

祁连山西段古元古代北大河岩群中斜长角闪岩的地球化学特征及构造背景

付国民¹ 苏建平² 胡能高¹ 王云斌¹

(1. 长安大学地球科学与国土资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:以大陆碎块形式残存于北祁连造山带内部的古元古代北大河岩群早期发育有大量的斜长角闪岩, 其原岩为玄武岩, Alk— Σ FeO—MgO 图解、REE 特征、里特曼组合指数等均显示斜长角闪岩属钙碱性系列范围, 个别显示弱碱性, 斜长角闪岩具有较高的 Al_2O_3 、 Σ FeO 和低的 $Mg^\#$, 这些特点反映其成分演化程度较高, 表明火山岩的形成与古老地壳的活化有关, 有较强分异的稀土元素分配模式, 在 Ti—Zr—Y 图、Ni—FeO/MgO 图解和 Ta/Yb—Th/Yb 图解上斜长角闪岩均显示火山弧或活动大陆边缘的特点, 在玄武岩的地球化学形式图、稀土元素整体特征与钙碱性岛弧玄武岩基本相同; $^{87}Sr/^{86}Sr=0.71617\sim 0.72033$, $^{143}Nd/^{144}Nd=0.512414\sim 0.512495$, $\epsilon_{Nd}=-2.79\sim -4.37$ 。显示出壳源性质或者是受到大陆下地壳的混染作用而形成。因此推测斜长角闪岩的原岩为不同程度部分熔融的岩浆弧作用的产物, 说明在古元古代华北克拉通和柴达木克拉通之间存在古洋盆的俯冲消减。

关键词:斜长角闪岩; 地球化学; 构造背景; 北大河岩群; 古元古代; 祁连山西段

中图分类号: P588.12⁺⁵, P597⁺³ **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2005)04-0541-07

位于秦祁昆巨型造山带中段的祁连造山带由于在中国西北大地构造中所处的关键位置和丰富而典型地质构造演化, 多年来一直成为中外地质学家关注的焦点之一^[1-9], 出露于祁连造山带西段的古元古代北大河岩群以 3 条宽窄不一的微陆块形式残存于北祁连造山带内部, 其中北带西起鱼儿红以东, 经石油河至祁连山主峰北麓一带分布, 该微陆块长达 160 km, 宽约 14 km。中带西起石油河脑至吊大坂一带分布, 长达 60 km, 最宽处为 10 km, 呈菱形短轴状。南带西起香毛山南柳沟峡经黑达坂至二指哈拉达坂一带分布, 东西向长达 160 km。另外, 在野马滩一带, 北大河岩群呈大小不一的块体残存于中祁连隆起带(图 1), 该岩群研究程度较低。笔者试图通过对该岩群中重要组分斜长角闪岩的地质和地球化学特征的研究, 探讨原岩形成时的大地构造背景。

1 地质特征

北大河岩群变质岩系属低角闪岩相和高绿片岩相变质岩系, 原岩是数千米厚的砂泥质韵律互层沉积, 伴有玄武岩喷发, 最终被碳酸盐岩代替。1:20 万区域地质调查将其划分为 4 个岩

组, 笔者在该区进行 1:25 万区域地质调查时根据岩石组合及变质特点将其重新划分为 3 个岩组, 自下而上分别为 A 岩组: 以斜长角闪岩、斜长角闪片岩和片麻岩为主, 夹有石英片岩、大理岩、石英岩等, 原岩为基性火山岩—碎屑岩建造; B 岩组: 以各类片岩为主, 夹片麻岩、大理岩、石英岩、变粒岩、二云片岩、角闪片岩等, 原岩为碎屑岩或粘土岩—火山岩建造; C 岩组: 以大理岩为主, 夹云母片岩、石英片岩、石英岩、片麻岩等, 原岩为碳酸盐岩—复理石建造。从变质岩的原岩建造来看, 3 个岩组的建造演化是火山岩—碎屑岩—碳酸盐岩, 显示一个完整的构造演化旋回。张招崇等^[6]在吊大坂北侧北大河岩群斜长角闪岩、石英阳起石岩、斜长黑云母片岩中获得 Sm—Nd 同位素模式年龄为 1907~2675 Ma, 平均 2120.5 Ma, 获得等时线年龄为 (1980 ± 0.27) Ma, 反映出北大河岩群火山岩形成于古元古代。各个岩组的岩石矿物定向, 流变及透入性面理发育, 说明是从地壳深处(可能为原造山带的根部)折返至地表, 冯益民等^[2]认为北大河岩群呈外来移置地体滑覆在下古生界之上, 左国朝等^[7]认为北大河岩群是造山带中原地有根的地体, 通过大量的野外调查研究认为后者的可能性较大。

收稿日期: 2005-01-17; 改回日期: 2005-06-20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(90102003)和祁连西段 1:25 万区域遥感调查项目(DK0002019)资助。

作者简介: 付国民, 男, 1968 生, 博士, 副教授, 主要从事构造地球化学、沉积盆地分析; E-mail: guominfu2000@163.com。

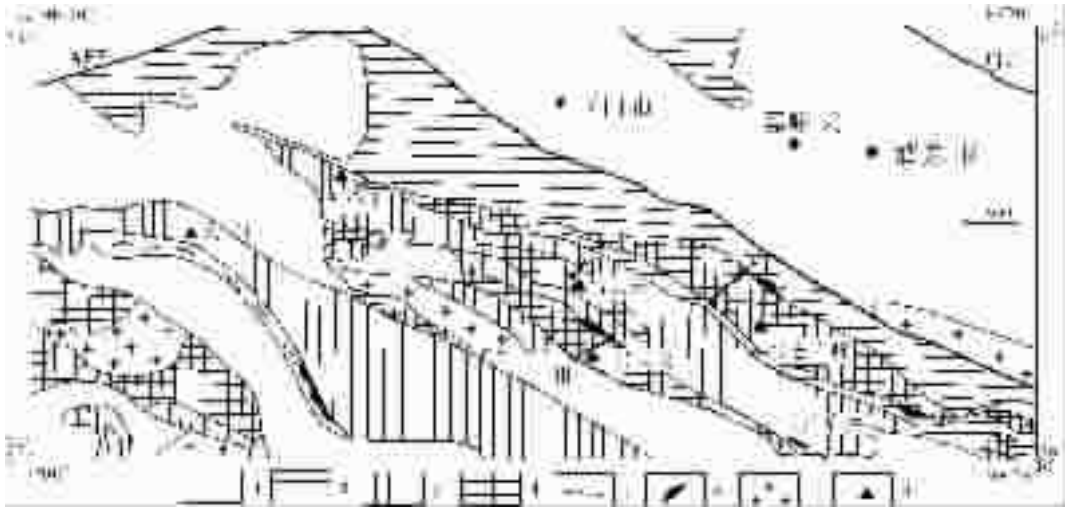


图1 祁连山西段北大河岩群分布及剖面位置略图(据 1:5 万昌马幅、酒泉幅区域地质调查报告改编)

1—上古生界-新生界;2—下古生界;3—中—新元古界;4—古元古代北大河岩群;5—龚岔口构造带;6—变橄辉岩;7—花岗岩;8—山峰;
I—北大河剖面;II—吊大坂剖面;III—黑大坂剖面;JTF—金塔南断裂;AEF—阿尔金断裂

Fig.1 Distribution of the Beidahe Group-complex and section location in the western segment of the Qilian Mountains (modified from the Regional Report of the 1:250 000 Changma Sheet and Jiuquan Sheet)

1—Upper Paleozoic-Cenozoic;2—Lower Paleozoic;3—Meso- and Neoproterozoic;4—Paleoproterozoic Beidahe Group-complex;5— Gongchakou tectonic belt;6— Metaperidotite;7—Granite;8—Mountain; I — Beidahe section, II — Diaodaban section, III — Heidaban section;JTF—Jinta South fault; AEF—Altyn Tagh fault.

2 地球化学特征

北大河岩群中的基性变质岩主要有角闪岩类、斜长角闪岩类、斜长角闪片岩类等(本文统称为斜长角闪岩),主要分布在A岩组,B岩组次之,C岩组比较少见。斜长角闪岩在野外多呈似层状产出,多数岩石在剖面上与其他岩石有明显边界,其矿物组成中以斜长石、角闪石为主,多数具基性变质岩的矿物组成特点。由于变形较强,变质程度较高,原岩的结构保存较少,仅在部分斜长角闪岩中见变余含长结构,有部分岩石的角闪石含量较高,为角闪岩和角闪片岩,原岩的基性程度较高。副矿物中磷灰石、榍石较多,也为基性火成岩的特点,故测区内多数斜长角闪岩和斜长角闪片岩的原岩为正变质基性岩。斜长角闪岩的主量元素、微量元素和稀土元素的分析结果见表1。

2.1 主量元素

从表1可以看出,SiO₂含量为46.9%~51.09%,均属基性岩的成分范围,部分靠近超基性岩。TiO₂含量为0.77%~2.65%,变化幅度大,多数为1%~2%,与高铝玄武岩及细碧岩的平均含量较接近。Al₂O₃含量为13.09%~16.62%,平均为15.16%,比高铝玄武岩的Al₂O₃略低,与细碧岩的平均值相近。Fe₂O₃含量为2.46%~9.32%,但多数含量在5%以下,个别较高的可能与成岩后氧化有关。FeO含量为2.35%~15.029%,变

化幅度很大,Fe₂O₃含量较高者FeO含量则较低,反之亦然,故FeO含量的变化幅度较小。总体上FeO含量较高,与高铝玄武岩较相似。MgO含量为3.5%~8.76%,多数在6%左右。CaO含量为7.78%~9.53%。Na₂O含量为1.46%~5.41%,平均为2.58%。K₂O含量在0.44%~1.92%,平均为0.83%,钾钠的平均成分与细碧岩、高铝玄武岩较接近。在尼格里图解上,均落在火成岩区内,但在Leake^[6]的mg—c变异图(图2)上与卡鲁粗玄岩趋势有较好的一致性,显示火成岩的成分特征。在TiO₂—MnO图解上^[4](图3),样品均落入正斜长角闪岩区,在Alk—∑FeO—MgO图解上,多数点落在钙碱性系列火山岩范围,里特曼组合指数σ(1.13~4.23)均不高,绝大部分在2.0以下,平均为1.99,大多属钙碱性系列范围,个别显示弱碱性;其Mg[#]值[Mg/(Mg+Fe)]为0.16~0.58,低于原始岩浆镁值(Mg[#]=0.68~0.75),说明岩浆为非原始岩浆,可能是因分异作用或同化混染了陆壳花岗岩岩浆作用而导致岩浆中Mg[#]的降低;斜长角闪岩的m/f多为0.08~0.62,大部分显示为铁质基性岩,少部分显示为富铁质基性岩。总的来看,斜长角闪岩的主成分显示正变质岩的特点,均为基性岩,成分特征与高铝玄武岩及细碧岩较接近。

2.2 微量元素

微量元素地球化学特征是分析岩石成因进而判断其形成构造背景的重要参数,从表1看出,Rb、Sr、Ba分别变化较

表 1 斜长角闪岩的主元素 (%)与稀土和微量元素成分 ($\mu\text{g/g}$)Table 1 Major(%) and trace element($\mu\text{g/g}$) compositions of the amphibolites from Baidahe Group

样号	X-3	X-5	X-7	X-8	X-9	X-10	X-13
标本号	B65	B68	B346	B349	B352	B361	B369
岩性	石榴斜长角闪岩	石榴斜长角闪岩	绿帘斜长角闪岩	角闪岩	黑云斜长角闪岩	石榴斜长角闪岩	白云母斜长角闪岩
SiO ₂	48.30	49.53	51.09	50.96	50.65	48.51	46.91
TiO ₂	1.62	1.94	0.77	1.06	1.01	2.65	1.31
Al ₂ O ₃	14.87	15.08	16.62	14.97	13.09	15.18	16.41
Fe ₂ O ₃	2.73	2.46	6.57	9.32	4.43	3.95	3.43
FeO	12.16	11.74	3.51	2.32	4.93	15.02	7.88
MnO	0.12	0.24	0.13	0.2	0.14	0.24	0.19
MgO	6.58	6.48	3.35	7.46	5.99	2.02	8.76
CaO	9.19	9.02	9.30	8.97	8.72	7.78	9.53
Na ₂ O	1.46	2.06	5.41	2.45	3.07	2.25	1.35
K ₂ O	1.03	0.66	0.44	0.80	1.10	0.87	1.92
P ₂ O ₅	0.12	0.16	0.06	0.09	0.07	0.24	0.10
H ₂ O ⁺	1.31	1.18	0.58	1.23	1.18	0.79	1.88
灼失	1.10	0.23	2.44	0.39	5.55	0.47	0.48
Total	100.68	100.80	100.27	100.25	99.94	99.97	100.15
Sc	46.8	55.5	66.7	44.3	40.4	45.6	45.7
V	361	365	303	286	222	685	262
Cr	121	84.4	46.8	115	90.2	21.5	158
Co	50.6	48.9	35.1	42.4	30.5	46.5	55.4
Ni	82.4	77.4	61.9	86.6	50.9	47.3	174
Cu	62	140	333	42.9	68.9	66.2	59.8
Rb	42.6	34.8	21.5	30	64.9	52	103
Sr	140	246	269	188	80.8	108	387
Y	30.6	33	23.4	23.8	27.3	43.5	21.3
Zr	24.8	89.7	51.7	79	106	115	67.7
Nb	9.14	7.9	3.27	4.47	6.34	8.65	6.91
Ba	177	107	82.8	163	132	157	232
Hf	1.07	2.69	1.74	2.48	3.52	3.48	1.85
Ta	0.75	0.57	0.27	0.37	0.65	0.74	0.49
Th	0.31	0.63	2.43	3.06	7.16	4.45	0.898
Sr/Rb	3.29	7.07	12.51	6.27	1.24	2.08	3.76
La	11.2	8.96	7.88	10.6	20.5	16.2	8.41
Ce	29.7	27.9	20.5	29.1	51	42.5	22.4
Pr	4.14	3.14	2.0	2.92	4.8	4.45	2.46
Nd	18.0	17.5	9.99	15.2	22.6	22.4	13.2
Sm	4.61	4.63	2.57	3.88	4.79	5.8	3.38
Eu	1.6	1.41	0.75	0.97	0.98	1.5	1.07
Gd	4.47	3.62	2.23	2.96	3.9	4.5	2.51
Tb	0.87	0.81	0.47	0.6	0.71	0.97	0.47
Dy	5.39	4.64	3.12	3.54	4.26	5.79	2.87
Ho	1.19	1.09	0.8	0.88	1.02	1.4	0.61
Er	3.14	2.67	2.1	2.17	2.55	3.61	1.53
Tm	0.51	0.46	0.38	0.37	0.44	0.64	0.26
Yb	3.45	2.71	2.5	2.3	2.97	3.93	1.61
Lu	0.48	0.44	0.41	0.38	0.51	0.68	0.28
ΣREE	88.76	79.98	55.7	75.87	121.03	114.37	61.09
ΣCe/ΣY	3.55	3.86	3.62	4.75	6.4	6.76	5.01
(La/Yb) _N	2.14	2.18	2.08	3.04	4.55	2.49	3.44
La/Yb	3.25	3.31	3.15	3.15	6.9	4.12	5.22
δEu	1.07	1.02	0.94	0.94	0.68	0.87	1.09

注: 由中国地质大学(武汉)测试中心分析, REE 用等离子光谱法;微量元素用 X 荧光法。

大, 除 Rb 值较高外, Sr、Ba 显示普通玄武岩的含量特征; Ni 含量为 $50.9 \times 10^{-6} \sim 174 \times 10^{-6}$ 、Cr 为 $21.5 \times 10^{-6} \sim 158 \times 10^{-6}$ 、Co 为 $30.5 \times 10^{-6} \sim 55.4 \times 10^{-6}$ 、V 为 $222 \times 10^{-6} \sim 685 \times 10^{-6}$, 其中个别 V 值偏高外, 上述成分均位于玄武岩的成分范围内, 其中 Ni、Cr

总体上偏低。Zr 和 Hf 含量分别为 $24.8 \times 10^{-6} \sim 115 \times 10^{-6}$ 和 $1.07 \times 10^{-6} \sim 3.48 \times 10^{-6}$, Zr/Hf 值为 $23.2 \times 10^{-6} \sim 36.6 \times 10^{-6}$, 与玄武岩的相近。在 Zr—MgO 图上, 均落在正变质斜长角闪岩范围内。在 Ni—FeO/MgO 图解^[9](图 4)和 Ta/Yb—Th/Yb

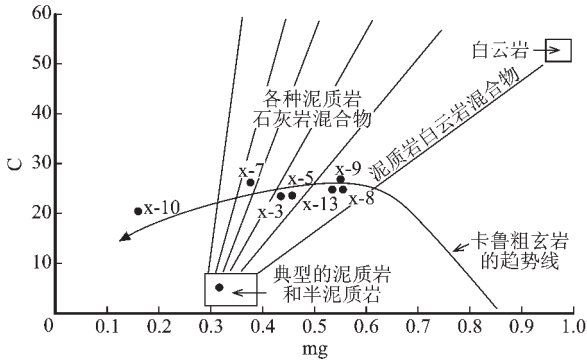


图2 斜长角闪岩的 mg—c 图解(据 Leake,1965)

Fig.2 mg vs. c plot for amphibolites (after Leake, 1965)

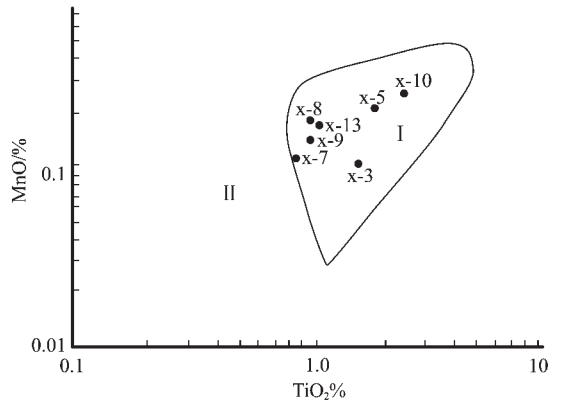


图3 斜长角闪岩的 TiO₂—MnO 图解 (据 Misra, 1973)

I—正斜长角闪岩;II—副斜长角闪岩

Fig. 3 TiO₂ vs. MnO plot for amphibolites (after Misra, 1973)

I—Ortho-amphibolite; II—Para-amphibolite

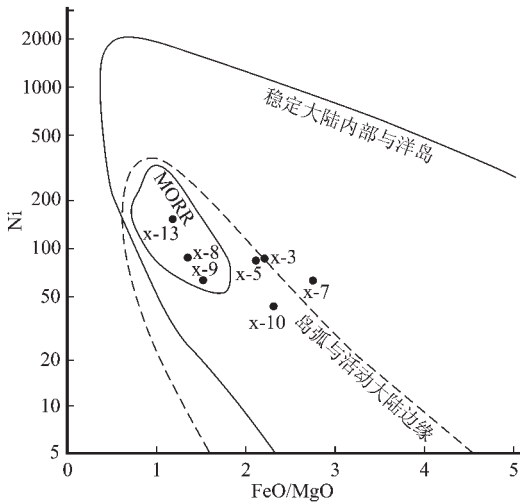


图4 Ni—FeO/MgO 图解 (转引自王仁民等,1987)

Fig.4 Diagram of Ni—FeO/MgO (after Wang Renmin et al.,1987)

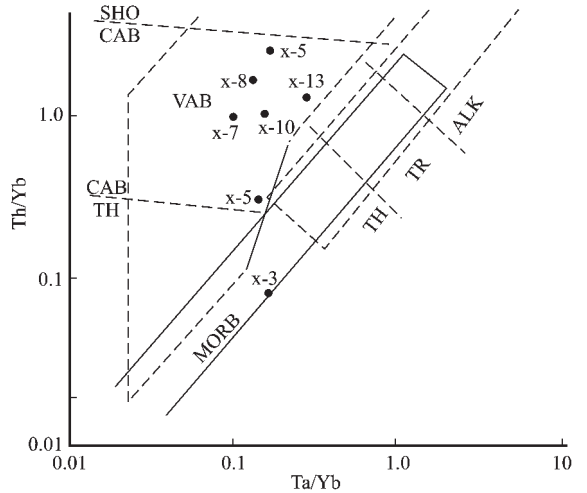


图5 Ta/Yb—Th/Yb 图解(据 Pearce,1982)

MORB—洋脊玄武岩;WPB—板内玄武岩;VAB—岛弧玄武岩; TH—拉斑玄武岩;CA—钙碱性玄武岩;SHO—橄辉玄粗岩; TR—过渡性玄武岩; ALK—碱性玄武岩

Fig.5 Diagram of Ta/Yb—Th/Yb (after Pearce, 1982)

MORB—mid-ocean ridge basalt;WPB—within-plate basalt; VAB—volcanic arc basalt;TH—tholeiite;CA—calc-alkaline basalt; SHO—shoshonite;TR—transitional basalt; ALK—alkaline basalt

图解(图5)上斜长角闪岩显示火山弧或活动大陆边缘的特点,在玄武岩的地球化学形式图上(图6)属火山岛弧类型,与智利钙碱性大陆型的岛弧非常相似。

2.3 稀土元素

稀土元素成分(表1)中,斜长角闪岩 $\sum REE$ 为 $55.7 \times 10^{-6} \sim 121.03 \times 10^{-6}$, $\sum Ce / \sum Y$ 、 $(La/Yb)_N$ 、 La/Yb 均明显大于1,显示轻稀土富集的特点,在稀土元素配分图上,配分曲线明显右倾(图7),同样显示轻稀土富集的特点。从曲线形态上轻稀土部分右倾斜率大,而重稀土部分较平坦,说明轻稀土本身分异明显,而重稀土部分分异弱。 Eu/Eu^* 0.68~1.09,说明Eu异常有正有负,但均不强烈。 Ce/Ce^* 值均大于1,变化在1.01~1.2,均显示正异常。稀土元素的整体特征基本上与钙碱

性岛弧玄武岩相同^[12]。

综上所述,北大河岩群斜长角闪岩在岩相学、副矿物、岩石化学和地球化学等方面均显示正变质特征;斜长角闪岩地球化学特征显示以大陆钙碱性岛弧玄武岩成分为主,部分显示岛弧拉斑玄武岩成分特征。说明岛弧的成熟度较差,陆壳

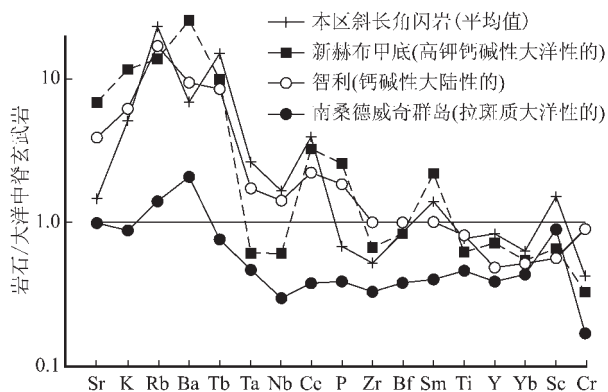


图 6 典型火山(岛)弧玄武岩的地球化学形式对比图
(标准化值据文献[10~11])

Fig.6 Comparison of geochemical forms of typical volcanic (island) arc basalts (normalized values based on references [10] and [11])

不厚,为一过渡性岛弧,与具有大陆基底的成熟岛弧有一定差别^[13]。

2.4 同位素特征

从表 2 可以看出斜长角闪岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 为 0.716 17~0.720 33,远高于球粒陨石储库(0.704528),属壳源型或受

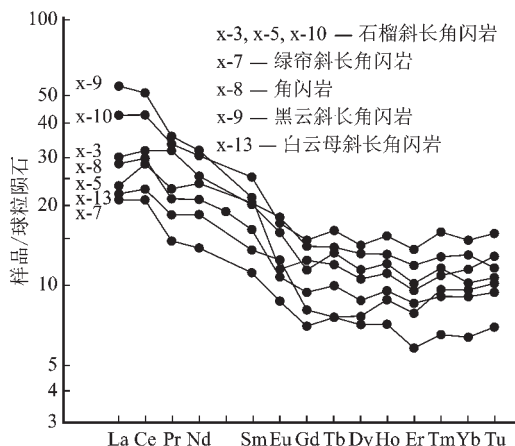


图 7 斜长角闪岩稀土元素配分图

Fig.7 REE distribution patterns for amphibolites

到了地壳的混染, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512\ 414\sim 0.512\ 495$,该值接近于海岛玄武岩的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值(0.512 5~0.513 0),但比值略低,低于球粒陨石储库(0.512 638),可能有地壳混染作用的发生(与 B369 样品的 K_2O 含量较高相对应),而导致 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值降低。 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=-2.79\sim -4.37$,显示出壳源性质或者是受到大陆下地壳的混染作用而形成^[14~16]。

表 2 斜长角闪岩同位素比值

Table 2 Ratios of isotopes for amphibolites

样号	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$\pm\%$	$\text{Sr}\times 10^{-6}$	$\text{Rb}\times 10^{-6}$	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$\epsilon_{\text{Sr}}(2120.5\text{Ma})$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm\%$	$\text{Nd}\times 10^{-6}$	$\text{Sm}\times 10^{-6}$	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(2120.5)$
X-5	0.72033	± 0.00006	144.27	42.98	0.8629	-116.1	0.512414	± 0.000007	17.68	4.53	0.1548	7.1
X-8	0.71617	± 0.00012	167.58	23.93	0.4136	20.4	0.512495	± 0.000006	13.03	3.37	0.1564	8.4

注:样品由中国科学院广州地球化学研究所测试;表中 ϵ_{Sr} 和 ϵ_{Nd} 计算公式同参考文献[12]。

3 大地构造背景分析

从前面的分析不难看出,斜长角闪岩原岩为玄武岩,以高铝钙碱性大陆岛弧玄武岩系列为主,同时尚有少量拉斑玄武岩系列。斜长角闪岩具有较高的 Al_2O_3 、 ΣFeO 、 ϵ_{Sr} 、 $\text{Mg}^\#$ 、 ϵ_{Nd} 值较低,这些特点反映其成分演化程度较高,表明火山岩的形成可能与古老地壳的活化有关,也佐证了这些火山岩形成与大陆环境很难分开,大陆镁铁质火山岩相对于 MORB 的地球化学特点主要是不相容元素发生富集(高的 ϵ_{Sr} 值)和低的 ϵ_{Nd} 值^[17],以及微量、稀土元素的配分形式。斜长角闪岩有较强分异的稀土元素分配模式,富集型 MORB 标准化不相容元素图谱(强烈富集大离子亲石元素,如 Rb、Ba、Th、K,相对亏损的高场元素,如 Ta、Nb、Hf、Zr、P 等,且出现了 Ta、Nb (低谷),以及各种地球化学图解,均显示火山岩形成于火山岛

弧环境。这种地球化学特征的原因可能与早期地壳的特点有关,在古元古代,研究区南北两侧的阿拉善和柴达木地区被大量的晚太古代 TTG 花岗岩侵入而克拉通化^[18~19],但处于它们之间的祁连地区仍处于地壳相对较薄的状态,此时随着地幔热柱的上涌,在本区发育北西向的裂陷槽并形成有限小洋盆,在俯冲消减过程中形成大量岛弧玄武岩的喷溢,来自盆地两侧古陆的大量的泥砂质也堆积于盆地之中,区域上虽然还未见到与之相应的大洋蛇绿岩套,但从岩石化学、地球化学及同位素年龄的角度印证了存在火山岛弧的可能性,古元古代中晚期随着小洋盆的被海盆替代,基性岩浆衰减,最终被碎屑岩和碳酸盐岩代替,这与中国古元古代克拉通边缘的总体构造演化格局是相似的^[19~21]。

在野外调查阶段得到龚全胜、朱伟元和叶德金教授级高级工程师的指导并进行了有益的探讨,在此表示衷心感谢,

参加野外调查的人员还有冯备战、常青、仲新、庞振甲、张海峰、柳煜、朱光儒。

参考文献(References):

- [1] 冯益民. 祁连山造山带研究概况——历史、现状及展望[J]. 地球科学进展, 1997, 12(4): 307~314.
Feng Yimin. Investigatory summary of the Qilian orogenic belt, China: history, presence and prospect [J]. Advance in Earth Sciences, 1997, 12(4): 307~314 (in Chinese with English abstract).
- [2] 冯益民, 何世平. 祁连山大地构造与造山作用[M]. 北京: 地质出版社, 1996. 1~50.
Feng Yimin, He Shiping. Geotectocline and Orogenesis of Qilian Mountain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 1~50. (in Chinese).
- [3] 夏林圻, 夏祖春, 任有祥, 等. 祁连山及邻区火山作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1998. 4~58.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Ren Youxiang, et al. Pyrogenesis and Mineralization in Qilian Mountain and Adjacent Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998. 4~58 (in Chinese).
- [4] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山奥陶纪弧后盆地火山岩浆成因[J]. 中国地质, 2003, 30(1): 48~60.
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi. Magmagenesis of Ordovician back-arc basins in the Northern Qilian Mountains [J]. Geology in China, 2003, 30(1): 48~60 (in Chinese with English abstract).
- [5] 于福生, 王春英, 杜国民. 北祁连山东段新元古代火山岩的年代学证据[J]. 中国地质, 2002, 29(4): 360~363
Yu Fusheng, Wang Chunying, Du Guomin. Chronological evidence of Neoproterozoic volcanic rocks in the eastern segment of the North Qilian Mountains [J]. Geology in China, 2002, 29(4): 360~363 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张招崇, 毛景文, 左国朝, 等. 北祁连山西段早元古代变质火山岩的地球化学特征及其构造背景[J]. 矿物岩石, 1998, 18(4): 22~30.
Zhang Zhaochong, Mao Jingwen, Zuo Guochao, et al. Geochemistry of the Proterozoic Metamorphic volcanic rocks in the west part of north Qilian mountains and their tectonic setting [J]. Mineral and Rock, 1998, 18(4): 22~30 (in Chinese with English abstract).
- [7] 左国朝, 刘义科, 张崇. 北祁连山造山带中—西段陆壳残块群的构造—地层特征[J]. 地质科学, 2002, 37(3): 302~312.
Zuo Guochao, Liu Yike, Zhang chong. Tectono-stratigraphic characteristics of continent crustal remnants in central-western sector of the north qmlan orogren [J]. Chinese Journal of Geology, 2002, 37(3): 302~312 (in Chinese with English abstract).
- [8] B E Leake. The relationship between composition of calciferous amphibole and grade of metamorphism [A]. In: Controls of Metamorphism [C]. 1965, 299~318.
- [9] Misra S N. Chemical distinction of high-grade ortho- and para-metabasites [J]. Norsk Geologisk Tidsskrift, 1971, 51: 311~316.
- [10] 王仁民, 贺高品, 陈珍珍, 等. 变质岩原岩图解判别法[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
Wang Renming, He Gaopin, Chen Zhenzhen, et al. Protolith Graphic Interpretation Discriminant Analysis of Metamorphic Rock [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987 (in Chinese).
- [11] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [A]. In: Thorpe R S (ed.). Andesites; Orogenic Andesites and Related Rocks [C]. 1982, 525~548.
- [12] Wilson M. Igneous Petrogenesis [M]. London: The Academic Division of Unwin Hyman Ltd, 1989.
- [13] 吴福元, 江博明, 林强. 中国北方造山带造山后花岗岩的同位素特点与地壳生长意义[J]. 科学通报, 1997, 42(20): 2188~2192.
Wu Fuyuan, Jiang Boming, Lin Qiang. The Nd isotopic constraints on the crustal growth in northern China Orogenic Belt [J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(20): 2188~2192 (in Chinese).
- [14] Zartman R E, et al. Plumbotectonics—the model [J]. Tectonophysics, 1981, 75: 135~162.
- [15] Depaolo D J. Neodymium isotope geochemistry [M]. New York: Springer, 1988, 183.
- [16] 福尔 G. 同位素地质学原理 [M]. 潘曙兰等译. 北京: 科学出版社, 1986. 156~180.
Faure G. Principles of Isotope Gology [M]. Translated by Pan Shulan. Beijing: Science Press, 1986. 156~180.
- [17] Morris J D, Hart S R. Isotopic and incompatible element constraints on the genesis of island arc volcanics from Cold Bay and Amark Island, Aleutians, and implication for structure [J]. Geochem. Cosmochim. Acta. 1983, 47: 2015~2035.
- [18] Condie K C. Geochemical characteristics of Precambrian basaltic greenstones [A]. In: Hall R P, Hughes D J (eds.). Early Precambrian Basic Magmatism [C]. Blackie, 1990, 40~55.
- [19] Jahn B M, Zhang Z Q. Archean granulite gneisses from eastern Hebei Province, China: rare earth geochemistry and tectonic implications [J]. Contributions to Mineral and Petrology, 1984, 85: 224~243.
- [20] 赵宗溥, 等. 中朝准地台前寒武纪地质演化 [M]. 北京: 科学出版社, 1993, 444.
Zhao Zongfu et al. Precapplatform Geology Evolution in China—Korea Metaplatform [M]. Beijing: Science Press, 1993. 444 (in Chinese).
- [21] 程裕淇. 中国的变质岩系、变质带及变质作用演化 [A]. 见程裕淇主编: 中国区域地质概论 [C]. 北京: 地质出版社, 1994. 432~447.
Cheng Yuqi. Metamorphic series, metamorphic belts and metamorphic processes of China [A]. In: Chen Yuqi (ed.). An Introduction to the Regional Geology of China [C]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. 432~447 (in Chinese with English abstract).

Geochemistry and tectonic setting of amphibolites in the Paleoproterozoic Beidahe Group-complex in the western segment of the Qilian Mountains

FU Guo-min¹, SU Jian-ping², HU Neng-gao¹, WANG Yun-bin¹

(1. *Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;*

2. *Institute of Geological Survey, Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China*)

Abstract: The Paleoproterozoic Beidahe Group-complex remains as continental shivers in the interior of the North Qilian orogen. In its early stage of development, there occurred abundant amphibolite. The protolith of the amphibolite is basalts. The Alk- Σ FeO-MgO plot, REE features and Rittmann index show that the protolith belongs to the calc-alkaline suite and exceptionally shows the subalkaline character. The rock is characterized by higher Al₂O₃ and Σ FeO and lower Mg[#], indicating that it has a higher degree of compositional evolution and that the formation of volcanic rocks is related to activation of older crust. Highly fractionated REE patterns and amphibolite on the Ti-Zr-Y plot, Ni-FeO/MgO plot and Ta/Yb-Th/Yb plot all indicate the characteristics of volcanic arcs and active continental margins. On the geochemical diagram of basalt, the overall REE features are in the main analogous to those of calc-alkaline island-arc basalt, with Sr⁸⁷/Sr⁸⁶=0.71617 - 0.72033, Nd¹⁴³/Nd¹⁴⁴=0.512414 - 0.512495 and ϵ_{Nd} = - 2.79 to - 4.37, ϵ_{Sr} =245.78 - 305.3, showing that the magma was derived from the crust or subjected to contamination with the lower crust below the continent. So it may be inferred that the protolith of the amphibolite is the product of different degrees of partial melting of the mantle in a magma arc. This suggests that subduction of a paleo-ocean basin occurred between the Paleoproterozoic North China craton and Qaidam craton.

Key words: amphibolite; geochemistry; tectonic setting; Beidahe Group-complex; Paleoproterozoic; western Qilian Mountains

About the first author: FU Guo-min, born in 1968, doctor and associated professor, major interests are in tectonogeochemistry and sedimentary basin analysis; E-mail: Guominfu2000@163.com.