

北祁连造山带大依马龙地区角斑岩的 岩石成因及构造背景分析

卜涛^{1,2)}, 王国强^{1,2)}, 唐卓^{1,2)}, 朱涛^{1,2)}, 罗根根^{1,2)}, 计波^{1,2)}

1) 中国地质调查局造山带地质研究中心/西安地质调查中心, 西安, 710054;

2) 自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室/西安地质调查中心, 西安, 710054

内容提要: 本文对北祁连造山带大依马龙地区的角斑岩进行了主量和微量元素地球化学分析, 结果表明, 角斑岩 SiO_2 含量介于 52.51%~55.46%, Na_2O 含量高, 介于 4.79%~6.86%, K_2O 含量低, 介于 0.16%~0.93%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 5.16~37.19, 具低钾拉斑系列—中钾钙碱性系列钠质岩石特点。岩石固结指数 (SI) 介于 15.03~23.59, $\text{Mg}^\#$ 值介于 39.9~52.14。在球粒陨石标准化的稀土元素配分图上表现出轻稀土轻微富集的右倾型, 基本没有或具有轻微的 Eu 异常, δEu 介于 0.86~1.30 之间, 平均 0.98; 在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上, 普遍亏损 Nb 、 Ta 、 Zr 、 Ti 、 P 等高场强元素, 角斑岩 Y 含量介于 15.6×10^{-6} ~ 21.8×10^{-6} , 平均 18.77×10^{-6} <20, Th/Yb 介于 0.59~1.38, 平均 0.77>0.6, Ce/Pb 值介于 4.31~7.79, Nb/La 值介于 0.28~0.49, Zr/Nb 值介于 14.73~30.08, 均表明其为岛弧火山岩。结合区域地质背景, 我们认为角斑岩形成于岛弧环境, 其形成机制为: 受俯冲板片流体改造的地幔楔物质发生部分熔融形成母岩浆, 在岩浆上升过程中, 热的岩浆体系发生了分离结晶作用并受到了围岩热卤水的混染, 热卤水带来了 Na 和 Si 离子, 带走了 Fe 和 Ca 离子, 从而形成了富钠的岩浆体系。

关键词: 角斑岩; 地球化学; 岩石成因; 构造背景; 北祁连; 甘肃

北祁连造山带是一个具有完整沟—弧—盆体系的加里东期造山带(夏林圻等, 1991, 1992, 1995, 1996, 1998, 2000, 2001; 冯益民, 1992, 1997; 左国朝等, 1997; 张旗等, 2000; 杜远生等, 2004; 徐学义等, 2008), 自 20 世纪 70 年代以来, 随着板块构造理论的发展, 围绕火山岩、蛇绿岩、基底构造属性、变质变形作用、洋盆俯冲极性及其大地构造演化等多个方面的关键科学问题, 开展了广泛而深入研究(李春昱等, 1980; Wu Hanquan et al., 1993; 冯益民等, 1996; 左国朝等, 1997; 夏林圻等, 1998, 2001, 2016; 葛肖虹等, 1999; 杜远生等, 2002, 2004; Xia Linqi et al., 2003; Zhang Jianxin et al., 2007; Song Shuguang et al., 2007a, 2009a; Xiao Wenjiao et al., 2009), 取得一系列的重要进展, 但是, 关于北祁连洋盆开始俯冲的时限, 存在多种认识, 冯益民等(1996)认为最早俯冲时间可能为 495 Ma, 吴才来等(2006, 2010)根据北祁连南缘柯柯里斜长花岗岩(512 Ma)、石英闪长岩(501 Ma)及野马咀花岗岩(508 Ma)推测北祁连造山带俯冲作用开始俯冲时间早于 512 Ma, 夏小

洪等(2012)报道了大盆大板弧后盆地蛇绿岩套中辉长岩的年龄为 517 ± 4 Ma, 由此推测, 北祁连岩石圈的俯冲可能开始于 520 Ma 之前, 也有学者认为俯冲开始时间稍晚于早—中奥陶世(林宜慧, 2010)。另外, 关于寒武纪黑茨沟组火山岩形成的构造环境也存在分歧, 有学者认为黑茨沟组火山岩形成于陆内裂谷和洋脊过渡环境(张建新等, 1997; 黄增保等 2004); 郭彦汝等(2014)认为其形成于弧后裂谷环境; 王晓伟等(2018)根据产于北祁连扎柯山地区的高镁安山岩(516 ± 7 Ma)认为其形成于岛弧环境。因此, 开展对黑茨沟组火山岩的岩石成因及构造背景研究具有重要意义。本文拟以北祁连造山带大依马龙河上游地区黑茨沟组火山岩为研究对象, 以精细的岩石学和岩石地球化学为研究手段, 探讨火山岩的岩石成因和构造环境, 为北祁连早古生代构造演化研究提供新的岩石学证据。

1 区域地质背景

北祁连造山带处于秦—祁—昆巨型造山带的中

注: 本文为中国地质调查局项目“祁连成矿带肃南—大柴旦地区地质矿产调查”(编号: DD20160012)的成果。

收稿日期: 2018-08-19; 改回日期: 2018-12-19; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.005

作者简介: 卜涛, 男, 1986 年生, 硕士, 工程师, 主要从事岩浆岩岩石学、岩石地球化学方面的研究, Email: cugbutao@163.com。

段,挟持于阿拉善地块、塔里木板块与中祁连地块之间,呈 NW—SE 向展布,长约 1200 km,宽约 100~300 km,该造山带北边以龙首山断裂为界,南界为中祁连北缘断裂,西端被阿尔金左行走滑断裂截切,东端为同心—固原右行走滑断裂。自北向南可以划分为弧后盆地、北祁连岛弧、俯冲杂岩和消减洋壳残片等不同的构造单元(冯益民等,1996)。本文所研究的黑茨沟组火山岩的大地构造位置就位于前人划分的走廊弧后盆地之上(图 1)。黑茨沟组系甘肃区测一队于 1965 年在甘肃天祝县黑茨沟、马营沟、响泉

山一带创名,由于首次在黑茨沟发现中寒武统标准化石,因此命名为黑茨沟组。区域上,主要分布在白银市灰土涝地—胜家梁、永登石青砬、天祝黑茨沟、肃南县大野口、大依马龙、肃北鹰嘴山及其以西地带,在东部的白银地区岩石组合主要为深灰—褐灰色凝灰质千枚岩、石英角斑岩类、细碧角斑岩夹硅质岩大理岩凸镜体;永登石青砬一带主要为灰绿色凝灰质千枚岩、绢云千枚岩、中酸性凝灰岩夹变质砂岩及少量大理岩和硅质岩;天祝黑茨沟一带以安山玄武岩、中酸性火山碎屑岩为主夹硅质岩及少量含三

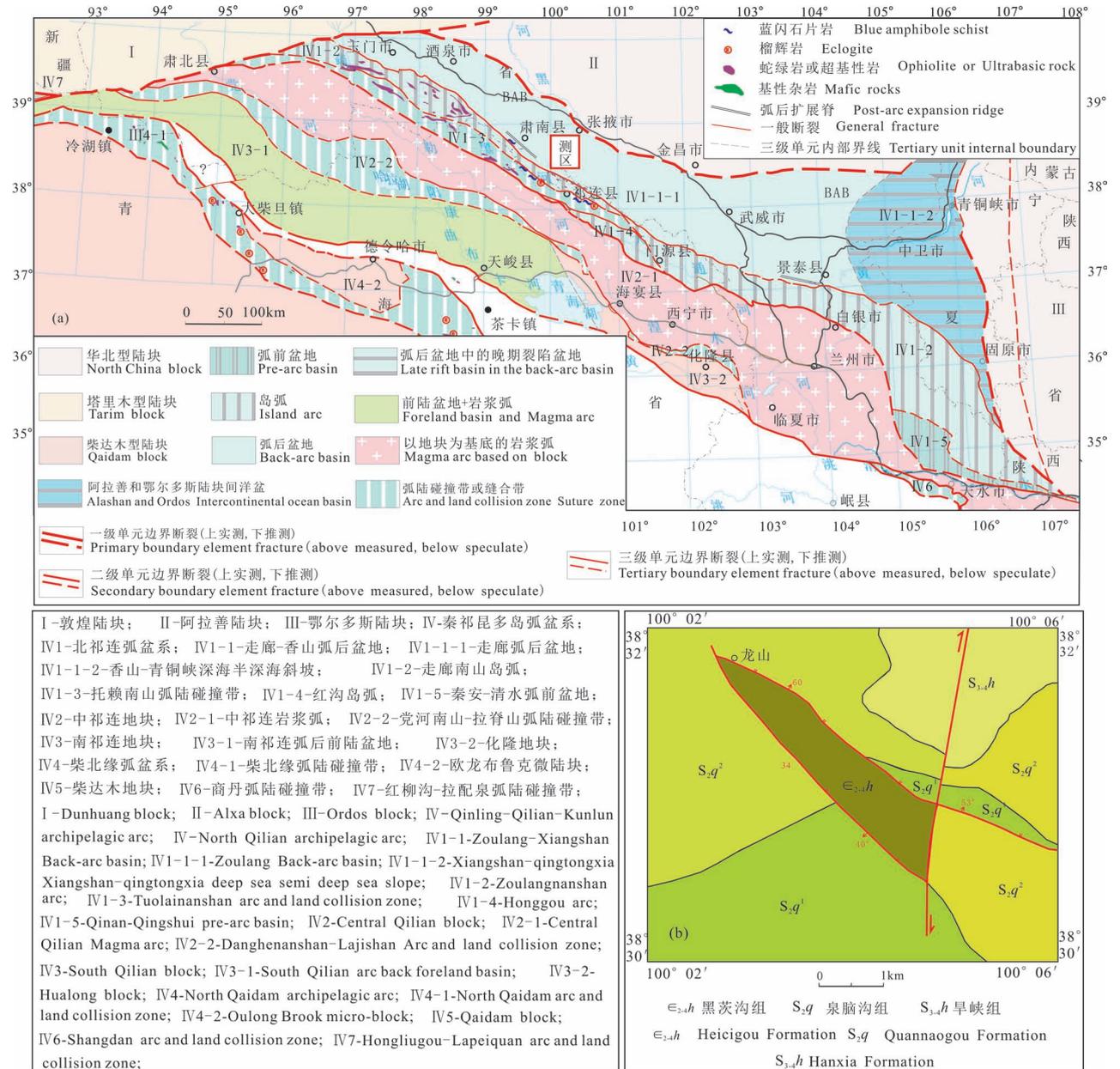


图 1 北祁连造山带早古生代构造单元划分图(a) (据冯益民等,1996 修改)及黑茨沟组角斑岩分布图(b)

Fig. 1 Tectonic subdivisionsmap of Qilan Mountains(a, modified from the Feng Yiming et al., 1996#) and the Keratophyes (The Heicigou Formation of Cambria) distribution in the Dayimalong area(b)

叶虫化石的生物灰岩和砂岩等;肃北县一带以灰绿色夹紫红色中酸性凝灰岩为主,夹凝灰质砂板岩及少量细晶灰岩。本文论述的寒武系黑茨沟组火山岩主要分布于甘肃省肃南县西水乡大依马龙河上游龙山附近,整体呈北西—南东方向展布,出露面积约 3.14 km^2 ,岩性组合上,下部主要为一套角斑岩、火山角砾岩,上部为中薄层的硅质岩夹少量的细晶灰岩及砂岩,底部和顶部均与晚志留世泉脑沟组呈断层接触关系(图2)。火山喷发方式以爆发和喷溢两种形式为主,火山岩相从爆发相—喷溢相—火山喷发间隙即宁静期的化学沉积相均有产出。

2 岩石学特征

角斑岩:研究区内角斑岩主要呈灰绿色,具无斑或少斑结构,隐晶质结构,基质具间粒、间片、间隙及似交织结构,块状构造,局部地段可见枕状构造和杏仁构造。具有斑状结构的角斑岩其斑晶含量在2%~7%左右,主要为自形—半自形的钠长石或更钠长石,粒径 $0.2\sim 0.4\text{ mm}$,解理发育,双晶较为发育,为简单双晶和聚片双晶,其中简单双晶多于聚片双晶,还可见少量的石英、方解石斑晶,含量极低。基质主要由钠长石或钠更长石、石英、透辉石、斜黝帘石、绿泥石、钠黝帘石云集物、铁质析离凝聚物组成。其中,钠长石自形程度差,边缘不整齐,多呈条状、针柱状,有的呈舒缓的弯曲状且具有波状消光,长宽比 $2:1\sim 3:1$,粒径 $0.3\text{ mm}\times 0.1\text{ mm}\sim 0.15\text{ mm}\times 0.08\text{ mm}$,边缘溶蚀明显,内部蚀变弱,双晶发育,主要为简单双晶和聚片双晶,多以格架状方式排列分布,含量45%~50%;石英为它形粒状,多数内部发育溶蚀洞、缝,边部溶圆明显,多分布于长石晶间空隙中,正低突起, I 灰白干涉色粒径 $<0.1\text{ mm}$,含量

8%~10%;透辉石为它形粒状,粒径 $0.15\text{ mm}\sim 0.2\text{ mm}$,辉石式解理,无蚀变,正高突起,斜消光, II 蓝干涉色,含量1%左右;斜黝帘石为粒状单晶或集合体,粒径一般 $0.2\sim 0.3\text{ mm}$,正中高突起,无解理, I 浅黄—紫红干涉色,分布于长石粒间,含量3%~5%;绿泥石为半晶质胶质体,空隙形态,隐晶质衍生物,淡绿色,无多色性,负低突起, I 灰黑干涉色,分布于长石晶间,含量8%~10%;钠黝帘石为凝聚集合体,内部为极细粒状,团块直径大于 0.1 mm ,单粒直径一般 $0.01\text{ mm}\sim 0.02\text{ mm}$,正中高突起, I 灰白干涉色,含量15%~18%;Fe—Mg 凝聚物:凝聚霉斑状、丝状、线条,半透明黑褐色—不透明,侧反光下蛋白白色,为蚀变析离凝聚物,分布于长石晶间,含量4%~6%左右,岩石中绿泥石、绿帘石发育,局部可见磁铁矿细脉和浸染体,普遍受到了低绿片岩相的变质作用。

3 地球化学特征

角斑岩的主量、微量元素分析测试均在中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心完成,主元素分析仪器为 Panalytical 公司生产的 PW440 型 X 荧光光谱仪(XRF),分析相对误差低于5%,微量元素和稀土元素测试仪器为 Thermo Fisher 公司生产的 X-Series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS),检测限优于 5×10^{-9} ,相对标准偏差低于5%。

主量元素:研究区角斑岩的主量元素分析结果及特征参数见表1。据表可知角斑岩 SiO_2 含量介于52.51%~55.46%,平均54.05%, Na_2O 含量较高,介于4.79%~6.86%,平均5.83%, K_2O 含量低,介于0.16%~0.93%,平均0.68, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为5.16~37.19, TiO_2 含量介于0.8%~1.0%之间,平均0.88,

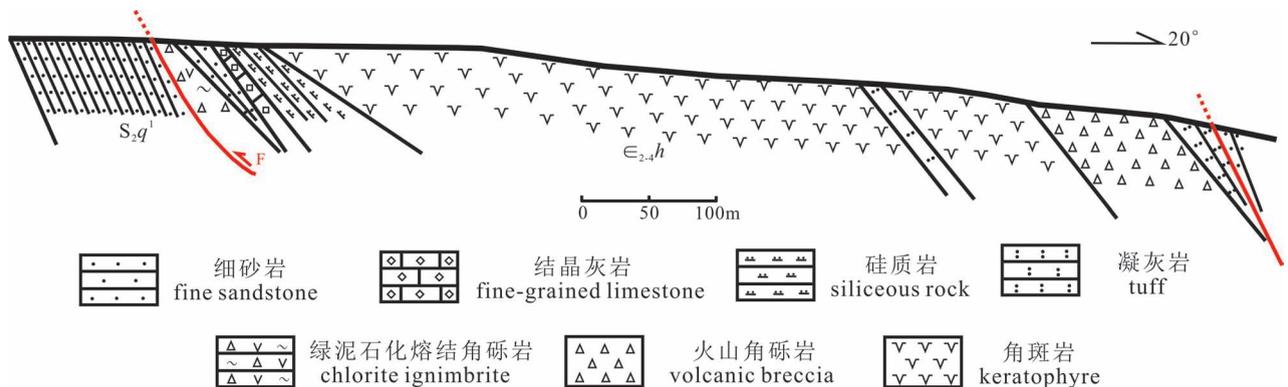


图2 甘肃省肃南县西水乡大依马龙地区黑茨沟组火山岩(Є_{2-4h})实测地质剖面图

Fig. 2 Geological section showing the Heicigou Formation(Є_{2-4h}) in the Dayimalong area, Sunan County, Gansu

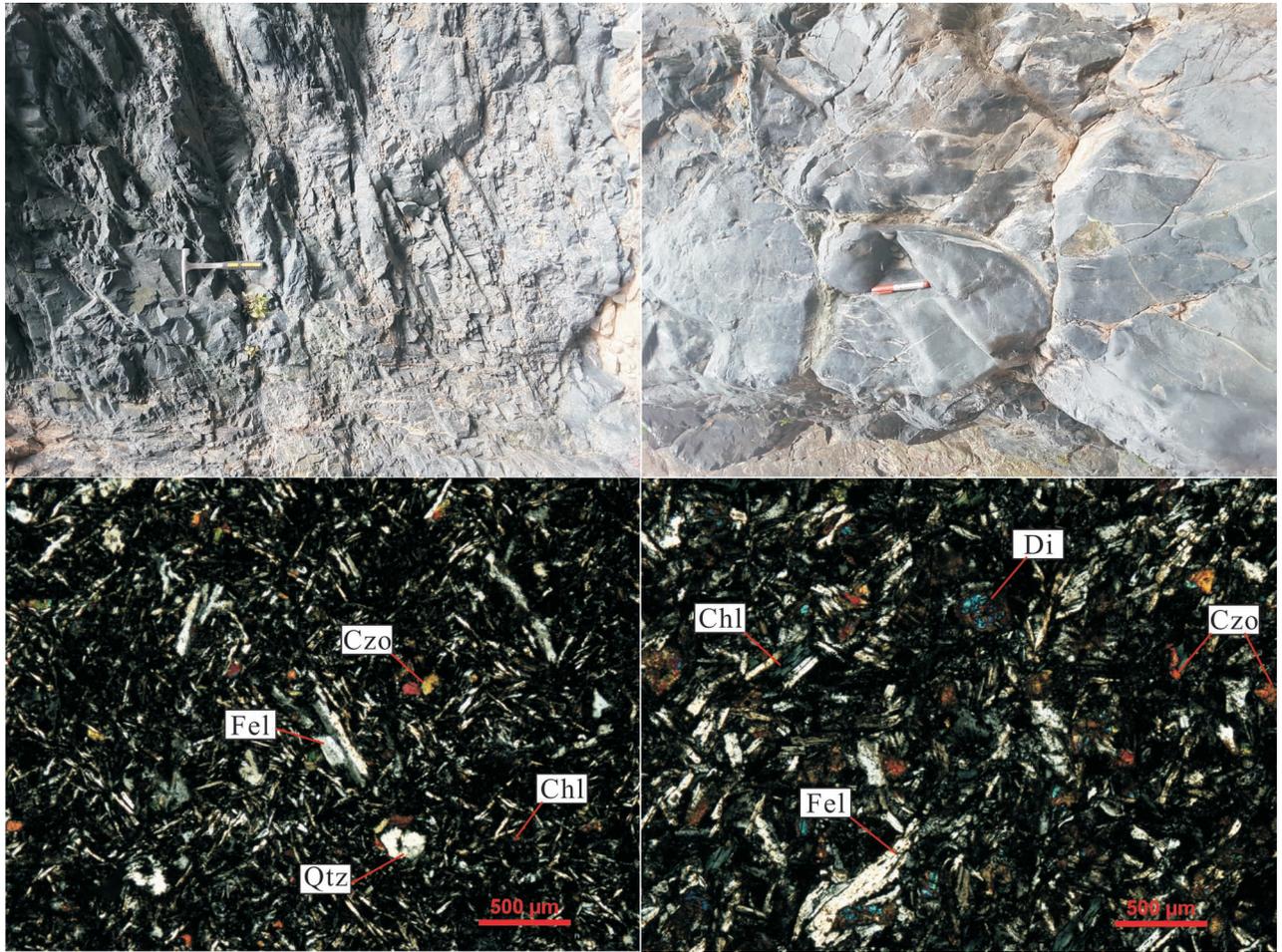


图 3 甘肃省肃南县西水乡大依马龙地区黑茨沟组角斑岩的野外及镜下照片

Fig. 3 Field photographs and Microphotographs of Keratophyes in the Dayimalong area, Sunan County, Gansu

Qtz—石英; Fel—长石; Czo—斜黦帘石; Di—透辉石; Chl—绿泥石

Qtz—quartz; Fel—feldspar; Czo— clinozoisite; Di—diopside; Chl—chlorite

Al_2O_3 含量 13.72% ~ 15.62%, 平均 14.82。岩石固结指数 (SI) 介于 15.03 ~ 23.59, $Mg^\#$ 值介于 39.9 ~ 52.14。在 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ 图上 (图 4a), 样品多位于亚碱性玄武质安山岩区域内, 在 SiO_2-FeO^T/MgO 图解中 (图 4b) 样品多集中在拉斑玄武岩系列区域内, 个别在拉斑玄武岩和钙碱性系列界线附近。

稀土元素: 角斑岩的稀土元素分析结果及特征参数见表 1。据表 1 可知角斑岩的稀土元素总量 (ΣREE) 介于 $69.56 \times 10^{-6} \sim 89.35 \times 10^{-6}$, 其中, 轻稀土元素 (LREE) 总量为 $43.12 \times 10^{-6} \sim 51.55 \times 10^{-6}$, 重稀土元素 (HREE) 总量为 $26.44 \times 10^{-6} \sim 38.05 \times 10^{-6}$, 轻重稀土间分馏不明显, $LREE/HREE = 1.20 \sim 1.75$, $(La/Yb)_N$ 值为 2.14 ~ 3.72。轻稀土元素内部分馏较弱, 其 $(La/Sm)_N$ 值为 1.44 ~ 2.07, 重稀土元素内部分馏亦不明显, $(Gd/Yb)_N$ 值为 1.24 ~ 1.42; 在球

粒陨石标准化的稀土元素配分图上 (图 5a) 表现出轻稀土轻微富集的右倾型, 基本没有或具有轻微的负 Eu 异常, δEu 介于 0.86 ~ 1.30 之间, 平均 0.98, 没有 Ce 的异常, δCe 介于 0.94 ~ 1.01 之间, 平均 0.98。

微量元素: 角斑岩的微量元素分析结果及特征参数见表 1。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上 (图 5b), 普遍表现出 Nb、Ta、Zr、Ti、P 等高场强元素的亏损和 Ba、U、K 等元素的富集, 显示出俯冲带火山岩 (弧火山岩) 特征, Ce/Pb 值介于 4.31 ~ 7.79 之间, 平均 5.52, 接近岛弧火山岩 Ce/Pb 值平均值 3, Nb/La 值介于 0.28 ~ 0.49, 亦类似于岛弧火山岩 Nb/La 值 (小于 0.8) (Candies et al., 1989)。

表 1 甘肃省肃南县西水乡大依马龙地区角斑岩主量元素(%)和微量元素($\times 10^{-6}$)分析数据

样品号	角斑岩										角斑岩									
	12-3 -1H	12-6 -2H	12-7 -1H	P12-7 -2H	12-10 -1H	012-10 -2H	012-10 -3H	012-10 -5H	012-10 -6H	样品号	12-3 -1H	12-6 -2H	12-7 -1H	P12-7 -2H	12-10 -1H	012-10 -2H	012-10 -3H	012-10 -5H	012-10 -6H	
SiO ₂	53.68	54.44	55.21	54.19	52.51	53.38	54.67	55.46	55.46	Y	21.40	21.80	18.60	19.40	15.6	18.40	19.60	18.40	15.70	
Al ₂ O ₃	14.81	13.72	14.9	15.36	14.31	14.41	15.13	15.62	15.62	ΣREE	81.62	89.35	84.69	84.79	73.09	76.94	81.73	79.12	69.56	
Fe ₂ O ₃	2.75	3.33	2.89	2.79	4.38	4.74	4.91	5.34	5.34	δEu	0.86	1.30	1.04	1.05	0.92	0.89	0.94	0.90	0.92	
FeO	6.88	6.17	6.93	7.52	7.78	5.84	6.60	5.46	5.46	δCe	1.00	0.97	0.96	0.96	1.01	1.00	0.99	0.96	0.94	
CaO	6.02	6.21	5.68	5.12	4.54	3.67	3.65	3.81	3.81	(La/Sm) _N	1.44	1.55	1.85	1.77	1.86	1.70	1.68	1.93	2.07	
MgO	4.86	3.49	4.54	4.78	5.36	3.91	4.03	3.25	3.25	(La/Yb) _N	2.14	2.43	2.92	2.80	3.60	2.68	2.98	3.37	3.72	
K ₂ O	0.16	0.38	0.80	0.93	0.79	0.88	0.74	0.71	0.71	(Gd/Yb) _N	1.29	1.29	1.31	1.24	1.49	1.28	1.40	1.38	1.42	
Na ₂ O	5.95	5.45	4.79	4.80	5.63	6.42	6.56	6.86	6.86	Cu	83	80	114	170	115	147	159	135	111	
TiO ₂	0.98	1.00	0.80	0.81	0.90	0.88	0.85	0.81	0.81	Pb	2.40	2.58	3.99	4.38	3.85	3.19	4.26	4.64	4.07	
P ₂ O ₅	0.13	0.17	0.19	0.19	0.20	0.21	0.22	0.21	0.21	Zn	61.20	66.9	65.80	77.90	85.80	107.01	96.01	77.02	57.80	
MnO	0.18	0.20	0.15	0.15	0.19	0.16	0.17	0.20	0.20	Cr	36.00	2.61	35.30	40.50	30.60	25.70	25.50	20.90	19.70	
灼失	3.56	5.33	2.99	3.24	3.38	2.89	2.47	2.24	2.24	Ni	22.10	5.49	20.80	22.70	18.20	17.30	16.50	12.20	11.40	
总和	99.96	99.89	99.87	99.88	99.97	100.01	99.99	99.97	99.97	Co	29.60	18.80	25.40	27.06	28.32	37.10	35.80	25.12	20.10	
Na ₂ O/K ₂ O	37.19	14.34	5.99	5.16	7.13	6.85	8.45	9.66	9.66	Li	10.70	8.54	9.38	11.10	15.70	18.40	13.40	13.30	9.82	
La	7.50	8.95	9.66	9.42	8.54	8.81	9.48	8.82	8.82	Rb	6.10	9.02	12.4	13.50	46.70	26.00	21.60	19.50	15.01	
Ce	17.80	20.10	20.70	20.70	19.90	20.00	20.00	18.00	18.00	Cs	0.69	1.06	0.47	0.38	0.62	0.58	0.51	0.54	0.48	
Pr	2.50	2.85	2.80	2.92	2.67	2.75	2.67	2.39	2.39	Sr	122	235	200	191	195	169	172	200	181	
Nd	12.40	14.00	13.80	13.20	11.50	11.80	11.80	10.30	10.30	Ba	161	214	348	390	282	266	184	172	137	
Sm	3.36	3.72	3.38	3.44	2.97	3.08	3.17	2.75	2.75	V	300	236	302	316	243	340	358	380	360	
Eu	1.02	1.68	1.21	1.22	0.92	0.94	0.97	0.86	0.86	Sc	26.60	22.60	24.20	26.30	24.70	30.90	31.07	29.8	25.50	
Gd	3.90	4.13	3.74	3.60	3.06	3.37	3.36	2.92	2.92	Nb	2.34	2.48	2.29	2.46	4.15	3.83	3.78	3.31	2.78	
Tb	0.68	0.72	0.64	0.63	0.47	0.55	0.54	0.45	0.45	Ta	0.20	0.21	0.20	0.21	0.32	0.28	0.29	0.26	0.21	
Dy	4.32	4.44	3.88	3.92	2.88	3.42	3.36	2.89	2.89	Zr	68.51	74.60	60.30	59.60	64.70	56.40	60.41	53.90	43.30	
Ho	0.92	0.93	0.82	0.83	0.61	0.73	0.76	0.60	0.60	Hf	2.23	2.38	1.90	2.00	2.26	2.06	2.17	1.99	1.74	
Er	2.54	2.57	2.36	2.37	1.74	2.09	2.15	1.68	1.68	Be	0.67	0.70	0.62	0.54	0.56	0.59	0.64	0.53	0.49	
Tm	0.38	0.40	0.36	0.37	0.27	0.33	0.32	0.25	0.25	Ga	17.61	15.40	15.01	16.20	14.60	17.60	16.30	19.30	14.20	
Yb	2.51	2.64	2.37	2.41	1.70	2.12	2.02	1.70	1.70	U	0.40	0.48	0.50	0.52	1.29	0.82	1.58	0.55	0.68	
Lu	0.39	0.42	0.37	0.36	0.26	0.32	0.29	0.25	0.25	Th	1.48	1.76	1.70	1.67	2.34	1.54	1.60	1.43	1.19	

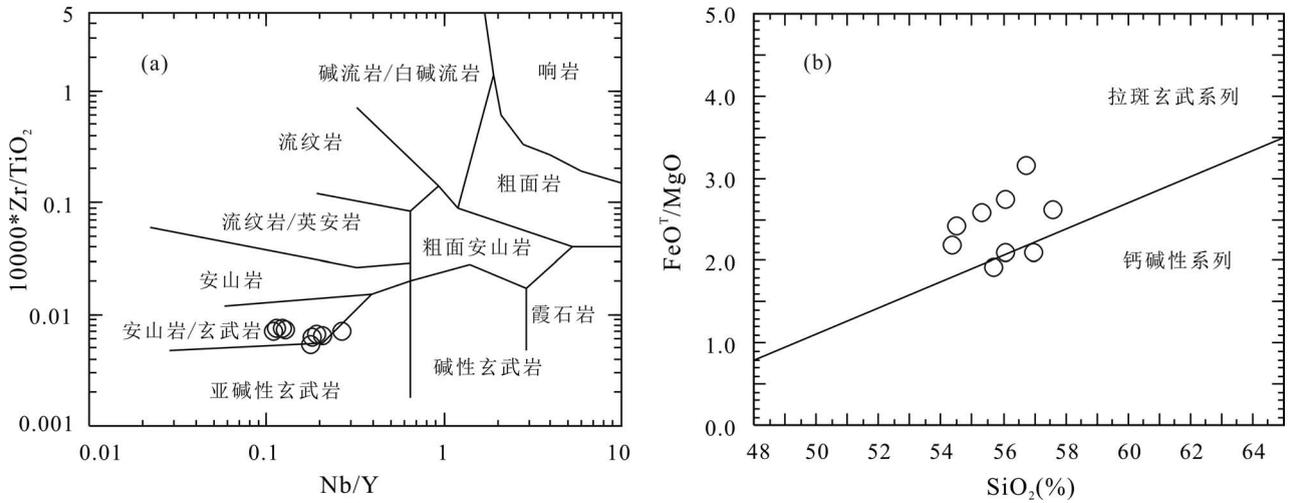


图 4 角斑岩 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ (a, 据 Winchester et al., 1977) 和 SiO_2-FeO^T/MgO 图解 (b, 据 Miyashiro, 1975)

Fig. 4 $Zr/TiO_2-Nb/Y$ diagram (a) (after Winchester et al., 1977) and SiO_2-FeO^T/MgO (b) (after Miyashiro, 1975) of Keratophyes in the Dayimalong area, Sunan County, Gansu

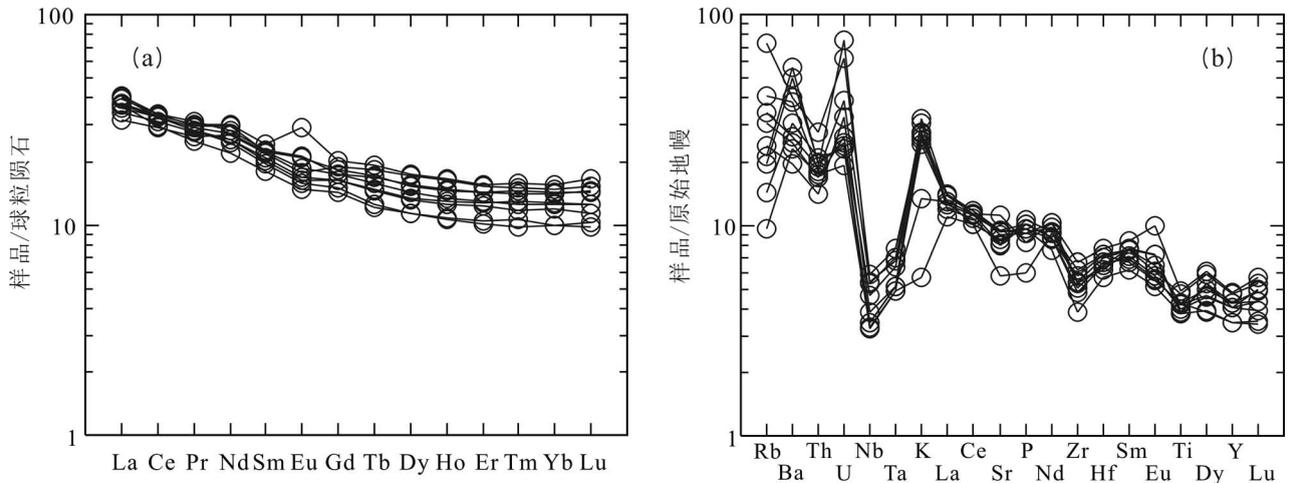


图 5 甘肃省肃南县西水乡大依马龙地区角斑岩稀土元素配分图(a)和微量元素蛛网图(b) (标准化数据据 Sun et al., 1989)

Fig. 5 REE patterns (a) and Trace elements spidergrams (b) of Keratophyes in the Dayimalong area, Sunan County, Gansu (values for normalization from Sun and McDonough, 1989)

4 讨论

4.1 角斑岩的形成时代及构造环境分析

关于黑茨沟组火山岩的形成时代,据 1 : 20 万祁连幅地质图说明书,黑刺沟组分布范围内所含三叶虫化石在不同地点的地质年代明显不同,大依马龙及酥油河等处灰岩中所产的三叶虫化石种属为: *Clavagnostus* sp., *Doryagnostus* sp., *Ptychagnostus* sp., *Peronopsis* sp., *Hypagnostus* sp., *Peronopsis* cf.

fallax minor (Brogger)., *Agrulopsis* sp., *Kootenia* so., *Dorypyge* cf. *laevis* (Walcott)., *Eosptychoparia* sp., *E. cf. tenuicaudata* (Endo)., *Clavagnostus* cf. *sulcatus* Westergard, 均为中寒武世的标准分子, 特别 *Peronopsis* cf. *fallax minor* (Brogger), *Dorypyge* cf. *laevis* (Walcott) 大都属于中寒武世晚期;天祝元安黑茨沟剖面中所含三叶虫化石 *Kootenia gansuensis* 属南皋阶到都匀阶化石分子, *Dinesus* 是都匀期—台江早期分子(周志强等, 1996), 门源县大梁火山岩系剖面

所含三叶虫化石 *Paraacidaspis hunanica Jegorova* 和 *Corynexochus plumula Whitehouse* 为排碧期化石分子, *Pseudagnostus* 为古丈阶到牛车河阶化石分子(朱涛等, 2015), 王晓伟等(2018)最新获得的黑茨沟组高镁安山岩 Rb-Sr 同位素年龄为 516 ± 7 Ma, 西安地质调查中心夹道寺项目组最新获得的黑茨沟组英安岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 521 Ma(未发表), 结合同位素年代学数据及古生物资料, 我们认为黑茨沟组火山岩的形成时代应为第二世到芙蓉世。

研究区的角斑岩 SiO_2 含量介于 52.51% ~ 55.46%, 全碱含量 5.59% ~ 7.57%, 且 Na_2O 含量较高, 介于 4.79% ~ 6.86%, $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 值为 5.16 ~ 37.19, 显示低钾拉斑系列—中钾钙碱性系列钠质岩石特点。角斑岩 TiO_2 含量介于 0.8% ~ 1.0% 之间, 与世界上岛弧火山岩一致, Ce/Pb 值介于 4.31 ~ 7.79, 平均 5.52, 接近岛弧火山岩 Ce/Pb 值平均值 3, Nb/La 值介于 0.28 ~ 0.49, 类似于岛弧火山岩 Nb/La 值(小于 0.8)(Candies et al., 1989), Zr/Nb 值介于 14.73 ~ 30.08 之间, 也与岛弧火山岩的变化范围(10 ~ 60)一致(Davidson., 1996), 据夏林圻等(2003)研究, 岛弧火山岩 Y 含量一般小于 20×10^{-6} , Th/Yb > 0.6, 研究区角斑岩的 Y 含量介于 15.6×10^{-6} ~ 21.8×10^{-6} , 平均 18.77×10^{-6} < 20, Th/Yb 介于 0.59 ~ 1.38, 平均 0.77, 均表明其为岛弧火山岩。在球粒陨石标准化的稀土元素配分图和原始地幔标准化的微量元素蛛网图上, 表现出轻微富集轻稀土元素和

Ba、U、K 等大离子亲石元素, 亏损 Nb、Ta、Zr、Ti、P 等高场强元素, 尤其亏损 Nb、Ta 元素, 具有十分明显的槽, 显示出与俯冲有关的弧火山岩的特征。区域构造研究表明, 北祁连洋盆最早俯冲时间可能为 495 Ma 或者更早(冯益民等, 1997; 张招崇等, 2001; 史仁灯等, 2004; 相振群等, 2007; 吴才来等, 2006, 2010; 夏小洪等, 2010; Song Shuguang et al., 2013; 夏林圻等, 2016); 弧火山岩和花岗岩的地球化学和年代学资料揭示, 北祁连地区最早的弧岩浆作用记录为 520 Ma (吴才来等, 2010, Xia Xiaohong et al., 2012; Song Shuguang et al., 2013), 代表的岩浆岩包括: 大盆大阪拉斑玄武质火山岩, 柴达诺过铝花岗岩和托勒牧场一带的花岗闪长岩。结合区域地质资料和黑茨沟组角斑岩的形成时代及地球化学特征, 我们认为研究区黑茨沟组中的角斑岩形成于岛弧环境。

4.2 岩浆的源区性质及岩石成因

岛弧火山岩岩浆源区主要为受到俯冲洋壳或泥质沉积物析出的流体交代地幔楔(Pearce et al., 1995)或俯冲板片发生熔融形成的熔体交代地幔楔(Scaillet et al., 2001)。岩石学研究表明, 微量元素, 特别是化学性质相近的元素比值不受岩浆分异作用的影响, 能够较好的示踪岩浆源区性质。在俯冲环境中, 地幔楔发生部分熔融时, 由于榍石、金红石等富钛矿物常常残留在地幔中, 因此, 形成的岩浆常常亏损 Nb、Ta、Ti 等元素, 与其他元素如 La、Ba、

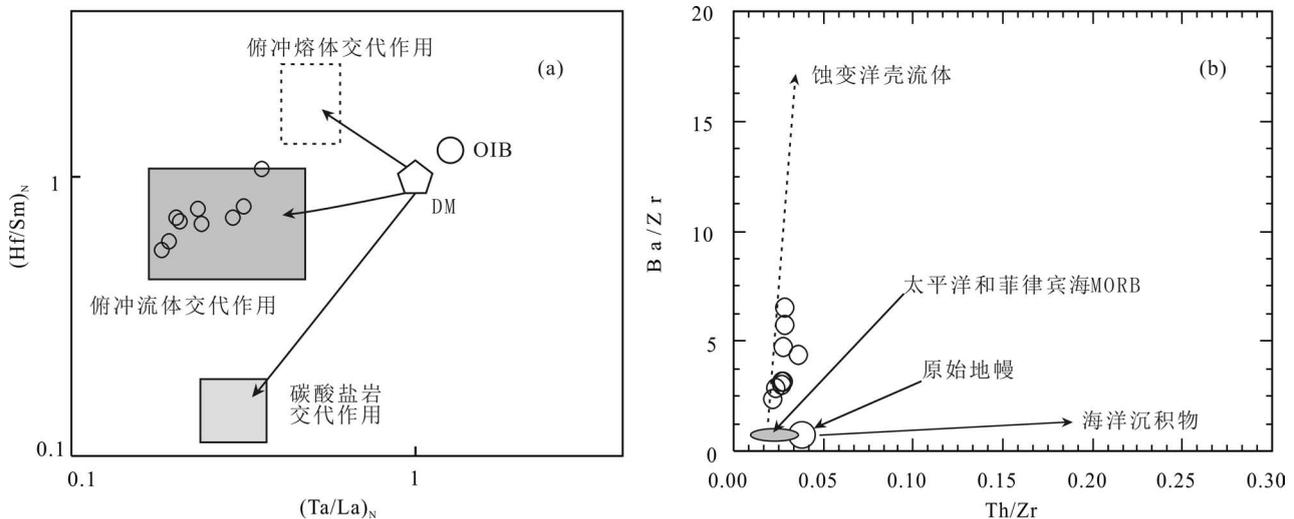


图6 甘肃省肃南县西水乡大依马龙地区角斑岩 $(\text{Ta}/\text{La})_N$ — $(\text{Hf}/\text{Sm})_N$ 图(a)(据 Fleche et al., 1998)和 Th/Zr — Ba/Zr 图(b)(据 Ishizuka et al., 2003)

Fig. 6 $(\text{Ta}/\text{La})_N$ — $(\text{Hf}/\text{Sm})_N$ diagram (a) after Fleche et al (1998) and Th/Zr — Ba/Zr (b) after Ishizuka et al (2003) of Keratophyes in the Dayimalong area, Sunan County

Th、U 等元素形成明显分异;另外,在地幔楔中,Zr、Hf 在俯冲板片析出流体中相对于板片熔体具有更低的溶解度,而 Nd 和 Sm 在流体中具有更高的溶解度,因此,可以用 $(Ta/La)_N - (Hf/Sm)_N$ 来区分弧岩浆来源于流体交代地幔还是熔体交代地幔 (Fleche et al., 1998; Tang Gongjian et al., 2012)。在 $(Ta/La)_N - (Hf/Sm)_N$ 图上 (图 6a),角斑岩主要投影到俯冲流体交代地幔范围内,指示岩浆主要来源于俯冲流体交代地幔的部分熔融,熔体交代作用不明显。Hawkesworth 等 (1997) 证实,Ba 和 U 倾向于富集在俯冲流体中,而 Th 则主要来源于俯冲沉积物,因此,Th/Zr—Ba/Zr 图解能区分俯冲流体和沉积物参与形成岛弧岩浆的差异。在 Th/Zr—Ba/Zr 图上 (图 6b),角斑岩主要表现出与俯冲流体参与岛弧岩

沉积物加入岛弧岩浆较少。角斑岩 La/Sm 值介于 2.23~3.21,小于受壳源物质污染的幔源浆一致的趋势,岩浆 La/Sm 值的最低值 (通常大于 5) (Rudnick et al., 2003),也暗示源区受壳源物质污染的可能性非常小,在 $K_2O/P_2O_5 - SiO_2$ 图 (图 7a) 和 $K_2O/TiO_2 - SiO_2$ 图上 (图 7b),与 SiO_2 的相关性不大,说明其母岩浆在上升过程中受壳源物质污染相对较弱。角斑岩 FeO^T 含量中等,介于 9.17%~11.88%之间,MgO 含量较低,介于 3.25%~5.36%, $Mg^{\#}$ 值介于 43.41~52.14,固结指数 (SI) 介于 15.03~23.59,这些特征反映其原始岩浆在上升至地表过程中经历了相当程度的结晶分异作用。

细碧—角斑岩系是一种富钠的特殊类型火山岩组合,自 19 世纪中期提出这一术语以来,围绕其矿物成分、结构、构造及成因等问题开展了广泛而深入的讨论 (Tomasson et al., 1972; Wadsworth, 1973; Lehmann, 1974; Amstutz., 1975; Bischoff et al., 1975; Mottl et al., 1978, 1979; 夏林圻等, 1979, 1987; Hajash et al., 1980, 1981; 张之孟等, 1981; 邓尔新, 1986; 李增田, 1990; 吕志成等, 2002, 陈志洪等, 2009; 吴杰等, 2014), 但迄今为止,关于细碧—角斑岩的成因问题仍然存在争议,争论的焦点主要集中在钠质物质的来源和钠质斜长石结晶作用上,目前,主要有 4 种认识:

(1) 原始岩浆结晶形成,细碧—角斑岩是由与正常岩浆平行的、幔源富钠岩浆直接结晶形成 (祁岷等, 1986)。

(2) 派生岩浆结晶形成,细碧—角斑岩是由正常岩浆分异出来的富钠富挥发份的派生岩浆结晶而成 (Lehmann, 1974; Amstutz., 1975)。

(3) 混染岩浆结晶形成,幔源玄武岩浆或深熔的壳源中酸性岩浆,在通过很厚的海底沉积物上升时,受到海底循环的围岩热卤水的混染作用,从而使岩浆中的 Na_2O 、 CO_2 、 H_2O^+ 含量增加,并溶滤出 Ca^{2+} 、 K^+ 等离子 (Hajash et al., 1980, 1981)。

(4) 热液交代作用形成,主要是指正常的岩浆受到了岩浆热液、变质热液或海水及热卤水的交代作用 (Tomasson et al., 1972; Wadsworth, 1973;

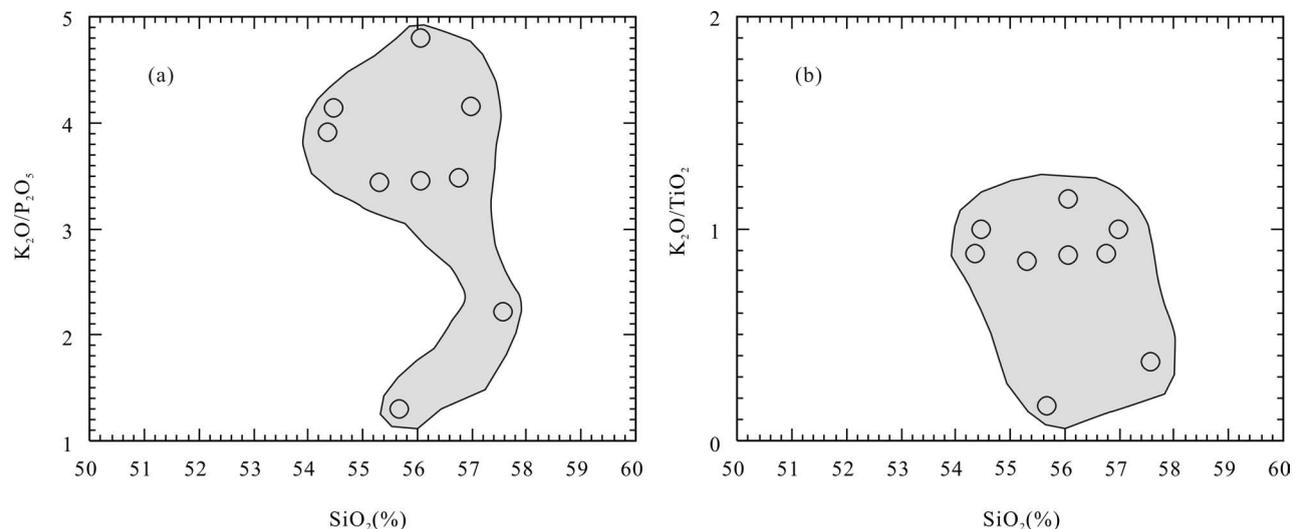


图 7 甘肃省肃南县西水乡大依马龙地区角斑岩 $K_2O/P_2O_5 - SiO_2$ 图 (a) 和

$K_2O/TiO_2 - SiO_2$ 图 (b) (据 Ishizuka et al., 2003)

Fig. 7 $K_2O/P_2O_5 - SiO_2$ diagram (a) and $K_2O/TiO_2 - SiO_2$ diagram (b) (after Ishizuka et al., 2003)

of Keratophyes in the Dayimalong area, Sunan County

Bischoff et al., 1975; Mottl et al., 1978, 1979)。

富钠是细碧—角斑岩的重要特征,因此,开展对细碧—角斑岩中钠长石及更钠长石的研究对于了解其形成机制具有关键作用(夏林析等,1979)。研究表明,晶体的弯曲只能发生在其结晶过程中,不可能是固化成岩后受后期应力作用造成的,另外,变质或后期成因的斜长石一般双晶不发育,即使有变生双晶,也多为简单双晶,相反,在火成岩中,所有的斜长石双晶都极其发育(夏林析等,1987)。研究区的角斑岩中的钠长石主要出现在基质中,自行程度差,边缘不整齐,多呈条状、针柱状,有的呈舒缓的弯曲状且具有波状消光,双晶发育,主要为简单双晶,可见聚片双晶,多以流动似定向或格架状方式排列分布,这从一个侧面也反应出岩浆成因的特点,但岩石中钠长石边缘溶蚀明显,内部蚀变弱,反映出其受到后期变质热液的影响,岩石中蚀变矿物发育,蚀变矿物组合为钠黝帘石、斜黝帘石、绿泥石及 Fe—Mg 析离凝聚物,具有水岩熔体凝结岩石特点。因此,我们推测研究区角斑岩的形成过程为:受俯冲板片流体改造的地幔楔物质发生部分熔融形成母岩浆,在其上升过程中,热的岩浆体系发生了分离结晶作用并受到围岩热卤水的混染,热卤水带来了 Na 和 Si 离子,带走了 Fe 和 Ca 离子,从而形成了富钠的岩浆体系,这种被改造了的岩浆喷出地表冷却结晶形成角斑岩。

5 结论

(1)显微镜下观察表明,角斑岩中的主要造岩矿物为钠长石或钠更长石,蚀变矿物包括钠黝帘石、斜黝帘石、绿泥石,Fe—Mg 析离凝聚物和磁铁矿,具有水岩熔体凝结岩石特点。

(2)角斑岩低硅、富钠,为低钾拉斑系列—中钾钙碱性系列钠质岩石,具有岛弧火山岩地球化学特点,结合其形成时代,我们认为角斑岩可能形成于岛弧环境。

(3)角斑岩的形成过程为:受俯冲板片流体改造的地幔楔物质发生部分熔融形成母岩浆,在其上升过程中,热的岩浆体系发生了分离结晶作用并受到了围岩热卤水的混染,热卤水带来了 Na 和 Si 离子,带走了 Fe 和 Ca 离子,从而形成了富钠的岩浆体系。

致谢:感谢项目组成员在野外工作中的帮助和支持,感谢西安地质调查中心实验测试中心在主微量元素分析测定中的帮助及审稿人的宝贵修改意

见。

参 考 文 献 / References

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

- 林志洪,邢光福,郭坤一,董永观,陈荣,曾勇,李龙明,贺振宇,赵玲. 2009. 浙江平水群角斑岩的成因:锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. 科学通报, 54(5): 610~617.
- 邓尔新. 1986. 浙江省中侏细碧岩类岩石学岩石化学特征及其成因. 地球科学, 11(5): 65~73.
- 杜远生,张哲,周道华,彭冰霞. 2002. 北祁连—河西走廊志留纪和泥盆纪古地理及其同造山过程的沉积响应. 古地理学报, 4(4): 1~8.
- 杜远生,朱杰,韩欣,顾松竹. 2004. 从弧后盆地到前陆盆地——北祁连造山带奥陶纪—泥盆纪的沉积盆地与构造演化. 地质通报, 23(10): 92~98.
- 冯益民,吴汉泉. 1992. 北祁连山及其邻区古生代以来大地构造演化初探. 西北地质科学, 13(2): 61~74.
- 冯益民,何世平. 1996. 祁连山大地构造与造山作用. 北京:地质出版社.
- 冯益民. 1997. 祁连山造山带研究概况——历史、现状及展望. 地球科学进展, 12(4): 307~314.
- 葛肖虹,刘俊来. 1999. 北祁连造山带的形成与背景. 地学前缘, 6(4): 223~230.
- 郭彦汝,王瑾. 2014. 北祁连东大坂黑矿型矿床特征及形成环境. 西北地质, 47(2): 191~197.
- 黄增保,金霞. 2004. 甘肃肃马地区寒武纪构造演化探讨. 西北地质, 37(1): 51~57.
- 李春昱,王荃,张之孟,刘雪亚. 1980. 中国板块构造轮廓. 中国地质科学院院报, 2(1): 11~22.
- 李增田. 1990. 细碧岩成因综述. 地质科技情报, 9(1): 19~24.
- 林宜慧,张立飞,季建清,王乾杰,宋述光. 2010. 北祁连山九个泉硬柱石蓝片岩⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其地质意义. 科学通报, 55(17): 1710~1716.
- 吕志成,段国正,郝立波,李殿超,潘军,董广华. 2002. 大兴安岭中段二叠系大石寨组细碧岩的岩石学地球化学特征及其成因探讨. 岩石学报, 18(2): 212~222.
- 祁岷,周新民,王德滋. 1986. 浙江西裘细碧角斑岩成因与相关幔源花岗岩类特征. 岩石矿物学杂志, 5(4): 299~308.
- 史仁灯,杨经绥,吴才来,Wooden J. 2004. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据. 地质学报, 78(5): 649~657.
- 吴杰,刘家军,王建平,杨隆勃,刘冲昊,王维钰,王立新,余康伟,李志国. 2014. 陕西铔厂沟金矿床中细碧岩的岩石学和元素地球化学特征研究. 矿物岩石地球化学通报, 33(4): 411~420.
- 吴才来,姚尚志,杨经绥,曾令森,陈松永,李海兵,戚学祥,Joseph L W, Frank K M. 2006. 北祁连早古生代双向俯冲的花岗岩证据. 中国地质, 33(6): 1197~1208.
- 吴才来,徐学义,高前明,李向民,雷敏,郜源红, Ronald B F, Joseph L W. 2010. 北祁连早古生代花岗岩岩浆作用及构造演化. 岩石学报, 26(4): 1027~1044.
- 王晓伟,杨春霞,王玉玺,于漫. 2018. 北祁连扎柯山寒武纪高镁安山岩地球化学及构造动力学特征. 西北地质, 51(1): 34~43.
- 夏林析,黄月华. 1979. 从钠质斜长石的结构状态论西北某些细碧—角斑岩系的成因. 地球化学, (1): 3~27.
- 夏林析,夏祖春. 1987. 细碧角斑质火山岩若干问题. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (19): 1~30.
- 夏林析,夏祖春,彭礼贵,任有祥,杨静华,张诚,李智佩,王兴安.

- 1991.北祁连山石灰沟奥陶纪岛弧火山岩系岩浆性质的确定.岩石矿物学杂志,10(1):1~10.
- 夏林圻,夏祖春,任有祥.1992.祁连、秦岭山系海相火山岩.武汉:中国地质大学出版社.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义.1995.北祁连山构造—火山岩浆演化动力学.西北地质科学,16(1):1~28.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义.1996.北祁连山海相火山岩岩石成因.北京:地质出版社.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义.1998.北祁连早古生代洋脊、洋岛和弧后盆地火山作用.地质学报,72(4):301~312.
- 夏林圻,夏祖春,赵江天,徐学义,杨合群,赵东宏.2000.北祁连西段元古宙大陆溢流玄武岩性质的确定.中国科学:D辑,30(1),1~8.
- 夏林圻,夏祖春,任有祥.2001.北祁连山构造—火山岩浆—成矿动力学.北京:中国大地出版社.
- 夏林圻,夏祖春,徐学义.2003.北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩浆成因.中国地质,30(1):48~60.
- 夏林圻,李向民,余吉远,王国强.2016.祁连山新元古代中—晚期至早古生代火山作用与构造演化.中国地质,43(4):1087~1138.
- 夏小洪,宋述光.2010.北祁连山肃南九个泉蛇绿岩形成年龄和构造环境.科学通报,55(15):1465~1473.
- 夏小洪,孙楠,宋述光,肖序常.2012.北祁连西段熬油沟—二只哈拉达坂蛇绿岩的形成环境和时代.北京大学学报(自然科学版),48(5):757~769.
- 徐学义,王洪亮,张二朋,陈隽璐,孙吉明.2008.中祁连东段兴隆山群基性火山岩锆石 U-Pb 定年及岩石成因研究.岩石学报,2008,24(4):827~840.
- 相振群,陆松年,李怀坤,李惠民,宋彪,郑健康.2007.北祁连西段熬油沟辉长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义.地质通报,26(12):1686~1691.
- 朱涛,张二鹏,徐学义,陈隽璐,王洪亮,谢群.2015.西北地区四分框架下的寒武纪岩石地层划分与对比.西北地质,48(3):112~126.
- 左国朝,吴汉泉.1997.北祁连山中段早古生代双向俯冲—碰撞造山模式剖析.地球科学进展,12(4):315~323.
- 张旗,王焰,钱青.2000.北祁连早古生代洋盆是裂陷槽还是大洋盆—与葛肖虹讨论.地质科学,35(1):121~128.
- 张之孟,王忠实,郑裕民.1981.川西南乡城—得荣地区细碧—角斑岩的岩石学特征和构造意义.地质学报,55(3):179~194.
- 张建新,许志琴,陈文,徐惠芬.1997.北祁连中段俯冲—增生杂岩/火山弧的时代探讨.岩石矿物学杂志,16(2):112~119.
- 张招崇,周美付,Paul T,Robinson P T,毛景文,杨建民,左国超.2001.北祁连山西段熬油沟蛇绿岩 SHRIMP 分析结果及其地质意义.岩石学报,17(2):222~226.
- 周志强,曹宣铎,赵江天,胡云绪.1996.祁连山东部早古生代地层和沉积—构造演化.西北地质科学,17(1):1~58.
- Amstutz G C. 1975. Spilites and spilitic rocks. *Clay Minerals*, 40(310): 216~217.
- Bischoff J L and Dickson W E. 1975. Seawater—basalt interaction at 200°C and 500 bars. Implication for origin of sea floor heavy metal deposits and regulation of seawater chemistry. *Earth planet. Sci. Lett.*, 25: 385~397.
- Candies K C. 1989. Geochemical changes in basalts and andesites across the Archean—Proterozoic boundary: Identification and significance. *Lithos*, 23:1~18.
- Chen Zhihong, Xing Guangfu, Guo Kunyi, Dong Yongguan, Chen Rong, Zeng Yong, Li Longming, He Zhenyu, Zhao Lin. 2009#. Petrogenesis of keratophyes in the Pingshui Group, Zhejiang: Constraints from zircon U-Pb ages and Hf isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 54(5):610~617.
- Deng Erxin. 1986#. The petrological and petrochemical characteristics of spilitic rocks and their origin in Zhong Gao, Zhejiang Province. *Earth Science*, 11(5):507~515.
- Du Yuansheng, Zhang Zhe, Zhou Daohua, Peng Bingxia. 2002#. Silurian and Devonian palaeogeography of northern Qilian—Hexi corridor and its sedimentary response to synorogenicogenesis of North Qilian orogenic belt. *Journal of Palaeogeography*, 4(4):1~8.
- Du Yuansheng, Zhu Jie, Han Xin, Gu Songzhu. 2004#. From the back-arc basin to foreland basin—Ordovician—Devonian sedimentary basin and tectonic evolution in the North Qilian orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 23(10):92~98.
- Davidson J P. 1996. Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism. In: *Subduction Top to Bottom*. Geophys., Monogr. 96, American Geophysical Union, Washington DC: 251~262.
- Feng Yimin, Wu Hanquan. 1992#. Tectonic evolution of North Qilian Mountains and its neighbourhood since Paleozoic. *Northwest Geoscience*, 13(2):61~74.
- Feng Yimin, He Shiping. 1996#. Geotectonics and Orogeny of the Qilian Mountains. Beijing: Geological Publishing House.
- Feng Yimin. 1997#. Investigatory summary of the Qilian Orogenic Belt, China: History, presence and prospect. *Advance in Earth Sciences*, 12(4):307~314.
- Fleche M R, Camire G, Jenner G A. 1998. Geochemistry of post-Acadian, Carboniferous continental intraplate basalts from the Maritimes Basin, Magdalen Islands, Quebec, Canada. *Chemical Geology*, 148(3~4):115~136.
- Ge Xiaohong, Liu Junlai. 1999#. Formation and tectonic background of the northern Qilian orogenic belt. *Earth Science Frontiers*, 6(4):223~230.
- Guo Yanru, Wang Jin. 2014#. Characteristics and Forming setting analysis of Gadaban Kuroko type deposit in North Qilian. *Northwestern Geology*, 47(2):191~197.
- Huang Zengbao, Jin Xia. 2004#. Structural evolution of Cambrian tectonic belt in Changma area, Gansu. *Northwestern Geology*, 37(1):51~57.
- Hajash A and Archer P. 1980. Experimental seawater / basalt interaction: effects of cooling. *Contrib. Miner. Petrol.*, 5: 1~13.
- Hajash A and Chandler G W. 1981. An experimental investigation of high-temperature interaction between seawater and rhyolite, andesite, basalt and peridotite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 78: 240~254.
- Hawkesworth C, Turner S, Peate D, et al. 1997. Elemental U and Th variations in island arc rocks; Intention for U-series isotopes. *Chemical Geology*, 139:207~221.
- Ishizuka O, Taylor R N, Milton J A, et al. 2003. Fluidmantle Interaction in an intra-oceanic arc; constraints from highprecision Pb isotopes. *Earth and Planetary Science Letters*, 211(3~4): 221~236.
- Li Zengtian. 1990#. Review on geneses of spilite. *Geological Science and Technology Information*, 9(1):19~24.
- Li Chunyu, Wang Quan, Zhang Zhimeng, Liu Xueya. 1980#. A preliminary study of plate tectonics of China. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 2(1):11~22.
- Lin Yihui, Zhang Lifei, Ji Jianqing, Wang Qianjie, Song Shuguang. 2010#. ⁴⁰Ar/³⁹Ar isochron ages of lawsonite blueschists from Jiuquan in the northern Qilian Mountain, NW China, and their tectonic implications. *Chinese Science Bulletin*, 55(19):2021~

2027

- Lü Zhicheng, Duan Guozheng, Hao Libo, Li Dianchao, Pan Jun, Dong Guanhua. 2002. The petrological and geochemical characteristics and petrogenesis significance of spilite from Lower Permian Dashizai Group in the middle section of Da Hinggan Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 18(2): 212~222.
- Lehmann E. 1974. Spilitic Magma. Characteristics and Mode of Formation. *Spilites and Spilitic Rocks*. Berlin: Springer; 23~38.
- Mottl M J and Holland H D. 1978. Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalt by seawater-I. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42: 1103~1115.
- Mottl M J, Holland H D, Corr R F. 1979. Chemical exchange during hydrothermal alteration of basalt by seawater-II. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43: 869~884.
- Miyashiro A. 1975. Tholeiitic and calc-alkalic series in relation to the behaviors of titanium, vanadium, chromium, and nickel. *Am. Jour. Sci.*, 275(3): 265~277.
- Pearce J A, Peate D W. 1995. Tectonic implications of the Composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth And Planetary Science*, 23: 251~286.
- Qi Qu, Zhou Xinmin, Wang Dezi. 1986. The Origin of the spilite—keratophyre series and the characteristic of the related mantle derived granitic rocks in Xiqiu, Zhejiang. *Acta Petrologica et Mineralogica*. 5(4): 299~308.
- Rudnick R, Gao S. 2003. Composition of the continental crust. *Treatise on Geochemistry*, 3: 1~64.
- Shi Rendeng, Yang Jingsui, Wu Cailai, Wooden J. 2004. Island arc volcanic rocks in the North Qaidam UHP metamorphic belt. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 52~64.
- Song Shuguang, Zhang Lifei, Niu Yaolin, Wei Chunjing, Liou J.G, Shu Guiming. 2007a. Eclogite and carpholite-bearing metasedimentary rocks in the North Qilian suture zone, NW China: Implications for Early Paleozoic cold oceanic subduction and water transport into mantle. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(5): 547~563.
- Song Shuguang, Niu Yaolin, Zhang Lifei, Wei Chunjing, Liou J G, Su Li. 2009a. Tectonic evolution of Early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives. *Journal of Asian Earth Science*, 35(3~4): 334~353.
- Song Shuguang, Niu Yaolin, Su Li, et al. 2013. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China. *Gondwana Research*, 23(4): 1378~1401.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes; In: Saunders A D and Norry M J. eds. *Magma-tism in the ocean basins*. London Geological Society Special Publication.
- Scaillet B, Prouteau G. 2001. Oceanic slab melting and mantle Metasomatism. *Science Progress*, 84(4): 335~354
- Tomasson J and Kristmannsdottir H. 1972. High-temperature alteration minerals and thermal brines. Reykjanes, Iceland. *Contrib. Miner. Petrol.*, 36: 123~134.
- Tang Gongjian, Wyman D A, Wang Qiang, Li Jie, Li Zhengxiang, Zhao Zhenhua. 2012. Asthenosphere—lithosphere interaction triggered by a slab Window during ridge subduction: trace element and Sr—Nd—Hf—Os isotopic evidence from Late Carboniferous tholeiites in the Western Junggar area (NW China). *Earth and Planetary Science Letters*, (329~330): 84~96.
- Winchester J A, Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325~342.
- Wadsworth W J. 1973. Petrology of igneous and metamorphic rocks. *Mineralogical Magazine*, 39(302): 257~258.
- Wu Hanquan, Feng Yimin, Song Shuguang. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implications, North Qilian Mountains, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11(4): 523~536.
- Wu Jie, Liu Jiajun, Wang Jianping, Yang Longbo, Liu Chonghao, Wang Weiyu, Wang Lixin, Yu Kangwei, Li Zhiguo. 2014. Petrological and geochemical characteristics of the spilite in the Huachanggou Gold deposit in the Shaanxi Province. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(4): 411~420.
- Wu Cailai, Yao Shangzhi, Yang Jingsui, Zeng Lingsen, Chen Songyong, Li Haibing, Qi Xuexiang, Joseph L W, Frank K M. 2006. Double subduction of the Early Paleozoic North Qilian oceanic plate: evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China. *Geology in China*, 33(6): 1197~1208.
- Wu Cailai, Xu Xueyi, Gao Qianming, Li Xiangming, Leimin, Gao Yuanhong, Ronald B F, Joseph L W. 2010. Early Palaeozoic granitoid magmatism and tectonic evolution in North Qilian, NW China. *Acta Petrol. Sinica*, 26: 1027~1044.
- Wang Xiaowei, Yang Chunxia, Wang Yuxi, Yu Man. 2018. Geochemistry of cambrian high-Mg andesites in North Qilian and its geodynamic implication. *Northwestern Geology*, 51(1): 34~43.
- Xia Linqi, Huang Yuehua. 1979. Genesis of some spilite—keratophyre suites in northwestern China as illustrated by the structural state of soda plagioclases. *Geochimica*, (1): 3~27.
- Xia Linqi, Xia Zuchun. 1987. Some problems of spilite—keratophyre. *Bulletin of Xi' an Institute of Geology and Mineral Resource*, (19): 1~30.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Peng Ligui, Ren Youxiang, Yang Jinghua, Zhang Cheng, Li Zhipei, Wang Xinan. 1991. Determination of nature of Ordovician island-arc volcanic series at Shihuigou area from Northern Qilian Mountains. *Acta Petrol. Mineral.*, 10(1): 1~10.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang. 1992. Marine Volcanic Rocks from Qilian and Qinling Mountains. Wuhan: China University of Geosciences Press.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 1995. Dynamics of tectono—volcanomagmatic evolution from North Qilian Mountains, China. *Northwest Geoscience*, 16(1): 1~28.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 1996. Petrogenesis of Marine Volcanic Rocks from Northern Qilian Mountains. Beijing: Geological Publishing House.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 1998. Early Palaeozoic mid-ocean ridge ocean island and back-arc basin volcanism in the North Qilian Mountains. *Acta Geologica Sinica*, 72(4): 301~312.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Zhao Jiangtian, Xu Xueyi, Yang Hequn, Zhao Donghong. 2000. The determination of the nature of Proterozoic continental flood basalts in Northwest Qilian. *Science in China (Series D)*, 30(1): 1~8.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, et al. 2001. Tectonics—Volcanic Magmatism—Mineralization Dynamics of North Qilian Mountains. Beijing: China Land Press.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 2003. Magmagenesis in the Ordovician back-arc basins of the northern Qilian Mountain, China. *Geological Society of America Bulletin*, 115(12): 1510~1522.
- Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. 2003. Magmagenesis of Ordovician backarc basins in the northern Qilian Mountains. *Geology in China*,

30(1):48~60.

- Xia Linqi, Li Xiangmin, Yu Jiyuan, Wang Guoqiang. 2016. Mid—Late Neoproterozoic to Early Paleozoic volcanism and tectonic evolution of the Qilian Mountain. *Geology in China*, 43(4): 1087~1138.
- Xia Xiaohong and Song Shuguang. 2010. Forming age and tectonogenesis of the Jiugequan ophiolite in the North Qilian Mountain, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 55(18): 1899~1907.
- Xia Xiaohong, Sun Nan, Song Shuguang, Xiao Xuchang. 2012. Age and tectonic setting of the Aoyougou—Erzhihaladaban ophiolite in the western North Qilian Mountains, NW China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(5): 757~769.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Yong Yong, Yan Zhen, Yuan Chao, Liu Chuanzhou, Li Jiliang. 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China. *Asian Earth Science*, 35(3~4): 323~333.
- Xiang Zhenqun, Lu Songnian, Li Huaikun, Li Huimin, Song Biao, Zheng Jiankang. 2007. SHRIMP U-Pb zircon age of gabbro in Aoyougou in the western segment of the North Qilian Mountains, China and its geological implications. *Geol. Bull. China*, 26: 1686~1691.
- Xu Xueyi, Wang Hongliang, Zhang Erpeng, Chen Junlu, Sun Jiming. 2008. Zircon U-Pb dating and petrogenesis of Xinglongshan Group basic volcanic rocks at eastern segment of Middle Qilian Mts. *Acta Petrol. Sinica*, 24(4): 827~840.
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Chen Wen, Xu Huifen. 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction accretionary Complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain. *Acta*

- Petrologica et Mineralogica*, 16(2): 112~119.
- Zhang Jianxin, Meng Fancong, Wan Yusheng. 2007. A cold Early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: petrological and U-Pb geochronological constraints. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(3): 285~304.
- Zhang Zhaochong, Zhou Meifu, Robinson P T, Mao Jingwen, Yang Jianmin, Zuo Guochao. 2001. SHRIMP dating of the Aoyougou ophiolite in the west sector of the North Qilian Mountains and its geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 222~226.
- Zhang Zhimeng, Wang Zhongshi, Zheng Yumin. 1981. Petrographic characteristics and tectonic significance of the spilite—keratophyreic rocks in the Xiangcheng Derong area of south-western Sichuan. *Acta Geologica Sinica*, 55(3): 179~194.
- Zhang Qi, Wang Yan, Qian Qing. 2000. The North Qilian ocean basin of the Early Paleozoic age anaulacogen or a large oceanic basin: A discussion with Ge Xiaohong. *Scientia Geologica*, 35(1): 121~128.
- Zuo Guochao, Wu Hanquan. 1997. A bisubduction—collision orogenic model of early-Paleozoic in the middle part of North Qilian area. *Advance in Earth Science*, 12(4): 315~323.
- Zhu Tao, Zhang Erpeng, Xu Xueyi, Chen Junlu, Wang Hongliang, Xie Qun. 2015. Cambrian Lithostratigraphy division and comparison in northwest China under the time scale with four series. *Northwestern Geology*, 48(3): 112~126.
- Zhou Zhiqiang, Cao Xuanduo, Zhao Jiangtian, Hu Yunxu. 1996. Early Palaeozoic stratigraphy and sedimentary—tectonic evolution in eastern Qilian Mountains, China. *Northwest Geosciences*, 17(1): 1~58.

The Petrogenesis and Tectonic Setting of the Keratophyre in the Dayimalong Area of the Northern Qilian Orogenic Belt

BU Tao^{1,2)}, WANG Guoqiang^{1,2)}, TANG Zhuo^{1,2)}, ZHU Tao^{1,2)}, LUO Gengen^{1,2)}, JI Bo^{1,2)}

1) *Research Center for Orogenic Geology, Xi'an Center of Geological Survey, Xi'an, 710054;*

2) *MNR Key Laboratory for the Study of Focused Magmatism and Giant Ore Deposits,*

Xi'an Center of Geological Survey, Xi'an, 710054

Abstract: This paper reports whole rock major and trace element from Keratophyre in the Dayimalong area of the North Qilian orogenic belt. The SiO₂ of Keratophyre is between 52.51%~55.46%, The Na₂O content is high, ranging from 4.79% to 6.86%, The K₂O content is low, ranging from 0.16% to 0.93%. The Na₂O/K₂O ratio is 5.16~37.19, With low potassium pull spot series — medium potassium and calcium alkaline series of sodium rock characteristics. The rock consolidation index (*SI*) is between 15.03 and 23.59, and the Mg[#] value is between 39.9 and 52.14. On the rare earth element distribution map standardized by chondrite, the right-inclined type of light rare earth is slightly enriched, and there is almost no or slight Eu anomaly. The δEu is between 0.86 and 1.30 with an average of 0.98. On the trace elements of the original mantle standardized, the high-field strength elements such as Nb, Ta, Zr, Ti, and P are generally depleted, Y content ranging from 15.6×10⁻⁶ to 21.8×10⁻⁶, with an average of 18.77×10⁻⁶, both less than 20. The Th/Yb ratio is 0.59~1.38, with an average of 0.77, both of which are greater than 0.6. The Ce/Pb ratio is 4.31~7.79, the Nb/La ratio is 0.28~0.49, and the Zr/Nb ratio is 14.73~30.08, all indicating that it is an island arc volcanic rock. Combined with the regional geological background, we believe that the Keratophyre is formed in the island arc environment, Its formation mechanism is:

The mantle wedge material modified by the subduction plate fluid partially melts to form the parent magma. During the magma rise, The hot magma system undergoes separation and crystallization and is contaminated by the surrounding rock thermal brine. The hot brine brings Na and Si ions, and takes away Fe and Ca ions, thus forming a sodium-rich magma system.

Keywords: keratophye; geochemistry; rock genesis; tectonic setting; North Qilian; Gansu

Acknowledgements: This study was financially supported by China Geological Survey (No. DD20160012). We would like to express our thanks to the Project team members and reviewers.

First author: BU Tao, male, born in 1986, engineer, mainly engaged in research on magmatic rock petrology and rock geochemistry. Email: cugbutao@163.com

Manuscript received on: 2018-08-19; Accepted on: 2018-12-19; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.01.005

2017年度中国与地质学有关主要中文学术期刊影响因子和总被引频次

刊名	核心被引频次	影响因子	刊名	核心被引频次	影响因子	刊名	核心被引频次	影响因子
煤炭学报	9119	4.080	湖泊科学	2116	1.204	矿物岩石地球化学通报	1171	0.794
地理学报	9392	3.711	沉积学报	3451	1.202	中国海上油气	1073	0.774
石油学报	5799	3.695	冰川冻土	3130	1.201	矿冶工程	1118	0.755
石油勘探与开发	4890	3.468	地质与勘探	1886	1.201	热带地理	904	0.744
地理研究	6460	3.268	古地学报	1420	1.176	硅酸盐学报	2538	0.742
中国稀土学报	4116	2.524	中国科学(地球科学)	4861	1.156	水资源保护	857	0.734
地理科学	5306	2.448	岩土工程学报	6313	1.143	高校地质学报	1612	0.730
地质论评	3285	2.354	矿床地质	2566	1.101	地质通报	3677	0.708
地质学报	6162	2.253	中国石油大学学报(自)	2215	1.078	水文地质工程地质	1598	0.693
地学前缘	4952	2.253	地球科学与环境学报	776	1.072	海洋与湖沼	2057	0.686
石油与天然气地质	3261	2.243	断块油气田	1347	1.062	山地学报	1277	0.681
石油实验地质	2092	2.177	中国地质	2632	1.061	世界地质	791	0.679
油气地质与采收率	1675	2.008	地球信息科学学报	1389	1.059	地球物理学进展	2981	0.675
自然资源学报	5162	1.994	吉林大学学报	2359	1.050	中国地质灾害与防治学报	766	0.675
第四纪研究	2817	1.972	(地球科学版)			岩石矿物学杂志	1298	0.673
环境科学	11228	1.958	钻井液与完井液	1100	1.039	地球与环境	1077	0.668
地球科学	3144	1.890	石油钻采工艺	1509	1.019	煤田地质与勘探	1323	0.666
天然气工业	4876	1.812	灾害学	1202	1.012	工程地质学报	1598	0.663
岩石力学与工程学报	11015	1.811	干旱区研究	2112	1.006	自然灾害学报	1918	0.652
地球物理学报	8142	1.609	现代地质	2133	1.000	新疆石油地质	1494	0.650
干旱区地理	2327	1.578	系统工程学报	1099	0.994	地震工程学报	832	0.648
中国矿业大学学报	2990	1.508	稀有金属	1454	0.989	海洋通报	1064	0.646
特种油气藏	1681	1.505	中国岩溶	1074	0.988	地质科技情报	1615	0.634
石油地球物理勘探	2068	1.497	中国有色金属学报	4253	0.976	矿物岩石	915	0.628
地球科学进展	3628	1.464	遥感技术与应用	1392	0.960	成都理工大学学报(自)	1167	0.626
湿地科学	1247	1.460	国土资源遥感	1098	0.954	Journal of Earth Science	462	0.624
岩石学报	9034	1.459	地层学杂志	734	0.941	地震学报	1306	0.613
天然气地球科学	2929	1.398	地震地质	1497	0.915	南京大学学报(自)	828	0.609
地球学报	2143	1.376	海洋学报	2031	0.909	兰州大学学报(自)	1016	0.600
岩土力学	8932	1.348	科学通报	7019	0.877	浙江大学学报(理学版)	22445	0.595
石油钻探技术	1363	1.338	稀土	986	0.876	矿物学报	1000	0.591
中国沙漠	3656	1.331	岩矿测试	1183	0.848	矿业研究与开发	939	0.591
遥感学报	2063	1.330	油气储运	1631	0.840	地质科学	1521	0.585
石油物探	1356	1.312	大地构造与成矿学	1369	0.817	海洋科学	1882	0.582
东北石油大学学报	918	1.304	地球化学	1921	0.814			