

柴北缘阿木尼克山牦牛山组火山岩 地球化学特征及其地质意义

胡俊¹, 陆勇², 肖小强³, 曾江¹, 罗波¹

(1. 四川省众成矿业有限公司, 四川 成都 610046; 2. 成都理工大学, 四川 成都 610059;
3. 青海省有色地质矿产勘查局, 青海 西宁 810015)

摘要:柴北缘阿木尼克地区分布有大面积的牦牛山组火山岩,通过对火山岩岩石组合、地球化学、锆石测年等研究。研究结果表明该区岩性组合以中-酸性火山岩为主,发育柱状节理,为典型陆相火山岩。里特曼指数(δ)为1.45~4.54,全碱(ALK)含量变化范围较大,铝饱和指数为0.66~1.19,具2种来源地球化学特征的火山岩(S和I型),显示混源演化,轻稀土富集,重稀土亏损,铀亏损明显。构造环境均显示为岛弧,锆石年龄为中—晚泥盆世,表明阿木尼克山一带在该时期主体处于隆升状态,而到了晚泥盆世—早石炭世时期则出现了海相沉积岩,说明古特提斯洋重新打开,拉开了该区海相沉积帷幕。

关键词:火山岩地质特征; 地球化学特征; 混源演化; 岛弧; 锆石年龄; 阿木尼克山; 柴北缘

中图分类号:P542 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-6248(2016)04-0073-11

Geochemical Characters and Geological Implications of Volcanic Rocks from Maoniushan Formation in Amunick Mountain of Northern Qaidam

HU Jun¹, LU Yong², XIAO Xiaoqiang³, ZENG Jiang¹, LUO Bo¹

(1. Sichuan Zhongcheng Mining Co., Ltd, Chengdu 610046, Sichuan, China;
2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;
3. Qinghai Provincial Bureau of Nonferrous Metaland Geological Exporation, Xining 810015, Qinghai, China)

Abstract: A large area of volcanic rocks is dispersed in Maoniushan Formation of Amunick area, northern Qaidam basin. In this paper, the rock association and geochemical characters of these volcanic rocks have been studied. The results show that these volcanics mainly consist of medium-acidic volcanic rocks, with columnar joints, belonging to typical continental volcanic rocks. The Rittman indexes of these volcanics vary from 1.45 to 4.54, with great range of ALK content, and their ACNK ratios change from 0.66 to 1.19, showing the geochemical characters of volcanics with two sources (S-type and I-type) and the mixed source evolution. The LREE of these volcanic rocks are enriched, while their HREE are depleted, with obvious U loss. The

收稿日期: 2015-12-13; 修回日期: 2016-06-21

基金项目:中国地质调查局“青海省都兰县阿木尼克山地区四幅1:5万区域地质矿产调查”(1212011221146)

作者简介:胡俊(1986-),男,助理工程师。从事区域地质矿产调查及找矿工作。E-mail:berry_1896@163.com

structural environment of these volcanic rocks belongs to island environment. The Zircon ages is classified into Middle to Late Devonian, showing the uplifting of Amunik Mountain in this period. And then, the marine sedimentary rocks had appeared in this area during Late Devonian to Early Carboniferous, explaining that the Paleo-Tethys Ocean was opened again and the marine sedimentary was began.

Keywords: geologic characters of volcanics; geochemical characters; mixed evolution; island; zirconage; Amunick; northern Qaidam Basin

火成岩的化学成分受其源区的化学成分和矿物成分所制约,其性质由熔融类型和程度而决定。笔者通过研究火山岩的岩石组合、主量-微量元素、稀土元素及稳定同位素,阐明它们在地球系统中的分布、分配、性状、迁移和演化的历史,对于岩浆源区、古构造环境的恢复、成岩成矿物源的示踪均有较好效果(杨学明等,2000)。

一直以来,牦牛山组被认为是一套碰撞后陆相磨拉石组合,其形成标志着柴北缘造山作用的结束(许志琴,2007;张雪亭等,2007;李荣社等,2007)。随着近年来研究工作的不断深入,对其岩石组合、地球化学特征、形成时代及环境也产生了新的认识。陈守建(2007)认为东昆仑地区牦牛山组为一套典型的伸展裂陷型磨拉石建造;李瑞保(2012)发现东昆仑地区牦牛山组夹有双峰氏火山岩,被认为是初始裂谷环境;吴才来(2008)发现柴北缘西段广泛发育岛弧地球化学特征花岗岩,属活动大陆边缘产物;夏文静等(2014)研究表明柴北缘牦牛山组其基底来源于岛弧杂岩滩间山群;冯乔等(2015)亦认为柴北缘乌兰县牦牛山一带可能存在太古宙古老地层结晶基底。

牦牛山组形成环境的分歧制约了对柴北缘构造演化的认识。因此,系统的研究牦牛山组的岩石组合、地球化学特征、形成时代,并探讨构造环境就变得很有必要,也将对柴北缘的构造演化提供一定依据。

笔者以柴北缘阿木尼克山一带牦牛山组火山岩为研究对象,通过野外调查,从岩石组合、地球化学特征、锆石 U-Pb 定年等着手研究,表明本区具有 2 种来源地球化学特征的火山岩,属混源演化产物,但地球化学特征均表现为岛弧地球化学特征,区域显示泥盆纪时期柴北缘均为陆相环境(孙崇仁,1997;许志琴,2007;张雪亭等,2007;李荣社等,2007;冯乔

等,2015),而部分学者认为柴北缘牦牛山组存在古结晶基底(夏文静等,2014;冯乔等,2015),滩间山群下伏牦牛山组火山岩源区是否与岛弧产物滩间山群有关还有待进一步研究(朱小辉等,2014)。4 件锆石 U-Pb 定年年龄为 (369.2 ± 3.3) Ma、 (374.8 ± 3.1) Ma、 (392.4 ± 3.3) Ma、 (385.8 ± 6.1) Ma,限定了本区牦牛山组火山岩形成时代为中—晚泥盆世。

1 地质特征

1.1 岩石组合特征

牦牛山组火山岩以酸性火山岩为主,其次为中性火山岩,另有少量的基性火山岩、陆相碎屑岩夹层。火山岩相有爆发相、溢流相及爆发沉积相。爆发相岩石有中酸性火山集块岩、中酸性火山角砾岩、熔结角砾凝灰岩、晶屑凝灰岩、珍珠岩;溢流相岩石有流纹岩、英安岩、安山岩、杏仁状玄武岩;爆发沉积相岩石有沉凝灰岩,发育层状构造,其喷发旋回、韵律见表 1。下部为一套以灰黑色薄层状灰岩、灰褐色薄板状的含砾微晶白云岩、灰绿色板岩、紫红色页岩、钙质长石石英砂岩组合的陆内碎屑岩建造,上覆石炭系。海相石炭系的出现标志着本区造山运动的结束,特提斯洋重新打开,开始了海相沉积序列(李瑞保等,2012)。

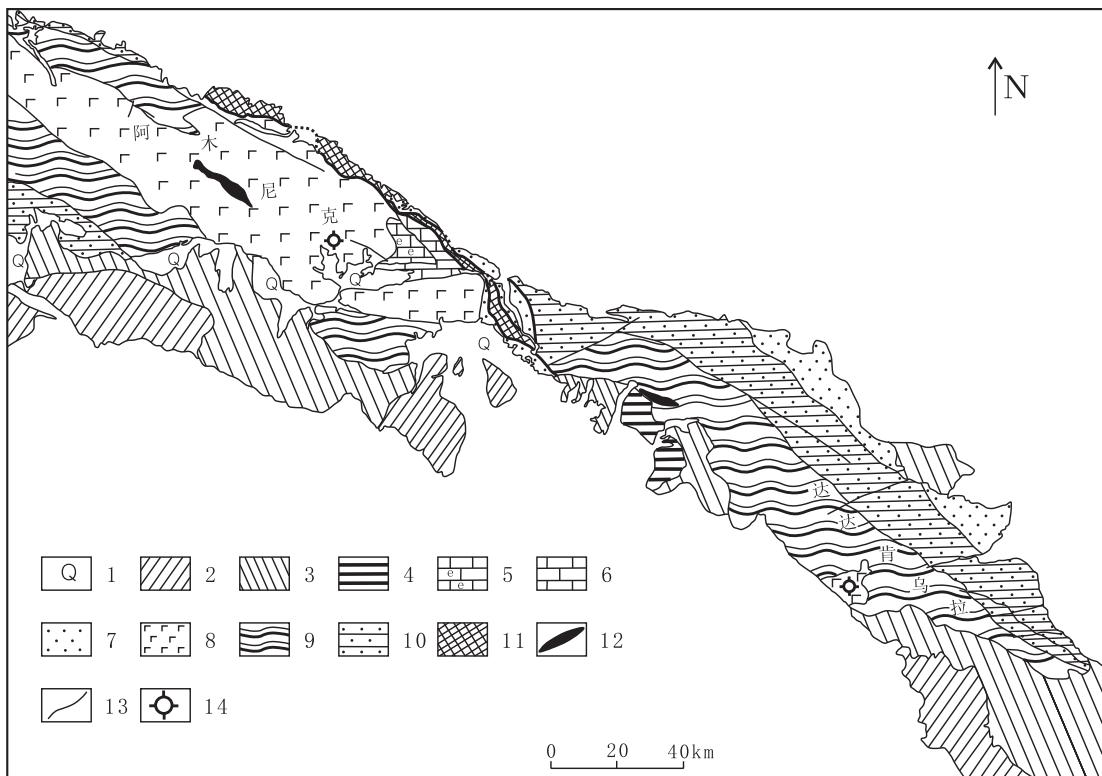
1.2 空间分布特征

火山岩分布范围较大,研究区从西—东均有分布,岩性横向差异较大(图 1)。在西段的阿木尼克山地区分布的火山岩以酸性火山岩为主,其次为中性火山岩,有少量的基性火山岩;火山岩相包括爆发相、溢流相及爆发沉积相;火山岩柱状节理比较粗大,柱状节理为陆相火山岩特有特征;而在东侧的达达肯乌拉山地区,岩性均为酸性火山岩;火山岩相为爆发相、溢流相。

表1 阿木尼克山地区火山岩喷发旋回、韵律及岩相特征表

Tab. 1 Eruptive cycles, rhythms and lithofacies characters in Amunick area

赋存地层	旋回	韵律	岩性	厚度(m)			岩相
				层	韵律	旋回	
牦牛山组	牦牛山火山旋回	④	流纹质熔结凝灰角砾岩	1.85	1.85	306.4	爆发相
			紫红色泥页岩、长石石英砂岩	2.75			沉积相
			英安质—安山质角砾凝灰熔岩	117.03			溢流相
			安山玄武质熔结角砾岩	64.17			爆发相
		③	英安质—安山质火山角砾岩	8.25		>459.29	爆发相
			安山玄武质熔结角砾岩或角砾凝灰岩	42.97			喷发相
			晶屑岩屑角砾凝灰岩	71.23			喷发相
	②		微晶白云岩夹板岩	49.63		117.92	沉积相
			晶屑凝灰岩	54.42			喷发相
			含砾晶屑凝灰岩	13.87			爆发相
	①		薄板状的含砾微晶白云岩	8.88		33.12	沉积相
			英安质晶屑沉凝灰岩	4.56			喷发-沉积相
			英安质晶屑凝灰岩	19.68			喷发相



- 第四系;
- 狮子沟组;
- 油沙山组;
- 大煤沟组;
- 怀头他拉组;
- 城墙沟组;
- 阿木尼克组;
- 牦牛山组火山岩段;
- 牦牛山组浅变质岩段;
- 牦牛山组碎屑岩段;
- 寒武—奥陶混杂岩带;
- 中性侵入岩;
- 断裂;
- 火山口

图1 研究区火山岩分布图

Fig. 1 Volcanics distribution in research area

2 岩石地球化学特征

2.1 主量元素

由表 2 可以看出, SiO_2 含量变化较大, $w(\text{SiO}_2)$ 含量为 56.38%~78.12%, 火山岩包括了中性岩、酸性岩, 在 TAS 图解中(图 2), 3 件中性岩样品分别投在粗面安山岩和安山岩区域, 3 件样品投在粗面英安岩区域, 其余 11 件样品投在流纹岩区域。里特曼(组合)指数(δ)为 1.45~4.54, 5 件样品 $9 > \delta > 3.3$, 为碱性岩, 12 件样品 δ 均小于 3.3, 属于钙碱性岩。全碱 [$\text{ALK}(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$] 含量变化范围较大, 为 5.38%~9.86%。安山岩富 Na , $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 均小于 1, 多数样品小于 0.5。而酸性岩多数富 K , $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 均大于 1。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图解中(图 3), 3 件安山岩投在钙碱性系列和高钾钙碱性系列, 酸性岩仅 1 件样品投在低钾(拉斑)系列, 13 件样品投在高钾钙碱性系列和钾玄岩系列。安山岩富 Ti , 其 TiO_2 含量大于 1%。铝饱和指数 A/CNK $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO})$ 为 0.66~1.19, 分 2 种类型: 一类具 S 型花岗岩特性, 铝饱和指数大于 1.1, Nd 初始值低, Sr 初始值高, 代表地壳产物; 另一类具 I 型花岗岩特性, 铝饱和指数小于 1.1, Nd 初始值高, Sr 初始值高, 代表下地壳产物。

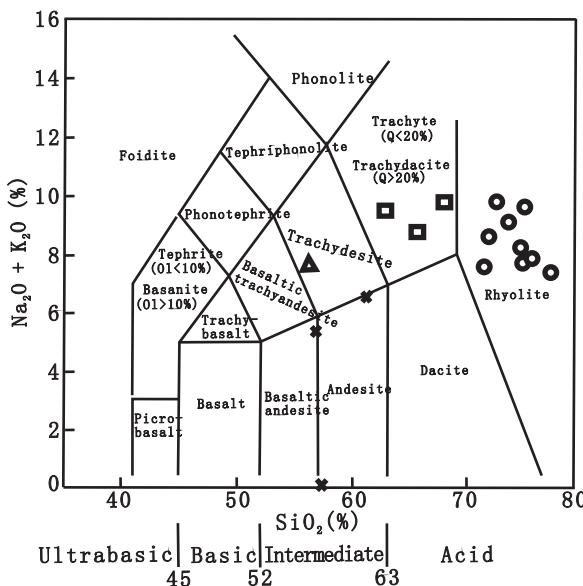


图 2 火山岩 TAS 图解

Fig. 2 Volcanics TAS diagram

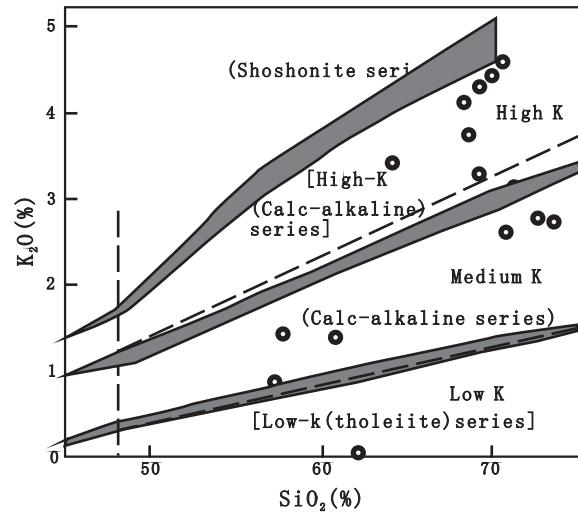


图 3 火山岩 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图

Fig. 3 Volcanics $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ diagram

2.2 稀土元素

从表 3 可以看出, 安山岩稀土总量 ΣREE 为 $90.58 \times 10^{-6} \sim 174.10 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 4.51~8.23, 轻稀土富集, 重稀土亏损。 δEu 为 0.73~1.16, 亏损富集特征不明显, δCe 为 1.06~1.29, 显示轻微的富集特征, 稀土分配曲线右倾(图 4)。

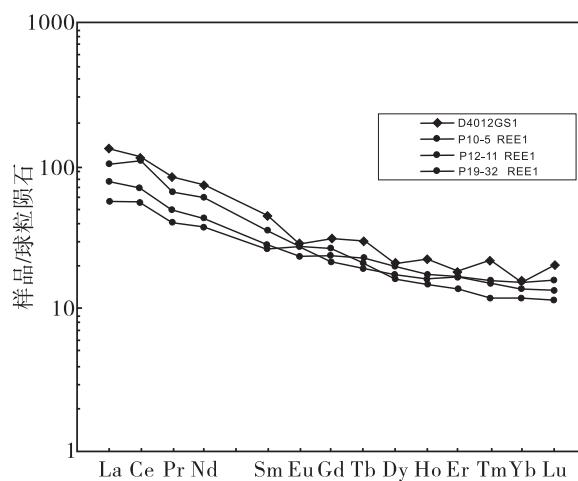


图 4 安山岩稀土分配曲线图

Fig. 4 Andesites REE pattern curve

酸性火山岩稀土总量变化很大, ΣREE 为 $67.72 \times 10^{-6} \sim 371.95 \times 10^{-6}$, LREE/HREE 为 4.93~18.25, 轻稀土富集, 重稀土亏损。Eu 亏损明显, δEu 均小于 1。 δCe 多数大于 1, 显示轻微的富集特征。稀土分配曲线右倾(图 5), 重稀土区域相对平坦, Eu 元素形成明显的波谷, Ce 元素形成一微

表2 火山岩主要元素含量表(%)
Tab. 2 Major elements content of volcanics(%)

样品编号	岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	LOSS	Total	ALK	δ	A / CNK
P3 - 16 REE1	粗面英安岩	64.69	13.79	2.56	0.50	0.46	2.96	0.14	9.18	0.11	0.043	0.033	4.71	99.17	9.78	3.84	0.74
P3 - 21 REE1	流纹岩	72.77	11.55	0.74	0.35	0.14	2.15	1.08	8.39	0.10	0.021	0.019	2.46	99.77	9.71	2.98	0.66
P5 - 3 REE1	流纹岩	71.67	12.03	1.52	0.47	0.80	1.54	1.87	6.06	0.27	0.025	0.053	3.39	99.70	8.20	2.16	0.85
P10 - 3 REE1	英安质晶屑凝灰岩	62.99	14.10	3.92	1.70	0.85	3.08	3.91	4.50	0.53	0.046	0.20	3.92	99.76	8.76	3.40	0.84
P10 - 5 REE1	安山玻质岩	61.88	18.57	0.89	2.70	2.77	0.47	9.25	0.12	0.80	0.014	0.27	1.87	99.60	9.54	4.54	1.35
P12 - 11 REE1	粗面安山岩	53.94	16.83	4.75	2.54	4.12	4.18	6.17	1.18	1.05	0.086	0.16	4.31	99.31	7.69	4.42	1.04
P12 - 12 REE1	杏仁状流纹岩	71.99	14.08	1.25	0.26	0.19	0.70	2.97	5.96	0.37	0.014	0.082	1.83	99.70	9.10	2.73	0.97
YP07(3) REE1	碳酸盐化流纹岩	70.13	12.62	0.19	0.53	0.91	2.11	3.85	5.70	0.22	0.044	0.055	3.12	99.49	9.86	3.31	0.73
D3450REE1	流纹岩	73.08	13.41	2.01	0.73	0.29	0.79	4.09	3.52	0.18	0.019	0.033	1.74	99.89	7.74	1.91	1.09
P16 - 60 REE1	流纹岩	69.65	13.50	0.43	1.88	0.75	2.03	3.44	5.01	0.35	0.041	0.088	2.55	99.73	8.67	2.64	0.88
P19 - 6 REE1	流纹岩	76.61	10.75	0.47	0.64	0.25	1.55	3.31	3.68	0.12	0.032	0.026	1.92	99.36	7.12	1.45	0.86
P19 - 30 REE1	流纹岩	67.60	12.08	0.88	0.97	0.83	4.48	1.81	5.36	0.40	0.048	0.066	5.03	99.56	7.55	2.02	0.71
P19 - 32 REE1	安山岩	55.66	16.77	2.54	4.87	3.96	6.54	3.32	1.93	1.12	0.13	0.251	2.30	99.39	5.38	2.07	1.02
D3560GS1	流纹岩	75.48	12.54	0.74	0.20	0.4	1.18	3.451	3.746	0.0721	0.0177	0.0721	1.78	99.68	7.33	1.59	1.02
D-D7015GS1	凝灰岩	70.81	15.58	1.24	0.43	0.37	1.26	3.50	4.42	0.12	0.016	0.063	2.10	99.90	8.08	2.23	1.15
D4012GS1	安山岩	59.15	16.73	1.22	5.31	2.19	3.55	4.49	1.87	1.10	0.097	0.33	3.35	99.38	6.58	2.38	1.19
P35 - 35GS1	流纹岩	72.56	14.21	0.81	0.15	0.60	0.68	3.42	4.15	0.069	0.021	0.033	3.35	100.05	7.83	1.91	1.16

注:测试单位:中国地质大学(北京),元素含量为 $w_B/10^{-2}$ 。

表 3 火山岩稀土元素含量表
Tab. 3 Rare earth elements content of volcanics

西北地质 NORTHWESTERN GEOLOGY 2016 年

样品编号	岩性	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LaN/ HREE	LaN/ YbN	δEu	δCe
P3 - 16 REE1	粗面英安岩	70.61	157.95	14.39	57.95	10.82	0.87	9.60	1.23	5.59	1.05	3.15	0.45	3.13	0.47	25.56	337.26	312.60	24.66	12.68	16.21	0.26	1.15
P3 - 21 REE1	流纹岩	34.60	92.73	8.40	34.67	6.94	0.64	7.28	1.26	7.34	1.52	4.54	0.67	4.39	0.63	35.98	205.61	177.97	27.64	6.44	5.65	0.27	1.29
P5 - 3 REE1	流纹岩	27.98	73.95	6.80	28.88	5.81	1.34	6.07	0.97	5.50	1.09	3.20	0.44	2.71	0.40	24.41	165.12	144.74	20.37	7.11	7.41	0.69	1.27
P10 - 3 REE1	英安质晶屑凝灰岩	27.96	73.87	6.85	29.98	6.21	1.59	6.40	1.05	5.96	1.24	3.87	0.55	3.56	0.55	34.06	169.64	146.46	23.18	6.32	5.63	0.76	1.27
P10 - 5 REE1	安山玻质岩	18.36	43.37	4.64	20.23	4.27	1.34	4.78	0.83	4.91	0.99	2.72	0.38	2.31	0.34	30.29	109.47	92.22	17.25	5.34	5.71	0.90	1.12
P12 - 11 REE1	粗面安山岩	13.39	33.75	3.79	17.48	3.97	1.58	4.32	0.73	4.43	0.92	2.82	0.40	2.60	0.40	22.84	90.58	73.96	16.63	4.45	3.70	1.16	1.14
P12 - 12 REE1	杏仁状流纹岩	20.03	69.73	5.29	22.82	4.93	1.06	5.03	0.83	4.73	0.96	2.81	0.42	2.70	0.42	29.06	141.76	123.86	17.90	6.92	5.32	0.64	1.63
YP07(3) REE1	碳酸盐化纹岩	82.39	180.17	15.45	61.66	10.05	1.44	9.10	1.05	4.41	0.80	2.46	0.34	2.28	0.35	21.62	371.95	351.17	20.78	16.90	25.94	0.45	1.15
D3450 REE1	流纹岩	19.02	44.41	4.73	19.61	3.88	1.12	3.80	0.59	3.27	0.64	1.98	0.29	2.02	0.33	15.95	105.69	92.77	12.92	7.18	6.75	0.88	1.12
P16 - 60 REE1	流纹岩	22.04	58.65	5.09	20.57	3.97	1.04	3.96	0.61	3.37	0.67	2.13	0.30	1.98	0.30	18.38	124.67	111.36	13.31	8.36	8.00	0.79	1.31
P19 - 6 REE1	流纹岩	21.51	63.31	5.88	25.68	5.88	0.59	6.32	1.08	6.65	1.40	4.16	0.62	4.08	0.61	34.50	147.77	122.86	24.91	4.93	3.78	0.30	1.36
P19 - 30 REE1	流纹岩	29.30	80.40	7.20	29.61	5.54	1.46	5.38	0.79	4.21	0.84	2.55	0.35	2.34	0.37	25.35	170.33	153.51	16.82	9.13	9.00	0.81	1.32
P19 - 32 REE1	安山岩	24.41	66.32	6.23	27.90	5.39	1.62	5.39	0.78	4.16	0.83	2.28	0.30	2.01	0.29	20.26	147.90	131.87	16.03	8.23	8.73	0.91	1.29
D3560GS1	流纹岩	17.62	26.12	3.68	13.15	2.48	0.39	1.82	0.24	0.95	0.16	0.48	0.07	0.48	0.08	6.35	67.72	63.46	4.26	14.88	26.50	0.54	0.75
D - D7015GS1	凝灰岩	27.12	69.79	5.18	18.51	3.26	0.72	2.63	0.46	1.34	0.38	0.78	0.24	0.75	0.25	8.30	131.42	124.59	6.83	18.25	25.79	0.73	1.35
D4012GS1	安山岩	31.74	70.58	7.95	34.50	7.00	1.62	6.35	1.13	5.26	1.26	3.04	0.56	2.60	0.52	32.00	174.10	153.38	20.71	7.41	8.76	0.73	1.06
P35 - 35GS1	流纹岩	23.92	45.18	5.51	20.54	4.01	0.65	2.97	0.39	1.49	0.30	0.71	0.13	0.81	0.12	8.75	106.72	99.80	6.91	14.44	21.12	0.55	0.93

注: 测试单位: 中国地质大学(北京), 元素含量为 $w_b \cdot 10^{-6}$ 。

弱的波峰。与安山岩相比,酸性火山岩 Eu 明显亏损,说明在酸性火山岩喷出之前,岩浆结晶已沉淀出较多的斜长石晶体,导致 Eu 亏损比较强烈。

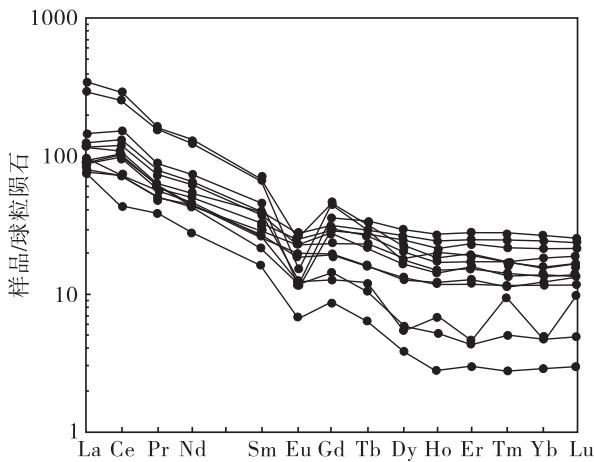


图 5 酸性火山岩稀土配分曲线图

Fig. 5 Acid volcanics REE pattern curve

2.3 微量元素

微量元素含量见表 4,由图 6 可以看出,3 件安山岩样品 Nd/Sr 值较小,1 件样品 Nd/Sr 值较大,表明其具有混源演化特征。强不相容元素 Rb、Ba、Th 富集,曲线上形成波峰,Ta、Nb 亏损明显,形成波谷。Ce 富集,形成波峰。Sm 相对富集,形成小波峰。蛛网曲线呈现峰谷迭起的曲线形式。

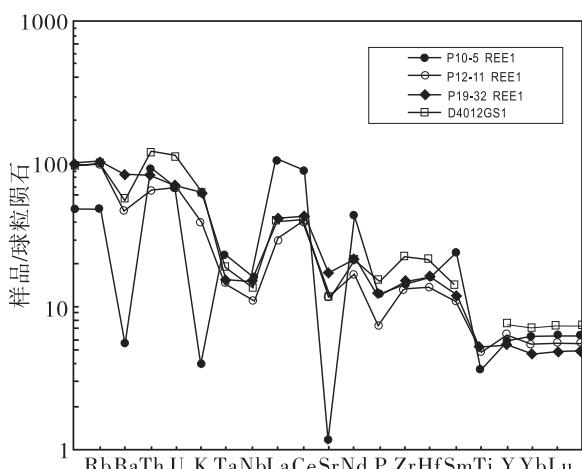


图 6 安山岩 ORG 标准化蛛网图

Fig. 6 Andesites ORG spider diagram

酸性岩的特征由图 7 可以看出,11 件样品曲线一致性较好,Nd/Sr 值较大,3 件样品 Nd/Sr 值较小,

亦说明其具有混源岩浆演化特性。强不相容元素 Rb、Ba、Th 富集,曲线上形成波峰,Ta、Nb 亏损明显,形成波谷。Ce 富集,形成波峰。蛛网曲线呈现峰谷迭起的曲线形式。2 种类型酸性火山岩微量元素特征、蛛网图曲线与对应的安山岩较为相似,属混源岩浆演化的结果。

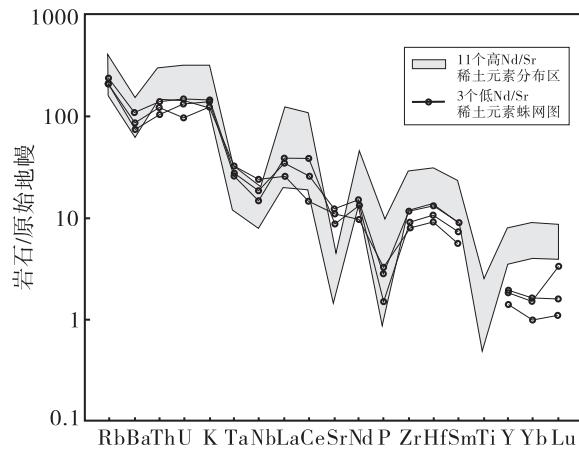


图 7 酸性火山岩 ORG 标准化蛛网图

Fig. 7 Acid volcanics ORG spider diagram

3 构造环境分析

3.1 岩相特征

阿木尼克山以南的英安岩中发育柱状节理(图 8),其分布宽度约 200 m,单节理截面多呈五方形(图 9),部分呈六方形。在达达肯乌拉山地区,流纹岩中亦发育柱状节理,出露宽度约 60 m,节理多呈四方柱状,柱状节理的出现标志着该火山岩为陆相喷发的产物。

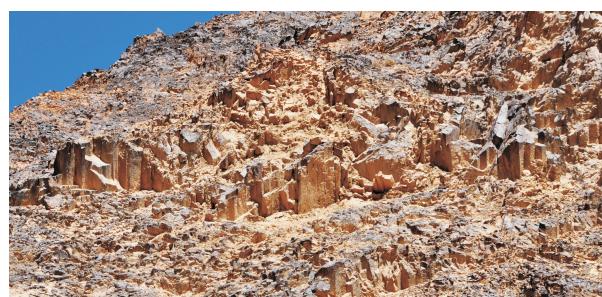


图 8 英安岩柱状节理图

Fig. 8 Dacite columnar joint

表 4 火山岩微量元素含量表
Tab. 4 Micro elements content of volcanics

样品编号	岩性	Rb	Ba	Th	U	K	Ta	Nb	La	Ce	Sr	Nd	P	Zr	Hf	Sm	Ti	Y	Yb	Lu
P3 - 16 REE1	粗面英安岩	250.10	845.60	24.86	6.59	76 174.47	1.38	14.35	31.74	70.58	38.03	34.50	144.08	178.60	5.29	7.00	672.00	32.00	2.60	0.52
P3 - 21 REE1	流纹岩	210.75	446.70	19.28	3.64	69 619.15	1.24	13.64	18.36	43.37	31.29	20.23	82.96	170.20	5.56	4.27	609.00	30.29	2.31	0.34
P5 - 3 REE1	流纹岩	151.90	715.80	15.57	3.23	50 285.11	0.88	8.31	13.39	33.75	40.86	17.48	231.41	204.20	6.16	3.97	1 644.00	22.84	2.60	0.40
P10 - 3 REE1	英安质晶屑凝灰岩	130.10	476.60	13.75	3.05	37 340.43	0.88	11.35	24.41	66.32	64.61	27.90	873.24	262.20	8.06	5.39	3 192.00	20.26	2.01	0.29
P10 - 5 REE1	安山玻质岩	30.92	39.67	7.82	1.47	995.74	0.93	11.36	70.61	157.95	24.80	57.95	1 178.87	163.00	5.05	10.82	4 814.00	25.56	3.13	0.47
P12 - 11 REE1	粗面安山岩	62.10	333.90	5.62	1.44	9 791.49	0.62	7.96	20.03	69.73	252.70	22.82	698.59	152.20	4.20	4.93	6 272.00	29.06	2.70	0.42
P12 - 12 REE1	杏仁状流纹岩	158.10	499.10	15.49	3.89	49 455.32	0.73	7.45	82.39	180.17	39.34	61.66	358.03	211.60	6.61	10.05	2 203.00	21.62	2.28	0.35
YP07(3) REE1	碳酸盐化流纹岩	100.10	478.10	14.54	3.26	47 297.87	0.47	8.63	34.60	92.73	40.29	34.67	240.14	250.80	7.52	6.94	1 347.00	35.98	4.39	0.63
D3450 REE1	流纹岩	128.65	646.50	12.22	1.78	29 208.51	0.74	10.38	27.98	73.95	92.43	28.88	144.08	312.80	9.01	5.81	1 074.00	24.41	2.71	0.40
P16 - 60 REE1	流纹岩	159.10	640.90	12.64	3.18	41 572.34	0.65	5.73	19.02	44.41	65.68	19.61	384.23	150.10	4.56	3.88	2 121.00	15.95	2.02	0.33
P19 - 6 REE1	流纹岩	139.90	424.10	18.91	3.82	30 536.17	0.92	11.27	22.04	58.65	64.84	20.57	113.52	131.40	4.36	3.97	714.00	18.38	1.98	0.30
P19 - 30 REE1	流纹岩	207.40	1 058.00	11.88	3.39	44 476.60	0.75	9.82	21.51	63.31	84.25	25.68	288.17	176.50	5.05	5.88	2 420.00	34.50	4.08	0.61
P19 - 32 REE1	安山岩	66.38	582.10	6.93	1.46	1 6014.89	0.63	12.12	29.30	80.40	355.50	29.61	1 095.92	177.90	4.89	5.54	6 688.00	25.35	2.34	0.37
D3560GS1	流纹岩	130.60	584.00	10.80	2.00	31 083.83	1.31	16.40	17.62	26.12	228.90	13.15	314.80	89.40	2.85	2.48		6.35	0.48	0.08
D - D7015GS1	凝灰岩	148.85	753.00	12.30	3.07	36 676.60	1.16	13.10	23.92	45.18	258.90	20.54	275.07	131.00	4.11	4.01		8.75	0.81	0.12
D4012GS1	安山岩	63.15	398.00	10.20	2.35	1 517.02	0.77	9.73	27.96	73.87	246.50	29.98	1 440.85	253.00	6.61	6.21		34.06	3.56	0.55
P35 - 35GS1	流纹岩	145.47	517.00	9.08	2.84	34 436.17	1.08	10.80	27.12	69.79	183.90	18.51	144.08	99.50	3.34	3.26		8.30	0.75	0.25

注: 测试单位: 中国地质大学(北京), 元素含量为 $w_B/10^{-6}$ 。

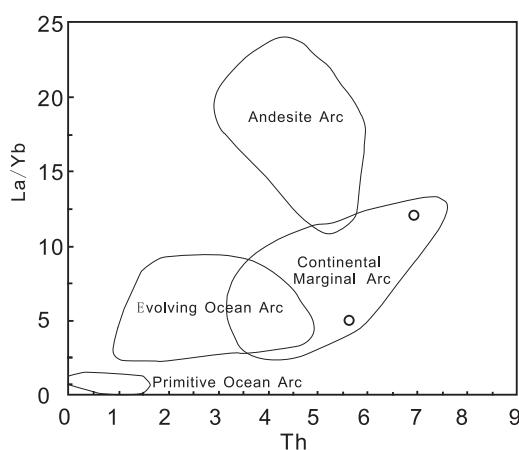
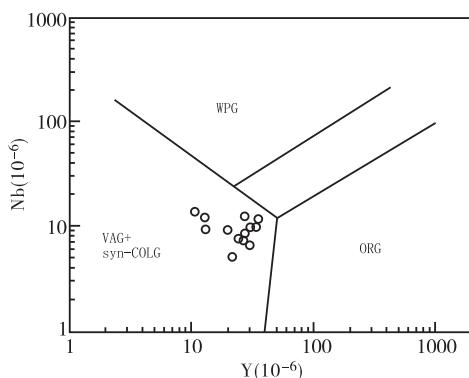
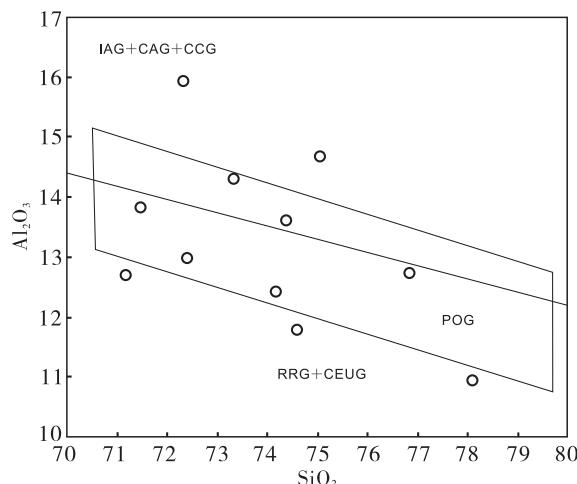


图 9 五方形柱状节理图

Fig. 9 Five square columnar joint

3.2 地球化学特征

在安山岩 $\text{Th} - \text{La}/\text{Yb}$ 图解上(图 10),有 2 件安山岩投在大陆边缘弧区域内。酸性火山岩 $\text{Y} - \text{Nb}$ 图解上(图 11),所有样品均投在 VAG + syn - COLG 区(火山弧花岗岩 + 同碰撞花岗岩)。在酸性火山岩 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图解上(图 12),多数样品投在 POG 区(造山后花岗岩类)。

图 10 安山岩 $\text{Th} - \text{La}/\text{Yb}$ 图解Fig. 10 Andesites $\text{Th} - \text{La}/\text{Yb}$ diagram图 11 酸性火山岩 $\text{Y} - \text{Nb}$ 图解Fig. 11 Acid volcanics $\text{Y} - \text{Nb}$ diagram图 12 酸性火山岩 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ 图解Fig. 12 Acid volcanics $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram

综合牦牛山组火山岩的地质特征、岩石组合特征、岩石地球化特征,牦牛山组酸性火山具岛弧火山岩特征,产于造山后碰撞环境。该特征与前人研究结果一致,晚志留世—早泥盆世时期,柴达木盆地北缘和东昆仑地区广泛发育具岛弧地球化学特征的花岗岩,被认为是后碰撞阶段伸展作用的产物(孟繁聪等,2005;吴才来,2008;张耀玲,2010;刘彬等,2012)。形成于晚志留世—晚泥盆世的牦牛山火山岩代表了古生代特提斯洋盆闭合的时间。表明中志留世末,洋盆基本闭合,晚志留世—晚泥盆世,本区已处于隆升状态。安山岩具有大陆边缘弧地球化学特征,上覆石炭系出现滨海—浅海相碳酸盐地层,标志着在泥盆纪末期该区由陆转海,拉开了海相沉积环境的序幕。

4 时代探讨

在区域上,周春景、胡道功等(2010)在东昆仑三道湾地区该组上部流纹英安斑岩中取得锆石 U - Pb 年龄(425 ± 2.6) Ma;张耀玲、胡道功等(2010)在东昆仑该组火山岩中上部英安岩中取得 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄(406 ± 2.9) Ma;刘彬、马昌前等(2013)在昆仑中泥盆世冰沟正长花岗岩中取得锆石 U - Pb 年龄(391 ± 3) Ma。本次工作在该区牦牛山组火山岩中测得 4 个样品锆石 U - Pb 年龄,分别为 (369.2 ± 3.3) Ma, (374.8 ± 3.1) Ma, (392.4 ± 3.3) Ma, (385.8 ± 6.1) Ma, 限定了该区火山岩形成时间为

中—晚泥盆世。在阿木尼克山南坡牦牛山组火山岩上部沉积岩夹层中采到 *Lepidodendropsis* sp. (图 13), 在牦牛山地区碎屑岩夹层采到植物化石 *Lepidophloem rhombicum*, 在肯得可克地区采到植物化石 *Sublepidodendron mirabile*、*Cyclostigma kil-torkense*, 上述化石多为晚泥盆世标准。综上所述, 研究区牦牛山组火山岩形成时间应为中—晚泥盆世。



图 13 鳞木化石图

Fig. 13 Lepidodendron fossil

5 结论

(1) 柴北缘阿木尼克山地区牦牛山组火山岩以一套陆相喷发中—酸性火山岩为主, 岩性横向差异较大, 地球化学特征反映为 I 型和 S 型花岗岩特征, 表明岩浆房源区具有地壳及下地壳产物, 属混源演化产物, 且酸性岩地球化学特征均反映为岛弧特征, 物源区是否含有滩间山群老结晶基底还有待研究。

(2) 研究区牦牛山组火山岩锆石 U—Pb 年龄 369~392 Ma, 限定该区火山岩形成时间为中—晚泥盆世, 较晚于东昆仑地区。

(3) 大面积的陆相火山活动表明在中—晚泥盆世时期古特提斯洋已关闭, 该区主体处于隆升状态, 在晚泥盆世末期—石炭纪时期, 该区出现海相沉积岩, 表明特提斯洋重新打开, 接受沉积。

致谢: 在野外工作中得到四川省众成矿业公司领导、同事的支持和关怀, 论文编写得到李建兵高级工程师的指导, 地球化学分析测试在中国地质大学(北京)地学实验中心完成, 在此一并感谢! 感谢贵刊编辑部对本文进行了认真审阅, 并提出了建设性

修改意见!

参考文献(References):

- 陈守建, 李荣社, 计文化, 等. 昆仑造山带晚泥盆世沉积特征及构造古地理环境[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1):44-51.
- CHEN SJ, LI Rongshe, JI Wenhua, et al. The Deposition Characteristics and Tectono-paleogeographic Environment of Kunlun Orogenic Belt in late Devonian[J]. Geotectonica et Metallogenica, 2007, 31(1):44-51.
- 冯乔, 秦宇, 付锁堂, 等. 柴达木盆地北缘乌兰县牦牛山组碎屑岩锆石 U—Pb 定年及其地质意义[J]. 沉积学报, 2015, 33(3):486-499.
- FENG Qiao, QIN Yu, FU Suotang, et al. U—Pb Age of Detrital Zircons and its geological significance from Maoniushan Formation in the Wulan Country, Northern Margin of Qaidam Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(3):486-499.
- 李荣社, 计文化, 赵振明, 等. 昆仑早古生代造山带研究进展[J]. 地质通报, 2007, 26(4):373-382.
- LI Rongshe, JI Wenhua, ZHAO Zhenming, et al. Progress in the study of the Early Paleozoic Kunlun orogenic belt [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26 (4): 373-382.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. 地学前缘, 2012, 19(5):244-254.
- LI RB, PEI XZ, LI ZC, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5):244-254.
- 陆露, 吴珍汉, 胡道功, 等. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U—Pb 年龄及构造意义[J]. 岩石学报, 2010, 26 (4): 1150-1158.
- LU LU, WU Zhenhan, HU Daogong, et al. Zircon U—Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4):1150-1158.
- 刘彬, 马昌前, 张金阳, 等. 东昆仑造山带东段早泥盆世侵入岩的成因及其对早古生代造山作用的指示[J]. 岩石学报, 2012, 28(6):1785-1807.
- LIU B, MA CQ, ZHANG JY, et al. Petrogenesis of Early Devonian intrusive rocks in the east part of Eastern

- Kunlun Orogen and implication for Early Palaeozoic orogenic processes[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(6):1785-1807.
- 刘彬,马昌前,郭盼,等.东昆仑中泥盆世A型花岗岩的确定及其构造意义[J].地球科学,2013,8(5):947-962.
- LIU B, MA CQ, GUO P, et al. Discovery of the Middle Devonian A-type Granite from the Eastern Kunlun Orogen and Its Tectonic Implications [J]. Diqu Kexue-Zhongguo Dizhi Daxue Xuebao/Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2013, 38 (5): 947-962.
- 孙崇仁.青海省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- SUN Chongren. Stratigraphy of Qinghai Province[M]. Wuhan:China University of Geoscience Press,1997.
- 孟繁聪,张建新,杨经绥.柴北缘锡铁山早古生代HP/UHP变质作用后的构造热事件——花岗岩和片麻岩的同位素与岩石地球化学证据[J].岩石学报,2005,21(1):45-56.
- MENG F C, ZHANG JX, YANG JS , Tectono-thermal event of post-HP/UHP metamorphism in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: isotopic and geochemical evidence of granite and gneiss [J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, 21(1):45-56.
- 吴才来,郜源红,吴锁平,等.柴北缘西段花岗岩锆石SHRIMP U-Pb定年及其岩石地球化学特征[J].中国科学D辑:地球科学,2008,38(8): 930-949.
- WU CL, GAO YH, WU SP, et al. Geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb dating of granitoids from the west segment of the North Qaidam[J]. Chinese Sciences D: Geoscience, 2008,38(8):930-949 in Chinese.
- 许志琴.造山的高原——青藏高原的地体拼合、碰撞造山及隆升机制[M].北京:地质出版社,2007.
- XU Zhiqin. Orogenic Plateau: Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House,2007.
- 夏文静,牛漫兰,闫臻,等.柴北缘牦牛山地区牦牛山组沉积相组合特征[J].地质学报,2014,88(5):943-955.
- XIA WJ, NIU ML, YAN Z, et al. Sedimentary Facies of the Maoniushan Formation in Maoniushan Area along the Northern Margin of Qaidam Terrane[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(5):943-955.
- 杨学明,杨晓勇,陈双喜.岩石地球化学[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2000;40-166.
- YANG XM, YANG XY, CHEN SX. Petrogeochemistry. In: Rollison RH (ed.)[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2000:40-166.
- 朱小辉,陈丹玲,刘良,等.柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义[J].岩石学报,2014,30(3):822-834.
- ZHU XH, CHEN DL, LIU L, et al. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back-arc type ophiolite in Lvliangshan area, North Qaidam [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3):822-834.
- 周春景,胡道功,BAROSH PJ,等.东昆仑三道湾流纹英安斑岩锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].地质力学学报,2010,16(1):28-35.
- ZHOU CJ, HU DG, BAROSH PJ, et al. Zircon U - Pb Dating of the Rhyolite - Dacite Porphyry in the Sandawowan of East Kunlun Mountains and Its Geological Significance[J]. Journal of Geomechanics, 2010, 16(1): 28-35.
- 张雪亭,杨生德.青海省区域地质概况[M].北京:地质出版社,2007.
- ZHANG Xueting, YANG Shengde. The Regional Geology of Qinghai Province [M]. Beijing: Geological Publishing House,2007.
- 张耀玲,胡道功,石玉若,等.东昆仑造山带牦牛山组火山岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及其构造意义[J].地质通报,2010,29(11):1614-1618.
- ZHANG YL, HU DG, SHI YR. SHRIMP zircon U - Pb ages and tectonic significance of Maoniushan Formation volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(11):1614-1618.