

北祁连山西段早奥陶世 阴沟群火山岩的构造背景*

张招崇

毛景文 杨建民

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037) (中国地质科学院矿床地质研究所, 北京 100037)

吴茂炳 左国朝

(甘肃省地质矿产局地质科学研究所, 兰州 730000)

主题词 阴沟群 火山岩 地质-地球化学 构造环境 北祁连山

提 要 早奥陶世阴沟群火山岩的地质-地球化学特征的研究结果表明, 该期火山岩的岩石组合为玄武岩-安山岩组合, 缺乏酸性火山岩和橄榄玄粗岩系列火山岩。其地球化学特征表明它们属于岛弧钙碱性火山岩, 以富集 LREE 和低离子位不相容元素以及亏损高场强元素为特征。火山岩形成于具有中等成熟度的岛弧环境, 其中发育于东水峡的火山岩可能形成于弧内裂谷环境。

北祁连山是我国典型的加里东造山带, 中外地质学家对此已做了大量的地质工作, 但是, 在许多地质问题上还有争论。奥陶纪是本区火山作用最强烈的时期, 其中尤以早奥陶世为甚, 该期火山岩在本区称为阴沟群(以玉门市阴沟地区火山岩剖面命名)。前人曾对该群火山岩做过一定的地质-地球化学工作, 但一般局限于某一小区域或岩石化学研究。夏林圻等(1996)认为, 阴沟群火山岩的构造背景为洋中脊^[1,2]; 左国朝等(1987)则认为是大陆裂谷^[3]。

阴沟群火山岩是北祁连山重要的含铁铜岩系(赋存有火山-沉积型铁矿和热液铜矿), 同时又是本区重要的含金岩系(北祁连山独立岩金矿床-玉门市昌马乡寒山大型金矿即赋存于此岩系中)。因此, 搞清火山岩产出的构造背景, 无论对研究本区的构造演化, 还是对 Fe、Cu、Au 的找矿方向均具有重要意义。本文试图通过对较大区域范围内的阴沟群火山岩的地质-地球化学的研究来揭示其构造背景。

1 地质特征

阴沟群主要分布于走廊南山、托莱山北坡、冷龙岭主脊一带。另外, 在青海省互助北山

* 本文属国家计委国地司科技找矿攻关项目“北祁连山西段镜铁山式铁铜金矿床成矿预测和定位研究”(1995-1997)的部分内容。

本文于1997年元月收到, 1997年6月改回。

的浪石档沟以及天祝一带也有出露。该群与下伏地层一般呈断层接触,仅在青海省祁连县穿刺沟整合覆盖于上寒武统之上,与上覆中奥陶统中堡组为整合接触关系。其延伸方向与区域构造线一致,即 NNW 向,中间为几个前寒武纪构造岩片(早元古代北大河群岩片和中元古代镜铁山群岩片)所截断,以致于阴沟群在地质图上看起来被肢解为几条岩带。从南至北,火山岩岩石组合和岩性有所不同,但沿走向则基本相同。

分布于本区南部托莱山北坡北大河附近的阴沟群火山岩由玄武岩、安山岩、玄武质角砾岩、安山质凝灰岩、凝灰熔岩组成,中间夹有沉积凝灰岩和砂岩。总体上,从早到晚,由基性过渡为中性,并且熔岩和火山碎屑岩呈互层;在镜铁山矿区北部的东水峡地区,早期为火山碎屑岩,中期为熔岩,晚期又变为火山碎屑岩,其岩性均为基性的玄武质岩石。在该区岩相变化剧烈,熔岩流和火山碎屑岩与正常沉积岩迅速过渡。由于后期的陆内造山作用,南部的镜铁山岩片和北部的北大河岩片均逆冲推覆其上,造成玄武岩的枕状构造被挤压变形;位于北部的暗门—阴沟,向西至玉门昌马的寒山金矿一带,火山岩由玄武岩、安山岩和相应的火山碎屑岩组成。暗门剖面火山岩为玄武岩、角砾岩、凝灰岩、晶屑凝灰岩和安山岩组成,中间夹有少量沉积岩。阴沟地区,还保存有明显的火山机构,其火山喷发中心为安山玢岩所充填,通道边部为火山集块岩,再依次变为复成分火山角砾岩、气孔杏仁状玄武岩和安山岩。寒山金矿区的火山岩剖面底部为玄武岩,往上过渡为安山岩,中间夹有凝灰质板岩和砂岩。

需要指出的是,所有阴沟群的火山岩变质程度均很低,火山岩原岩的结构、构造保存完好,只是发生了轻微的蚀变,如绿泥石化、碳酸盐化等,当然,在某些矿区附近也发生了强烈的蚀变(如寒山金矿)。

2 地球化学特征

2.1 主量元素

本区阴沟群火山岩的主量元素分析结果见表 1。从表 1 可以看出,无论是玄武岩还是安山岩, TiO_2 的含量均很低,一般不超过 1%,最高也仅为 1.17%,显示出岛弧火山岩的特征,而有别于大洋中脊和洋岛火山岩(它们的 TiO_2 的含量一般 $>1.3\%$);其 Al_2O_3 的含量一般为 15%—16%,高于一般的大洋火山岩,而小于典型的岛弧钙碱性玄武岩;其 SiO_2 的含量最高为 56.70%,表明岩浆只演化到中性岩浆,而没有分异出酸性岩浆。

火山岩系列对于判别其构造环境具有重要意义,由于阴沟群火山岩时代较老,一些易活动的元素容易发生带入和带出,所以不能用常用的 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 和 A—F—M 图解来判别,必须选取相对惰性的元素。利用 Winchester 等(1977)的 $\text{SiO}_2-\text{Zr}/\text{TiO}_2$ 图解^[4]可以将阴沟群火山岩划分为碱性和非碱性两大类。从图 1 可以看出,东水峡玄武岩位于碱性区,但较靠近非碱性区,它们可能是由于低的 SiO_2 造成的,而低的 SiO_2 则是由于蚀变作用引起的;其它地区的阴沟群火山岩均位于非碱性区。利用 $\Sigma\text{FeO}-\Sigma\text{FeO}/\text{MgO}$ 图解可以将非碱性火山岩进一步划分为拉斑玄武岩和钙碱性玄武岩两个系列,从图 2 可以看出,本区属非碱性的火山岩均位于图 2 的钙碱性区内,所以由此大致可以判断出,阴沟群火山岩可能为岛弧火山岩。

表 1 阴沟群火山岩主量元素分析结果

Table 1 Analyses of major elements in volcanic rocks of Yingou Group

序号	样号	岩石	采样地点	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	H ₂ O	CO ₂	总和
1	TL-10	玄武岩	托莱河谷	51.78	0.94	15.15	1.91	8.32	0.18	6.94	7.22	3.28	0.60	0.12	3.20	0.57	100.21
2	TL-18	玄武岩	托莱河谷	49.87	1.031	5.28	6.51	4.45	0.16	7.54	3.52	4.31	1.84	0.10	3.84	1.32	99.77
3	YGP-1	玄武岩	暗门	51.05	0.651	5.98	1.78	4.69	0.13	4.31	6.30	6.85	0.32	0.15	3.62	4.72	100.55
4	YGP-12	安山岩	暗门	55.76	1.101	5.50	3.03	3.26	0.09	5.86	5.76	3.88	0.64	0.34	3.46	1.13	99.89
5	YG2-1	安山玢岩	阴沟	56.70	0.56	13.68	1.94	6.05	0.09	6.36	5.52	3.89	0.33	0.13	3.68	0.75	99.68
6	YG2-8	玄武岩	阴沟	50.55	0.661	5.68	3.25	6.48	0.14	6.39	8.50	2.45	1.06	0.13	3.28	0.75	99.32
7	YG2-13	玄武岩	阴沟	45.49	0.671	5.43	4.11	5.33	0.15	6.421	2.45	2.44	0.71	0.17	2.94	3.21	99.52
8	YG2-17	玄武安山岩	阴沟	52.06	0.661	5.75	5.37	3.22	0.13	6.69	5.03	5.62	0.68	0.17	3.70	0.66	99.74
9	YG2-18	玄武岩	阴沟	51.49	0.531	6.12	6.08	2.93	0.12	5.46	8.85	5.17	0.07	0.14	3.18	0.19	100.33
10	DS-2	玄武岩	东水峡	46.01	1.171	3.76	2.22	8.10	0.16	5.681	0.47	4.58	0.28	0.13	3.54	3.40	99.50
11	DS-3	玄武岩	东水峡	41.55	1.011	4.28	3.80	6.84	0.16	6.511	2.64	3.00	0.98	0.16	3.58	4.81	99.32
12	HSP-10	安山岩	寒山	55.38	0.551	4.90	2.99	3.29	0.16	2.03	7.14	1.70	3.95	0.19	2.96	5.38	100.62

分析方法：X 荧光光谱分析；分析者：国家地质实验测试中心谭元媛、宋尔良、陈晓青。

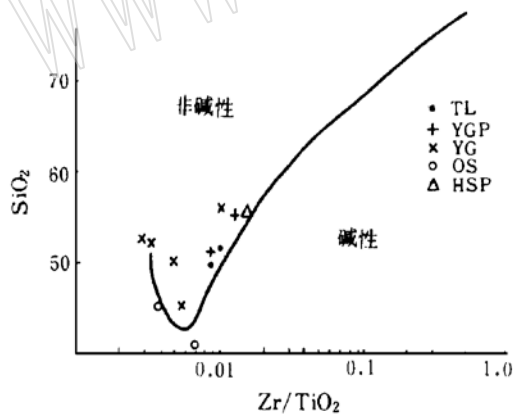


图 1 SiO₂-Zr/TiO₂ 图解

Fig.1 Diagram of SiO₂ versus Zr/TiO₂

(据参考文献[4],图例代号同表 1)

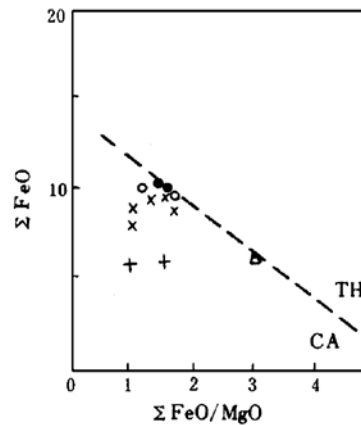


图 2 ΣFeO-ΣFeO/MgO 图解

Fig.2 Diagram of ΣFeO versus ΣFeO/MgO

(据参考文献[5],图例同图 1)

利用图 3 可以进一步判断其构造环境,从图 3 可以看出,阴沟群所有的玄武岩均投影在岛弧拉斑玄武岩和岛弧钙碱性玄武岩范围内,由此表明,阴沟群火山岩可能形成于岛弧环境。

2.2 稀土元素特征

阴沟群火山岩的稀土元素分析结果见表 2, 稀土分配模式见图 4。从表 2 可以看出, 玄武岩的 ΣREE 为 $41.94\text{--}84.92 (\times 10^{-6})$, 安山岩的 ΣREE 为 $71.77\text{--}101.70 (\times 10^{-6})$, 均与岛弧火山岩相应岩石的稀土总量相当^[7]; 玄武岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $3.79\text{--}6.09$, 平均为 5.13 , 相当于 LREE 中等富集型, 安山岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $3.13\text{--}9.26$, 平均为 6.41 , 虽然比玄武岩略高, 但也属于 LREE 中等富集型, 它们均与岛弧钙碱性火山岩的 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值相似, 而与岛弧碱性火山岩(橄榄玄粗岩系列)的 LREE 强富集型明显不同, 这一点与前面所述的火山岩系列划分的结果是一致的; 除少数样品存在正铈异常外, 大多数具负铈异常, 其中玄武岩的 δEu 为 $0.36\text{--}1.04$, 安山岩的 δEu 为 $0.57\text{--}1.17$, 说明发生了一定程度的斜长石分离结晶作用, 但分离结晶程度不是很高, 这一点也说明地壳成熟度不是很高, 岩浆上升速度相对较快, 从而不利于发生大规模的分离结晶作用, 这一点同样可以由阴沟群火山岩不存在酸性火山岩和侵入岩得到佐证。



图 3 大洋玄武质岩石的 $\text{TiO}_2\text{--}(\text{MnO} \times 10)\text{--}(\text{P}_2\text{O}_5 \times 10)$ 构造岩浆判别图

Fig. 3 $\text{TiO}_2\text{--}(\text{MnO} \times 10)\text{--}(\text{P}_2\text{O}_5 \times 10)$ tectonomagmatic discriminant diagram of ocean basaltic rocks (据参考文献[6], 图例同图 1)

表 2 阴沟群火山岩稀土元素分析结果($\times 10^{-6}$)及某些参数

Table 2 Analyses of REE in volcanic rocks of Yingou Group as well as some parameters

序号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	$(\text{La}/\text{Yb})_N$	δEu
1	16.88	28.13	3.84	15.19	3.80	0.52	6.26	0.65	3.72	0.82	2.35	0.32	2.14	0.30	84.92	4.68	0.36
2	14.10	26.56	3.49	14.23	3.96	0.80	6.62	0.75	4.13	0.86	2.41	0.35	2.21	0.32	80.79	3.79	0.53
3	12.15	25.27	3.59	15.33	3.91	0.89	4.94	0.68	2.41	0.50	1.42	0.20	1.36	0.18	72.83	5.30	0.69
4	20.43	39.69	5.22	20.27	4.98	1.28	5.43	0.72	2.97	0.57	1.53	0.20	1.31	0.11	101.7	9.26	0.83
5	12.89	24.32	3.68	15.33	3.83	0.73	4.86	0.60	2.21	0.46	1.31	0.17	1.12	0.15	71.66	6.83	0.57
6	10.66	19.35	3.02	13.06	3.49	0.89	4.31	0.45	2.09	0.42	1.15	0.16	1.04	0.13	60.22	6.09	0.78
7	10.66	19.82	2.77	13.19	3.57	0.80	3.92	0.40	2.15	0.56	1.22	0.17	1.14	0.13	60.50	5.55	0.72
8	10.00	15.91	2.59	12.97	3.30	0.71	4.29	0.60	2.08	0.45	1.22	0.17	1.12	0.14	55.55	5.30	0.64
9	7.79	14.17	2.11	7.63	2.12	0.75	2.85	0.38	1.68	0.48	0.89	0.23	0.85	<0.10	41.94	5.44	1.04
10	11.34	14.84	2.50	11.92	2.68	0.52	4.46	0.49	2.85	0.59	1.51	0.20	1.22	0.18	55.30	5.52	0.51
11	13.81	21.71	3.17	13.69	3.48	0.72	4.93	0.71	3.82	0.77	2.09	0.28	1.84	0.25	71.27	4.46	0.59
12	11.79	22.70	3.12	13.71	3.81	1.41	4.75	0.69	4.41	0.96	2.62	0.35	2.24	0.30	72.86	3.13	1.12

样号、岩石名称、采样地点、分析方法、分析者同表 1。

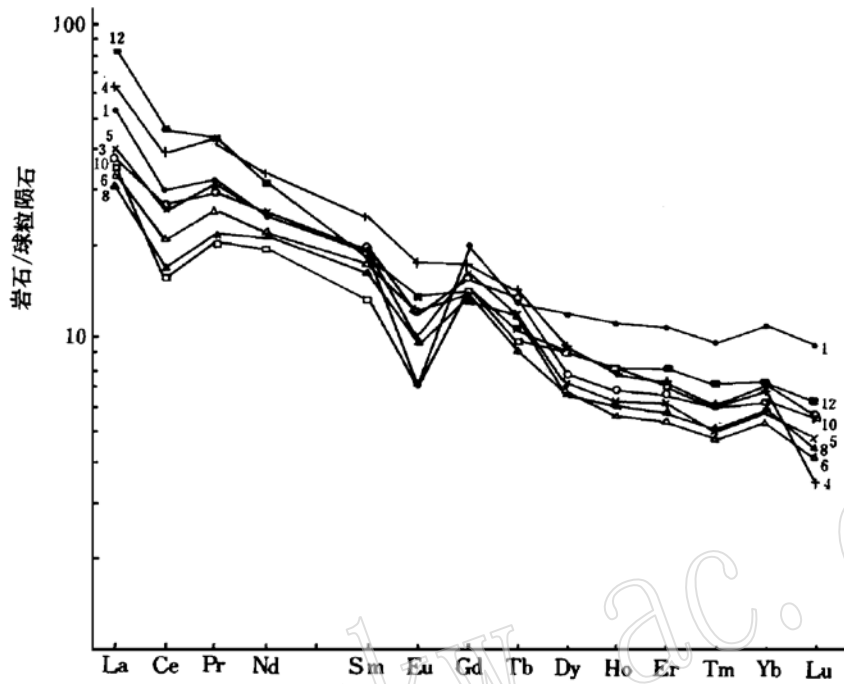


图 4 阴沟群火山岩稀土元素分配模式

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns of volcanic rocks of Yingou Group
图中的号码同表 2 中的相应序号

2.3 微量元素特征

阴沟群火山岩的微量元素分析结果见表 3,其微量元素蛛网图见图 5 和图 6。从图 5 和

表 3 阴沟群火山岩微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 3 Analyses of trace elements in volcanic rocks of Yingou Group

序号	Sr	Rb	Ba	Th	Nb	Ta	Zr	Hf	Y	Sc
1	191	31	261.10	3.24	8	10	91	<10	22.26	23.70
2	70	42	336.20	<3.00	<2	<10	84	<10	22.52	24.23
3	136	11	140.10	<3.00	<2	<10	56	<10	14.18	19.18
4	506	13	190.40	<3.00	5	<10	141	10	15.95	11.95
5	488	5	118.10	3.10	<2	<10	66	<10	12.80	16.12
6	581	24	235.00	<3.00	<2	<10	31	<10	11.63	15.76
7	574	18	163.20	<3.0	<2	<10	37	<10	12.59	17.56
8	404	11	243.30	<3.0	<2	<10	19	<10	11.97	18.82
9	163	2	37.49	<3.0	<2	<10	16	<10	9.37	12.50
10	284	6	86.78	<3.0	9	<10	45	<10	15.14	13.04
11	296	14	109.50	<3.0	8	12	64	<10	21.52	18.10
12	243.00	34	279.10	<3.0		<10	90.21	<10	24.28	30.69

序号、岩石名称和采样地点同表 1 相应的序号,分析方法和分析者同表 1,序号 12 中 Nb 项空格表明未作该项分析。

图6可以看出,与N-MORB相比,阴沟群火山岩选择性富集低离子位的不相容元素(Sr、K、Rb、Ba、Th),而高场强元素(Ta、Nb、Ce、P、Zr、Hf、Sm、Ti、Y、Yb)的丰度则较低,其微量元素蛛网图呈不太明显的“三隆起”型式,表现为Sr、K、Rb、Ba、Th的明显富集,以及Ce、P和Sm的低度富集,并且出现明显的Nb和Zr槽(图5和6中凡低于Nb的检测线,均取其最大值,所以实际情况Nb槽将更加明显),其中尤以暗门和阴沟剖面的火山岩最为明显,显示出岛弧钙碱性火山岩的微量元素分配型式,而与岛弧拉斑玄武岩系列和岛弧橄榄玄粗岩系列火山岩的微量元素分配型式明显不同,前者以低度富集低离子位的不相容元素和亏损高场强元素为特征,而后者则以强烈富集低离子位的不相容元素为特征。

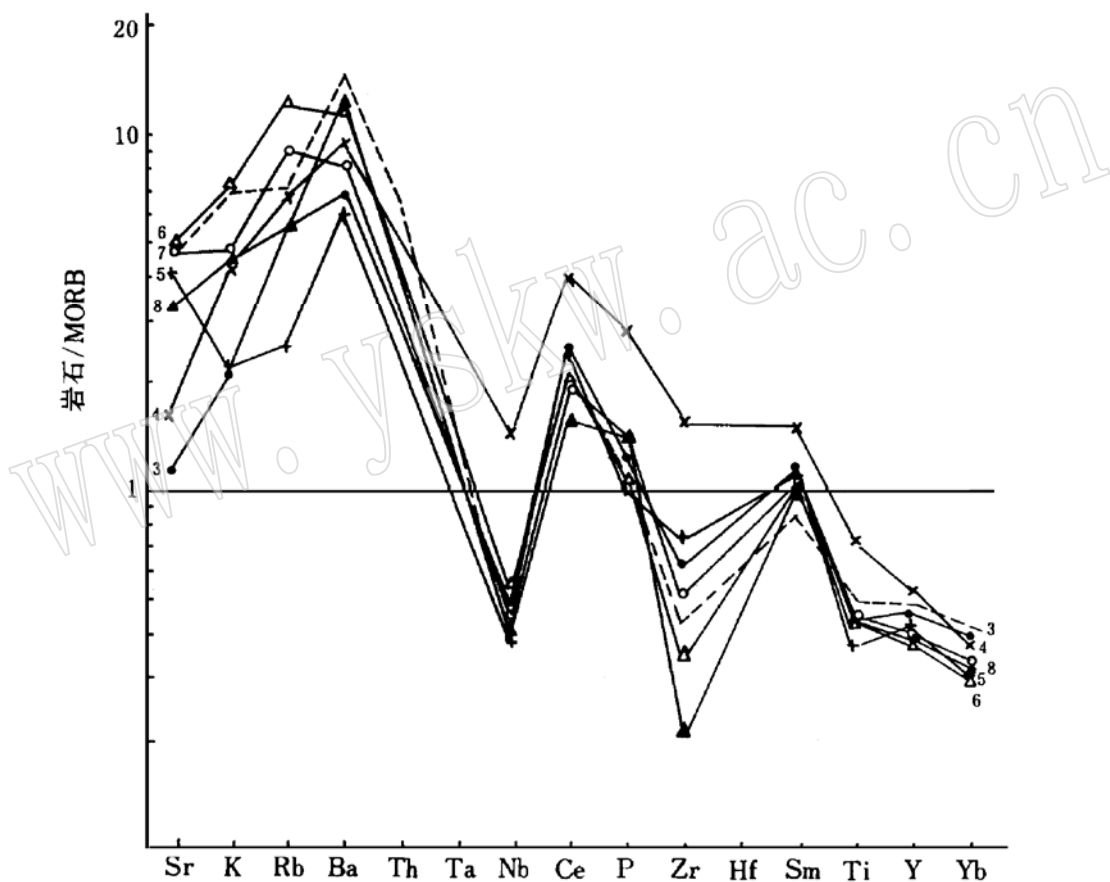


图5 暗门和阴沟剖面火山岩微量元素蛛网图

Fig. 5 Web diagram of trace elements in volcanic rocks along Anmen and Yingou section

图中的号码同表3相应的序号,虚线代表典型的岛弧钙碱性玄武岩的微量元素分配型式^[8]

东水峡玄武岩的Nb负异常没有或不明显,可能与地壳的混染有关。而其它元素的丰度与暗门和阴沟的火山岩大体相似。

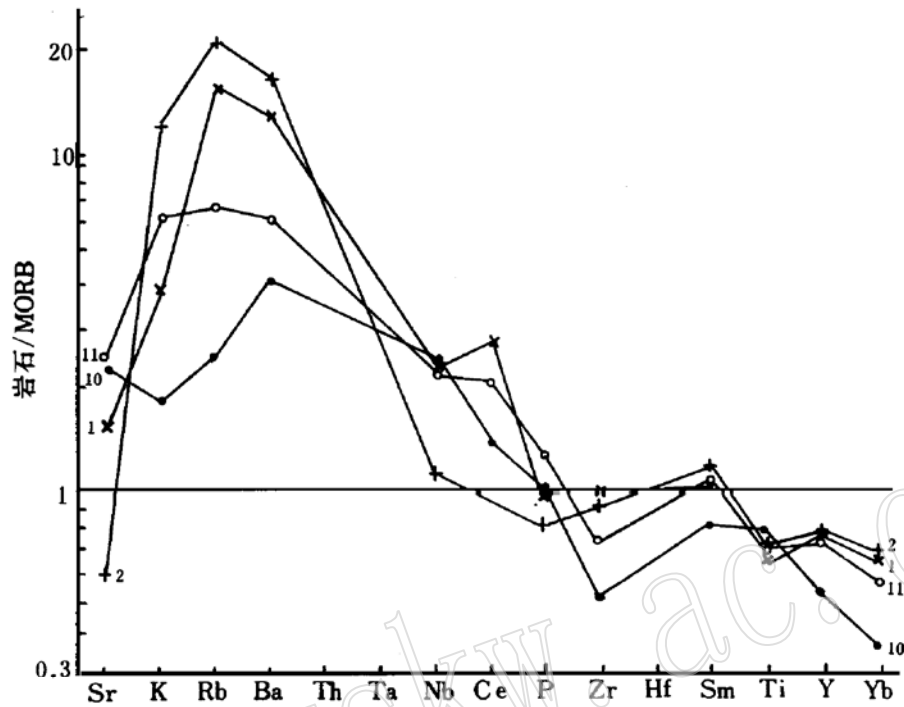


图6 东水峡和托莱河谷火山岩微量元素蛛网图

Fig. 6 Web diagram of trace elements in volcanic rocks from Dongshuixia and Tuolai Valley

图中的号码同表3相应的序号

3 讨论

阴沟群火山岩的地球化学特征表明,除东水峡的玄武岩略显碱性系列以外,其它地区的阴沟群火山岩(包括玄武质岩石和安山质岩石)均属钙碱性玄武岩系列。它们的稀土元素分配型式和稀土总量均与岛弧钙碱性火山岩相当。其微量元素蛛网图也与岛弧钙碱性火山岩完全相似,并且有关地球化学判别图也落在岛弧火山岩范围内。这些都说明阴沟群火山岩形成于岛弧环境。

然而,在阴沟群火山岩中还没有发现严格意义上的橄榄玄粗岩系列,也没有发现酸性火山岩和侵入岩,所以这种岛弧应为具有中等成熟度的岛弧,而不是成熟度很高的岛弧。

东水峡火山岩与其它地区有所不同,只有基性火山岩,没有中性的火山岩,并且略具有碱性火山岩的特征,但是稀土和微量元素蛛网图均表明为钙碱性火山岩系列,所以其构造环境仍为岛弧环境。在微量元素蛛网图上,Nb的负异常不明显,暗示了可能有地壳物质的混染。同时考虑到东水峡火山碎屑岩中成分复杂(火山岩本身物质和沉积岩碎屑),显示出拉张的环境,所以推测东水峡火山岩可能形成于弧内裂谷。相对而言,暗门和阴沟地区的火山岩比托莱河谷的火山岩的碱性程度要高,因此,托莱河谷在早奥陶世时相对靠近大洋一侧,

而暗门—阴沟—寒山一带则相对靠近大陆一侧。另外,图3还显示出托莱河谷和东水峡的玄武岩落在岛弧拉斑玄武岩的范围内,而暗门—阴沟地区的玄武岩落在岛弧钙碱性玄武岩的范围内,这一点也同样暗示了位于南部的托莱河谷相对靠近大洋一侧,形成于不成熟的岛弧环境;北部的暗门—阴沟一带相对靠近大陆一侧,形成于成熟度相对较高的岛弧环境。所以由此推测大洋板块在早奥陶世时是由南向北俯冲的,这与其他学者所得出的结论一致^[3,9]。

综上所述,阴沟群火山岩的一个鲜明特点是富集低离子位的不相容元素(Sr、K、Rb、Ba),这是由于这些元素最易于被含水相流体活化,当消减洋壳板块俯冲到楔性地幔时,洋壳内的含水流体相在对岛弧岩浆地幔源区进行交代的同时,也将上述元素和LREE带到了地幔楔中。高场强元素的亏损可能与地幔源区本身和部分熔融过程有关;Y、Yb的亏损暗示了地幔源区残留有石榴石,Nb、Zr、Ti的亏损则可能分别与源区残留有金红石、锆石和榍石有关。

4 结论

通过上述讨论,可以得出结论:早奥陶世阴沟群火山岩总体上形成于岛弧环境,但不同地区略有差异,南部的托莱河谷一带相对靠近大洋一侧,岛弧的成熟度较低,北部的暗门—阴沟—寒山一带相对靠近大陆一侧,为具有中等成熟度的岛弧,位于两者之间的东水峡一带可能处于弧内裂谷环境。

参 考 文 献

- 1 夏林圻、夏祖春、徐学义. 北祁连山构造—火山岩浆演化动力学. 西北地质科学, 1995, 16(1): 1—28.
- 2 夏林圻、夏祖春、徐学义. 北祁连山海相火山岩岩石成因. 北京:地质出版社, 1996.
- 3 左国朝、刘寄陈. 北祁连早古生代大地构造演化. 地质科学, 1987, (1): 14—24.
- 4 Winchester J A and Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical. Geol.* 1977, 20: 325—343.
- 5 Miyashiro A. Classification, characteristics and origin of ophiolites. *J. Geol.* 1975, 83: 249—281.
- 6 Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its applications for petrogenesis. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1983, 62: 53—62.
- 7 Wilson M. *Igneous petrogenesis*. London Unwin Hyman, 1989.
- 8 Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries. In: *Andesites: orogenic andesites and related rocks*, R. S. Thorpe (ed.), 1982, 525—548. Chichester: Wiley.
- 9 冯益民、何世平. 蛇绿岩与造山作用——北祁连造山带例析. 见张旗主编: 蛇绿岩与地球动力学研究. 北京:地质出版社, 1996, 135—138.

Geology and Geochemistry of Volcanic Rocks of the Early Ordovician Yingou Group in the Western Part of North Qilian Mountain and Their Tectonic Setting

Zhang Zhaochong

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Mao Jingwen, Yang Jianmin

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Wu Maobing, Zuo Guochao

(Institute of Geological Sciences, Gansu Bureau of Geology and Mineral Resources, Lanzhou 73000)

Key words: Yingou Group, volcanic rock, geology and geochemistry, tectonic setting, North Qilian Mountain

Abstract

Geological and geochemical characteristics of the Early Ordovician volcanic rocks from North Qilian Mountain show that they are of the basalt – andesite association with no acid rocks or volcanic rocks of the shoshonite series. Their geochemical features indicate that they are of the calc – alkaline series characterized by enrichment of LREE and LILE and depletion of HFSE. They were formed in an island – arc environment of moderate maturity, and the volcanic rocks present in Dongshuixia area might have been formed in an intra – arc rift.