

白银厂酸性火山岩地球化学特征及成因分析

覃伟¹, 陈守余^{1,2}, 赵江南^{1,2}, 董凯¹, 田光礼¹

(1. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 甘肃白银厂矿田是我国著名的火山成因块状硫化物矿床产地, 赋矿岩石主要为酸性火山岩(石英角斑岩和石英角斑凝灰岩)。文章通过对白银厂矿区酸性火山岩的岩相学和岩石地球化学特征研究, 结果表明: 1) 岩石发生了低绿片岩相的变质作用, 镜下可见明显的绢云母化、绿泥石化等蚀变作用, 造成了岩石 K、Ca、Na、Rb 等活泼元素的迁移; 2) 岩石具有高硅、低钛、弱铝、贫镁, 亏损高场强元素 Nb、Ta, 以及明显的 Sr、P、Ti、Eu 的负异常和 Th、U、Pb 正异常特征, 表明本区酸性火山岩可能为下地壳基性岩重熔的产物, 源区存在斜长石、磷灰石以及钛铁矿等矿物的残留, 并且岩浆在演化过程中经历过围岩的混染与弱的分离结晶作用; 3) 结合北祁连的区域构造演化、岩浆活动以及本区火山岩的年代学资料, 认为该酸性火山岩可能处于由岛弧向弧后盆地过渡的环境中。

关键词: 酸性火山岩; 地球化学; 构造环境; 白银厂; 甘肃省

中图分类号: P588.14; P618.2 **文献标识码:** A

0 引言

产出在北祁连造山带东北部的白银矿田, 是我国重要的海相火山成因块状硫化物矿床产地, 现已发现的铜多金属矿有折腰山、火焰山、小铁山、铜厂沟、四个圈等矿床, 具有较高的经济价值。自矿田发现以来, 已有不少学者对该地火山岩的岩石学、地球化学、年代学等方面做了大量的研究工作, 促进了矿床成因及形成时代的研究, 但至今对容矿火山岩的成因及形成环境还存在争议, 这种争议主要产于对成岩时代认识的分歧上。

早期夏林圻^[1]、夏祖春^[2]、左国朝^[3]等人根据矿区及外围的化石及 Sm-Nd、Rb-Sr 同位素等时线年龄将白银厂火山岩划归为寒武纪, 因此部分学者认

为该地火山岩形成于大陆裂谷环境^[1,4-5], 由下地壳岩石重熔形成。随着同位素理论的发展及测试仪器精度的提高, 对白银厂酸性火山岩的成岩时代有了新的认识, 由锆石 U-Pb 获得的等时线年龄认为其形成于奥陶纪时期^[6-7], 基本得到了一致认可, 据此部分学者认为火山岩是陆缘火山弧作用的产物^[8-9]。然而, 俯冲环境由于其复杂性, 同区基性火山岩和酸性火山岩可能存在很大区别, 如王焰等^[10]认为该区基性火山岩形成于活动陆缘环境, 而酸性火山岩则形成于洋内岛弧环境, 二者不存在成因上的联系; 近期, 有研究资料^[7]认为基性火山岩和酸性火山岩为同源玄武质岩浆演化的产物。因此, 对于白银厂酸性火山岩究竟是大陆裂谷环境下地壳岩石重熔形成的, 还是活动陆缘环境下玄武质岩浆高度分异或地壳岩石深熔作用形成的, 尚需进行细致探讨。

本文将在前人研究的基础上, 通过对白银厂石

收稿日期: 2017-05-11; **改回日期:** 2017-09-14; **责任编辑:** 王传泰

基金项目: 中国地质调查局“甘肃省白银厂影响找矿突破的关键地质问题及找矿预测研究”项目(编号:12120114050101)资助。

作者简介: 覃伟(1991—), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为矿产普查与勘探。通信地址: 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, 中国地质大学(武汉)资源学院; 邮政编码: 430074; E-mail: 394472713@qq.com

通信作者: 陈守余(1956—), 男, 教授, 博导, 长期从事矿产综合勘查与定量评价的教学与科研工作。通信地址: 湖北省武汉市洪山区鲁磨路 388 号, 中国地质大学(武汉)资源学院; 邮政编码: 430074; E-mail: 45321870@qq.com

英角斑岩、石英角斑凝灰岩的岩石学、地球化学系统的分析研究工作,探讨北祁连东段酸性火山岩的成因及构造环境,进一步为白银矿田的成矿环境提供理论依据。

1 区域地质背景和岩石学特征

北祁连造山带地处华北地台与柴达木地块之间(图 1a),呈 NW 向展布,长约 1 200 km,宽约 100~300 km,经历了寒武纪大陆边缘裂谷盆地、早奥陶世成熟洋盆、中晚奥陶世大陆边缘沟-弧-盆体系以及志留-泥盆纪的碰撞造山演化过程^[13-16]。该造山带主要由早古生代的混杂堆积、蓝片岩、蛇绿岩、岛弧火山岩,以及志留系复理层、泥盆系磨拉石建造等组成;其北侧为阿拉善地块,南缘与中祁连地块北缘断裂相接,西部被阿尔金走滑断裂所截。

研究区位于北祁连造山带东部的岛弧火山岩带上(图 1b),该火山岩带主要沿走廊南山主脊分布,向东经永登沿至白银厂,由基性、中性、酸性及火山碎屑岩组成,为一套低绿片岩相的海相火山岩^[17]。前人为与正常火山岩区分,将此定为细碧角斑岩系火山岩(部分学者称为变玄武岩、变流纹岩);其岩石类型主要有细碧岩、角斑岩、石英角斑岩、石英角斑凝灰岩、石英角斑凝灰熔岩、集块岩以及绿片岩、凝

灰岩、千枚岩等(图 1c),且中酸性及基性火山岩占主要地位,有双峰式火山岩的特征。此次笔者选取的研究样品主要为石英角斑岩和石英角斑凝灰岩,其岩石学特征如下:

(1)石英角斑凝灰岩(图 2a、b、c):外观呈灰绿色,斑状结构,块状构造。斑晶成分多见石英和钠长石;石英灰白色,粒径 1 mm 左右,呈次棱角状或次浑圆状,含量约 20%,多数被基质交代呈碎片状;钠长石灰色,粒径 1~2 mm,见聚片双晶结构。基质主要为火山灰,以硅质和绢云母为主,含量约 80%;绢云母以鳞片状集合体不均匀分布。岩石大多遭受过蚀变作用、主要以绿泥石化、绢云母化为主。

(2)石英角斑岩(图 2d、e、f):外观呈灰白、灰绿至浅肉红色,斑状结构,块状构造,具弱片理化。斑晶为石英和钠长石;石英呈次棱角状或棱角状,形状不规则,表面一般不干净,大小 1~2 mm,含量约 30%;钠长石呈半自形或他形,粒径约 1 mm,多被蚀变成绢云母。基质以硅质和绢云母为主,具霏细结构。

2 样品采集及测试

本次研究的样品主要采集于折腰山、火焰山矿区附近,采样位置见图 1c 所示。采样尽量选取弱蚀变、无矿化的新鲜岩石露头作为采集对象,以保证样

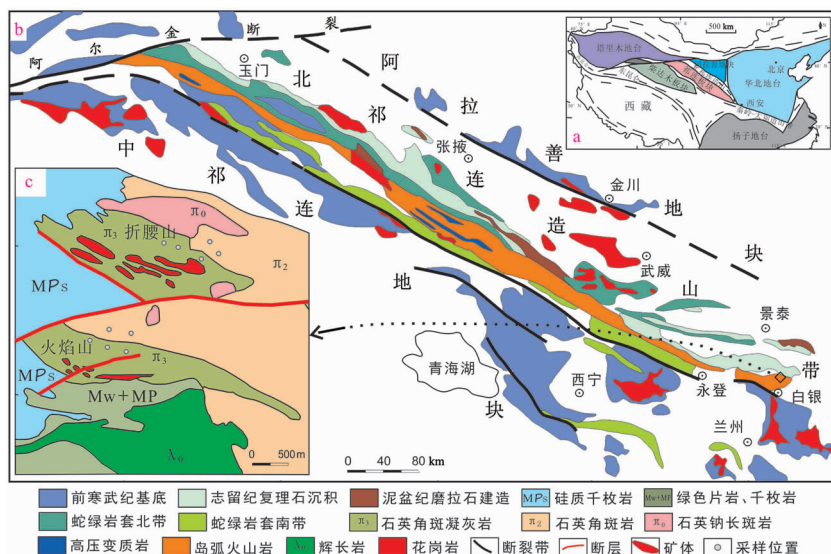


图 1 北祁连山早古生代构造火山岩带及研究区地质简图^[11-12]

Fig. 1 Geological sketch of the Early Paleozoic volcanic rock belt in North Qilian and the study area

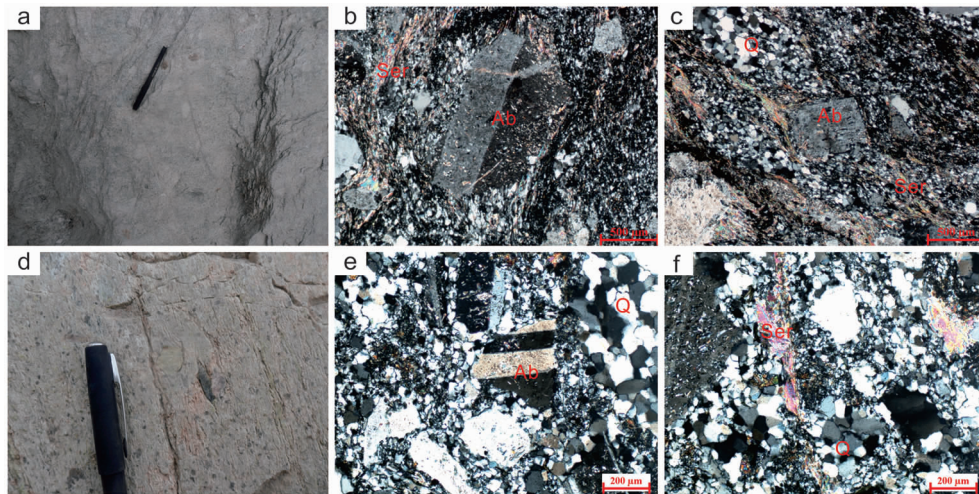


图 2 白银厂酸性火山岩岩石学特征

Fig. 2 Petrological characteristics of the acidic volcanic rocks from Baiyinchang

a. 石英角斑凝灰岩“外观”; b, c. 石英角斑凝灰岩显微照片(+);

d. 石英角斑岩“外观”; e, f. 石英角斑岩显微照片(+)

Ab. 钠长石; Q. 石英; Ser. 绢云母

品的有效性。

样品测试由中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所完成。主量元素采用 XRF 测定,详细方法见文献[18];微量元素含量(含稀土元素)在等离子质谱仪(ICP-MS)上进行,具体操作流程可见文献[19],测试误差普遍小于 10%。最后选取烧失量少于 5% 的 10 件样品数据作为研究对象,数据结果见表 1 所述。

3 地球化学特征

前人研究认为,蚀变作用及中、低级变质作用可以造成某些主化学成分(如 K、Na、Ca、Si)和大离子亲石元素 Rb、Ba、Sr 等化学成分发生一定程度的改变和迁移,这些元素已无法可靠的反映岩石成因信息,而 HFSE 和 REE 由于其独特的化学特征和原子结构,活动性较弱,变化较小^[20]。因此,对于白银厂酸性火山岩,需要考虑变质作用对岩石化学成分的影响,故后续将主要采用 HFSE 及 REE 元素进行讨论。

3.1 主量元素

从表 1 中可以看出,该区酸性火山岩具有高 SiO_2 含量($w(\text{SiO}_2) = 68.00\% \sim 78.00\%$),低 TiO_2 ($w(\text{TiO}_2) < 0.4\%$),较高全碱($w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) = 1.54\% \sim 6.03\%$),贫 Al_2O_3 (平均 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) = 12.26\%$), MnO 、 MgO 及 P_2O_5 ,变化范围较广的

Na_2O ($w(\text{Na}_2\text{O}) = 0.17\% \sim 5.14\%$)、 CaO ($w(\text{CaO}) = 0.04\% \sim 4.92\%$) 的地球化学特征。高硅、低钛特征,与典型岛弧火山岩表现一致;而变化范围较大的 Na_2O 、 CaO 则可能与岩石中钠长石的绢云母化蚀变有关,蚀变作用造成了 K、Ca、Na 等元素的迁移。由于该区火山岩是遭受了蚀变的海相火山岩,因而不适合采用 TAS 分类图解,但可以利用 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ 、 $w(\text{Zr}) - w(\text{Y})$ 图解对岩石进行分类。

通过投图发现,在 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ 图解(图 3a)中,样品全部落入流纹岩大类,属于长英质火山岩类;在 $w(\text{Zr}) - w(\text{Y})$ 图解(图 3b)中,石英角斑凝灰岩主要落入拉斑系列和过渡区间,而石英角斑岩全部落入钙碱系列区域内。可以看出,本区酸性火山岩(从石英角斑凝灰岩到石英角斑岩)具有从拉斑系列向钙碱系列过渡的特点。

3.2 微量元素

白银厂流纹岩稀土元素总量变化范围较广($w(\Sigma\text{REE}) = 58.21 \times 10^{-6} \sim 334.00 \times 10^{-6}$),其中石英角斑凝灰岩稀土总量 $w(\Sigma\text{REE}) = 212.66 \times 10^{-6} \sim 334.00 \times 10^{-6}$ 明显高于石英角斑岩($w(\Sigma\text{REE}) = 58.21 \times 10^{-6} \sim 93.50 \times 10^{-6}$);轻重稀土本身分馏程度不同,相对于重稀土,轻稀土明显富集且分馏明显,呈现出右倾的分配模式(图 4a),而重稀土较为平坦。所有样品均表现出中等负铕异常(δEu 值介于 0.27~0.55 之间,平均值 0.45),可能与斜长石的分离结晶或部分熔融过程中源区残留有关。

表 1 白银厂酸性火山岩主量元素和微量元素分析结果

Table 1 Analysis of major and trace elements of the acidic volcanic rocks from Baiyinchang

岩性	石英角斑凝灰岩						石英角斑岩			
样号	ZH1-1	ZH1-2	ZH1-3	ZH1-5	ZH1-6	ZH1-9	ZH2-5	ZH2-12	ZH2-13	ZH-2-20
SiO ₂	69.70	70.60	70.50	78.00	72.50	69.20	69.40	74.36	71.07	68.00
TiO ₂	0.32	0.30	0.19	0.22	0.37	0.27	0.23	0.23	0.34	0.32
Al ₂ O ₃	12.30	13.35	13.90	10.65	11.40	12.50	15.58	11.31	10.04	12.81
TFeO	3.16	2.96	2.06	2.25	4.01	2.88	2.20	4.21	8.77	5.99
MnO	0.05	0.04	0.06	0.04	0.11	0.11	0.01	0.03	0.04	0.08
MgO	0.72	0.56	1.24	0.76	0.53	1.12	1.10	2.62	3.14	5.23
CaO	3.17	2.53	2.87	2.46	2.73	4.92	1.35	0.04	0.08	0.07
Na ₂ O	5.14	4.03	2.85	2.37	4.03	2.52	2.21	0.20	0.17	0.23
K ₂ O	1.16	2.04	2.09	1.23	1.08	1.92	2.77	2.22	1.37	1.77
P ₂ O ₅	0.08	0.07	0.04	0.03	0.08	0.05	0.04	0.04	0.09	0.06
LOI	3.78	2.46	3.55	1.60	3.04	4.17	3.77	3.42	4.62	4.63
Totle	95.8	96.48	95.8	98.01	96.84	95.49	94.89	95.26	95.11	94.562
Ni	1.70	0.80	3.20	1.30	1.00	1.40	0.50	0.50	1.00	4.00
Rb	20.40	41.30	49.60	19.20	9.70	23.00	55.60	35.50	20.40	26.80
Ba	210	280	260	120	120	140	388	619	367	403
Th	3.90	5.10	5.60	2.80	2.40	2.00	7.26	5.43	7.39	5.83
U	0.70	0.60	1.00	0.90	0.80	0.80	2.26	1.65	1.66	1.88
K	10090	17620	18180	10458	9294	16756	24326	19421	12004	15598
Nb	1.90	1.80	2.20	3.40	2.40	3.50	4.30	2.90	4.60	3.10
Ta	0.17	0.17	0.21	0.23	0.17	0.24	0.40	0.30	0.30	0.30
Pb	44.30	21.00	21.20	17.20	6.50	10.80	61.00	12.00	161.00	19.00
Sr	161.0	144.0	158.0	119.0	66.20	96.10	122.5	22.00	37.90	21.70
P	365	317	182	134	361	229	198	183	413	286
Hf	1.90	2.00	2.30	2.70	2.90	1.90	4.30	3.00	2.30	2.70
Zr	71.40	74.20	83.60	102.5	104.5	66.30	158.0	113.00	87.00	99.00
Ti	2002	1864	1189	1345	2290	1695	1453	1447	2143	2028
Y	48.90	51.30	30.70	29.40	30.00	27.90	16.40	10.60	17.90	17.00
w(Nb)/w(Ta)	11.18	10.59	10.48	14.78	14.12	14.58	10.75	9.67	15.33	10.33
w(Zr)/w(Hf)	37.58	37.10	36.35	37.96	36.03	34.89	36.74	37.67	37.83	36.67
La	48.70	42.10	77.70	66.40	81.70	80.00	15.90	13.90	20.70	12.10
Ce	111.0	88.90	143.0	124.50	154.00	146.00	30.20	25.80	39.80	22.80
Pr	12.20	9.30	13.60	12.30	15.20	14.50	3.27	2.83	4.39	2.58
Nd	45.00	34.00	47.20	43.40	52.50	50.00	11.50	9.80	15.10	9.40
Sm	8.30	8.10	8.40	8.30	9.30	9.00	2.27	1.89	2.87	1.95
Eu	1.00	1.16	1.40	1.30	1.40	1.30	0.20	0.24	0.43	0.34
Gd	7.30	7.60	6.80	6.80	7.40	6.90	2.19	1.72	2.67	2.12
Tb	1.00	1.20	0.90	0.90	0.90	0.90	0.37	0.28	0.43	0.37
Dy	6.60	7.70	5.00	5.20	5.20	4.80	2.29	1.61	2.71	2.30
Ho	1.20	1.50	0.90	0.90	0.90	0.80	0.51	0.34	0.57	0.52
Er	3.70	4.60	2.50	2.60	2.60	2.40	1.62	1.16	1.73	1.58
Tm	0.60	0.70	0.40	0.40	0.40	0.40	0.27	0.20	0.25	0.24
Yb	4.40	5.20	2.40	2.40	2.30	2.20	1.93	1.51	1.59	1.63
Lu	0.50	0.60	0.20	0.20	0.20	0.20	0.35	0.25	0.26	0.28
w(ΣREE)	251.5	212.6	310.4	275.6	334.0	319.4	72.87	61.53	93.50	58.21
w(LREE)	226.2	183.5	291.3	256.2	314.1	300.8	63.34	54.46	83.29	49.17
w(HREE)	25.30	29.10	19.10	19.40	19.90	18.60	9.53	7.07	10.21	9.04
w(LREE)/w(HREE)	8.94	6.31	15.25	13.21	15.78	16.17	6.65	7.70	8.16	5.44
w(La) _N /w(Yb) _N	7.94	5.81	23.22	19.85	25.48	26.08	5.91	6.60	9.34	5.32
δEu	0.38	0.44	0.55	0.51	0.50	0.49	0.27	0.40	0.47	0.51
δCe	1.09	1.05	0.99	0.99	1.00	0.97	0.97	0.95	0.97	0.95

量单位: w(氧化物)/%, w(微量元素、稀土元素)/10⁻⁶

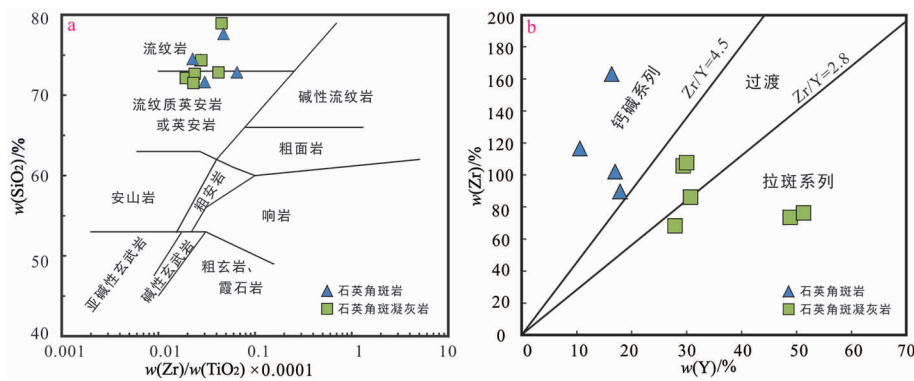


图3 白银厂酸性火山岩 $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ 分类图解(a)、 $w(\text{Zr})$ — $w(\text{Y})$ 分类图解(b)

(a图解底图据文献[21];b图解底图据文献[22])

Fig. 3 $w(\text{SiO}_2)$ — $w(\text{Zr})/w(\text{TiO}_2)$ (a) and $w(\text{Zr})$ — $w(\text{Y})$ (b)

diagrams of the acidic volcanic rocks from Baiyinchang

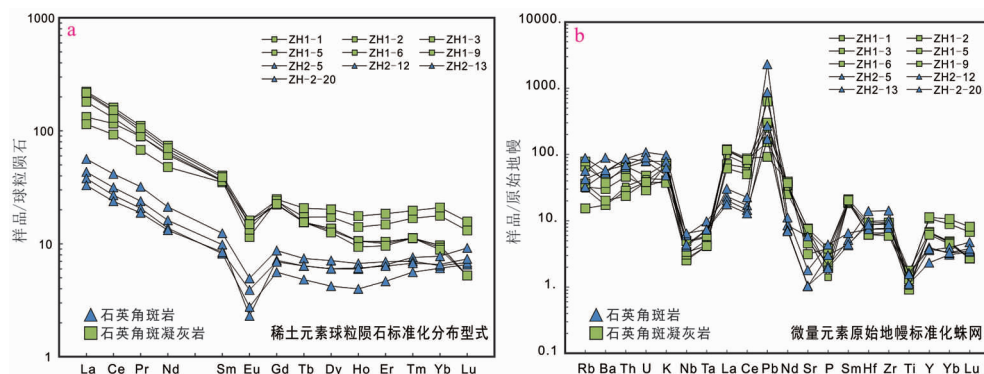


图4 白银厂酸性火山岩稀土配分模式图(a)和微量元素蛛网图(b)

(a. 球粒陨石标准化的球粒陨石标准值据文献[24];

b. 原始地幔标准化的原始地幔值据文献[25])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b) of the acidic volcanic rocks from Baiyinchang

在原始地幔标准化的微量元素蛛网图(图4b)上,本区酸性火山岩具有富集大离子亲石元素 Rb、Ba、K、Pb,亏损高场强元素 Nb、Ta 的特点;所有样品均具有明显的 Sr、P、Ti 的负异常,与大兴安岭低锆流纹岩特征类似^[23],表现出弧岩浆的特征。石英角斑岩与石英角斑凝灰岩微量元素特征基本一致,暗示二者可能为同一(同源)岩浆演化形成。

4 讨论

4.1 岩浆来源及演化

目前已知关于双峰式火山岩中流纹岩成因主要

有两种:一是由幔源玄武质岩浆分离结晶或玄武质岩石部分熔融形成^[26],基性与酸性火山岩来自同一源区,二者具有相似的地球化学特征^[27-28];二是由地壳岩石深熔作用形成^[29],可能有少量地幔物质的参与,基性与酸性火山岩源区不同,地球化学特征有很大区别^[30]。

从前人研究^[10,31]来看,白银厂酸性火山岩微量元素及同位素特征与基性火山岩都有很大区别,说明本区基性与酸性火山岩源区不同,酸性火山岩由玄武质岩浆经结晶分异作用形成的可能性不大,而可能与地壳岩石的部分熔融有关。虽然不同构造环境下形成的酸性火山岩具有明显不同的微量元素地球化学特征,但它们的化学成分基本受控于源区物

质^[32]。一般认为,分配系数相近的微量元素在岩浆形成过程中不易发生分离,其比值可以用于进行成岩过程的识别。本研究区岩石的 $w(\text{La})$ 值与 $w(\text{La})/w(\text{Sm})$ 值成正相关关系(图略),说明岩石成因应该主要受控于部分熔融;从石英角斑凝灰岩到石英角斑岩,可能是岩浆结晶分异的结果。而作为地球化学性质相近的(Nb、Ta)、(Zr、Hf)不相容元素对,则可以用来示踪岩浆源区的组成成分,因为由部分熔融及分离结晶作用引起 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 、 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值的变化基本可以忽略不计^[33]。但是,在长英质岩浆的演化过程中, $w(\text{Ta})$ 值会因为蚀变或矿化有少许增加^[34];而在遭受来自消减板片流体或熔体改造的地幔,Nb 与 Ta、Zr 与 Hf 将发生明显的分异^[35]。本研究区岩石的 $w(\text{Nb})/w(\text{Ta})$ 值存在一定变化(9.67~15.33),可能与后期的蚀变矿化有关,因为石英角斑岩 $w(\text{Ta})$ 值($0.3 \times 10^{-6} \sim 0.4 \times 10^{-6}$)普遍高于石英角斑凝灰岩($0.17 \times 10^{-6} \sim 0.24 \times 10^{-6}$),而 $w(\text{Zr})/w(\text{Hf})$ 值基本恒定不变(介于 36~38 之间,除一个样为 34.89),与原始地幔值($w(\text{Zr})/w(\text{Hf}) = 37$)、洋岛玄武岩为主的洋壳值($w(\text{Zr})/w(\text{Hf}) = 37.5$)^[25] 以及大陆下地壳值($w(\text{Zr})/w(\text{Hf}) = 37 \pm 1$)^[36] 接近,并且 Zr、Hf、Th、U 的丰度要远大于地幔的相应值,说明岩石不可能来源于原始地幔,而应该为地壳岩石部分熔融的产物;其较低 $w(\text{Ti})/w(\text{Zr})$ 值(0.87~2.68, <20)也说明了这一点^[37](属于地壳岩石部分熔融的产物)。另外,本研究区岩石低 Sr、弱 Al_2O_3 的特征与由俯冲洋壳形成的高 Sr、富 Al_2O_3 的埃达克岩明显不同^[38],因此也可以排除由俯冲洋壳部分熔融产生;而本研究区岩石高硅、弱铝、极低 Ni 含量($w(\text{Ni}) = 0.5 \times 10^{-6} \sim 4.0 \times 10^{-6}$)的特征,则表明初始岩浆受地幔物质的混染不明显。

本研究区岩石具有明显的 Eu 负异常,并强烈亏损 Sr、P、Ti 等元素,表明岩浆源区有斜长石、磷灰石、钛铁矿等矿物的残留^[39];由于斜长石中钙离子半径与 Ba 相似,斜长石的残留还会导致 Ba 的亏损,而本研究区酸性火山岩 Ba 并不亏损,并且 Pb 强烈富集,表明岩浆在上升过程中遭受了中上地壳围岩的混染。另外,本研究区岩石镜下可见钠长石斑晶,说明岩浆经历过弱的结晶分异作用。

综上,认为本区的酸性火山岩初始岩浆形成于下地壳的部分熔融,源区存在斜长石、磷灰石以及钛铁矿等矿物的残留,初始岩浆形成后,在上升演化过程中,遭受了围岩的同化混染作用和钠长石的分离

结晶作用。

4.2 构造环境

北祁连造山带作为中国重要的铜多金属成矿带,其形成与演化历史一直是地质学领域的研究热点,但这种研究主要集中在北祁连造山带的西段,对东段的研究工作相对较少,而且对于白银厂酸性火山岩的构造环境也存在较大分歧。部分学者认为形成于大陆裂谷环境^[5,40],产于此种环境下的酸性火山岩(流纹岩)具有明显富集 LREE 和 HFSE 的特点,一般为陆壳重熔的产物^[41],与本文所描述火山岩特征差别较大;也有学者认为形成于火山弧环境下,是岛弧向成熟岛弧转变的产物^[8]。本区岩石具有高硅、低钛,强烈富集 LILE(Rb、Ba、Th、U、Pb)、LREE,亏损 HFSE(Nb、Ta)元素的特征,其暗示形成环境与俯冲消减作用有关^[42-45],而此种环境下形成的岛弧火山岩,特别是酸性火山岩,其构造环境的判别是非常复杂的^[46],因为具有岛弧性质的火山岩既可以形成岛弧环境,也可以形成于弧后盆地初始环境^[47]。

白银厂酸性火山岩在花岗质岩石构造环境判别 $w(\text{Ta})-w(\text{Yb})$ 、 $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ 图解(图 5)中,表现出从火山弧到洋中脊过渡的特征,类似于东秦岭二郎坪群火山岩^[48],同时同区基性火山岩也具有从岛弧环境向弧后盆地过渡的特征^[7],暗示本区酸性火山岩可能处于一个过渡的环境中。前人的研究认为,长英质熔岩的喷发总是与弧后盆地打开的早期阶段相伴,由长英质熔岩和基性熔岩构成的双峰式岩套被认为是在岛弧裂谷化的基础上产生早期弧后盆地的标志^[49],岛弧裂谷化会使构造背景从相对挤压到拉张变化,引起 Y 含量升高,使火山岩表现出从拉斑性到钙碱性变化的特征^[46]。白银厂酸性火山岩具有从拉斑系列向钙碱系列过渡的特点(见图 3b),同时石英角斑岩 Y 含量介于 $10.6 \times 10^{-6} \sim 17.9 \times 10^{-6}$ 之间,小于 20×10^{-6} ,反映的是一种成熟岛弧火山岩特征^[12],说明本区酸性岩浆喷发于岛弧裂谷化的早期阶段,也即弧后盆地的初始阶段。

北祁连在奥陶纪早期经历了多岛洋的构造演化,形成了成熟的沟-弧-盆体系。在肃南白泉门、九个泉、景泰老虎山等地发现具有弧后盆地特征的俯冲杂岩组合及火山岩^[12,50-51],而且北祁连西段从南到北,火山岩具有从岛弧到弧后盆地连续出露的特征,说明走廊南山岛弧火山岩带北侧为弧后盆地构造环境。老虎山(细碧玢岩, $453.56 \text{ Ma} \pm 4.44 \text{ Ma}$)、扁都口(角斑岩, $464.59 \text{ Ma} \pm 21.89 \text{ Ma}$)以及

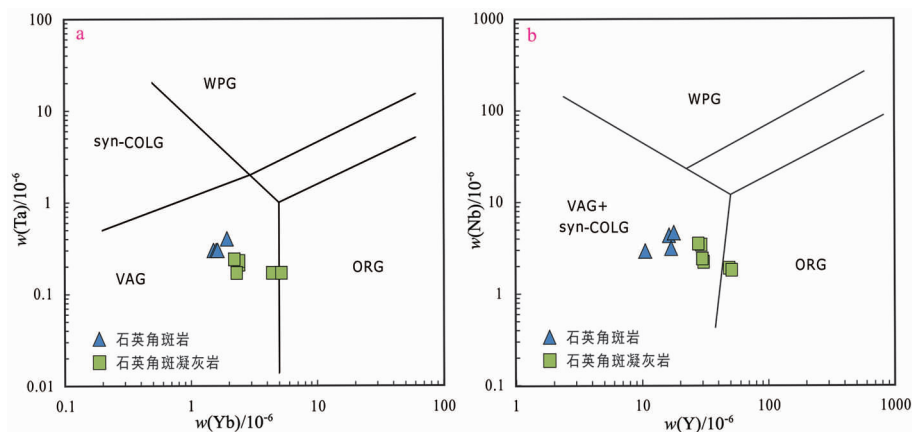


图5 白银厂酸性火山岩构造判别 $w(\text{Ta})-w(\text{Yb})$ 图解(a)和 $w(\text{Nb})-w(\text{Y})$ 图解(b)
(a、b图解底图据文献[49])

Fig. 5 Tectonic setting diagrams for the acidic volcanic rocks from Baiyinchang

WPG, 板内花岗岩; syn-COLG, 同碰撞花岗岩; VAG, 火山弧花岗岩; ORG, 洋中脊花岗岩

白泉门(玄武岩, $468.87 \text{ Ma} \pm 4.63 \text{ Ma}$)等地区的弧后盆地火山岩的 Sm-Nd 等时线年龄表明北祁连弧后盆地开启于中奥陶世, 东段稍晚于西段^[12], 此正好与白银厂酸性火山岩的成岩年龄(前人测得锆石 U-Pb 年龄为 $468 \sim 472 \text{ Ma}$ 和 $467.3 \text{ Ma} \pm 2.9 \text{ Ma}$)相吻合^[6-7], 从侧面佐证了本区酸性火山岩形成于弧后盆地初始阶段。

5 结论

(1) 白银厂酸性火山岩为流纹岩大类, 具有高硅、低钛的特点, 属拉斑系列向钙碱系列过渡的火山岩系。总体上, 表现为富集 LILE 和 LREE, 亏损 HFSE, 反映其具有俯冲消减环境下形成的岛弧火山岩地球化学特征。

(2) 通过对岩石微量元素的研究, 认为白银厂酸性火山岩不是玄武质岩浆分异演化的结果, 而是基性下地壳部分熔融的产物。

(3) 根据北祁连岛弧岩浆的演化资料以及本区火山岩的地球化学研究成果, 认为白银厂酸性火山岩形成于俯冲消减环境中; Y 元素含量的变化暗示其属于拉张背景下的岩浆活动, 表明其形成环境可能为弧后盆地初始阶段。

致谢: 甘肃省有色金属地质勘查局白银矿产勘查院李伟院长、方春家总工、周科慧高级工程师及王懋海高级工程师在野外对我们提供的帮助与支持,

中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所负责老师在样品测试中提供的指导与帮助, 在此一并深表谢忱!

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[J]. 西北地质科学, 1995(1): 1-28.
- [2] 夏祖春, 夏林圻, 徐学义. 北祁连山元古代末-寒武纪海相火山作用与成矿作用的关系[J]. 西北地质科学, 1995(1): 29-37.
- [3] 左国朝. 甘肃白银厂黄铁矿型多金属矿床火山岩系的时代[J]. 中国地质, 1985(3): 19-20.
- [4] 边千韬. 白银厂矿田地质构造及成矿模式[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- [5] 彭礼贵, 任有祥, 李智佩. 甘肃白银厂铜多金属矿床成矿模式[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [6] 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 等. 甘肃白银矿田变酸性火山岩锆石 LA-ICP-MS 测年——白银式块状硫化物矿床形成时代新证据[J]. 矿床地质, 2006, 25(4): 401-411.
- [7] 杜泽忠. 甘肃白银厂铜多金属矿田成矿作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014.
- [8] 郭原生, 王金荣, 谢宪丽, 等. 白银厂矿田早中寒武世火山岩地球化学及成因分析[J]. 岩石学报, 2000, 16(3): 337-344.
- [9] 王金荣, 郭原生, 翟新伟, 等. 甘肃白银厂矿田早-中寒武世火山岩形成的构造环境[J]. 高校地质学报, 2003, 9(1): 89-98.
- [10] 王焰, 刘良, 张洪培, 等. 白银矿田火山岩构造环境的地球化学证据[J]. 自然科学进展: 国家重点实验室通讯, 2001, 11(7): 715-720.
- [11] Song S, Niu Y, Su L, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China [J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1378-1401.
- [12] Yu S, Zhang J, Qin H, et al. Petrogenesis of the early Paleo-

- zoic low-Mg and high-Mg adakitic rocks in the North Qilian orogenic belt, NW China: Implications for transition from crustal thickening to extension thinning [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 107: 122–139.
- [13] 夏林圻, 夏祖春. 北祁连山早古生代洋脊—洋岛和弧后盆地火山作用[J]. *地质学报*, 1998, 72(4): 301–312.
- [14] 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.
- [15] 杜远生, 朱杰, 韩欣, 等. 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[J]. *地质通报*, 2004, 23(9): 911–917.
- [16] 徐学义, 何世平, 王洪亮, 等. 中国西北部地质概论[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [17] 张建新, 许志琴. 北祁连中段俯冲—增生杂岩/火山弧的时代探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 1997, 16(2): 112–119.
- [18] LI Xianhua, QI, et al. Petrogenesis of the Neoproterozoic bimodal volcanic rocks along the western margin of the Yangtze Block: New constraints from Hf isotopes and Fe / Mn ratios [J]. *科学通报(英文版)*, 2005, 50(21): 2481–2486.
- [19] LI Xianhua. Geochemistry of the Longsheng Ophiolite from the southern margin of Yangtze Craton, SE China [J]. *Geochemical Journal*, 1997, 31(5): 323–337.
- [20] Barrett T J, Maclean W H. Volcanic sequences, lithochemistry, and hydrothermal alteration in some bimodal volcanic-associated massive sulfide systems [C]//Modern & Ancient Settings, Ct Barrie & Md Hannington Eds; Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology, 1999.
- [21] Winchester J A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20(4): 325–343.
- [22] Ross PSS, Bédard JHBH. Magmatic Affinity Of Modern And Ancient Subalkaline Volcanic Rocks Determined From Trace-Element Discriminant Diagrams [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2009, 46(11): 823–839.
- [23] 林强, 葛文春, 吴福元, 等. 大兴安岭中生代花岗岩类的地球化学[J]. *岩石学报*, 2004, 20(3): 403–412.
- [24] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks[J]. *Journal of Geology*, 1985, 94(4): 632–633.
- [25] Sun S S. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- [26] Marjorie Wilson. Magmatism and the geodynamics of basin formation [J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 86(1–2): 5–29.
- [27] Geist D, Howard K A, Larson P. The Generation of Oceanic Rhyolites by Crystal Fractionation; the Basalt-Rhyolite Association at Volcn Alcedo, Galpagos Archipelago [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4): 965–982.
- [28] GARLAND F, HAWKESWORTH C J, MANTOVANI M S M. Description and Petrogenesis of the Paran Rhyolites, Southern Brazil [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(5): 1193–1227.
- [29] Sigurdsson H, Sigurdsson H. Generation of Icelandic rhyolites by melting of plagiogranites in the oceanic layer[J]. *Nature*, 1977, 269(269): 25–28.
- [30] Bryan S E, Riley T R, Jerram D A, et al. Silicic volcanism: An undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins [J]. *Special paper-Geological Society of America*, 2002, 362: 97–118.
- [31] 翟新伟. 白银矿田火山岩地球化学与构造背景研究——兼论构造成矿作用[D]. 兰州: 兰州大学, 2002.
- [32] Frster H J, Tischendorf G, Trumbull R B. An evaluation of the Rb vs (Y + Nb) discrimination diagram to infer tectonic setting of silicic igneous rocks [J]. *Lithos*, 1997, 40(2–4): 261–293.
- [33] Jörg A, Pfänder. Nb/Ta and Zr/Hf in ocean island basalts—Implications for crust-mantle differentiation and the fate of Niobium[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2007, 254(1–2): 158–172.
- [34] Dostal J. Contrasting behaviour of Nb/Ta and Zr/Hf ratios in a peraluminous granitic pluton (Nova Scotia, Canada) [J]. *Chemical Geology*, 2000, 163(1): 207–218.
- [35] Stolz A J. 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.
- [36] Rudnick R L. The composition and petrogenesis of the lower crust: A xenolith study [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1987, 92(B13): 13981–14005.
- [37] Francalanci L, Taylor S R, McCulloch M T, et al. Geochemical and isotopic variations in the calc-alkaline rocks of Aeolian arc, southern Tyrrhenian Sea, Italy: constraints on magma genesis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1993, 113(3): 300–313.
- [38] Marc J Defant & Mark S Drummond. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere [J]. *Nature*, 1990, 347(6294): 662–665.
- [39] Lightfoot P C, Hawkesworth C J, Sethna S F. Petrogenesis of rhyolites and trachytes from the Deccan Trap: Sr, Nd and Pb isotope and trace element evidence [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 95(1): 44–54.
- [40] 李智佩, 彭礼贵, 任有祥, 等. 白银厂火山碎屑岩岩石学与古海相火山作用[J]. *岩石学报*, 2000, 16(2): 183–190.
- [41] 王焰, 钱青, 刘良, 等. 不同构造环境中双峰式火山岩的主要特征[J]. *岩石学报*, 2000, 16(2): 169–173.
- [42] Wallace P J, Carmichael I S E. Quaternary volcanism near the Valley of Mexico; implications for subduction zone magmatism and the effects of crustal thickness variations on primitive magma compositions [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 135(4): 291–314.
- [43] Castillo P R, Solidum R U, Punongbayan R S. Origin of high

- field strength element enrichment in the Sulu Arc, southern Philippines, revisited [J]. *Geology*, 2002, 30(8): 707.
- [44] Castillo P R, Rigby S J, Solidum R U. Origin of high field strength element enrichment in volcanic arcs: Geochemical evidence from the Sulu Arc, southern Philippines [J]. *Lithos*, 2007, 97(3-4): 271-288.
- [45] Pearce J A, Peate D W. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas [J]. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 1995, 23(1): 251-285.
- [46] Pearce J A, Harris N 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.
- [47] 杨婧, 王金荣, 张旗, 等. 弧后盆地玄武岩(BABB)数据挖掘: 与 MORB 及 IAB 的对比[J]. *地球科学进展*, 2016, 31(1): 66-77.
- [48] 徐勇航, 赵太平, 陈伟. 东秦岭二郎坪群长英质火山岩成因及其对 VMS 型矿床成矿环境的制约[J]. *岩石学报*, 2009, 25(2): 399-412.
- [49] Pearce, J. A, Laan V D, et al. Boninite and harzburgite from ODP Leg 125 (Bonin-Mariana forearc): a case study of magma genesis during the initial stages of subduction [J]. *Proceedings of the Ocean Drilling Program Scientific Results*, 1992, 125: 623-659.
- [50] 张旗, 孙晓猛, 王岳明, 等. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(4): 366-393.
- [51] 宋述光. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化[J]. *地球科学进展*, 1997, 12(4): 351-365.

Geochemical Characteristics and Genetic Analysis of the Acidic Volcanic Rocks in Baiyinchang

QIN Wei¹, CHEN Shouyu^{1,2}, ZHAO Jiangnan^{1,2}, DONG Kai¹, TIAN Guangli¹

(1. *Faculty of Earth Resource, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;*

2. *State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)*

Abstract: Baiyinchang ore field in Gansu province is the place where occurs the famous volcanogenic massive sulfide deposit in China. The deposit is mainly controlled by the bi-model volcanics. The host rocks are acidic volcanics, including quartz keratophyre and quartz-keratophyre tuff. This article deals with petrography and geochemistry of the acidic rocks. The Result obtained 1): they were exposed to low grade green schist faies metamorphism with obvious alteration of sericitization and chloritization etc. Which can be seen under microscope and lead to migration of K, Ca, Na, Rb and other active elements. 2) The rocks are characteristics of high silicon, low titanium, poor aluminum and magnesium, depleted in high filed intensity elements of Nb, Ta, obvious negative anomalies of Sr, P, Ti, Eu, and positive anomalies of Th, U as well as Pb, suggesting that they were may be generated by partial remelting of the lower crust, with plagioclase, apatite, ilmenite and other minerals remaining in the source area, and the initial magma had undergone assimilation and weak fractional crystallization in the process of evolution, 3) Combining the magmatism and regional tectonic evolution of North Qilian and the chronological data of volcanic in this area, it is concluded that the acidic volcanics were formed in the transitional environment of the arc to the back-arc basin.

Key Words: Acidic volcanic rocks; Geochemistry; Tectonic setting; Baiyinchang; Gansu province