

文章编号:0258-7106 (2008) 03-0345-12

北祁连黑矿型和塞浦路斯型硫化物矿床 容矿火山岩的物质来源与形成环境*

张兰英, 曲晓明, 辛洪波

(中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘要 文章以白银厂石英角斑岩和石居里富钠玄武岩为代表,对产于北祁连造山带的“黑矿型”和“塞浦路斯型”铜多金属块状硫化物矿床的容矿火山岩做了系统的常量元素、微量元素、稀土元素及锶、钕、铅同位素分析。结果表明,这2种火山岩均表现出俯冲带岩浆作用的特征。所不同的是,白银厂“黑矿型”块状硫化物矿床容矿火山岩形成于活动大陆边缘的陆缘弧环境;石居里“塞浦路斯型”硫化物铜矿床形成于大洋板块内部的洋生弧环境。与各自的形成环境相对应,白银厂的石英角斑岩来源于原生地幔在俯冲板片流体参与下的部分熔融,岩浆在上升侵位过程中有部分大陆地壳物质混入。石居里的富钠玄武岩同样也是产生于原生地幔在板片流体作用下的部分熔融,但没有遭受陆壳物质混染。

关键词 地质学;块状硫化物矿床;容矿火山岩;成矿构造环境;物质来源;北祁连造山带

中图分类号: P618.41

文献标志码: A

Material source and formation environment of ore-hosting volcanic rocks in Kuroko-type and Cyprus-type sulfide deposits of North Qilian Mountains

ZHANG LanYing, QU XiaoMing and XIN HongBo

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

Abstract

The North Qilian orogen is one of the main metallogenic areas for sulfide deposits. Besides the sedimentation-exhalation (sedex) type Jingtieshan iron deposit, there exist lots of “Kuroko-type” and “Cyprus-type” copper polymetallic massive sulfide deposits related to acid and basic volcanism. With Baiyinchang and Shijuli areas as representatives, the authors made a systematical study of main elements, trace elements, rare elements and Sr, Nd, Pd isotopes of the ore-hosting volcanic rocks in these two types of ore deposits. The results indicate that the volcanic rocks have clear characteristics of subduction zone magmas. The difference between these two types lies in the fact that the ore-hosting volcanic rocks of the Baiyinchang “Kuroko-type” massive sulfide deposit were formed in an epicontinental arc environment of the active continental margin, whereas those of the Shijuli “Cyprus-type” sulfide copper deposit were formed in an ocean arc environment within the ocean plate. Correspondingly, the quartz keratophyre of Baiyinchang was derived from partial melting of the original mantle with the participation of the liquid of subduction plate and, during the upward migration and invasion of magma, the mingling of some continental crust. Similar to things of Baiyinchang, the source of the sodium-rich basalts of Shijuli came from partial melting of the original mantle with the participation of the liquid of subduc-

* 本文得到国土资源大调查项目“我国主要金属矿床模型研究”(编号 1212010634001)的资助

第一作者简介 张兰英,女,1983年生,硕士研究生。主要从事地球化学研究。Tel: 010-68999077; E-mail: zlyhappy9018@tom.com
收稿日期: 2007-08-27; 改回日期: 2008-03-03。李岩编辑。

tion plate, but with no mingling of continental materials.

Key words: geology, massive sulfide deposits, ore-hosting volcanic rocks, metallogenic tectonic environment, material source, North Qilian Orogen

北祁连造山带是中国主要的块状硫化物矿床成矿区,造山带内不仅发育以沉积岩为容矿岩石的镜铁山 SEDEX 型铁矿,还同时发育了分别以酸性和基性海相火山岩为容矿岩石的“黑矿型”和“塞浦路斯型”块状硫化物矿床。前者以产于造山带东段的白银厂矿田为代表,包括折腰山、火焰山、小铁山、四个圈等矿床;后者以产于造山带中段肃南县的石居里、九个泉等矿床为代表。过去的几十年中,白银厂矿田作为中国铜多金属块状硫化物矿床的典型代表已被做了广泛、深入的研究,但是对于其形成时代和成矿构造环境仍有不同的认识。夏林圻等(1995; 1998)和侯增谦等(2003)认为这些矿床是晚元古代—寒武纪在大陆裂谷环境中形成的;毛景文(2003)认为这些矿床形成于奥陶纪的沟-弧-盆体系。最新测年结果显示白银厂矿田容矿火山岩的锆石 U-Pb 年龄为 467.1~467.3 Ma(LAICPMS 法,何世平等, 2006),应属于中奥陶世的加里东期。对于石居里、九个泉等“塞浦路斯型”块状硫化物铜矿床目前尚无同位素年龄资料可查,杨合群等(2000)根据地层时代将其限定于中奥陶世弧后扩张脊环境。其他方面的研究多限于火山喷发方式、成矿水深条件及蚀变矿化等特征,对容矿火山岩生成演化机理方面的研究显示不足。本文基于北祁连造山带两种类型的块状硫化物矿床均形成于中奥陶世的事实,从造山带演化的角度探索两种含矿火山岩浆发生、发展的机理及其形成环境,进而总结区域成矿特点和控矿因素,为区域找矿预测提供理论依据。

1 区域成矿背景

北祁连山是在元古代褶皱基底上发展起来的,位于华北板块与柴达木—中祁连板块构造缝合带上(王荃等,1976;冯益民等,1995;左国朝,1996;汤立中等,1999;2000)。早古生代海相火山岩大面积发育,形成了不同类型的与海相火山岩有关的块状硫化物矿床(VMS)(图 1)。在北祁连加里东褶皱带,与海相火山岩有关的铜多金属硫化物矿床主要有两大类:一类是产于细碧-角斑岩系酸性端员的石英角斑岩层间的矿床,这类火山岩分布于造山带东段的

白银市一带,包括折腰山、火焰山、小铁山、四个圈等矿床,具有“黑矿型”块状硫化物矿床的基本特征(侯增谦等,2003)。另一类是产于细碧-角斑岩系基性端员的细碧岩-玄武岩层间的矿床,以分布于造山带中段肃南县的石居里、九个泉等矿床为代表,在东段白银市一带也有分布(如猪嘴哑吧、银洞沟等矿点),具有“塞浦路斯型”块状硫化物铜矿床的基本特征(宋忠宝等,2003)。从区域分布上看,“黑矿型”矿床规模大,分布比较集中,开发早,研究程度也高;“塞浦路斯型”矿床规模较小,区域上相对分散(图 1),开发晚,相应的勘查、研究程度也低,但找矿前景很大。

2 容矿火山岩的分布与岩相学

北祁连造山带位于华北板块与柴达木—中祁连板块构造缝合带上,主要火山岩沿 NWW-SEE 向的昌马—祁连—白银古断裂带分布,整体上构成了南、北两侧为残留洋壳型火山岩带,中部为岛弧型火山岩带的弧-沟-盆分布格局(图 1)(向鼎璞,1986)。该带主要由 3 条海相火山岩带构成(邹介人等,1994)。北带由东部老虎山至西部走廊南山北坡复向斜带组成,岩性为奥陶系基性火山岩;中带东起白银厂,向西至走廊南山南坡复背斜带,为寒武系—奥陶系的基性、酸性火山岩及次火山岩,以及各喷发阶段喷发的火山碎屑岩类;南带为走廊南山南坡复背斜带南侧、托赖山复向斜带,由前志留系变质火山岩组成,为分异特征不明显的奥陶纪基性-超基性、中基性和中酸性变质火山岩集中分布区。白银厂矿田位于走廊南山南坡火山岩带中的石膏洞—白银厂亚带,酸性火山岩在其中的铜厂沟—小铁山—折腰山、火焰山一带广泛出露;石居里矿田位于北火山岩带走廊南山北坡的中晚奥陶世火山岩带发育区,基性火山岩出露于其中的石居里 I—Ⅷ号矿沟及九个泉等地。

白银厂矿区容矿火山岩为初糜棱岩化石英角斑岩,岩石具斑状结构,块状构造,斑晶成分主要为钠长石、石英,粒度相差不大(0.1~0.25 mm),钠长石以板柱状为主,石英呈自形-他形粒状,基质由霏细状长英质和少量绢云母、绿泥石及帘石类矿物组成,

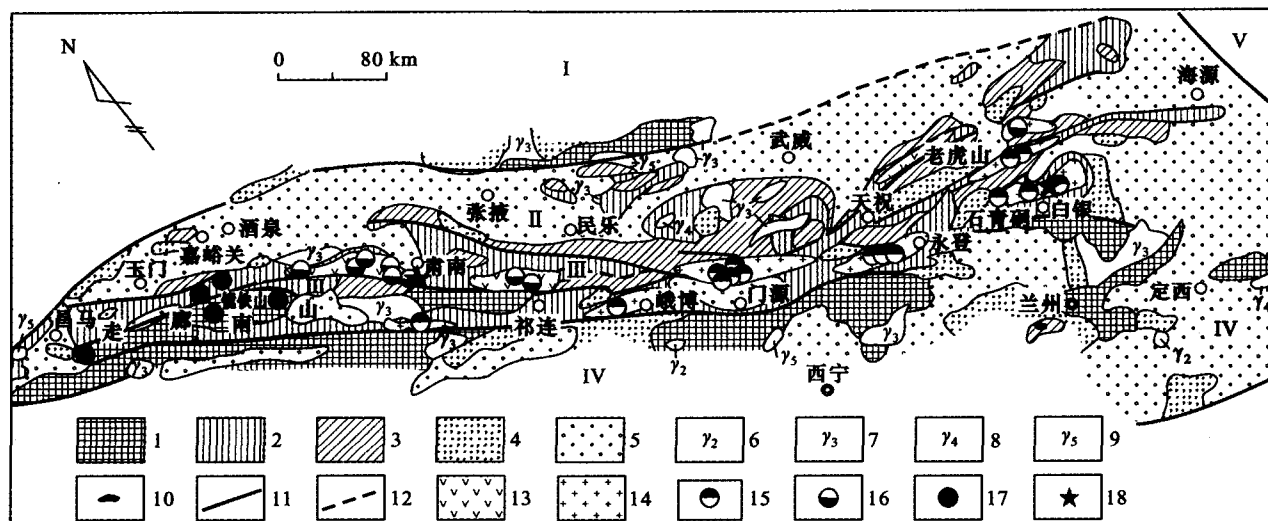


图 1 北祁连山构造分区及火山岩型铜、铁、多金属矿点分布略图(据向鼎璞,1986)

I—塔里木河-阿拉善地台; II—河西走廊褶皱带; III—北祁连山褶皱带; IV—中祁连山褶皱带; V—华北地台(鄂尔多斯地块)。1—前寒武纪褶皱; 2—加里东期褶皱; 3—华力西期褶皱; 4—中生代沉积; 5—新生代沉积; 6—前寒武纪侵入岩; 7—加里东期侵入岩; 8—华力西期侵入岩; 9—印支期-燕山期侵入岩; 10—超基性岩; 11—大断裂; 12—推测断裂; 13—基性火山岩; 14—酸性火山岩; 15—“黑矿型”矿床; 16—“塞浦路斯型”矿床; 17—铜多金属矿点; 18—采样位置

Fig. 1 Schematic geological map of North Qilian Mountains, showing tectonic units and mine spots of volcanic type copper, iron and polymetallic deposits (after Xiang, 1986)

I—Tarim River-Alxa platform; II—Fold zone of Hexi Corridor; III—Fold zone of North Qilian Mountains; IV—Fold zone of Middle Qilian Mountains; V—North China platform (Ordos massif). 1—Precambrian fold; 2—Caledonian fold; 3—Hercynian fold; 4—Mesozoic sediments; 5—Cenozoic sediments; 6—Precambrian intrusive rock; 7—Caledonian intrusive rock; 8—Hercynian intrusive rock; 9—Intrusive rock of Indosinian-Yanshanian; 10—Ultrabasic rock; 11—Gigantic fault; 12—Inferred fault; 13—Basic volcanic rocks; 14—Acid volcanic rocks; 15—“Kuroko-type” deposit; 16—“Cyprus-type” deposit; 17—Mine spots of copper-polymetallic deposit; 18—Sampling location

副矿物见有磷灰石、锆石、磁铁矿等。原岩矿物均经受了不同程度的蚀变交代与塑性变形, 出现糜棱岩化现象, 定向排列明显。蚀变作用有滑石化、绿泥石化、绿帘石化、绢英岩化、硅化及碳酸盐化等。

石居里矿区容矿火山岩为蚀变玄武岩, 具变余斑状结构, 块状构造。斑晶成分有钠长石、辉石, 含量约 25%, 基质成分有钠长石、辉石、石英等, 副矿物见有磷灰石、锆石、磁铁矿等。岩石蚀变比较明显, 包括绿泥石化、硅化、碳酸盐化, 主要沿裂隙充填交代。斑晶钠长石呈板状, 聚片双晶发育; 辉石柱粒状, 可被绿泥石交代。部分样品的基质长石呈板条状, 杂乱排列; 辉石呈柱粒状分布于长石格架中, 显示辉绿结构特点。

3 地球化学

3.1 分析方法

本文选用的容矿火山岩样品分别采自白银厂和石居里矿区。白银厂矿田早中寒武世酸性火山岩主

要分布在北祁连中部海相火山岩带中, 在铜厂沟—小铁山—折腰山一带广泛出露(郭原生等, 2003), 本文酸性石英角斑岩样品采集于这一火山岩带上的折腰山矿区, 具有代表性。白银厂矿区的石英角斑岩样品采自 2 处, 一为折腰山露天采坑的东壁 (GBY-54、GBY-55、GBY-56), 火山岩呈数米到数十米的团块状产于蚀变破碎带中, 相对周围岩石受后期改造较轻, 较好地保留了原岩特征; 另一处位于折腰山矿体南部约 2 km 处 (GBY-41、GBY-43、GBY-44), 岩石层理稳定, 与区域地层一致, 产状为 $228^{\circ} \angle 76^{\circ}$, 未遭受后期蚀变改造。镜下观察 2 处火山岩的结构和矿物组成基本一致; 石居里矿区的岩石样品采自 VIII 号沟沟口, 岩石蚀变较弱, 呈深灰-灰绿色, 斑状结构, 块状构造。

北祁连地区容矿火山岩的常量元素、微量元素、稀土元素及铅同位素分析是在核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成的。常量元素用飞利浦 PW2404 X 射线荧光光谱仪测定。微量和稀土元素用 HR-ICP-MS (Element 1) 电感耦合等离子质谱仪

测定。铅同位素组成据EJ/T693-92《沥青铀矿、晶质铀矿的年龄测定方法》测定,所用仪器为ISO-PROBE-T,误差 2σ 。

铈、钕同位素分析在中国地质科学院地质研究所同位素实验室完成。铈同位素分析采用MAT262固体同位素质谱计,标准测定结果为NBS987 SrCO₃ $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.710247 \pm 12(2\sigma)$,铈同位素质量分馏采用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.37521$ 校正;钕同位素分析采用Nu Plasam HR MC-ICP-MS (Nu Instruments)仪测定,

DSN-100膜去溶,标准测定结果为JMC Nd₂O₃ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511125 \pm 10(2\sigma)$,钕同位素质量分馏采用 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ 校正。

3.2 常量元素

K₂O、Na₂O在壳、幔中含量差别显著,是主要元素中最容易熔融的组分,对源区组成和部分熔融程度以及岩浆演化过程反应灵敏(韩吟文等,2003)。由表1可知,白银厂石英角斑岩SiO₂含量较高, $w(\text{SiO}_2)$ 为67.69%~77.58%,平均73.56%,以高钠

表1 白银厂和石居里矿区容矿火山岩主量元素、微量元素和稀土元素分析结果

Table 1 Major, trace and rare earth element compositions of ore-hosting volcanic rocks in Baiyinchang and Shijuli areas

	白银厂矿区石英角斑岩						石居里矿区玄武岩		
	GBY-41	GBY-43	GBY-44	GBY-54	GBY-55	GBY-56	SJL-12	SJL-13	SJL-14
	$w(\text{B})/\%$								
SiO ₂	67.69	72.23	72.48	77.13	74.23	77.58	44.49	49.82	48.57
TiO ₂	0.33	0.28	0.28	0.21	0.21	0.20	0.95	1.28	1.39
Al ₂ O ₃	15.56	14.20	13.98	11.49	13.48	11.13	14.17	13.46	13.79
Fe ₂ O ₃	2.85	2.67	2.66	1.06	0.88	1.02	3.60	4.10	4.05
FeO	0.42	0.18	0.24	0.64	0.74	0.55	6.61	8.03	8.76
MnO	0.066	0.043	0.038	0.027	0.026	0.051	0.17	0.24	0.25
MgO	0.56	0.23	0.19	0.32	0.73	0.24	8.67	7	7.52
CaO	1.59	1.18	1.11	0.43	0.45	0.34	11.21	7.02	6.63
Na ₂ O	8.06	7.35	7.40	5.50	4.88	5.89	4.14	4.62	4.51
K ₂ O	0.20	0.56	0.55	1.12	2.17	1.49	0.11	0.21	0.11
P ₂ O ₅	0.099	0.091	0.087	0.042	0.026	0.028	0.095	0.12	0.12
LOI	2.30	0.72	0.86	1.80	1.94	1.24	4.16	3.00	3.10
	$w(\text{B})/10^{-6}$								
Ba	53.5	81.9	80.3	125	201	245	59.3	159	161
Be	1.15	0.775	0.833	0.736	1.05	0.576	0.44	0.489	0.464
Sc	6.17	4.15	4.51	2.81	3.12	2.32	34	34	37.2
Ti	1970	1770	1711	1177	1261	1062	5595	7980	9799
V	28.9	22.1	21.5	14.4	15.2	11.5	207	213	273
Cr	3.08	2.82	2.54	3.62	3.56	4.82	286	163	187
Mn	383	254	231	220	168	184	1316	1696	1896
Co	3.06	1.88	1.84	2.42	2.16	1.95	37.3	34.3	40.9
Ni	1.49	1.71	1.13	1.41	1.41	1.43	74.9	60.6	63.8
Cu	20.9	21.3	12.3	14.8	22	6.56	80.3	131	117
Pb	8.65	8.93	6.84	5.75	5.11	7.34	1.78	5.08	7.77
Zn	66.8	51.1	48.7	21.7	24.1	12.2	70.8	91.7	140
Ga	14.1	12.1	11.9	7.37	10.2	5.9	14.2	12.2	13.3
Rb	3.7	10	9.92	9.93	20.2	7.32	1.76	3.86	1.55
Sr	81.7	54	50.7	98.5	101	78.7	94.8	111	142
Zr	195	169	164	138	141	118	68.3	134	152
Hf	7	6.05	5.76	4.96	5.13	4.4	2.82	4.97	5.6
Nb	4.58	4.15	4	3.77	4.12	3.34	1.61	3.04	3.24
Ta	0.455	0.374	0.357	0.361	0.38	0.305	0.153	0.221	0.264
K	1660	4647	4564	9294	18006	12364	913	1743	913
U	1.3	1.37	1.16	1.46	1.47	1.46	0.067	0.248	0.18
Th	5.52	4.89	4.76	5.11	4.2	4.41	0.169	0.617	0.407
Mo	0.526	0.556	0.469	1.18	1.07	1.3	0.428	0.414	0.541

续表 1
Table 1 Cont. 1

	白银厂矿区石英角斑岩						石居里矿区玄武岩		
	GBY-41	GBY-43	GBY-44	GBY-54	GBY-55	GBY-56	SJL-12	SJL-13	SJL-14
Bi	0.108	0.077	0.068	0.107	0.082	0.085	0.018	0.061	0.064
Sn	0.822	0.822	0.733	1.11	0.513	0.909	1.18	0.608	1.23
Sb	0.283	0.247	0.181	0.587	0.636	0.541	0.132	0.373	0.207
La	12.6	10.7	12.5	5.91	4.56	7.54	2.09	4.62	4.69
Ce	23.6	20.3	22	10.8	8.63	12.5	5.74	11.7	12.2
Pr	3.26	2.75	2.99	1.38	1.09	1.57	1.15	2.12	2.32
Nd	12.6	10.8	10.9	4.81	3.76	5.4	6.45	10.8	12
Sm	2.86	2.32	2.56	0.962	0.764	1.02	2.19	3.56	4.23
Eu	0.771	0.693	0.686	0.275	0.252	0.323	0.968	1.21	1.2
Gd	2.98	2.43	2.43	0.988	0.847	0.937	3.26	4.89	5.79
Tb	0.436	0.393	0.38	0.181	0.149	0.155	0.593	0.834	0.966
Dy	2.87	2.40	2.23	1.27	1.13	1.02	3.91	5.51	6.61
Ho	0.603	0.532	0.484	0.314	0.269	0.266	0.838	1.18	1.38
Er	1.97	1.58	1.47	1.08	1.00	0.90	2.47	3.53	4.19
Tm	0.313	0.257	0.231	0.184	0.177	0.165	0.351	0.503	0.590
Yb	2.31	1.79	1.67	1.44	1.38	1.23	2.35	3.26	3.95
Lu	0.375	0.289	0.253	0.233	0.221	0.214	0.342	0.488	0.565
Y	15.9	13.5	12.1	8.72	7.58	7.31	20.1	28.3	33.3
∑REE(不含 Y)	67.55	57.23	60.78	29.83	24.23	33.24	32.70	54.21	60.68
LREE/HREE*	4.70	4.92	5.64	4.24	3.68	5.81	1.32	1.68	1.52
δEu*	0.80	0.89	0.83	0.85	0.95	0.99	1.11	0.89	0.74
δCe*	0.88	0.90	0.85	0.89	0.92	0.85	0.90	0.91	0.90
La _N /Yb _N *	3.91	4.29	5.37	2.94	2.37	4.40	0.64	1.02	0.85

* 单位为 1。

低钾为特征,为浅色钠质火山岩, $w(\text{Na}_2\text{O})$ 平均为 6.51%,与邱家骧(1985)记载的石英角斑岩 Na_2O 含量相当。 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O}) < 1$, $w(\text{Na}_2\text{O})/[w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O})]$ 为 0.69~0.98,全碱含量平均为 6.52%。 $w(\text{TiO}_2)$ 均小于 0.90%,平均 0.25%,低于大洋拉斑玄武岩的该值(1.80%)。

石居里玄武岩的 $w(\text{SiO}_2)$ 为 44.49%~49.82% (表 1),属于基性火山岩类,也具有高钠低钾的特征。 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 平均 4.42%,与邱家骧(1985)记载的细碧岩平均 Na_2O 含量相差不大。 $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 为 0.02~0.05, $w(\text{Na}_2\text{O})/[w(\text{K}_2\text{O}) + w(\text{Na}_2\text{O})]$ 为 0.95~0.98, K_2O 、 Na_2O 含量变化都较小,全碱含量平均为 4.57%。 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 平均含量为 12.52%, $w(\text{TiO}_2)$ 含量平均为 1.10%,接近大洋拉斑玄武岩。

郭原生等(2000;2001;2003)研究表明白银厂酸性火山岩属于低钾和钙碱性系列。结合本文样品岩相学特征,可知北祁连白银厂和石居里矿区容矿火山岩为典型的海相火山细碧-角斑岩系。在火山岩系 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 和 $\text{K}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}$ 图解(图 2)中,白银厂(折腰山)石英角斑岩落入低钾和钙碱性系列区,容矿石

英角斑岩和矿体外围石英角斑岩分别属于钾质和钠质系列岩区;石居里玄武岩钾含量较低,为富钠质系列火山岩。

3.3 微量元素

白银厂和石居里矿区容矿火山岩的微量元素 N-MORB 标准化分布曲线分别见图 3a、3c。白银厂矿区矿带内和外围石英角斑岩的微量元素配分曲线基本是一致的,尤其 Th、U、Nb、Pb 等元素几乎完全重合,暗示了源区的相关性。总体分布特征为从 Ba 到 Lu 随元素不相容性从大到小,各元素含量呈现降低的趋势。同时,大离子不相容元素 Rb、Ba、Th、U、K、Pb、Hf、Zr 高度富集,高场强元素 Nb、Ta、Ti 显著亏损, Nb、Ta 谷明显,显示出岛弧岩浆作用特征。

石居里矿区玄武岩的微量元素分布曲线与白银厂矿区石英角斑岩的分布曲线有所差异(图 3c)。图中除了 Ba、U、Pb 明显富集外, Rb、Th 相对亏损, K 略有富集,同时高场强元素 Nb、Ta、Ti 亏损也很弱,这些特征反映了岩浆源区的变化。Ba、U、Pb 富集说明可能有大量俯冲板片中释放的流体渗入了岩浆作用过程(郭原生等,2003)。

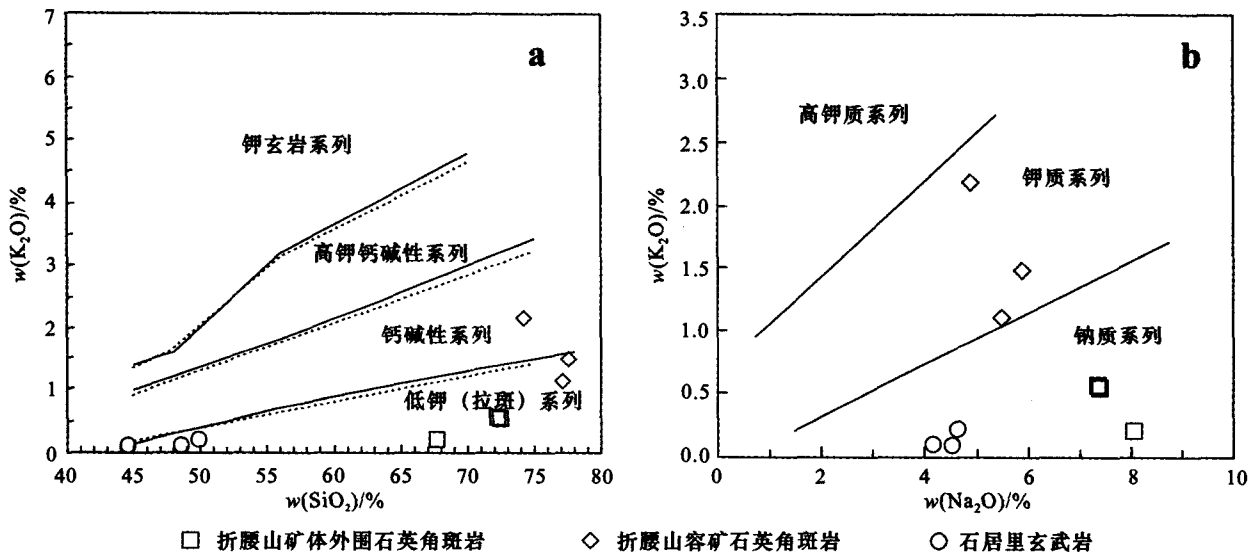


图2 白银厂和石居里矿区容矿火山岩 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ 图(a)(实线据 Peccerillo et al., 1976,虚线据 Middlemost, 1989)和 $w(\text{K}_2\text{O})$ - $w(\text{Na}_2\text{O})$ 图(b)(据 Middlemost, 1989; Le Maitre et al., 1989)

Fig. 2 SiO_2 - K_2O diagram (a) (solid line after Peccerillo et al., 1976, whereas broken line after Middlemost, 1989) and K_2O - Na_2O diagram (b) (after Middlemost, 1989; Le Maitre et al., 1989) of ore-hosting volcanic rocks in Baiyinchang and Shijuli

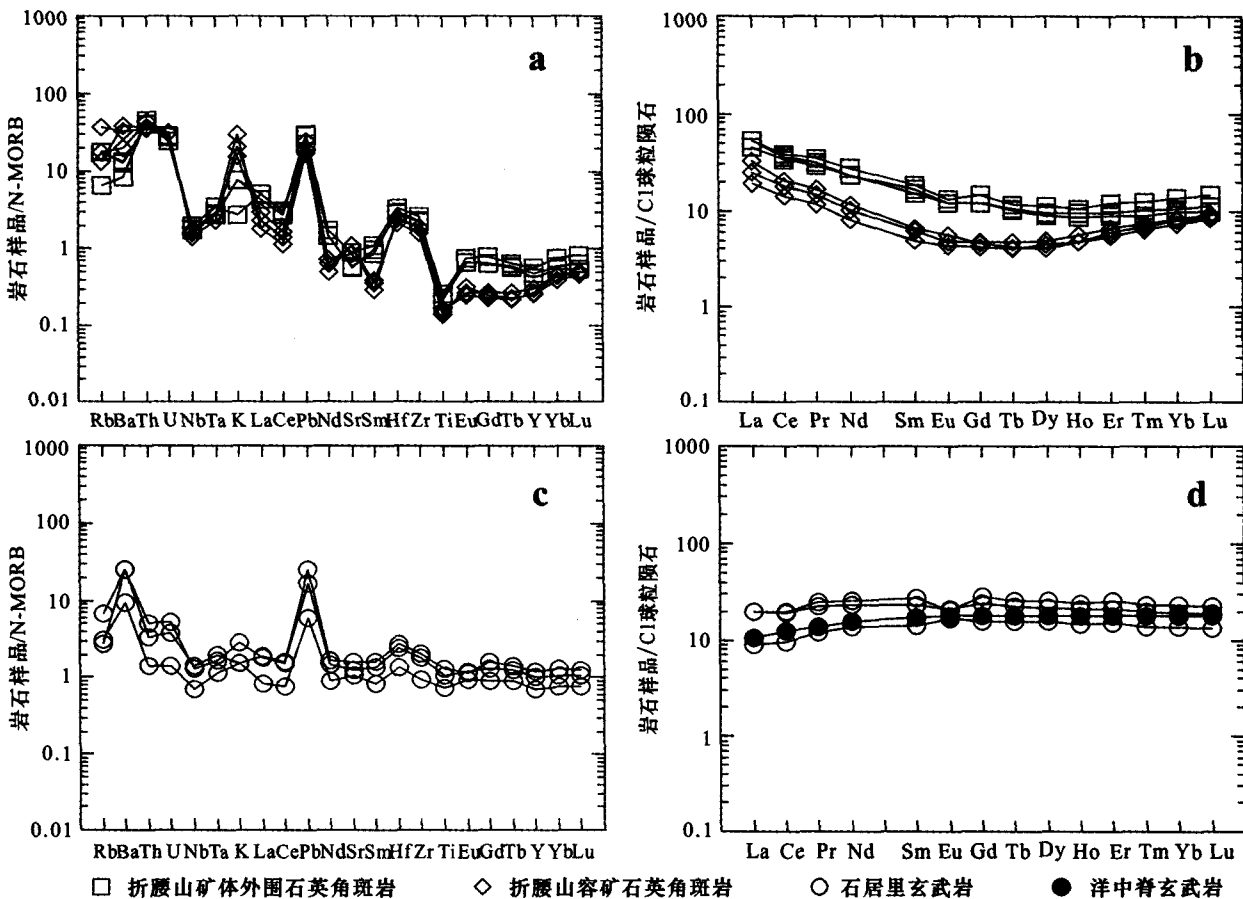


图3 a. 白银厂石英角斑岩微量元素 N-MORB 标准化蛛网图解; b. 白银厂石英角斑岩稀土元素 CI 球粒陨石标准化配分图解; c. 石居里玄武岩微量元素 N-MORB 标准化蛛网图解; d. 石居里玄武岩稀土元素 CI 球粒陨石标准化配分图解

Fig. 3 N-MORB-normalized trace element spidergrams (a, c) and CI chondrite-normalized REE patterns (b, d) of ore-hosting volcanic rocks in Baiyinchang (a, b) and Shijuli (c, d) areas

3.4 稀土元素

在 CI-球粒陨石标准化配分曲线上(图 3b), 白银厂矿田折腰山矿带内的石英角斑岩比矿体外围的石英角斑岩的中稀土元素含量(Σ MREE)显著降低, 这可能反映了两者在源区条件上有所差异。说明前者岩浆生成于角闪岩相, 源区熔融程度较低, 大量角闪石在源区残留, 从而造成了含矿岩浆中中稀土元素的显著亏损。矿带内的角斑岩比外围的角斑岩 Si_2O 、 K_2O 含量高, CaO 、 Fe_2O_3 、 $\text{T}(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})$ 含量低, 也说明了这一点。

石居里矿区容矿玄武岩的稀土元素配分曲线(图 3d)呈水平状态, 略带 Eu 负异常, 且与洋脊玄武岩的分布曲线相似, 说明成岩物质保留了洋底玄武岩的特征, 且熔融程度较高, 没有造成轻、重稀土元

素的明显分馏。

4 铅、锶、钕同位素

4.1 铅同位素

白银厂和石居里矿区容矿火山岩铅同位素组成见表 2, 无论是白银厂还是石居里容矿火山岩都富含放射成因 Pb。白银厂矿区石英角斑岩的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 37.792~38.694、15.503~15.556 和 18.025~18.097; 石居里矿区玄武岩的 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 和 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值分别为 37.061~38.301、15.402~15.564 和 17.848~18.245。在 Doe 等的铅构造模式图(图 4)上, 前者靠近造山带分布, 后者位于地幔演化线上,

表 2 白银厂和石居里矿区容矿火山岩铅、锶、钕同位素组成

Table 2 Pb, Sr and Nd isotopic compositions of ore-hosting volcanic rocks in Baiyinchang and Shijuli areas

矿区及样品编号	样品名称	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\epsilon_{\text{Nd}}(o)$	$\epsilon_{\text{Nd}}(t)$
白银厂									
GBY-41	石英角斑岩	38.253	15.528	18.517	0.707193	0.7063	0.512673	0.6827	4.1716
GBY-43	石英角斑岩	38.402	15.553	18.571	0.709539	0.7060	0.512653	0.2926	4.2138
GBY-44	石英角斑岩	38.507	15.556	18.698	0.709669	0.7059	0.512669	0.6047	3.8136
GBY-54	石英角斑岩	38.362	15.555	18.527	0.708044	0.7061	0.512645	0.1366	4.5841
GBY-55	石英角斑岩	38.558	15.548	18.897	0.709667	0.7058	0.512576	-1.2094	3.1247
GBY-56	石英角斑岩	38.282	15.536	18.649	0.707829	0.7060	0.512645	0.1366	4.9789
石居里									
SJL-12	玄武岩	38.301	15.564	18.245	0.707218	0.7069	0.513117	9.3438	8.8599
SJL-13	玄武岩	37.602	15.459	17.867	0.707554	0.7069	0.512955	6.1837	6.0337
SJL-14	玄武岩	37.777	15.491	17.958	0.706990	0.7068	0.513054	8.1149	7.1940

注: $\epsilon_{\text{Nd}}(o)$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值按球粒陨石储库 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.1967$ 计算, 白银厂 $t = 467$ Ma, 石居里 $t = 443$ Ma。

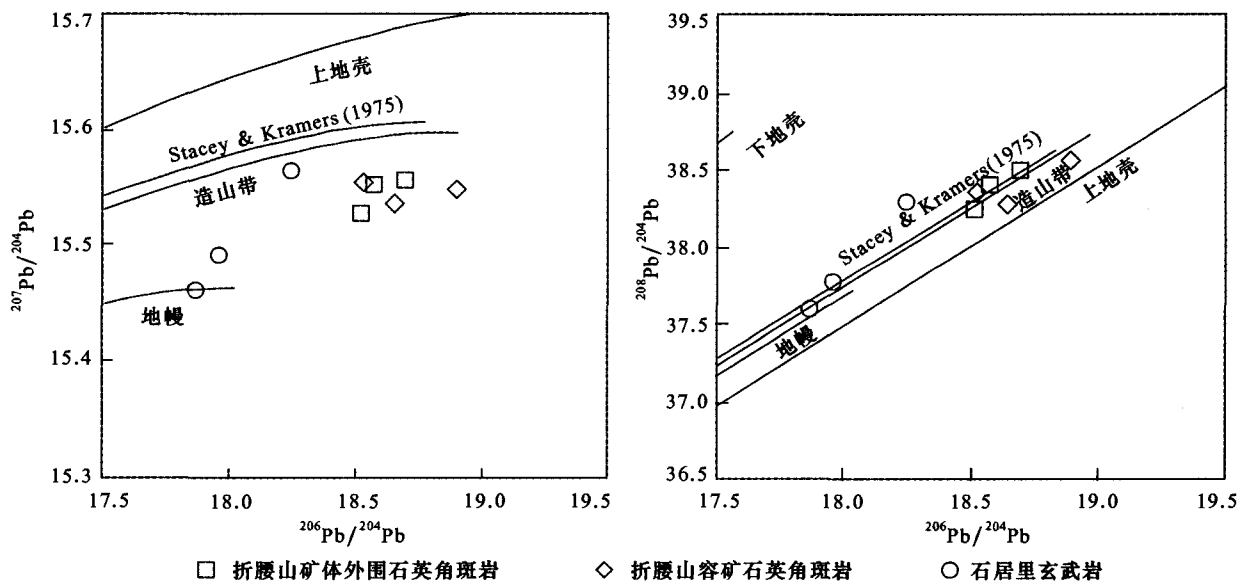


图 4 白银厂、石居里矿区容矿火山岩铅同位素构造模式图(据 Doe 等, 1979)

Fig. 4 Pb isotopic tectonic framework diagram of ore-hosting volcanic rocks in Baiyinchang and Shijuli (after Doe et al., 1979)

指示两者在源区上的差异。

4.2 锶、钕同位素

白银厂和石居里矿区容矿火山岩岩层沿 NWW-SEE 向分布达数百公里,但其锶同位素初始比值 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$) 变化不大(表 2),在 0.7058~0.7069 之间,且东段白银厂矿区 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$) 比值为 0.7058~0.7063,平均 0.7060,中部石居里矿区 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$) 值为 0.7068~0.7069,平均为 0.7069,白银厂矿区较石居里矿区的 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}_i$) 值要低一些。与锶同位素相比,两种火山岩的钕同位素比值 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 差距明显增大(表 2),东段白银厂矿区 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值在 0.5125~0.5127 之间,平均为 0.5126,中段石居里矿区 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值在 0.5129~0.5132 之间,平均为 0.5131。

5 形成环境

由海底火山喷流形成的块状硫化物矿床几乎全部与拉张环境有关。目前,已知有利于块状硫化物矿床形成的地质构造环境主要有 4 种:①大陆边缘裂谷区;②岛弧裂谷区;③大洋扩张脊;④弧后扩张盆地。白银厂矿田位于北祁连加里东褶皱带东段,由中寒武世—中奥陶世火山岩和少量沉积岩组成岛弧型火山岩带(李百祥,1994)。火山作用以中心喷

发为主,分异较好,喷发旋回韵律性明显,由细碧-角斑岩系和相应的次火山岩、熔岩、凝灰岩等构成完整的火山建造。处于火山穹窿核部的石英角斑岩系为主要赋矿层位。杨合群等(2000)根据北祁连中段岛弧型和弧后盆地型火山岩的配置关系,结合同位素年龄资料,提出石居里一带富铜硫化物矿床形成于弧后扩张脊的观点。从本文获得的资料看,白银厂矿田酸性容矿火山岩的形成时代与石居里地区基性容矿火山岩的形成时代是一致的,都是中奥陶世(测得结果为 414 Ma)。从岩石地球化学特点上看,这些容矿火山岩都以富集大离子不相容元素 Ba、Rb、K、U、Pb,强烈亏损高场强元素 Nb、Ta、Ti 为特征,与岛弧型火山岩相符合(Wilson,1989),处处显示出俯冲板片流体在岩浆生成中的重要作用。在人们广泛采用的 Nb-Y 和 Ta-Yb 构造环境判别图中(图 5a, b),两种类型的容矿火山岩都位于火山弧区,说明它们与俯冲有关。在 Th/Yb-Ta/Yb 和 La/Yb-Th 图中(图 6a, b),两种火山岩的俯冲环境得到了进一步区分。石居里玄武岩与洋中脊玄武岩具有非常相似的稀土元素特征(图 3d),图 5 中石居里玄武岩样品靠近洋中脊环境区,而图 6 中石居里玄武岩分别落在洋生弧附近和原始大洋弧区域,这可能是因为石居里玄武岩形成环境与原始大洋弧有关,因此保留了洋中脊玄武岩的部分岩石特征。总之,造山带东

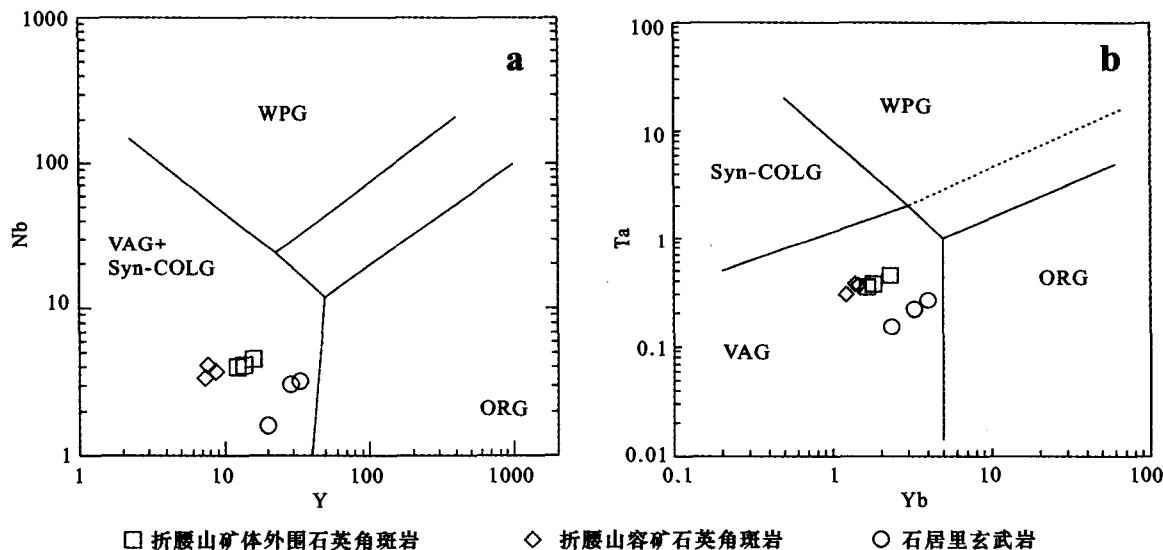


图 5 花岗岩构造环境判别图解(a. Nb-Y 图解;b. Ta-Yb 图解)

WPG—板内环境;ORG—洋中脊环境;VAG—火山弧环境;Syn-COLG—同碰撞造山环境(原图据 Pearce 等,1984)

Fig. 5 Trace element discrimination diagrams (a. Nb-Y diagram; b. Ta-Yb diagram)

WPG—Intraplate granite; ORG—Mid-ocean ridge granite; VAG—Volcanic arc granite; Syn-COLG—Syn-collision granite (after Pearce et al., 1984)

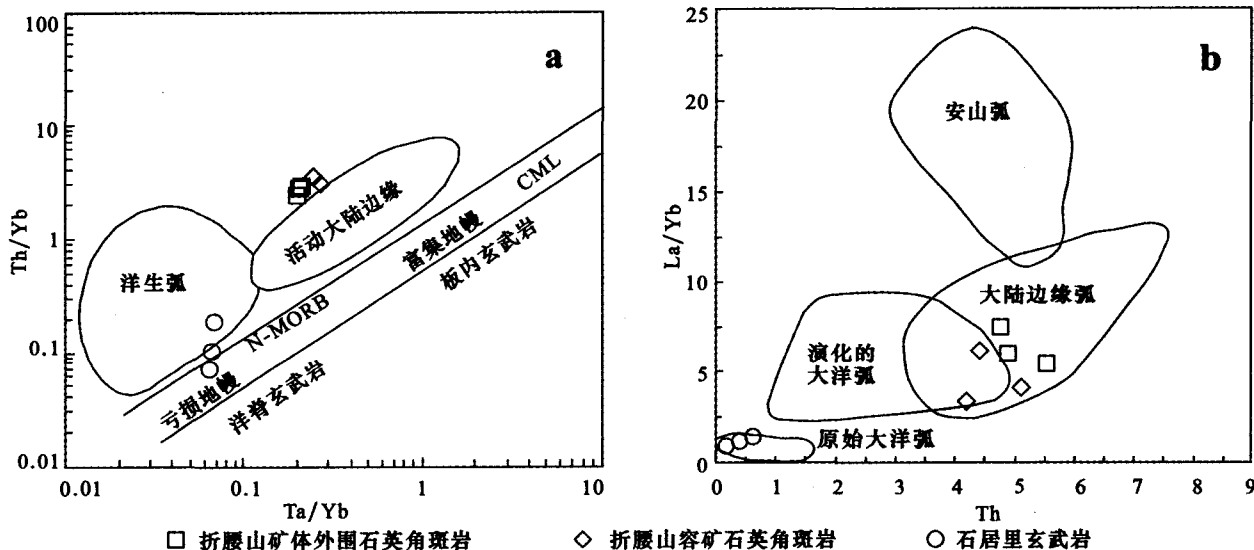


图 6 Th/Yb-Ta/Yb(a)(原图据曲晓明等,2006)和 La/Yb-Th(b)(原图据 Condie,1986)图解

图 a 中: N-MORB—标准洋中脊玄武岩, CML—大陆岩石圈地幔

Fig. 6 Th/Yb-Ta/Yb (a, after Qu et al., 2006) and La/Yb-Th (b, after Condie, 1986) diagrams

段白银厂矿田的酸性火山岩(石英角斑岩)生成于活动大陆边缘,即俯冲环境是洋壳向大陆边缘之下的俯冲;而位于造山带中段的石居里矿田的容矿玄武岩生成于与原始大洋弧有关的洋生弧中,即为洋内俯冲的结果。

6 物质来源

在块状硫化物矿床形成过程中,容矿火山岩不仅决定着海底之下热液成矿循环系统的规模 and 活动时间,而且也直接提供了部分成矿物质和成矿流体,因此容矿火山岩岩浆的来源对理解成矿过程的机理具有举足轻重的意义。对白银厂矿田的容矿火山岩,前人虽然已做了大量研究工作(夏林圻等,1995;1998;郭原生等,2000),但多数侧重于岩相学和火山作用方式生成条件方面。侯增谦等(2003)研究认为白银厂矿田容矿火山岩形成于大陆裂谷地质构造环境,具有双峰式岩石组合,其基性端员以碱性玄武岩为主,来源于软流圈地幔的部分熔融,并受到地壳物质的混染;酸性端员则是地壳物质部分熔融的产物。至于石居里地区基性容矿火山岩,以往的讨论一般限定在岩石类型、喷发方式及喷发时的海水深度等方面(杨合群等,2000;邬介人等,2001),对玄武岩的岩浆生成和来源问题探讨不多。

从本文测得的铅、锶、钕同位素资料看,北祁连

地区早古生代(中奥陶世)带来大规模块状硫化物矿化的酸性和基性火山岩既有着不同的形成环境(陆缘弧与洋生弧之分),在物质来源上也有着一定的差异。从图 4 的铅同位素组成可以看出,石居里矿区的基性火山岩位于地幔演化线上,白银厂矿田的酸性火山岩则靠近造山带分布,说明前者形成过程中地壳物质混入较少,而后者形成过程中有较多的地壳物质组分参与。在 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 图中(图 7a),清楚地显示出石居里矿区的容矿玄武岩非常接近原始地幔(PREMA)组成,而白银厂酸性火山岩则向下地壳端员偏移,表明岩浆中有地壳物质混入。在 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - I_{Sr} 图上(图 7b),两种容矿火山岩均离开地幔岩源区向右偏移, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值显著增大, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值变化却很小。这种变化特点说明在石居里基性玄武岩的形成过程中只有来自俯冲洋壳的流体参与,没有地壳岩石或沉积物混入,已有试验研究证明,海水混入可以使火山岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值显著增大,同时保持 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值不变(Jacobsen et al., 1979)。相比之下,白银厂矿田的石英角斑岩除了 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值增大外, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值也有所降低,说明在这些酸性容矿火山岩的形成过程中除了有板片流体的参与外,还有少量的地壳物质混入。这种情况与前面指出的两种火山岩的产出环境是完全一致的。白银厂地区的酸性火山岩生成于大陆边缘的岩浆弧中,岩浆在深部地幔楔中生成以后,

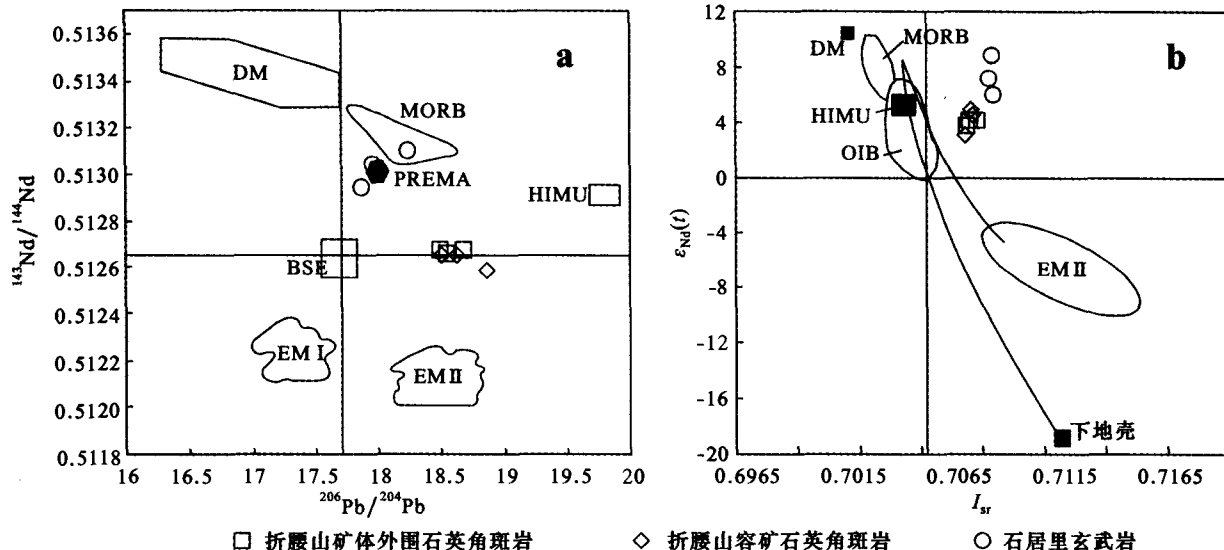


图 7 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (a)(据侯增谦等,2004)和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - I_{Sr} (b)(据朱弟成等,2003)图解

DM—亏损地幔; BSE—全硅酸盐地球; EM I—富集 I 型地幔; EM II—富集 II 型地幔; PREMA—普通地幔; HIMU—高 U/Pb 值地幔; MORB—大洋中脊玄武岩; OIB—洋岛玄武岩

Fig. 7 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (a) (after Hou et al., 2004) and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ - I_{Sr} (b)(after Zhu et al., 2003) diagrams

DM—Depleted mantle; BSE—Bulk silicate earth; EM I—Enrichment I-type mantle; EM II—Enrichment II-type mantle; PREMA—Normal mantle; HIMU—High U/Pb mantle; MORB—Basalt of middle ocean ridge; OIB—Ocean island basalt

在上升过程中不可避免地要与浅部地壳物质发生相互作用,从而改变其铍、锶、铅同位素组成。而石居里地区的基性火山岩不同,它们生成于洋内弧,缺少大陆地壳物质,岩浆生成过程中只有板片流体参与,因而只有锶同位素比值发生了变化,铍、铅同位素仍保留了原始地幔岩浆作用的特点。

7 结 论

(1) 最新锆石 U-Pb LAICPMS 定年结果显示,北祁连造山带东段“黑矿型”块状硫化物矿床的容矿火山岩年龄为 467 Ma,与该带中段“塞浦路斯型”铜矿床的形成时代是一致的,都属于中奥陶世。

(2) 微量元素地球化学分析表明,北祁连以白银厂为代表的“黑矿型”块状硫化物矿床和以石居里为代表的“塞浦路斯型”硫化物铜矿床都是形成于洋壳俯冲环境,但前者为陆缘弧,后者为与原始大洋弧有关的具有洋脊环境特征的洋内弧。

(3) 北祁连 2 种类型块状硫化物矿床的容矿火山岩-石英角斑岩和富钠玄武岩都来源于原始地幔。前者除了来自俯冲洋壳的流体显著参与了岩浆作用外,还有部分陆壳物质混入;后者在岩浆生成过程中只有来自俯冲洋壳的流体参与,缺少其他陆缘物质。

这种岩浆源区的物质组成特点与前面得出的成矿构造环境是完全一致的。

References

Condie K C. 1986. Geochemistry and tectonic setting of early proterozoic supracrustal rocks in the southwestern United States [J]. *J. Geol.*, 94: 845-861.
 Doe B R and Zartman R E. 1979. Plumbotectonics[A]. In: Barnes H L, ed. *The Phanerozoic, geochemistry of hydrothermal ore deposits* [C]. New York: John Wiley and Sons Inc.
 Feng Y M and He S P. 1995. *The geotectonic action of the Qilian Mountains*[M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
 Guo Y S, Wang J R, Xie X L, Meng G S, Yang Y J and Tian Y X. 2000. Geochemical characteristics and genetic analysis of the early and middle Cambrian volcanic rocks in Baiyin mining field [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 337-344 (in Chinese with English abstract).
 Guo Y S, Wang J R, Xie X L, Qiu H Y, Hu P Q and Fu S M. 2001. Geochemical characteristics of basalts in Baiyinchang ore-field and its formation geological setting[J]. *Acta Geol. Gansu*, 10(2): 29-34 (in Chinese with English abstract).
 Guo Y S, Wang J R, Qiu H Y, Hu P Q, Fu S M and Chen J L. 2003. Petrology and trace element geochemistry of the acid volcanic rocks of Baiyinchang ore-field [J]. *Acta Geol. Gansu*, 12(1): 21-29 (in Chinese with English abstract).
 Han Y W and Ma Z D. 2003. *Geochemistry* [M]. Beijing: Geol. Pub.

- House(in Chinese).
- He S P, Wang H L, Chen J L, Xu X Y, Zhang H F, Ren G M and Yu J Y. 2006. A LA-ICP-MS U-Pb chronological study of zircons from meta-acidic volcanics in Baiyin ore field, Gansu Province: New evidence for metallogenic age of Baiyin type massive sulfide deposits [J]. *Mineral Deposits*, 25(4): 401-411(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Li Y Q, Zhang Q L and Qu X M. 2003. End-members and mixing of fluid in submarine hydrothermal system: Evidence from fluid inclusions in the Baiyinchang and Gacun VMS deposits [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 19(2): 221-234(in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Gao Y F, Meng X J, Qu X M and Huang W. 2004. Genesis of adakitic porphyry and tectonic controls on the Gangdese Miocene porphyry copper belt in the Tibetan orogen [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 20(2): 239-248(in Chinese with English abstract).
- Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A and Lameyre J. 1989. A classification of igneous rocks and glossary of terms[M]. Oxford: Blackwell.
- Li B X. 1994. The comprehensive exploration pattern at Baiyinchang pyrite-type copper, polymetallic deposit[J]. *Acta Geologica Sinica*, 3(1): 90-95 (in Chinese with English abstract).
- Mao J W. 2003. Metallogenic series and prospecting evaluation of copper-gold-iron-tungsten polymetallic deposits in the west of North Qilian Mountain [M]. Beijing: Geol. Pub. House (in Chinese).
- Jacobsen S B and Wasserburg G J. 1979. Nd and Sr isotopic study of the Bay of Island ophiolite complex and the evolution of the source of mid-ocean ridge basalts[J]. *Geophys. Res.*, 84: 7429-7445.
- Middlemost E A K. 1989. Iron oxidation ratios, norms and the classification of volcanic rocks[J]. *Chem Geol.*, 77: 19-26.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *J. Petrol.*, 95: 956-983.
- Peccerillo R and Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58: 63-81.
- Qiu J X. 1985. Magma petrology [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 110, 160 (in Chinese).
- Qu X M and Xin H B. 2006. Ages and tectonic environment of the Bangong Co porphyry copper belt in western Tibet, China [J]. *Geol. Bull. China*. 25(7): 792-799(in Chinese with English abstract).
- Song Z B, Yang H Q and Wu J R. 2003. Silicon-lead-sulfur isotopic constitution of Shijuli copper deposits of North Qilian Mountains [J]. *Northwestern Geol.*, 36(2): 83-86 (in Chinese with English abstract).
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 26: 207-221.
- Tang Z L and Bai Y L. 1999. Geotectonic framework and metallogenic system in the southwest margin of North China paleocontinent [J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 6(2): 271-284(in Chinese with English abstract).
- Tang Z L and Bai Y L. 2000. The geotectonic setting of the large and superlarge mineral deposits in the southwest margin of North China paleocontinent[J]. *Acta Geol. Gansu*, 9(1): 1-151(in Chinese with English abstract).
- Wang Q and Liu X Y. 1976. The ancient oceanic crust and its geotectonic meaning in the Qilian Mountains of West China[J]. *Chinese J. Geol. (Scientia Geologica Sinica)*, (1): 42-55(in Chinese with English abstract).
- Wilson M. 1989. *Igneous petrogenesis*[M]. London: Unwin Hyman.
- Wu J R, Ren B C and Huang Y C. 1994. The massive sulfide deposits in the oceanic volcanic rocks areas of Northwest[M]. Wuhan: Geol. Pub. China Univ. Geosci. (in Chinese).
- Wu J R, Yu P S and Ren B C. 2001. Geological characteristics and comprehensive metallogenic model of copper and/or zinc sulfide deposits in Shijuli area, North Qilian Mountains[J]. *Mineral Deposits*, 20(4): 339-346 (in Chinese with English abstract).
- Xia L Q, Xia Z C and Xu X Y. 1995. Dynamics of tectono-volcano-magmatic evolution from north Qilian Mountains, China[J]. *Northwest Geosci.*, 21(11): 768-776(in Chinese with English abstract).
- Xia L Q, Xia Z C and Xu X Y. 1998. Early Palaeozoic min-ocean ridge-ocean island and back-arc basin volcanism in the North Qilian Mountains [J]. *Acta Geologica Sinica*, 72(4): 301-312(in Chinese with English abstract).
- Xiang D P. 1986. Petrochemical characteristics of marine volcanic rocks in North Qilian Mountains and their metallogenetic relations [J]. *Geochem.*, (4): 353-363(in Chinese with English abstract).
- Yang H Q, Li W Y, Zhao D H and Song Z B. 2000. Metallogenic feature of Shijuligou copper-rich ore deposits in northern Qilian Mountains [J]. *Geol. & Prospec.*, 36(6): 20-22, 31 (in Chinese with English abstract).
- Zhu D C, Pan G T, Mo X X, Duan L P, Liao Z L and Wang L Q. 2003. Sr-Nd-Pb isotopic variations of the Cenozoic volcanic rocks from the Qinghai-Xizang Plateau and its adjacent areas [J]. *Sedimentary Geol. & Tethyan Geol.*, 23(3): 1-11(in Chinese with English abstract).
- Zuo G C. 1996. Division of the Qilian areas ophiolite belt and its tectonic meaning[A]. In: Zhang Q, ed. *Study of ophiolite and geodynamics* [C]. Beijing: Geol. Pub. House. 129-134 (in Chinese).

附中文参考文献

- 冯益民, 何世平. 1995. 祁连山大地构造作用[M]. 北京: 地质出版社.
- 郭原生, 王金荣, 解宪丽, 孟桂生, 杨永均, 田玉轩. 2000. 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*, 16(3): 337-344.
- 郭原生, 王金荣, 解宪丽, 邱红英, 胡沛青, 傅善明. 2001. 白银厂矿田玄武岩地球化学特征及其形成地质环境[J]. *甘肃地质学报*, 10(2): 29-34.
- 郭原生, 王金荣, 邱红英, 胡沛青, 傅善明, 陈建林. 2003. 白银厂

- 矿田酸性火山岩岩石学及微量元素地球化学特征[J]. 甘肃地质学报, 12(1): 21-29.
- 韩吟文, 马振东. 2003. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社.
- 何世平, 王洪亮, 陈隽璐, 徐学义, 张宏飞, 任光明, 余吉远. 2006. 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, 25(4): 401-411.
- 侯增谦, 李荫清, 张绮玲, 曲晓明. 2003. 海底热水成矿系统中的流体端员与混合过程: 来自白银厂和呷村 VMS 矿床流体包裹体的证据[J]. 岩石学报, 19(2): 221-234.
- 侯增谦, 高永丰, 孟祥金, 曲晓明, 黄卫. 2004. 西藏冈底斯中新世斑岩铜矿带: 埃达克质斑岩成因与构造控制[J]. 岩石学报, 20(2): 239-248.
- 李百祥. 1994. 白银厂黄铁矿型铜-多金属矿床综合勘查模型[J]. 甘肃地质学报, 3(1): 90-95.
- 毛景文. 2003. 北祁连山西段铜金铁钨多金属矿床成矿系列和找矿评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 邱家骧. 1985. 岩浆岩岩石学[M]. 北京: 地质出版社. 110, 160.
- 曲晓明, 辛洪波. 2006. 藏西班公湖斑岩铜矿带的形成时代与成矿构造环境[J]. 地质通报, 25(7): 792-799.
- 宋忠宝, 杨合群, 邬介人. 2003. 北祁连山石居里铜矿硅、铅、硫同位素组成特征[J]. 西北地质, 36(2): 83-86.
- 汤中立, 白云来. 1999. 华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统[J]. 地质前缘, 6(2): 271-284.
- 汤中立, 白云来. 2000. 华北板块西南边缘大型、超大型矿床的地质构造背景[J]. 甘肃地质学报, 9(1): 1-151.
- 王荃, 刘雪亚. 1976. 我国西部祁连山区的古海洋地壳及其大地构造意义[J]. 地质科学, (1): 42-55.
- 邬介人, 任秉琛, 黄玉春, 等. 1994. 西北海相火山岩地区块状硫化物矿床[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 邬介人, 于浦生, 任秉琛. 2001. 北祁连山石居里地区 Cu(Zn)-S 矿床地质特征及综合成矿模式[J]. 矿床地质, 20(4): 339-346.
- 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[J]. 西北地质科学, 16(1): 1-28.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1998. 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, 72(4): 301-312.
- 向鼎璞. 1986. 北祁连山海相火山岩岩石化学特征及成矿关系[J]. 地球化学, (4): 353-363.
- 杨合群, 李文渊, 赵东宏, 宋忠宝. 2000. 北祁连山石居里沟富铜矿床成矿特征[J]. 地质与勘探, 36(6): 20-22, 31.
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 段丽萍, 廖忠礼, 王立全. 2003. 青藏高原及邻区新生代火山岩 Sr-Nd-Pb 同位素特征[J]. 沉积与特提斯地质, 23(3): 1-11.
- 左国朝. 1996. 祁连地区蛇绿岩带划分及其构造意义[A]. 见: 张旗, 主编. 蛇绿岩与地球动力学研究[C]. 北京: 地质出版社. 129-134.