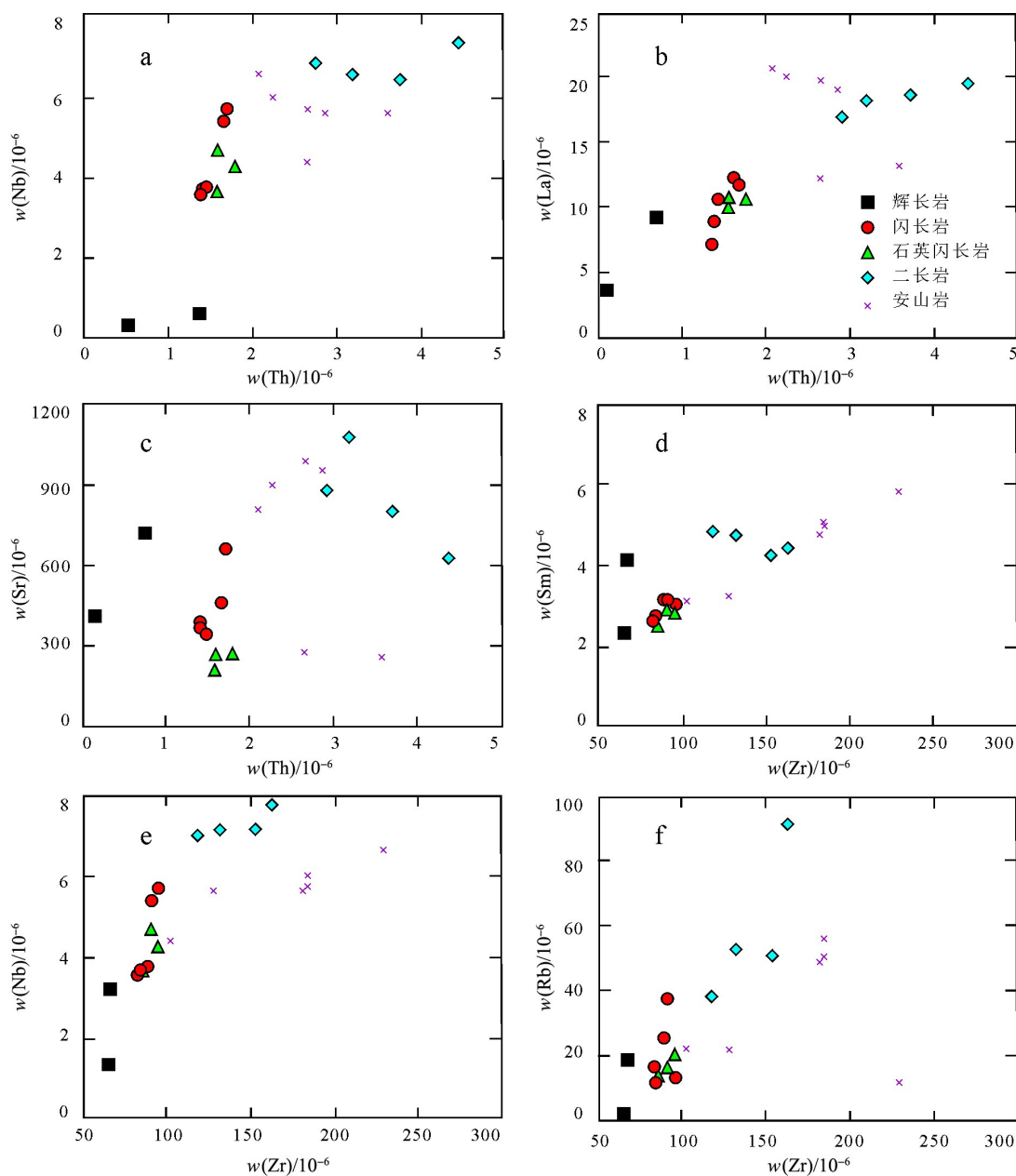


图9 相关元素活动性判断图解

Fig.9 Discrimination diagrams for understanding element mobility

5.2 岩石成因

微量元素原始地幔标准化蛛网图及稀土元素标准化图(图 7)显示,本区岩浆岩富集轻稀土和大离子亲石元素 Rb、Ba、K 等,亏损重稀土和高场强元素 Ta、Nb、Ti 等,显示岛弧岩浆岩的特征^[38]。通常认为,岩浆中轻稀土和大离子亲石元素的相对富集以及重稀土和高场强元素的相对亏损,暗示其形成与洋壳俯冲-消减作用有关^[39-40],或是受到地壳混染的影响^[41-42]。

一般认为,La/Sm 比值在 5 以上表明岩浆明显受到地壳物质的混染^[43]。辉长岩 La/Sm 比值为 1.55~2.21;闪长岩、石英闪长岩 La/Sm 比值为 2.72~

4.00;二长岩 La/Sm 比值为 3.81~4.39;安山岩 La/Sm 比值为 3.52~4.02。La/Sm 比值均小于 5,可见没有明显的地壳物质混染。岩浆中若有地壳物质的加入一般会增加岩浆的 SiO₂、K₂O 和 Th、Cs、Rb、Ba 等大离子亲石元素以及 Zr、Hf 等高场强元素的丰度,同时会升高 La/Nb、La/Sm、Zr/Nb 比值,降低 Ti/Yb、Ce/Pb 比值^[44-46]。然而,总分配系数相同或很相近的元素比值不受分离结晶作用和部分熔融程度的影响,不同元素比值之间的相关变化可以准确地验证地壳混染作用是否存在及其程度^[47]。在同化混染作用判别图(图 10)中,泥盆纪岩浆岩均显

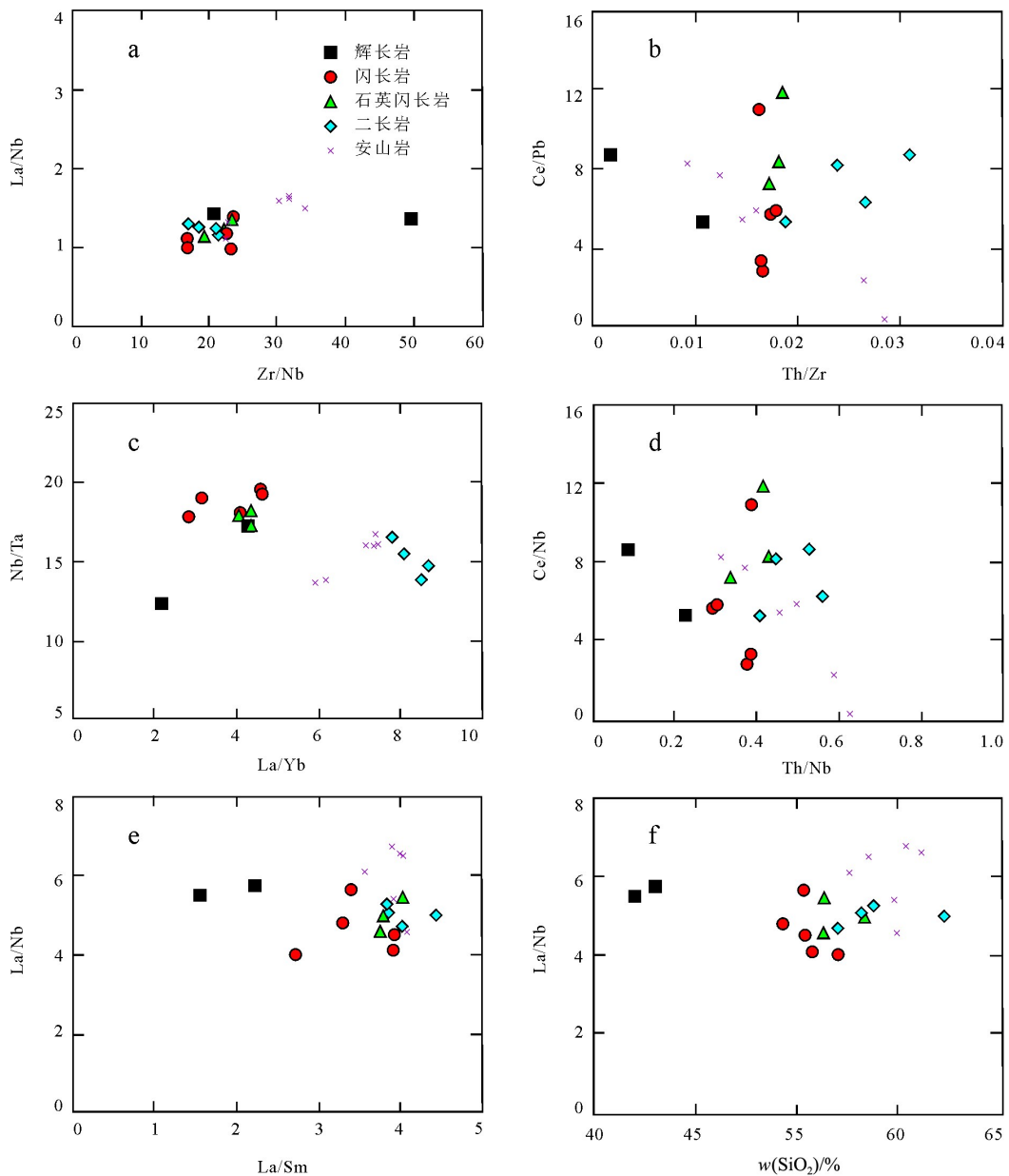


图 10 同化混染作用判别图

Fig.10 Discrimination diagrams for contamination detection

示较弱的相关性 or 无相关性,说明其在形成过程中受到地壳混染的作用较弱或基本无地壳混染。

此外,辉长岩 Th/La 比值为 0.03~0.08, Rb/Sr 比值 0.01~0.03, Nb/Ta 比值 12.40~17.24, Nb/La 比值 0.35~0.36; 闪长岩、石英闪长岩 Th/La 比值为 0.13~0.19, Rb/Sr 比值 0.02~0.08, Nb/Ta 比值 17.24~19.29, Nb/La 比值 0.35~0.50; 二长岩 Th/La 比值为 0.18~0.23, Rb/Sr 比值 0.05~0.15, Nb/Ta 比值 13.84~16.57, Nb/La 比值 0.38~0.43; 安山岩 Th/La 比值为 0.10~0.27, Rb/Sr 比值 0.02~0.09, Nb/Ta 比值 13.93~17.01, Nb/La 比值 0.29~0.43。总体而言,泥盆纪岩浆岩的 Th/La、Rb/Sr、Nb/Ta、Nb/La 比值均与原始地幔的比值较为接近^[34],说明其形成受到的地壳混染作用较弱,其形成可能与俯冲流体的交代作用有关。

5.3 岩浆源区

西二区泥盆纪岩浆岩体现了由基性到中性过渡的一系列岩石类型,构成成分连续的岩石组合,偏基性的辉长岩与偏酸性的二长岩很可能代表了岩浆源区两个不同的端员,可以用来反演岩浆源区的组成和性质。Lu 和 Yb 具有相似的地球化学性质,且 Lu/Yb 值在部分熔融或结晶分异过程中不会改变,幔源岩浆的 Lu/Yb 比值介于 0.14~0.15^[34]。本文辉长岩的 Lu/Yb 比值为 0.14~0.15; 闪长岩、石英闪长岩的 Lu/Yb 比值为 0.14~0.16; 二长岩的 Lu/Yb 比值为 0.15~0.16; 安山岩的 Lu/Yb 比值为 0.15,与幔源岩浆基本一致。实验岩石学研究表明, Mg[#] 值可用来示踪岩浆源区的贡献, Mg[#] 值小于 40 指示熔体来于基性下地壳, Mg[#] 值大于 40 指示熔体主要为地幔来源^[48-50]。辉长岩 Mg[#] 值为 57.28~

69.37; 闪长岩、石英闪长岩 Mg[#] 值为 57.28~72.24; 二长岩 Mg[#] 值为 59.31~70.91; 安山岩 Mg[#] 值为 53.67~72.91。泥盆纪岩浆岩的 Mg[#] 值均大于 40,说明其源区以幔源物质为主。闪长岩初始 Sr 值为 0.704 24~0.705 18, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 6.70~7.13; 安山岩初始 Sr 值为 0.703 11~0.704 95, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 5.36~7.72。Mao 等^[22] 获得西二区泥盆纪石英闪长岩具较低的初始 Sr 值(0.704 12~0.704 67)和较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值(6.1~7.0),均显示其可能来源于亏损地幔源区。

在岛弧环境中,岩浆源区物质来源一般包括:(1)地幔楔橄榄岩;(2)俯冲板片脱水释放的流体;(3)洋壳沉积物;(4)俯冲板片部分熔融^[51-52]。俯冲板片部分熔融形成的母岩浆多以安山质为主,具有埃达克岩特征,泥盆纪岩浆岩与埃达克岩特征明显不同。岛弧岩浆中俯冲板片来源的流体与洋底沉积物的加入可以通过 Th 的含量及 Th/Ce、Th/Yb、Sr/Nd 和 Sr/Th 比值区别^[53-54]。Th 在洋底沉积物中高度富集,Ce 在热液体系中比 Th 更容易从体系中迁移出来,而板片流体加入的岩浆具有高 Sr 的特点^[55-57]。从 Sr/Th - Th/Ce 与 Sr/Nd - Th/Yb 图(图 11)^[53-54] 中可以看出,泥盆纪岩浆岩明显表现为板片流体的加入,与洋底沉积物的加入基本无关。

本区泥盆纪岩浆岩多为钙碱性系列,具有较高的 LIFE/HFSE 及 LREE/HREE 比值,如:辉长岩 Th/Nb 比值为 0.09~0.22, Th/Ta 比值为 1.07~3.86; 闪长岩、石英闪长岩 Th/Nb 比值为 0.29~0.43, Th/Ta 比值为 5.64~7.80; 二长岩 Th/Nb 比值为 0.40~0.56, Th/Ta 比值为 6.71~7.77; 安山岩 Th/Nb 比值为 0.31~0.62, Th/Ta 比值为 4.99~8.73。这些均显示地幔源区可能有俯冲流体或部分熔融交

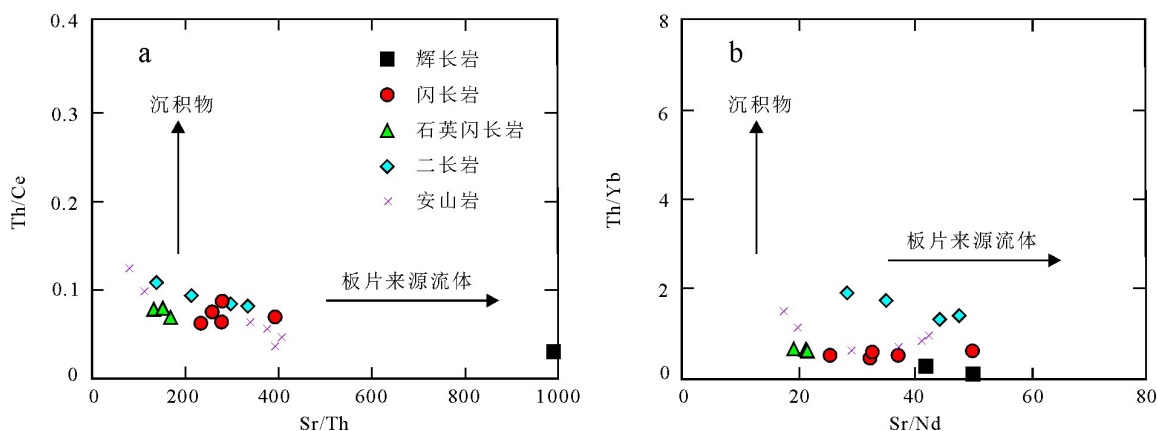


图 11 Sr/Th - Th/Ce 图解(a)^[53] 和 Sr/Nd - Th/Yb 图解(b)^[54]

(图 a 据文献^[53]; 图 b 据文献^[54])

Fig.11 Sr/Th - Th/Ce diagram(a)^[53] and Sr/Nd - Th/Yb diagram(b)^[54]

代地幔楔橄榄岩^[58-59]。因 La、Ba、Rb、Th、Zr 和 Nb 具有相似的分配系数,分离结晶作用不影响岩浆中 La/Nb、La/Ba、Rb/La、Ba/Nb 等的比值,且岩浆演化过程中发生的同化混染作用不强烈,故这些比值差异可以指示源区特征^[60-62]。Nb/Yb - Th/Yb、La/Nb - La/Ba、Th/Zr - Nb/Zr 及 Th/La - Rb/La 之间的关系指示岩浆源区存在交代改造的富集型岩石圈地幔^[62](图 12)。

综上所述,卡拉塔格泥盆纪岩浆岩可能为同期岩浆活动的产物,为来源于地幔演化的岩浆,地幔源区应该为富集微量元素的岩石圈地幔,可能为俯冲板片形成的流体交代地幔楔橄榄岩发生部分熔融而形成的。

5.4 构造背景

在 2Nb - Zr/4 - Y 和 Ta/Yb - Th/Yb 图解^[63-64](图 13a,b)中,辉长岩基本投入大洋岛弧区;在 Sc/Ni - La/Yb 和 Th - La/Yb 图解^[65-66](图 13c,d)中,闪长岩、石英闪长岩、二长岩和安山岩大多投入岛弧区范围;在 Yb + Ta - Rb 和 Rb/30 - Hf - 3Ta 图解^[67-68](图 13e,f)中,石英闪长岩和二长岩均落入

火山弧花岗岩区域,表明卡拉塔格地区在泥盆纪时为岛弧环境。这也与前人研究的大南湖岛弧构造属性相吻合^[3,69-70]。

目前,对觉罗塔格带大洋的俯冲时间和极性尚不清楚,其构造性质也存在较大的争议。一些研究认为该带在奥陶纪时为北部卡拉麦里洋沿着博格达-哈尔里克带向南俯冲时形成的岛弧带^[3,13];另外一些研究者认为该带在奥陶纪-石炭纪时属于康古尔洋向北俯冲到卡拉麦里洋下时形成的岛弧带^[7,70]。近年来,大南湖岛弧带的泥盆纪岩浆岩陆续被报道(表 3^[16,22,71-74]),如:宋彪等^[71]获得侵入下泥盆统大南湖组的二长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (383±9) Ma;Mao 等^[22]获得西二区石英闪长岩和玉带石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 (382.1±2.4) Ma 和 (389.7±2.5) Ma,近于同一时代,可能为同期岩浆活动的产物;李玮等^[21]指出卡拉塔格地区出露的荒草坡群火山岩形成于洋内岛弧环境,并对安山岩和英安岩进行了同位素测年,其 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 434.8 Ma 和 438.4 Ma;肖兵等^[75]获得土屋地区花岗闪长岩的 LA-

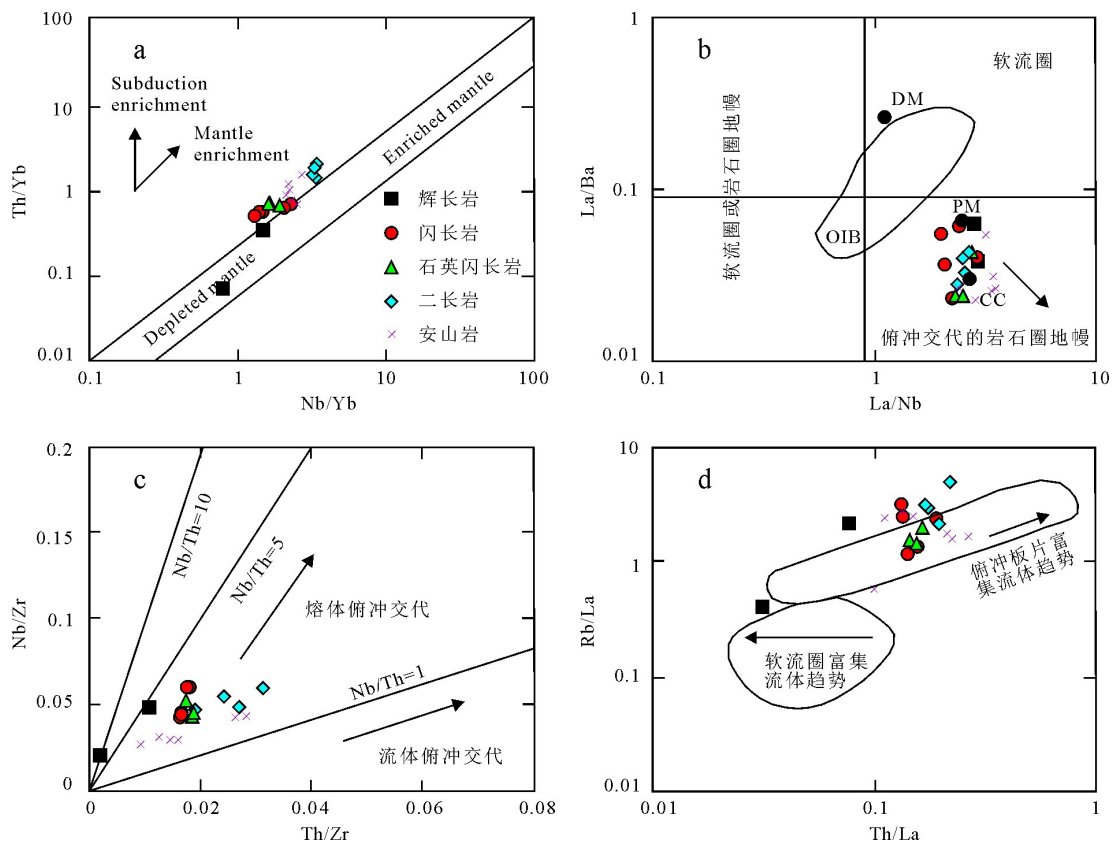
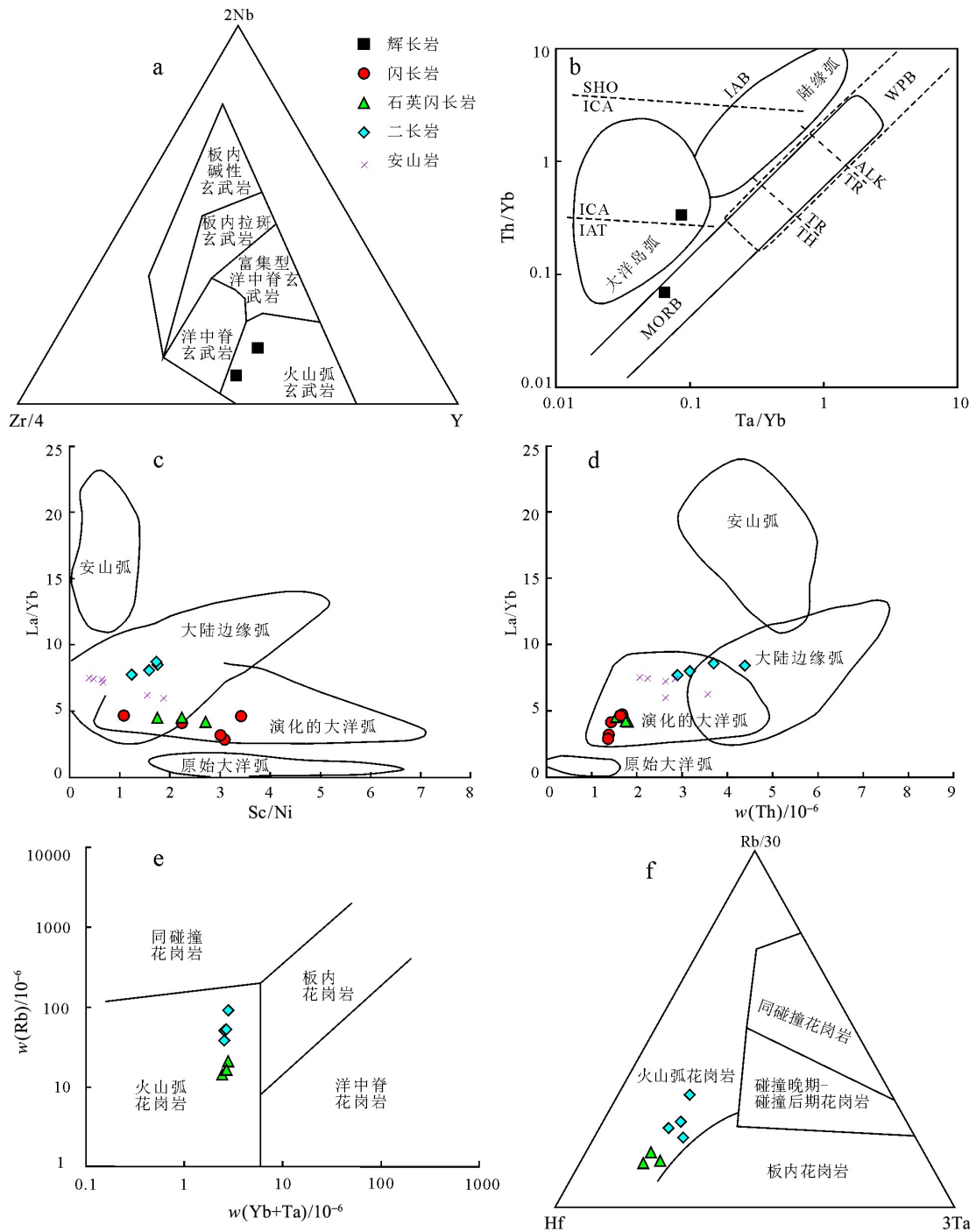


图 12 Th/Yb - Nb/Yb(a)、La/Ba - La/Nb(b)、Nb/Zr - Th/Zr(c)和 Th/La - Rb/La(d)图解^[62]
(底图据文献^[62])

Fig.12 Th/Yb - Nb/Yb(a), La/Ba - La/Nb(b), Nb/Zr - Th/Zr(c), and Th/La - Rb/La(d) diagrams^[62]



IAB—岛弧玄武岩; IAT—岛弧拉斑系列; ICA—岛弧钙碱性系列; SHO—岛弧橄榄玄粗岩系列; WPB—板内玄武岩; MORB—洋中脊玄武岩; TH—拉斑玄武岩; TR—过渡玄武岩; ALK—碱性玄武岩。

图 13 泥盆纪岩浆岩形成的构造环境判别图^[63-68]

(图 a 据文献[63]; 图 b 据文献[64]; 图 c 据文献[65]; 图 d 据文献[66]; 图 e 据文献[67]; 图 f 据文献[68])

Fig.13 Discrimination diagrams of tectonic setting for Devonian magmatic rocks^[63-68]

ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 420 Ma, 富集轻稀土元素和大离子亲石元素 Rb、Ba、K 等, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 等, 其初始 Sr 值为 0.704 149~0.704 520, $\epsilon_{Nd}(t)$ 为 4.05~4.07, $\epsilon_{Hf}(t)$ 为 8.91~11.66。这些证据表明大南湖岛弧带在奥陶纪—志留纪应该已经形

成。从觉罗塔格带的地层与火山岩分布来看, 奥陶纪—泥盆纪地层和火山岩仅在北部的南湖岛弧带出露, 而大草滩断裂以南几乎未见泥盆纪以前的地层和侵入岩, 显示该岛弧带从奥陶纪—石炭纪岩浆前锋逐渐向南迁移, 证实了李锦轶等^[70]关于该岛弧

带形成时间和迁移方向的推论。因此,大南湖岛弧带可能由康古尔洋向北俯冲至卡拉麦里洋形成,卡拉塔格地区泥盆纪岩浆岩可能为俯冲板片形成的流体交代地幔楔橄榄岩发生部分熔融而形成。

表3 大南湖岛弧带泥盆纪岩浆岩一览表

Table 3 List of occurrences and characteristics of Devonian magmatic rocks in the Dananhu arc belt

位置	岩性	年代学测试方法	年龄/Ma	资料来源
大南湖岩体	二长花岗岩	SHRIMP U-Pb	383±9	[71]
克孜尔岩体	花岗闪长岩	SHRIMP U-Pb	357.3±6.2	[71]
四顶黑山	黑云母花岗岩	SHRIMP U-Pb	386±5	[72]
咸水泉	花岗闪长岩	SHRIMP U-Pb	369.5±3.6	[73]
镜儿泉	花岗岩	LA-ICP-MS U-Pb	376.9±3.1	[74]
红海	英安岩	SIMS U-Pb	416.3±3.9	[16]
玉带	石英闪长玢岩	LA-ICP-MS U-Pb	389.7±2.5	[22]
西二区	石英闪长岩	LA-ICP-MS U-Pb	382.1±2.4	[22]

6 结论

(1)卡拉塔格地区泥盆纪火山岩主要为安山岩,侵入岩由一套成分连续的岩石组合构成,包括辉长岩、闪长岩、石英闪长岩、二长岩,并以中性岩石为主。

(2)岩石地球化学特征表明:卡拉塔格地区泥盆纪岩浆岩为一套钙碱性-高钾钙碱性系列准铝质岩石,均富集轻稀土和大离子亲石元素,亏损重稀土和高场强元素;该区岩石具有较低的初始 Sr 值和较高的 $\epsilon_{Nd}(t)$ 值,显示岛弧岩浆岩的特征。

(3)大南湖岛弧带可能由康古尔洋向北俯冲至卡拉麦里洋形成,卡拉塔格地区泥盆纪岩浆岩可能为俯冲板片形成的流体交代地幔楔发生部分熔融而形成。

论文的野外调查工作得到了哈密红石矿业有限公司和北京矿产地质研究院毛启贵教授级高级工程师、吕晓强高级工程师的大力支持和帮助,河北省廊坊市岩拓地质服务有限公司对样品进行了磨片、粉末处理,核工业北京地质研究院分析测试研究中心刘牧老师在样品测试过程中给予了热情的帮助,论文写作过程中得到了赵路通、辛宇佳、王显莹博士给予的建议,两位审稿人对稿件提出了宝贵修改意见,谨此一并表示感谢。

参考文献

[1] SENGÖR A M C, NATALIN B A, BURTMAN V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in

Eurasia[J]. *Nature*, 1993, 364(6435): 299-307.

- [2] CHEN Y J, PIRAJNO F, WU G, et al. Epithermal deposits in north Xinjiang, NW China[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2012, 101(4): 889-917.
- [3] XIAO W J, ZHANG L C, QIN K Z, et al. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of Central Asia[J]. *American Journal of Science*, 2004, 304(4): 370-395.
- [4] WINDLEY B F, ALEXEIEV D, XIAO W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164(12): 31-47.
- [5] XIAO W J, SANTOSH M. The western Central Asian Orogenic Belt: a window to accretionary orogenesis and continental growth[J]. *Gondwana Research*, 2014, 25(4): 1429-1444.
- [6] GUO Q Q, CHUNG S L, XIAO W J, et al. Petrogenesis and tectonic implications of Late Devonian arc volcanic rocks in southern Beishan orogen, NW China: geochemical and Nd-Sr-Hf isotopic constraints[J]. *Lithos*, 2017, 278-281: 84-96.
- [7] 王京彬, 王玉往, 何志军. 东天山大地构造演化的成矿示踪[J]. *中国地质*, 2006, 33(3): 461-469.
- [8] PIRAJNO F, SELTMANN R. A review of mineral systems and associated tectonic settings of northern Xinjiang, NW China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2011, 2(2): 157-185.
- [9] ZHANG F F, WANG Y H, LIU J J. Fluid inclusions and H-O-S-Pb isotope systematics of the Baishan giant porphyry Mo deposit in Eastern Tianshan, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 78: 409-423.
- [10] 王登红, 李纯杰, 陈郑辉, 等. 东天山成矿规律与找矿方向的初步研究[J]. *地质通报*, 2006, 25(8): 910-915.
- [11] 马比阿伟, 木合塔尔·扎日, 阿以拉者. 东天山花岗岩与造山带演化[J]. *矿产与地质*, 2014, 28(4): 546-550.
- [12] SHEN P, PAN H D, DONG L H. Yandong porphyry Cu deposit, Xinjiang, China: geology, geochemistry and SIMS U-Pb zircon geochronology of host porphyries and associated alteration and mineralization[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 80(2): 197-217.
- [13] 马星华, 陈斌, 王超, 等. 早古生代古亚洲洋俯冲作用: 来自新疆哈尔里克侵入岩的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学和 Sr-Nd 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2015, 31(1): 89-104.
- [14] WANG Y H, ZHANG F F, LIU J J. The genesis of the ores and intrusions at the Yuhai Cu-Mo deposit in eastern Tianshan, NW China: constraints from geology, geochronology, geochemistry and Hf isotope systematics[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 77: 312-331.
- [15] 邓小华, 王京彬, 王玉往, 等. 东天山卡拉塔格红石铜矿地质特征及矿床成因初步探讨[J]. *矿产勘查*, 2014, 5(2): 159-168.
- [16] DENG X H, WANG J B, PIRAJNO F, et al. Re-Os dating of chalcopyrite from selected mineral deposits in the Kalatag

- district in the eastern Tianshan Orogen, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 77: 72-81.
- [17] 毛启贵,方同辉,王京彬,等.东天山卡拉塔格早古生代红海块状硫化物矿床精确定年及其地质意义[J].*岩石学报*, 2010, 26(10): 3017-3026.
- [18] DENG X H, WANG J B, SANTOSH M, et al. New $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages from the Kalatag VMS deposits, eastern Tianshan, NW China: constraints on the timing of Cu mineralization and stratigraphy[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.08.006.
- [19] 李文铅,王冉,王核,等.“吐哈天窗”卡拉塔格岩体的地球化学和岩石成因[J].*中国地质*, 2006, 33(3): 559-565.
- [20] 唐俊华,顾连兴,郑远川,等.东天山卡拉塔格钠质火山岩岩石学、地球化学及成因[J].*岩石学报*, 2006, 22(5): 1150-1166.
- [21] 李玮,陈隽璐,董云鹏,等.早古生代古亚洲洋俯冲记录:来自东天山卡拉塔格高镁安山岩的年代学、地球化学证据[J].*岩石学报*, 2016, 32(2): 505-521.
- [22] MAO Q G, YU M J, XIAO W J, et al. Skarn-mineralized porphyry adakites in the Harlik arc at Kalatage, E. Tianshan (NW China): slab melting in the Devonian – Early Carboniferous in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 153: 365-378.
- [23] 秦克章,方同辉,王书来,等.东天山板块构造分区、演化与成矿地质背景研究[J].*新疆地质*, 2002, 20(4): 302-308.
- [24] QIN K Z, SU B X, SAKYI P A, et al. SIMS zircon U-Pb geochronology and Sr-Nd isotopes of Ni-Cu-bearing mafic-ultramafic intrusions in eastern Tianshan and Beishan in correlation with flood basalts in Tarim Basin(NW China): constraints on a ca. 280 Ma mantle plume[J]. *American Journal of Science*, 2011, 311: 237-260.
- [25] 雷如雄,吴昌志,屈迅,等.中天山天湖东铁钼矿含矿片麻状花岗岩年代学、地球化学和锆石 Hf 同位素:对于中天山早古生代构造演化的启示[J].*吉林大学学报(地球科学版)*, 2014(5): 1540-1552.
- [26] LI D F, CHEN H Y, ZHANG L, et al. Ore geology and fluid evolution of the giant Caixiashan carbonate-hosted Zn-Pb deposit in the eastern Tianshan, NW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2016, 72: 355-372.
- [27] DENG X H, WANG J B, SANTOSH M, et al. Early Paleozoic volcanic rocks with VMS mineralization from eastern Tianshan Orogen: implication for tectonic evolution[J]. *Geological Journal*, 2017. DOI: 10.1002/gj.3046.
- [28] GAO S, LIU X M, YUAN H L, et al. Determination of forty-two major and trace elements in USGS and NIST SRM glasses by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2002, 26: 181-196.
- [29] LI C F, CHEN F, LI X H. Precise isotopic measurements of sub-nanogram Nd of standard reference material by thermal ionization mass spectrometry using the NdO^+ technique[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2007, 266(1): 34-41.
- [30] RICKWOOD P C. Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements[J]. *Lithos*, 1989, 22(4): 247-263.
- [31] MANIAR P, PICCOLI P. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [32] WRIGHT J B. A simple alkalinity ratio and its application to questions of non-orogenic granite genesis [J]. *Geological Magazine*, 1969, 106(4): 370-384.
- [33] EWART A. The mineralogy and petrology of Tertiary – recent orogenic volcanic rocks with special reference to the andesitic basaltic compositional range[M]// *Orogenic andesites and related rocks*. Chichester, UK: Wiley, 1982: 25-95.
- [34] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processed[J]. *Geological Society of London Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- [35] ZINDLER A, HART S R. Chemical geodynamics[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1986, 14(1): 493-571.
- [36] GIBSON S A, KIRKPATRICK R J, EMMEMANN R, et al. The trace element composite of lavas and dykes from a 3-km vertical section through the lava pile of eastern Iceland [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, 87: 6532-6546.
- [37] PEARCE J A, THIRLWALL M F, INGRAM G, et al. Isotopic evidence for the origin of boninites and related rocks drilled in the Izu-Bomin (Ogasa Wara) Forearc, Leg 125 [J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1992, 125: 237-261.
- [38] GILL J B. *Orogenic andesites and plate tectonics*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981: 1-390.
- [39] DAVIS J H, STEVENSON D J. Physical model of source region of subduction volcanics[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 2037-2070.
- [40] STOLZ A J, JOCHUM K P, SPETTEL B, et al. Fluid and melt related enrichment in the subarc mantle: evidence from Nb/Ta variations in island-arc basalts[J]. *Geology*, 1996, 24(7): 587-590.
- [41] PEARCE J A, CANN J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290-300.
- [42] GREEN M G, SYLVESTER P J, BUICK R. Growth and recycling of early Archaean continental crust: geochemical evidence from the Coonterunah and Warrawoona Groups, Pilbara Craton, Australia[J]. *Tectonophysics*, 2000, 322(1): 69-88.
- [43] LASSITER J C, DEPAOLO D J. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: chemical and isotopic constraints [J]. *Geophysical Monograph Series*, 1997, 100: 335-355.

- [44] MECDONALD R, ROGERS N W, FITTON J G, et al. Plume-Lithosphere interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift, East Africa[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(5): 877-900.
- [45] BAKER J A, MENZIES M A, THIRLWALL M F, et al. Petrogenesis of Quaternary intraplate volcanism Sana'a Yemen: implication and polybaric melt hybridization[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38: 1359-1390.
- [46] CAMPHELL I H, GRIFFITHS R W. The evolution of mantle's chemical structure[J]. *Lithos*, 1993, 30: 389-399.
- [47] 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 新疆东天山葫芦岩体岩石学与地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2008, 24(12): 2749-2760.
- [48] RAPP R P, WATSON E B. Dehydration melting of meta basalt at 8 - 32 kbar: implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 891-931.
- [49] SCHMIDT M W, VIELZEUF D, AUZANNEAU E. Melting and dissolution of subducting crust at high pressures: the key role of white mica[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 228(1/2): 65-84.
- [50] 章永梅, 张力强, 高虎, 等. 新疆西天山呼斯特杂岩体岩石学、锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J]. *岩石学报*, 2016, 32(6): 1749-1769.
- [51] TATSUMI Y, TAKAHASHI T. Operation of subduction factory and production of andesite[J]. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, 2006, 101(3): 145-153.
- [52] 邢浩, 赵晓波, 张招崇, 等. 西天山巴音布鲁克地区早古生代成矿地质环境: 岩浆岩及其时代和元素同位素约束[J]. *岩石学报*, 2016, 32(6): 1770-1794.
- [53] ZHU Y F, ZHANG L F, GU L B, et al. The zircon SHRIMP chronology and trace element geochemistry of the Carboniferous volcanic rocks in western Tianshan Mountains [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(19): 2201-2212.
- [54] WOODHEAD J D, EGGINS S M, JOHNSON R W. Magma genesis in the New Britain island arc: further insights into melting and mass transfer processes[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(9): 1641-1668.
- [55] PLANK T, LANGMUIR C H. Tracing trace elements from sediment input to volcanic output at subduction zones[J]. *Nature*, 1993, 362(6422): 739-743.
- [56] OTHMAN D B, WHITE W M, PATCHETT J. The geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis and crust-mantle recycling[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1989, 94(1/2): 1-21.
- [57] YOU C F, CASTILLO P R, GIESKES J M, et al. Trace element behavior in hydrothermal experiments: implications for fluid processes at shallow depths in subduction zones[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1996, 140: 41-52.
- [58] WILSON M. *Igneous petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-466.
- [59] ELLIOTT T, PLANK T, ZINDLER A, et al. Elements transport from slab to volcanic front the Mariana arc[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 14991-15019.
- [60] SAUNDERS A D, STOREY M, KENT R W, et al. Consequences of plume-lithosphere interactions[J]. *Geological Society of London Special Publication*, 1992, 68(1): 41-60.
- [61] WOODHEAD J D, HERGT J M, DAVIDSON J P, et al. Hafnium isotope evidence for "conservative" element mobility during subduction zone processes[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2001, 192(3): 331-346.
- [62] 夏明哲, 姜常义, 钱壮志, 等. 新疆东天山黄山东岩体岩石地球化学特征与岩石成因[J]. *岩石学报*, 2010, 26(8): 2413-2430.
- [63] MARTIN M. A method of discriminating between different types of min-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56(3/4): 207-218.
- [64] PEARCE J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries[J]. *Andesites*, 1982: 528-548.
- [65] BAILEY J C. Geochemical criteria for a refined tectonic discrimination of orogenic andesites[J]. *Chemical Geology*, 1981, 32(1): 139-154.
- [66] CONDIE K C. Geochemistry and tectonic setting of early Proterozoic supracrustal rocks in the Southwestern United States[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(6): 845-864.
- [67] HARRIS H B W, PEARCE J A, TINDLE A G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism[J]. *Geological Society of London Special Publication*, 1986, 19(5): 67-81.
- [68] PEARCE J A, HARRIS H B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [69] 马瑞士, 舒良树, 孙家齐, 等. 东天山构造演化与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-202.
- [70] 李锦轶, 王克卓, 孙桂华, 等. 东天山吐哈盆地南缘古生代活动陆缘残片: 中亚地区古亚洲洋板块俯冲的地质记录[J]. *岩石学报*, 2006, 22(5): 1087-1102.
- [71] 宋彪, 李锦轶, 李文铅, 等. 吐哈盆地南缘克孜尔卡拉萨依和大南湖花岗岩基锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *新疆地质*, 2002, 20(4): 342-345.
- [72] 李亚萍, 孙桂华, 李锦轶, 等. 东天山吐哈盆地东缘泥盆纪花岗岩的确定及其地质意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(8): 932-936.
- [73] 唐俊华, 顾连兴, 张遵忠, 等. 东天山咸水泉片麻状花岗岩特征、年龄及成因[J]. *岩石学报*, 2007, 23(8): 1803-1820.
- [74] 周涛发, 袁锋, 张达玉, 等. 新疆东天山觉罗塔格地区花岗岩类年代学、构造背景及其成矿作用研究[J]. *岩石学报*, 2010, 26(2): 478-502.
- [75] 肖兵, 陈华勇, 王云峰, 等. 东天山土屋一延东铜矿区晚志留世岩体的发现及构造意义[J]. *地学前缘*, 2015, 22(6): 251-266.