

云南白牛厂银多金属矿床喷流沉积成因证据： 容矿岩石的地球化学约束

祝朝辉^{1,2}, 刘淑霞¹, 张乾², 谷德敏¹

(1. 河南省国土资源科学研究院, 河南 郑州 450053;
2. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要:滇东南是否存在广泛的热水沉积活动已成为制约滇东南三大多金属矿床(个旧、都龙、白牛厂)成因研究的主要因素之一。系统研究了白牛厂银多金属矿床容矿岩石的地球化学特征, 研究表明: 矿床容矿岩石主量元素数据均投影于火山及海底热卤水成因区域内; 稀土元素明显分为两组, 稀土元素总量较高的样品可能与较多的正常沉积物的加入有关; 稀土元素总量较低的样品具有与加拿大沙利文矿山的条带状富电气石热液沉积岩和加拿大 Agnico-Eagle 矿山的铁建造中的条带状燧石岩相似的稀土元素配分模式与标准化参数; 同时, 微量元素对的演化趋势与现代大洋热水沉积物相似, 而且 As、Sb 和 Ag 含量与大厂和个旧热水沉积硅质岩相当。推测白牛厂银多金属矿床属热水沉积成矿, 只是在距花岗岩体较近的部位遭受了部分叠加改造。

关键词: 白牛厂; 银多金属矿床; 喷流沉积; 容矿岩石; 地球化学; 滇东南

中图分类号: P618.52; P59

文献标志码: A

文章编号: 1000-8527(2010)01-0120-11

The Exhalative-sedimentary Evidence of the Baniuchang Ag-polymetallic Deposit, Yunnan, China: Constraints from Geochemistry of Host-rocks

ZHU Chao-hui^{1,2}, LIU Shu-xia¹, ZHANG Qian², GU De-min¹

(1. Henan Academy of Land and Resources Sciences, Zhengzhou, Henan 450053, China; 2. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550002, China)

Abstract: Studying if there took place extensive exhalative-sedimentary activities in the southeast Yunnan Province has been one of key factors to constrain origin of the Gejiu, Baniuchang, and Dulong polymetallic deposits. The authors systematically study the geochemistry characteristics of host-rocks in the Baniuchang Ag-polymetallic deposit in this paper. The host-rocks have the same distribution area with the sea-floor volcano or hot-water origin chert. Then normalized REE distribution patterns of host-rocks can be divided into two groups: One group with higher total REE contents indicates more normal sediments attendance. The other group with lower total REE contents possesses the similar normalized REE distribution patterns and parameters with rich-tourmaline banded hydrothermal sediments in the Canada Sullivan deposit and banded chert in iron-bearing formations in the Canada Agnico-Eagle deposit. And the pairs of trace elements show the similar characteristics with modern sea-floor hydrothermal sediments. In addition, the contents of As, Sb and Ag are similar with that of chert in the Dachang and the Gejiu mining districts. Based on above of all, it is indicated that the Baniuchang Ag-polymetallic deposit is exhalative-sedimentary origin.

Key words: Baniuchang; Ag-polymetallic deposit; exhalative-sediment; host-rock; geochemistry; southeast Yunnan Province

收稿日期: 2009-02-25; 改回日期: 2009-11-03; 责任编辑: 楼亚儿。

基金项目: 中国科学院重点方向项目(KZCX3-SW-125); 国家自然科学基金项目(40172037)。

作者简介: 祝朝辉, 男, 工程师, 博士, 1978年出生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事矿床地球化学及区域地质找矿研究。Email: zch_7856@163.com。

0 引言

白牛厂银多金属矿床是 20 世纪 80 年代后在滇东南探明的超大型多金属矿床之一, 江鑫培^[1]根据该矿床阿尾矿段存在隐伏花岗岩及岩体上部伴随的具岩浆热液特征的矽卡岩化和矿化特点, 提出该隐伏花岗岩是矿床的成矿母岩, 整个矿床为岩浆热液成矿的产物。而高子英^[2]基于矿床地质地球化学研究认为, 该矿床的形成经历了: (1) 寒武纪沉积盆地沉积形成矿源层; (2) 燕山期花岗岩浆作用带来的含矿热液充填、交代成矿; (3) 岩浆热源及热液连同大气降水一起从矿源层中淋滤出成矿物质形成混合成矿流体, 对原有的岩浆热液成矿叠加改造, 最后形成了现今所见的白牛厂银多金属矿床。周建平等^[3-4]研究则认为, 包括白牛厂在内的滇东南三大多金属矿床都存在热水沉积成矿的证据, 矿床是海底热水喷流沉积的产物, 岩浆侵入只是对原有的热水沉积矿床进行了某种改造, 并未提供大量的成矿物质。此前, 白金刚等^[5-6]通过对该矿床矿体形态及其与地层关系等的研究, 曾提出该矿床为海底热水沉积成因, 并且白金刚^[7]发现该矿床黄铁矿的标型特征也支持热水沉积成矿作用的观点。陈学明等^[8]通过对成矿流体成分及物理化学性质的研究, 也为该矿床提供了热水沉积成矿的流体证据。但在肯定热水沉积成矿的同时, 陈学明等^[9]列举了大量的后期热液叠加成矿的地质和地球化学证据, 认为矿床遭受了后期岩浆热液的叠加。的确, 仅就矿区大量存在的穿层脉状矿体来说, 也很难将它们直接与同生沉积成矿联系起来。滇东南三大多金属矿床(个旧、白牛厂、都龙)各自有一个较大的花岗岩体相伴随, 矿区内常存在规模和数量不等的酸性小岩体或岩脉。刘玉平等^[10]获得的都龙锡锌多金属矿床石英-闪锌矿 Rb-Sr 等时线年龄为 79 Ma, 与矿床产出的中寒武统田蓬组地层时代相去甚远, 而与矿区花岗斑岩的年代接近, 可能代表都龙矿床岩浆热液成矿的时代, 说明岩浆作用对成矿是有贡献的。祝朝辉等^[11-13]以及 Zhu et al.^[14-15]通过对矿床地质地球化学及花岗岩的系统研究, 也认为矿床主要由中寒武世热水沉积作用形成, 燕山期岩浆活动只是在距岩体较近的东南部对矿床叠加改造。李晓波等^[16]、刘继顺等^[17]及张洪培等^[18]根据矿化空间分带规律与花岗岩体关系的研究, 认为白牛厂矿床的形成主要是与燕山

期花岗质岩浆侵入活动有关(并非岩浆热液矿床), 花岗质岩浆侵位不仅可形成有利的成矿构造空间, 也可带来主要成矿物质, 还可以提供成矿热源。

白牛厂银多金属矿床成因经历了岩浆热液—热水沉积—岩浆成因的认识过程, 研究的重点是矿床地质地球化学特征以及矿床与花岗岩体的关系, 而对矿床容矿岩石的研究很少涉及, 只是白金刚^[6]在研究中寒武世田蓬组含矿地层的沉积相特征时, 认为含矿地层可能存在一部分热水沉积岩。但是, 关于矿床容矿围岩的地球化学研究一直没有开展。基于此, 我们认为如果矿床与热水沉积成矿有关, 那么矿床围岩的地球化学特征可能为矿床成因提供某些约束。

1 矿床地质概况

白牛厂矿区地处滇东南个旧和都龙多金属矿田之间, 矿床赋存于华南加里东褶皱系滇东南褶皱带西北缘的中寒武统田蓬组上段和龙哈组下段细碎屑岩系之中。北西面以弥勒断裂与扬子地台分界, 西南以红河断裂为界与哀牢山断块毗邻, 南连越北古陆, 东部文麻断裂与南岭褶皱系连为一体(图 1 中(a))。各构造单元的构造演化对白牛厂银多金属矿床均有不同程度的影响, 区内地质构造、岩浆活动和矿化作用均较复杂。结合矿区的构造关系, 矿区及其外围出露的地层可分为两部分: 一部分为寒武纪地层, 从下到上依次为下寒武统冲庄组和大寨组, 中寒武统大丫口组、田蓬组和龙哈组; 另一部分为泥盆纪地层。冲庄组主要为红黄色、灰绿色板岩、粉砂质板岩夹长石英砂岩(>110 m); 大寨组主要为灰—深灰色薄—中厚层状泥质条带灰岩、灰岩、鲕状灰岩夹灰色粉砂质板岩(53 m); 其上为整合接触的中寒武统大丫口组黄色、红黄色板岩、泥质粉砂岩互层, 下部夹灰岩透镜体(221 m); 田蓬组上部为灰色薄层状白云岩、砂质白云岩与鲕状泥质条带灰岩、石英砂岩互层, 下部为黄色粉砂岩、板岩夹灰岩(317 m); 龙哈组为灰色薄—中厚层状白云岩、粉砂质白云岩夹浅灰黄色白云质粉砂岩(>460 m)。龙哈组分布广泛, 次为田蓬组和大丫口组, 冲庄组和大寨组呈局部分布。由于本区隆升较早, 致使泥盆系浅灰—深灰色砂岩、泥岩和灰岩, 底部的含砾砂岩、砾岩呈低角度直接超覆于龙哈组及田蓬组之上, 缺失上寒武统、奥陶系及志留系(图 1 中(b))。

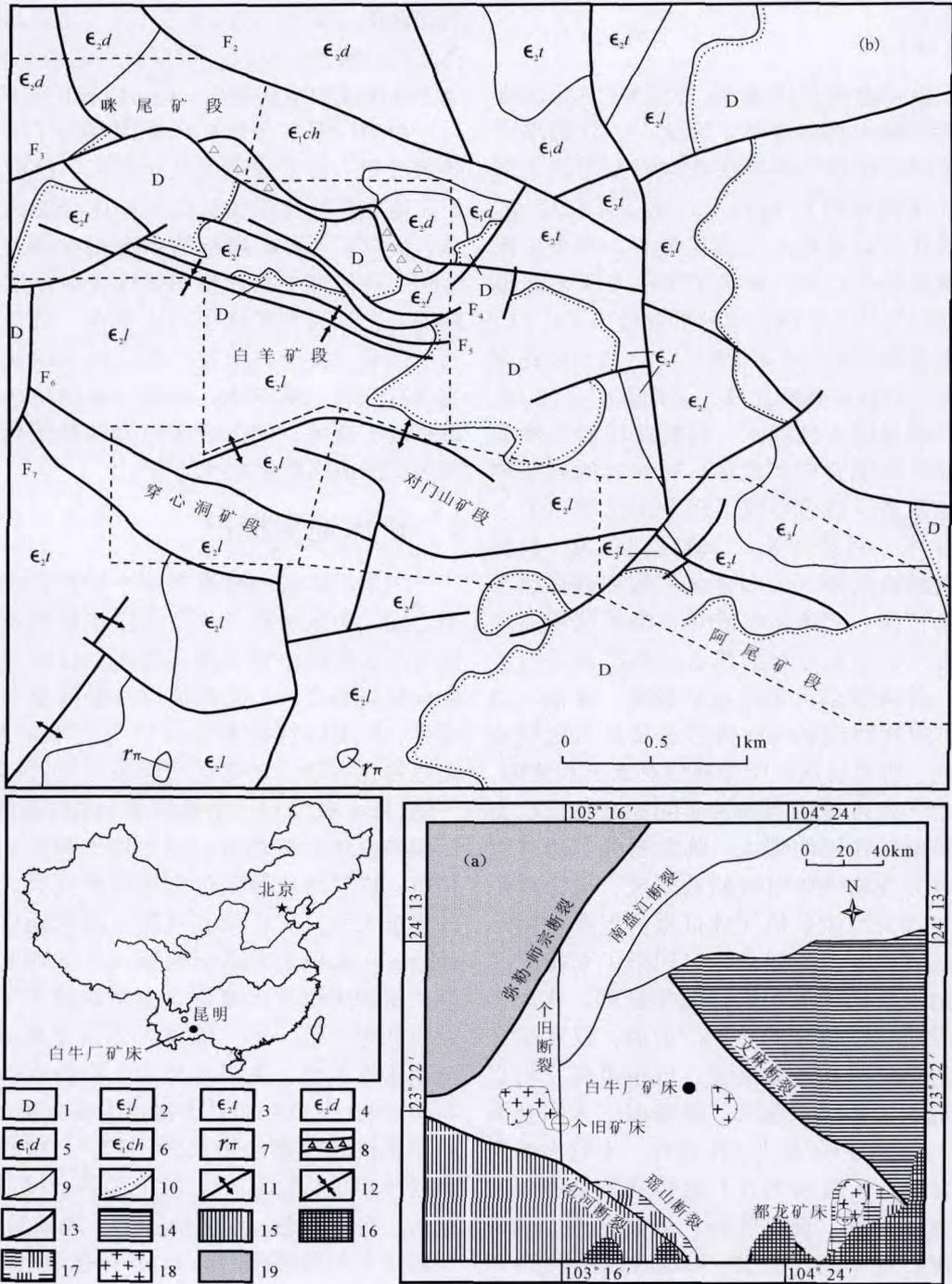


图1 白牛厂矿床地质简图

Fig. 1 Sketch geological map of Bainiuchang deposit

1. 泥盆系; 2. 中寒武统龙哈组; 3. 中寒武统田蓬组; 4. 中寒武统大丫口组; 5. 早寒武统大寨组; 6. 早寒武统冲庄组; 7. 花岗岩;
8. 构造角砾岩; 9. 整合地层界线; 10. 不整合地层界线; 11. 背斜; 12. 向斜; 13. 断裂; 14. 南岭褶皱系; 15. 哀牢山地块;
16. 越北古陆; 17. 基底混合岩; 18. 花岗岩; 19. 扬子地台

滇东南褶皱带在加里东期为一伸展背景下的裂陷海槽, 海槽北面及西面为扬子古陆, 南为越北古陆, 东面与华南海槽相通, 为一近东西向展布的狭窄海槽。海槽的沉积盆地边缘和内部受阶梯状断裂带控制, 盆地明显分割为台地型盆地和

裂陷深海槽区以及两者之间的海下断裂斜坡带。白牛厂银多金属矿床即位于断裂斜坡带靠陆棚一侧的次一级断层凹陷内, 矿区主体构造为圆宝山复式向斜和以 F₃、F₇ 为代表的北西西向断裂(图 2); 圆宝山复式向斜, 位于矿区的西北部, 轴向

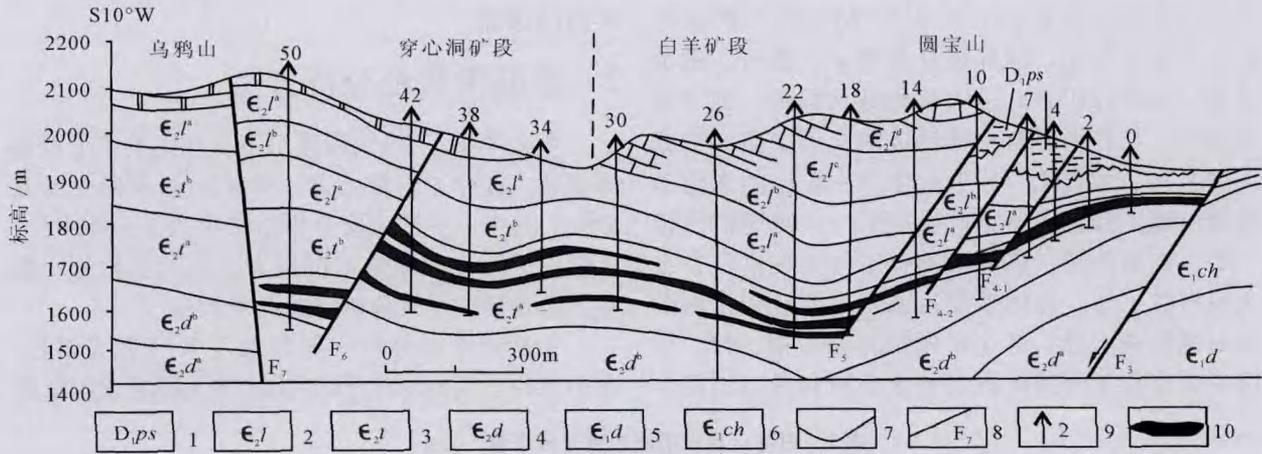


图2 白牛厂矿床57号勘探线矿体横剖面图(据云南省地质矿产局二大队资料, 1993)

Fig. 2 Cross profile of orebody along No. 57 exploration line in Bainiuchang deposit

- 1. 早泥盆统坡松冲组; 2. 中寒武统龙哈组; 3. 中寒武统田蓬组; 4. 中寒武统大丫口组; 5. 早寒武统大寨组; 6. 早寒武统冲庄组;
- 7. 地质界线; 8. 断裂及编号; 9. 钻孔及编号; 10. 矿体

北西西向, 轴长约 2 km, 核部为龙哈组白云岩, 枢纽两端向矿区外围延伸至下泥盆统超覆面附近, 地层产状从四周向中心槽部倾斜, 整体上显示出一个宽缓的构造盆地, 控制了沉积相的空间配置方式, 从而制约了矿体的空间形态及产状; 北西西向断裂 F₃、F₇ 为多期活动断裂, 为控制含矿次级盆地南北缘的同生断裂, 也是深部含矿热卤水进入海底凹陷成矿的通道。其中, 断裂 F₃ 位于矿体的北部边缘, 全长 4 km, 是顺 V₁ 号矿体顶部或附近发育的一条低角度正断层; 断裂 F₇ 位于矿体的南缘, 全长 3.4 km。

矿区有小的呈脉状产出的花岗斑岩, 主要分布于穿心洞和对门山矿段; 在矿体的下部已查明有隐伏花岗岩体存在, 白羊矿段侵位较低, 阿尾矿段侵位较高, 另外在矿床的东南部有薄竹山花岗岩体出露, 岩性以黑云母二长花岗岩为主。

白牛厂银多金属矿床 70 余个隐伏矿体分布于咪尾、白羊、穿心洞、对门山和阿尾 5 个矿段(图 1 中(b))。矿体主要赋存于田蓬组上部及龙哈组下部, 按产状可分为与沉积岩层产状基本一致的整合矿体(层状、似层状、透镜状等矿体), 与地层不整合的矿体(脉状、网脉状和不规则状矿体等), 其中 V₁ 号矿体规模最大, 金属量占总储量的 95% 以上, 几乎横穿了上述 5 个矿段, 但以西北部白羊矿段最为发育。该矿体长 1 200 m, 倾向延深超过 1 400 m, 总体向南倾斜, 倾角一般为 20°左右, 受圆宝山复式向斜控制, 与地层同步褶皱(图 2), 矿体内部普遍发育极薄的、延伸很远

的纹层状韵律层理, 主要蚀变类型为硅化、绢云母化、碳酸盐化, 但不甚发育。矿石以方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、银黝铜矿、黝锑银矿、深红银矿及辉锑银矿等为主, 呈浸染状、稠密浸染状、块状和条带状构造, 胶状结构发育, 脉石矿物主要为微晶石英、方解石、白云母及绢云母等。穿心洞、对门山和阿尾矿段位于

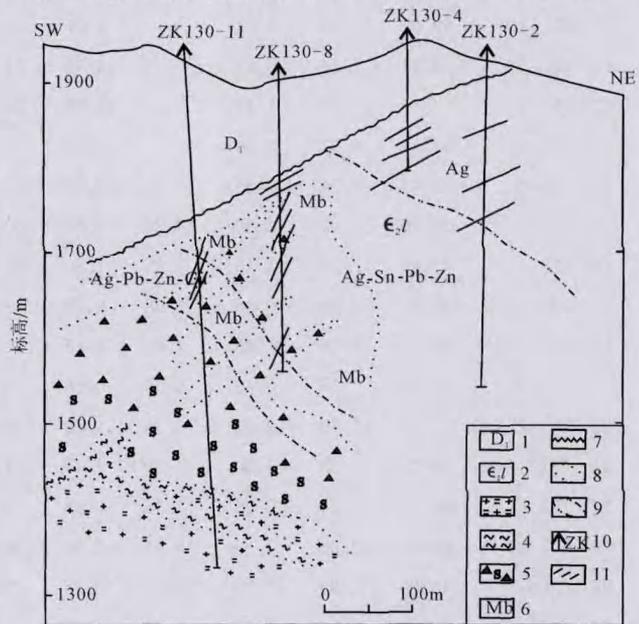


图3 白牛厂矿床阿尾矿段130号勘探线剖面图

(据云南省地质矿产局二大队资料, 1993)

Fig. 3 Profile along No. 130 exploration line in Awei ore block

- 1. 下泥盆统; 2. 龙哈组; 3. 黑云母二长花岗岩; 4. 云英岩化; 5. 角闪岩及砂岩岩化; 6. 大理岩化; 7. 地层不整合界线; 8. 接触变质界线; 9. 矿化分界线; 10. 钻孔及编号; 11. 脉状矿

矿区的东部至东南部, 矿石以黄铁矿、铁闪锌矿、方铅矿为主, 深部还有黄铜矿、锡石、磁黄铁矿、铁闪锌矿等, 呈块状和脉状构造, 蚀变程度加强, 与花岗岩有关的热接触交代变质产物如大理岩化、角岩化、矽卡岩化等在矿区的东南部普遍出现, 特别在阿尾矿段(图3)。咪尾矿段位于矿区的最西端, 该矿段勘查工作正在进行, 本文没有做工作。总体来说, 蚀变程度从矿区西部到东部逐渐增强, 各个矿段都含银、铅、锌, 但锡主要富集于阿尾矿段以及穿心洞和对门山两个

矿段的深部。

2 样品采集及分析方法

本文采集了14块田蓬组下段和龙哈组上段地层样品, 进行了主量元素、微量元素及稀土元素分析。其中, 主量元素分析结果见表1, 同时表1还收集了部分大厂热水沉积岩主量元素数据; 微量元素及稀土元素分析结果见表2。

主量元素的分析一部分采用X荧光光谱法, 在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重

表1 白牛厂容矿围岩主量元素含量($w_B/\%$)

Table 1 The major element contents of host-rocks in the Bainiuchang deposit(%)

序号	样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	烧失量	总值
1	BD-1	13.47	2.86	1.88		2.27	42.80	0.05	0.76	0.07	0.04	0.16	35.75	100.11
2	BD-2	5.30	0.80	0.62		2.81	48.64	0.05	0.24	0.03	0.02	0.03	41.48	100.02
3	BD-3	15.59	1.62	1.55		1.70	43.46	0.06	0.44	0.30	0.03	0.06	35.08	99.89
4	BD-4	67.05	12.90	6.40		2.18	3.58	1.40	1.76	0.06	0.02	0.37	4.24	99.96
5	BD-5	59.18	17.02	6.98		2.41	3.46	0.15	4.43	0.09	0.03	1.24	4.88	99.86
6	BD-6	58.12	17.90	6.78		2.43	2.78	0.11	5.18	0.09	0.03	1.36	4.94	99.72
7	BD-7	65.37	13.68	6.01		2.03	3.26	0.11	3.93	0.12	0.02	0.35	5.24	100.12
8	BD-8	69.73	10.89	4.75		1.53	4.95	1.04	2.30	0.10	0.02	0.32	4.17	99.80
9	BD-9	66.48	13.91	5.38		1.85	2.78	1.11	3.19	0.09	0.02	0.38	4.58	99.76
10	BD-10	59.69	13.36	5.04		2.07	8.04	0.85	2.49	0.10	0.02	0.30	7.79	99.75
11	LH-1	19.23	2.44	0.83		16.55	23.87	0.72	1.62	0.03	0.09	0.15	35.80	101.33
12	LH-2	7.14	0.97	1.49		18.33	30.06	0.43	0.22	0.04	0.02	0.03	42.98	101.71
13	LH-4	57.21	6.02	0.96		6.52	9.56	1.67	4.63	0.06	0.15	0.35	14.31	101.43
14	LH-5	2.45	0.94	0.65		20.73	29.72	1.18	0.17	0.03	0.02	0.03	45.57	101.49
15	T2-2	59.90	6.99	6.50	14.20	0.64	0.42	0.04	0.95	0.02	0.03	0.37	8.30	98.36
16	T18	47.80	12.90	1.15	1.55	1.80	19.30	0.13	4.02	0.14	<0.03	0.51	11.40	100.70
17	DT25-1	11.37	3.26	0.86	1.98	0.80	2.22	0.12	2.20	0.02	<0.03	0.06	2.31	25.20
18	DT25-2	48.74	15.36	1.36	2.66	1.15	1.01	0.09	10.50	0.01	0.04	0.73	3.96	85.61
19	DT-25-51	39.80	7.16	0.40	0.45	0.66	0.92	0.03	4.73	0.01	<0.03	0.19	1.80	56.15
20	DT-25-52	67.28	11.79	2.92	3.78	1.43	0.47	0.07	6.95	0.01	0.11	0.78	4.42	100.01
21	C15-2	84.29	5.55	1.00	1.29	1.17	1.01	0.04	1.92	0.02	<0.03	0.29	2.99	99.57
22	T22-1	60.10	6.24	0.25	17.36	0.85	1.11	0.05	3.69	0.09	<0.03	0.26	4.10	94.10
23	T22-2	66.60	12.00	1.30	8.45	2.01	0.74	0.09	5.03	0.03	0.09	0.49	3.80	100.63
24	C20-1	15.60	1.85	2.79	57.15	0.25	2.92	0.02	0.37	0.09	0.01	0.08	18.40	99.53
25	C20-2	48.84	10.87	1.49	11.44	1.90	9.22	0.34	1.75	0.17	4.55	0.44	8.34	99.35
26	T11	91.15	1.76	1.12	3.18	0.15	0.47	0.01	0.45	0.04	0.23	0.04	1.19	99.79
27	C5	85.26	1.05	0.51	0.45	0.18	8.46	0.01	0.14	0.06	0.45	0.03	3.60	100.20

注: 序号1-14为本文测试的白牛厂矿床沉积围岩数据, 其中序号1-10采用湿化学方法分析, 序号11-14采用XRF方法分析; 序号15-27为大厂热液沉积岩数据^[27], 由于部分样品硫含量高, 这些样品的Fe₂O₃和FeO原始分析不准确, 故所用数据是根据样品中黄铁矿或磁黄铁矿含量校正过的, 但总量保持不变, 而另一些样品中含有未被分析的锡石, 具体见文献[27]。

表 2 白牛厂容矿围岩微量、稀土元素含量及球粒陨石标准化参数($w_B/10^{-6}$)

Table 2 Trace element, rare earth element contents and chondrite-normalized parameters of host-rocks in the Bainiuchang deposit

样号	Sc	Ti	Cr	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Rb	Zr	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Ba	Tl	Pb	Th	U
LH-1	1.68	1 020	42.0	12.2	316.0	2.90	0.43	7.28	34.3	93.4	0.21	1.97	0.39	2.15	0.78	176.0	0.16	174.0	5.05	1.73
LH-2	1.09	222	13.9	23.1	48.3	1.63	0.32	44.30	9.6	11.6	0.81	0.26	0.04	2.43	3.21	21.0	0.13	157.0	1.30	1.76
LH-4	3.12	2 420	31.7	10.1	70.2	6.01	1.03	5.52	97.2	222.0	0.44	0.33	0.09	8.40	2.15	487.0	0.44	179.0	15.90	2.15
LH-5	0.45	179	14.3	5.89	97.5	0.93	0.11	8.27	6.5	9.1	0.15	0.46	0.04	3.20	1.63	11.4	0.08	278.0	1.05	1.23
BD-1	2.56	690	27.2	39.4	231.0	4.16	0.39	67.40	42.0	58.6	3.37	1.79	0.17	16.40	23.00	125.0	0.63	763.0	5.01	1.73
BD-2	1.61	527	12.8	5.4	36.6	2.40	0.28	7.18	26.4	40.8	0.13	0.22	0.03	2.87	1.11	64.4	0.18	153.0	2.59	0.60
BD-3	1.51	383	13.2	9.8	47.3	1.82	0.31	7.56	18.5	16.0	0.09	0.45	0.05	2.02	0.67	48.0	0.14	219.0	2.12	0.63
BD-4	11.70	5 650	92.0	50.0	144.0	18.90	2.62	6.90	129.0	405.0	0.64	1.03	0.10	6.00	0.82	361.0	0.61	140.0	26.10	4.32
BD-5	14.40	6 220	122.0	25.9	289.0	31.80	2.87	84.30	324.0	299.0	3.42	1.13	0.17	10.80	10.50	528.0	1.82	998.0	31.30	4.82
BD-6	19.40	6 230	246.0	39.7	172.0	29.00	2.91	14.20	385.0	240.0	0.65	0.30	0.14	7.70	7.34	541.0	1.86	131.3	25.75	3.99
BD-7	13.10	5 640	167.0	15.5	199.0	21.90	2.53	14.50	263.0	428.0	0.81	0.34	0.11	10.10	3.02	540.0	1.61	145.0	23.30	3.75
BD-8	9.11	4 870	99.7	89.8	825.0	15.10	2.67	8.80	145.0	482.0	0.91	1.95	0.11	5.41	0.99	498.0	0.78	248.0	22.50	2.97
BD-9	13.60	4 820	81.2	11.2	123.0	22.40	2.4	8.18	207.0	273.0	0.45	0.31	0.13	6.23	1.63	478.0	0.82	93.2	12.40	2.07
BD-10	10.10	4 510	66.3	29.4	110.0	16.60	2.03	7.28	149.0	305.0	0.54	0.21	0.08	5.86	1.02	284.0	0.78	11.9	25.10	3.94

样号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	δCe	δEu	(La/Yb) _N	(La/Sm) _N	(Gd/Yb) _N
LH-1	10.60	25.1	2.70	10.40	2.13	0.46	2.00	0.32	1.98	0.38	1.14	0.16	1.10	0.16	4.89	63.43	1.10	0.67	6.49	3.13	1.47
LH-2	7.51	15.4	1.69	6.22	1.22	0.24	1.13	0.17	1.03	0.21	0.56	0.08	0.45	0.07	7.35	43.33	1.00	0.61	11.25	3.87	2.03
LH-4	34.20	71.8	7.69	28.10	5.00	0.97	4.16	0.60	3.53	0.68	1.92	0.28	1.87	0.28	8.22	169.25	1.03	0.63	12.32	4.30	1.8.
LH-5	4.64	9.9	1.06	3.87	0.70	0.16	0.76	0.12	0.72	0.16	0.48	0.06	0.37	0.05	4.57	27.64	1.04	0.66	8.46	4.20	1.65
BD-1	12.50	25.0	2.80	10.40	2.09	0.44	1.75	0.29	1.66	0.34	0.96	0.14	0.84	0.12	9.57	68.90	0.98	0.69	10.03	3.76	1.68
BD-2	6.31	12.6	1.39	5.13	0.94	0.18	0.86	0.12	0.78	0.15	0.43	0.06	0.41	0.06	1.93	31.37	0.99	0.61	10.27	4.23	1.67
BD-3	9.36	21.1	2.52	9.89	2.12	0.48	2.32	0.34	2.09	0.42	1.12	0.14	0.87	0.12	7.19	60.09	1.03	0.65	7.28	2.77	2.16
BD-4	59.40	126.0	13.20	47.60	9.21	1.48	7.99	1.12	6.60	1.28	3.83	0.54	3.53	0.55	16.20	298.09	1.04	0.51	11.36	4.06	1.83
BD-5	66.20	116.0	13.60	47.60	8.84	1.73	7.09	1.15	6.82	1.43	3.98	0.60	3.71	0.59	37.60	316.94	0.88	0.65	12.03	4.71	1.54
BD-6	49.00	101.0	10.90	39.80	7.52	1.41	6.94	1.09	6.73	1.36	4.06	0.59	4.04	0.62	17.00	252.07	1.01	0.59	8.16	4.10	1.39
BD-7	61.60	131.0	13.60	49.90	9.24	1.59	8.19	1.23	7.70	1.47	4.26	0.62	4.06	0.62	18.70	313.83	1.05	0.55	10.23	4.19	1.63
BD-8	78.30	162.0	18.16	71.60	15.10	2.74	14.20	2.06	11.7	2.20	5.92	0.81	5.03	0.72	27.30	417.38	1.00	0.56	10.48	3.27	2.28
BD-9	52.70	112.0	12.00	44.60	8.83	1.58	8.42	1.20	7.15	1.34	3.70	0.53	3.38	0.50	16.30	274.11	1.03	0.55	10.52	3.75	2.01
BD-10	49.60	105.0	11.30	42.20	8.16	1.40	7.34	1.11	6.54	1.32	3.76	0.55	3.70	0.54	15.80	258.04	1.03	0.54	9.02	3.82	1.60

点实验室完成,所用仪器型号为 AXIOS(PW4400)。另一部分主量元素的测试采用常规湿化学分析方法,在中国科学院地球化学研究所矿床国家重点实验室分析测试中心完成,元素分析精度优于 10%。

微量元素和稀土元素分析的前期样品处理过程在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。样品的后期测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心用 ICP-MS 完成,分析方法和流程见文献 [19],分析过程中以国内标样 GSR-5 为标样,分析精度优于 5%。

3 矿床围岩的主量及微量元素特征

3.1 矿床围岩主量元素特征

热水沉积岩是由来自深部的热卤水喷流进入沉积盆地的局部凹陷内,于静水还原环境中以化学沉积为主所形成的主要是硅质和硫化物以及硫酸盐的热水沉积物^[20-26]。在研究方法上,目前并没有一种非此即彼的标准能判断某种岩石是否为热水沉积岩。但是,已经积累起来的大量实际资料和野外地质关系的研究证明,前寒武纪铁建造及与块状硫化物矿床有关的各类硅质岩、长石岩及电气石岩等均属热液沉积岩^[27]。韩发等^[27]通

过对各种成因硅质岩的研究,认为生物成因的硅质岩与火山及海底热卤水成因的硅质岩有明显差别,在 $w(\text{SiO}_2) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 及 $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 判别图解上分别处于不同的区域。白牛厂银多金属矿床硅质岩 Al_2O_3 含量为0.80%~17.90%,平均值8.24%; TiO_2 含量为0.03%~1.36%,平均值0.37%; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为0.29%~5.29%,平均值2.87%。上述3组主量元素平均含量均高于Hein et al. 1981年研究得出的太平洋中脊生物成因硅质岩相应主量元素平均含量(0.84%、0.016%、0.34%),而与大厂相应元素含量(Al_2O_3 含量为1.05%~15.36%,平均值7.44%; TiO_2 含量为0.03%~0.78%,平均值0.33%; $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量为0.15%~10.59%,平均值3.36%)^[27]相当。在 $w(\text{Al}_2\text{O}_3) - w(\text{TiO}_2)$ 及 $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 判别图解上,白牛厂矿区硅质岩与大厂硅质岩落于相同的区域(图4,图5),可能暗示二者在成因上具有相似性。

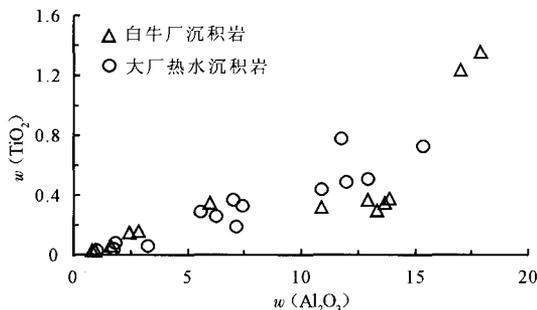


图4 白牛厂容矿围岩 $w(\text{TiO}_2) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 关系图
(据文献[27]修改)

Fig. 4 The $\text{TiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of host-rock in the Bai niu chang deposit

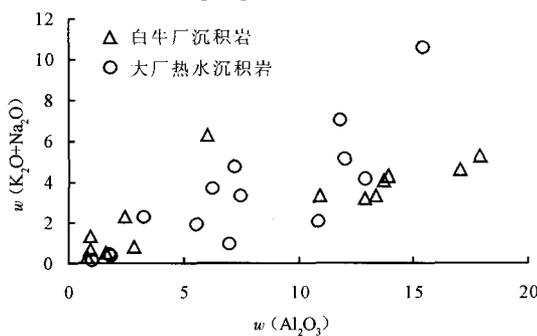


图5 白牛厂容矿围岩 $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) - w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 关系图
(据文献[27]修改)

Fig. 5 The $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} - \text{Al}_2\text{O}_3$ diagram of host-rock in the Bai niu chang deposit

3.2 矿床围岩微量元素特征

国外许多研究者^[28-31]曾试图通过热水沉积岩中元素的绝对含量或是通过热水沉积岩中元素含量与陆源碎屑岩中相应元素含量的比值来区分热水沉积岩和正常沉积岩,但是由于富铁的热热水沉积岩与正常沉积岩具有相似的化学组成,这些尝试都不能有效地判别上述两种沉积岩成因。Marchig^[32]在研究现代大洋热水沉积物的微量元素特征时,认为深海沉积物和正常沉积岩中Cr主要来源于大陆碎屑物质,并且必然伴随其他陆源物质(Ti、Mg、K、Rb和Zr)富集,从而表现出明显的正相关关系;而在热液过程中,由于Cr有限的活动性,它在热液沉积物中的富集并没有伴随其他陆源物质的富集,从而使它们之间的相关关系不明显或没有意义。同样,深海沉积物中P也与Sc、Y、La及其他稀土元素呈正相关关系,而热液沉积物中上述元素之间的相关关系不明显或变得没有意义。在 $w(\text{Zr})/w(\text{Cr}) - w(\text{Y})/w(\text{P})$ 关系图上,正常沉积岩与热液沉积物之间的这种不同会更明显。在此基础上,作者研究了白牛厂容矿岩石微量元素之间的相关性(图6),在 $w(\text{Cr}) - w(\text{Zr})$ 、 $w(\text{Cr}) - w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{Cr}) - w(\text{Rb})$ 、 $w(\text{Cr}) - w(\text{Mg})$ 、 $w(\text{Cr}) - w(\text{K})$ 关系图上, $w(\text{Cr}) - w(\text{Zr})$ 呈非线性关系, $w(\text{Cr}) - w(\text{Mg})$ 呈不明显的负相关关系,与热液沉积物中 $w(\text{Cr}) - w(\text{Mg})$ 呈相似分布状态; $w(\text{Cr}) - w(\text{Ti})$ 、 $w(\text{Cr}) - w(\text{K})$ 、 $w(\text{Cr}) - w(\text{Rb})$ 呈较好的正相关关系,可能与热液沉积物的稀释和正常沉积物的混染有关。而在 $w(\text{P}) - w(\text{Y})$ 、 $w(\text{P}) - w(\text{Sc})$ 、 $w(\text{P}) - w(\text{La})$ 关系图上,P与Sc、Y、La均无明显相关关系,并且相关性极差,相关系数为0.055 8~0.094 5。同时,在 $w(\text{Zr})/w(\text{Cr}) - w(\text{Y})/w(\text{P})$ 关系图上(图7),相关系数只有0.041 2,相关性更差。总之,虽然白牛厂容矿岩石有些元素之间可能由于正常沉积物的混染和稀释,从而显示出一定的正相关关系,但从总体来看,大部分元素之间都呈非线性相关关系,暗示了可能存在一定程度的热水沉积活动。

同时, Marchig^[32]研究认为As、Sb和Ag的富集是热水沉积物区别于正常沉积物的重要标志。白牛厂含矿建造沉积岩样品的As、Sb、Ag平均含量分别为 20.8×10^{-6} 、 4.13×10^{-6} 、 0.90×10^{-6} ,与广西丹池盆地典型热水沉积成因硅质岩的As、Sb、Ag含量(16×10^{-6} 、 90×10^{-6} 、 0.8×10^{-6})^[33]和个旧明显富集热水沉积物的含矿围岩

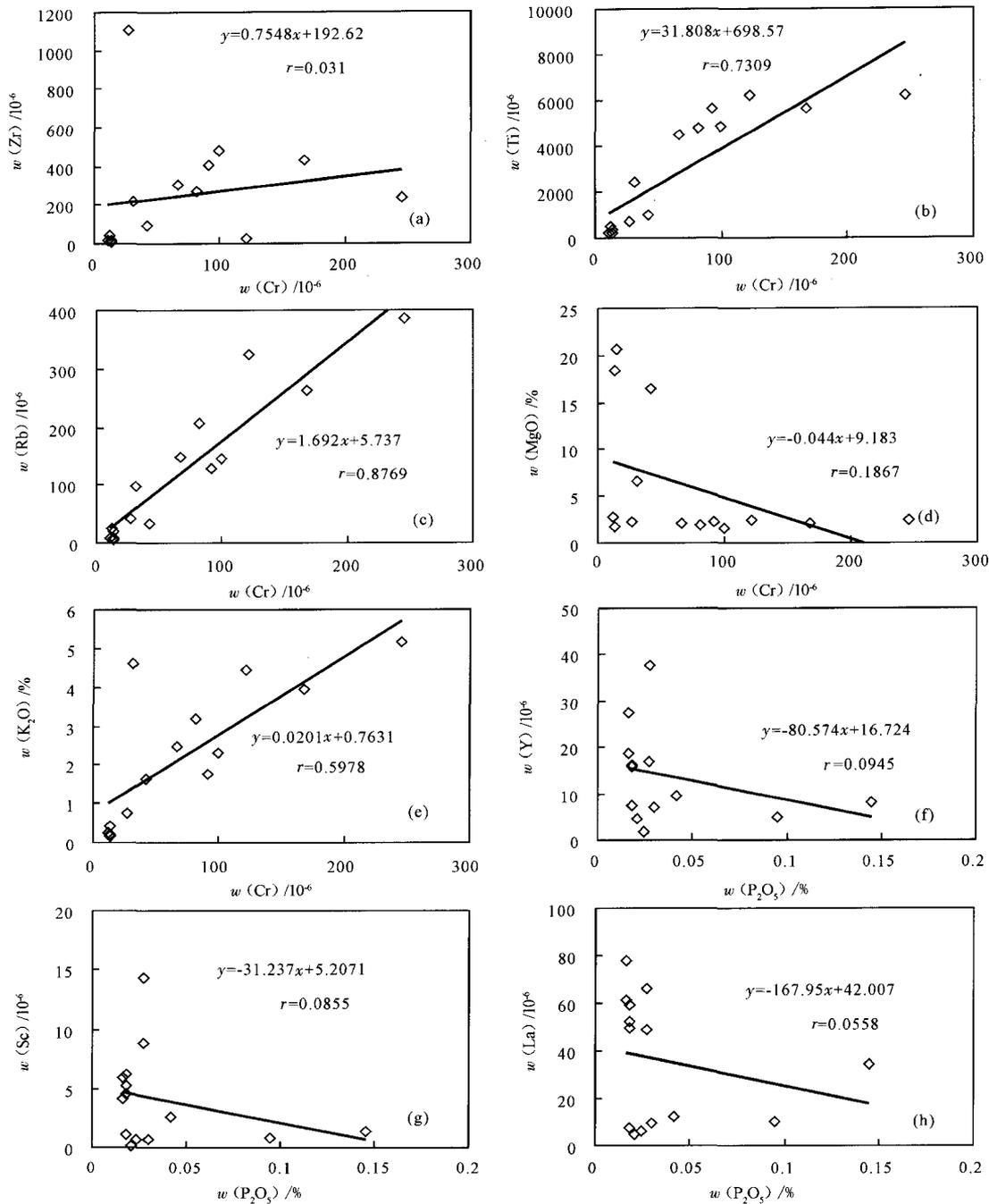


图 6 白牛厂矿床容矿岩石成因判别图

Fig. 6 Discrimination diagrams of host-rock petrogenesis in the Bainiuchang deposit

As、Sb、Ag 含量 (22.0×10^{-6} 、 10.5×10^{-6} 、 0.80×10^{-6} [34]) 相比, 除 Sb 含量差别较大外, As 和 Ag 的含量相当, 说明白牛厂含矿建造沉积岩可能也有较多的热水沉积物的存在。

3.3 矿床围岩稀土元素特征

现代海水沉淀下来的化学沉积物, 如洋中脊附近的 Fe - Mn 沉淀物, 准确反映了海水相对亏损 Eu 和 Ce 的特点。所以, Fryer [35] 认为化学沉积物

特别是条带状含铁建造是追踪随着时间的推移沉积环境中稀土元素演化的最好物质。韩发等 [36] 认为可以把含铁建造作为典型的热液沉积岩, 把我们研究的样品稀土元素组成特点与其加以比较, 无疑是解决某些岩石、矿石成因的有效方法。基于此, 作者引用了两组典型热水沉积岩稀土元素含量数据, 即加拿大沙利文矿山的条带状富电气石热液沉积岩(样品号 4155ND - 1)和加拿大 Agni-

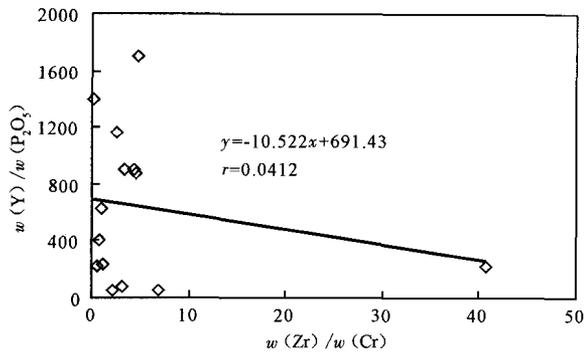


图7 白牛厂矿床容矿围岩 $w(Y)/w(P_2O_5) - w(Zr)/w(Cr)$ 关系图

Fig. 7 The $Y/P_2O_5 - Zr/Cr$ diagram of host-rock in the Bainiuchang deposit

co-Eugle 矿山的铁建造中的条带状燧石岩(样品号 19577a)稀土元素含量数据(具体数据见文献 [36]), 与白牛厂含矿建造沉积岩的稀土元素类比, 探讨其成因。

白牛厂矿区容矿围岩样品的稀土元素球粒陨石标准化参数(表 2)与配分曲线(图 8 中(a))显示, 标准化曲线均具有轻稀土富集的右倾特征, 轻稀土分异相对较强, 重稀土分异较弱, Eu 出现不同程度的负异常, Ce 异常不明显, $(La/Yb)_N = 6.49 \sim 12.32$, $(La/Sm)_N = 2.77 \sim 4.71$, $(Gd/Yb)_N = 1.39 \sim 2.28$, $\delta Eu = 0.51 \sim 0.69$, $\delta Ce = 0.88 \sim 1.10$ 。在球粒陨石标准化图(图 8 中(a))上, 以 LH-4 样品为界明显分为两组(第一组包括: LH-4、BD-4、BD-5、BD-6、BD-7、BD-8、BD-9、BD-10; 第二组包括: LH-1、LH-2、LH-5、BD-1、BD-2、BD-3)。第一组样品岩性以灰岩为主, 稀土元素总量较高, $w(\Sigma REE) = 169.25 \times 10^{-6} \sim 316.94 \times 10^{-6}$, 可能与较多陆源物质的加入有关。Fryer^[37]认为热液沉积物的稀土元素含量一般是非常低的, 因此, 任何有意义的陆源物质或火山碎屑的加入都会严重影响 REE 的丰度, 也影响其数据解释。第二组样品岩性以白云岩为主, 稀土总量较低, $w(\Sigma REE) = 27.64 \times 10^{-6} \sim 68.90 \times 10^{-6}$, 与产于加拿大沙利文矿山的条带状富电气石热液沉积岩 ($w(\Sigma REE) = 57.85$) 和加拿大 Agnico-Eugle 矿山的铁建造中的条带状燧石岩 ($w(\Sigma REE) = 35.40$) 相近, 并且具有相似的球粒陨石标准化参数, $(La/Yb)_N = 6.29 \sim 6.86$, $(La/Sm)_N = 1.97 \sim 3.06$, $(Gd/Yb)_N = 1.32 \sim 1.75$, $\delta Eu = 0.64 \sim 0.82$, $\delta Ce = 0.97 \sim 1.06$, 暗示了其热水沉积成因。

本文还同时给出了白牛厂矿区容矿围岩样品的北美页岩标准化参数及稀土元素配分曲线(表 3 及图 8 中(b))。在北美页岩标准化稀土配分图上, 样品同样明显分为两组: 第一组样品稀土含量均高于北美页岩, 稀土配分曲线呈水平分布特征, Eu

表 3 白牛厂矿床容矿围岩北美页岩标准化参数
Table 3 North America shale-normalized REE parameters of host-rocks in the Bainiuchang deposit

序号	样品号	δCe	δEu	$(La/Yb)_N$	$(La/Sm)_N$	$(Gd/Yb)_N$
1	LH-1	1.11	1.04	0.91	0.93	1.04
2	LH-2	1.02	0.96	1.57	1.15	1.43
3	LH-4	1.05	1.00	1.72	1.28	1.27
4	LH-5	1.06	1.01	1.18	1.25	1.17
5	BD-1	1.00	1.08	1.40	1.12	1.19
6	BD-2	1.01	0.95	1.44	1.26	1.18
7	BD-3	1.03	1.00	1.02	0.83	1.53
8	BD-4	1.06	0.81	1.59	1.21	1.29
9	BD-5	0.91	1.03	1.68	1.40	1.09
10	BD-6	1.04	0.92	1.14	1.22	0.98
11	BD-7	1.08	0.86	1.43	1.25	1.15
12	BD-8	1.02	0.88	1.47	0.97	1.61
13	BD-9	1.05	0.86	1.47	1.12	1.42
14	BD-10	1.05	0.85	1.26	1.14	1.13

注: $\delta Eu = Eu/Eu^* = 2Eu_N / (Sm_N + Gd_N)$, $\delta Ce = Ce/Ce^* = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)$, 下标 N 代表北美页岩标准化, 标准化数据据

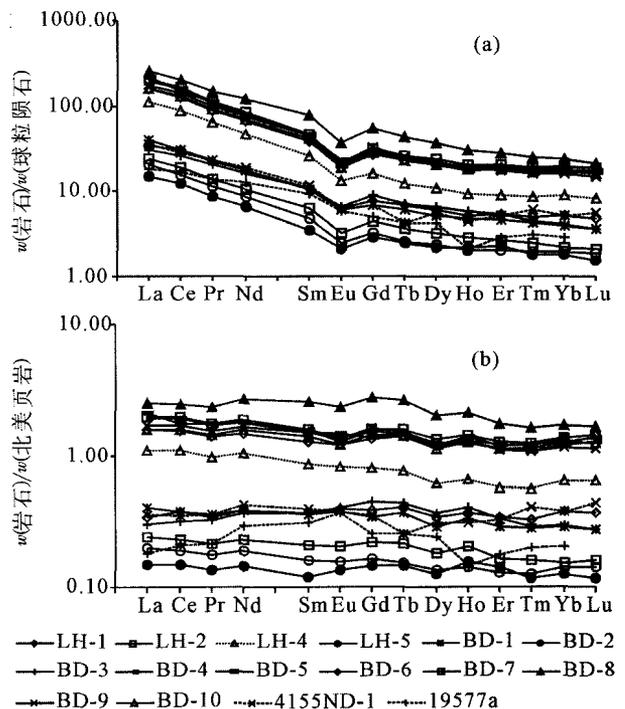


图 8 白牛厂矿床容矿围岩北美页岩标准化稀土配分模式图
Fig. 8 The North America shale-normalized REE distribution pattern of host-rock in the Bainiuchang deposit

呈弱负异常或无异常, Ce 异常不明显, $(La/Yb)_N = 1.14 \sim 1.68$, $\delta Eu = 0.81 \sim 1.02$, $\delta Ce = 0.91 \sim 1.08$; 第二组样品稀土含量均低于北美页岩, 样品稀土标准化参数 $(La/Yb)_N = 0.91 \sim 1.72$, $\delta Eu = 0.95 \sim 1.08$, $\delta Ce = 1.00 \sim 1.11$, 除大部分样品稀土配分呈右倾模式外, 其余特征与产于加拿大沙利文矿山的条带状富电气石热液沉积岩和加拿大 Agnico-Eagle 矿山的铁建造中的条带状燧石岩相近 ($(La/Yb)_N = 0.88 \sim 0.96$, $\delta Eu = 1.01 \sim 1.31$, $\delta Ce = 0.97 \sim 1.05$)。虽然从总体上来说, 本次测试的第二组样品不完全具备稀土元素总量低、北美页岩标准化模式呈重稀土相对富集的左倾模式这一热水沉积岩的共性^[38-43], 但是与典型热水沉积岩稀土元素参数的相似性, 暗示了其热水沉积成因, 只是可能由于较多的正常沉积物的影响, 歪曲甚至掩盖了部分原来热水沉积物的稀土元素特征。

4 结 语

容矿岩石的地球化学研究显示: 白牛厂银多金属矿床容矿围岩具有明显的热液沉积特征, 暗示了中寒武世滇东南局部地区可能发生了广泛的热液沉积事件。这与白牛厂银多金属矿床分布受同生断裂及局限性盆地特殊沉积相的控制是一致的, 中寒武世含矿热液经同生断裂 F_3 、 F_7 进入局部凹陷盆地, 由于盆地古地形的圈闭作用, 致使陆源碎屑物质很少进入含矿盆地, 有利于成矿物质的富集; 矿区地层与矿体同步褶皱, 明显受地层岩相控制, 从而制约了矿体的空间形态及产状^[6]。同时, 也与作者在系统的显微镜鉴定中发现存在大量的纹层状白铁矿, 并且这种纹层状白铁矿局部具有明显的弯曲揉皱现象(另文发表)相一致, 何镜宇^[44]认为这是裂隙槽盆斜坡带上形成的独特滑动构造系列, 它与同生断裂活动引起的海底强烈下陷有关。

参考文献:

- [1] 江鑫培. 蒙自白牛厂银-多金属矿床特征和成矿作用探讨 [J]. 云南地质, 1990, 9(4): 291-307.
- [2] 高子英. 蒙自白牛厂银多金属矿床的成因研究 [J]. 云南地质, 1996, 15(1): 91-102.
- [3] 周建平, 徐克勤, 华仁民, 等. 滇东南锡多金属矿床成因商榷 [J]. 云南地质, 1997, 16(4): 309-349.
- [4] 周建平, 徐克勤, 华仁民, 等. 滇东南喷流沉积块状硫化物特征与矿床成因 [J]. 矿物学报, 1998, 18(2): 158-168.
- [5] 白金刚. 云南白牛厂超大型银多金属矿床含矿沉积相研究及沉积喷流成矿作用证据 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1993: 1-95.
- [6] 白金刚, 池三川, 覃功炯. 云南白牛厂沉积喷流型银多金属矿床沉积环境分析 [J]. 有色金属矿产与勘查, 1996, 5: 140-145.
- [7] 白金刚, 池三川, 梅建明. 云南白牛厂超大型银多金属矿床黄铁矿的标型特征及其成因意义 [J]. 贵金属地质, 1995, 4(4): 302-306.
- [8] 陈学明, 邓军, 白金刚, 等. 云南白牛厂矿区古生代沉积盆地的成矿流体系统 [J]. 现代地质, 2000, 14(2): 173-178.
- [9] 陈学明, 林棕, 谢富昌. 云南白牛厂超大型银多金属矿床叠加成矿的地质地化特征 [J]. 地质科学, 1998, 33(1): 115-123.
- [10] 刘玉平, 李朝阳, 曾志刚. 都龙锡锌矿床单矿物 Rb-Sr 等时线年龄测定 [J]. 昆明冶金高等专科学校学报, 1999, 15: 5-8.
- [11] 祝朝辉, 张乾, 邵树勋, 等. 云南白牛厂银多金属矿床成因 [J]. 世界地质, 2006, 25(4): 353-359.
- [12] 祝朝辉, 张乾, 何玉良. 滇东南白牛厂银多金属矿床成矿元素 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(4): 327-332.
- [13] 祝朝辉. 云南省白牛厂超大型银多金属矿床矿物学及矿床地球化学 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2008: 1-117.
- [14] Zhu Chaohui, Zhang Qian, Shao Shuxun, et al. Lead isotopic composition and lead source in the Bainiuchang Ag-polymetallic deposit, Yunnan Province, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(4): 845-857.
- [15] Zhu Chaohui, Zhang Qian, Shao Shuxun, et al. Sea-floor exhalative sedimentary and magmatic hydrothermal superimposition of the Bainiuchang polymetallic deposit in Yunnan: Evidence from REE geochemistry [J]. Chinese Journal of Geochemistry, 2007, 26(3): 267-275.
- [16] 李晓波, 刘继顺, 张洪培, 等. 云南省蒙自县白牛厂银多金属矿床控矿因素分析 [J]. 地质找矿论丛, 2005, 20(2): 111-114.
- [17] 刘继顺, 张洪培, 方维萱, 等. 云南蒙自白牛厂银多金属矿床若干地质问题探讨 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(增刊): 238-244.
- [18] 张洪培, 刘继顺, 张宪润, 等. 云南蒙自白牛厂银多金属矿区深部找矿的新发现 [J]. 矿产与地质, 2006, 20(4/5): 361-365.
- [19] Qi Liang, Gregoire D C. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. Geostandards Newsletter, 2000, 24: 51-63.
- [20] 陈多福, 陈先沛, 陈光谦, 等. 热水沉积作用与成矿效应 [J]. 地质地球化学, 1997(4): 7-12.
- [21] 涂光炽, 王秀璋, 陈先沛, 等. 中国层控矿床地球化学(第三卷) [M]. 北京: 科学出版社, 1998: 131-254.
- [22] 侯增谦, 艾永德, 曲晓明, 等. 岩浆流体对冲绳海槽海底成

- 矿热水系统的可能贡献 [J]. 地质学报, 1999, 73(1): 57-65.
- [23] 顾连兴, 徐克勤. 论大陆地壳拗陷带中的华南型块状硫化物矿床 [J]. 矿床地质, 1986, 5(2): 16-27.
- [24] 张复新. 喷流岩及其识别与找矿 [J]. 地质科技情报, 1988, 7(3): 67-73.
- [25] 薛春纪. 热水沉积岩及识别标志 [M] // 中国科学院矿床地球化学开放研究实验室. 矿床地质和矿床地球化学研究新进展. 兰州: 兰州大学出版社, 1990: 25-30.
- [26] 陈先沛, 高计元, 陈多福. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志 [J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 124-132.
- [27] 韩发, 哈钦森 R W. 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积的证据——含矿建造及热液沉积岩 [J]. 矿床地质, 1989, 8(2): 25-40.
- [28] Boström K. The origin and fate of ferromanganous active ridge sediments [J]. Stockholm Contributions in Geology, 1973, 27: 149-243.
- [29] Bonatti E. Metallogenesis at oceanic spreading centers [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1975, 3: 401-431.
- [30] Bischoff J L, Rosenbauer J R. Recent metalliferous sediment in the North Pacific Manganese Nodule Area [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1976, 33: 379-388.
- [31] Dymond J, Corliss J B, Stillinger R. Chemical composition and metal accumulation rates of metalliferous sediments from site 319, 320, 321 [R]. Initial Reports of Deep Drilling Project, Washington: Government Printing Office, 1976, 34: 575-588.
- [32] Marchig V, Gundlach H, Möller P, et al. Some geochemical indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments [J]. Marine Geology, 1982, 50(3): 241-256.
- [33] 周永章. 广西丹池盆地泥盆系热水成因硅岩的地球化学特征 [J]. 沉积学报, 1990, 8(3): 75-83.
- [34] 张欢. 个旧超大型锡多金属矿床地球化学及成因 [D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005: 1-121.
- [35] Fryer B J. Rare earth evidence in iron-formation for changing Precambrian oxidation states [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1977, 41: 361-367.
- [36] 韩发, 哈钦森 R W. 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积成因的证据——容矿岩石的微量元素及稀土元素地球化学 [J]. 矿床地质, 1989, 8(3): 33-42.
- [37] Fryer B J. Rare earth elements in iron-formation [M] // Trendall A F, Morris R C. Iron-formation: Facts and Problems. Amsterdam: Elsevier Science Publishing, 1983: 345-358.
- [38] Bostrom K, Rydell H, Joensuu O. Langbank: An exhalative sedimentary deposit [J]. Economic Geology, 1979, 74(5): 1002-1011.
- [39] Crerar D A, Namson J, Chyi M S, et al. Manganiferous chert of the Franciscan assemblage: I. General geology ancient and modern analogues and implication for hydrothermal convection at oceanic spreading centers [J]. Economic Geology, 1982, 77(3): 519-540.
- [40] Yomamoto K. Geochemical characteristics and depositional environments of cherts and associated rocks in the Franciscan and Schimanto terranes [J]. Sedimentary Geology, 1987, 52: 65-108.
- [41] Murray R W, Buchholtz T, Jones D L, et al. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. Geology, 1990, 18: 268-271.
- [42] 张乾, 张宝贵, 潘家永, 等. 粤西大降坪黄铁矿床热水沉积硅质岩特征及稀土模式 [J]. 科学通报, 1992(17): 1588-1592.
- [43] 张乾, 张宝贵, 曹裕波, 等. 大降坪硫铁矿床热水沉积硅质岩的稀土元素特征 [J]. 岩石学报, 1993, 9(增刊): 180-188.
- [44] 何镜宇, 孟祥化. 沉积岩和沉积相模式建造 [M]. 北京: 地质出版社, 1987: 414-418.