

doi:10.6053/j.issn.1001-1412.2023.03.004

西藏边坝县白库铅锌银矿床地质-地球化学特征及成因分析

高启荣,王东方,白志鸿

(河南省地质矿产勘查开发局第四地质矿产调查院,郑州 450003)

摘要: 白库铅锌银矿床地处班公湖-怒江缝合带南侧冈底斯-念青唐古拉山弧盆系,古地理位置属比如盆地南缘。赋矿地层侏罗系中-上统拉贡塘组($J_{2-3}l$)浅海相碎屑沉积岩建造,其土壤地球化学特征及微量元素特征指示该地层为矿源层。硫同位素 $\delta(^{34}S)$ 值指示硫主要来源于生物成因硫化氢,少部分来源于蒸发岩和储存于盆地基底的海水硫酸盐。地下热卤水在白垩纪班公湖-怒江弧后洋盆闭合碰撞作用下被活化,沿断裂运移过程中不断萃取地层中的金属元素形成成矿流体,成矿流体与生烃层的有机质发生一系列热化学还原反应,最终在构造有利部位的碳酸岩中富集成矿。综合区域地质背景、盆地构造演化史、矿床地球化学特征,白库铅锌银矿床属于 MVT 型铅锌银矿床。

关键词: 矿床地质;地球化学;成矿流体;MVT 型铅锌银矿床;比如盆地;西藏

中图分类号: P618.52 **文献标识码:** A

行分析。

0 引言

白库铅锌银矿区位于班公湖-怒江缝合带南侧冈底斯-念青唐古拉山弧盆系,处在尤卡朗-同德铅银多金属矿带,区内已发现金属矿产有金、银、铜、铅、锌等各类矿产的矿床点多达二十多处,是西藏地区一条重要的多金属成矿带。区域上属念青唐古拉有色金属地球化学活动区二级分区,以富钾、高钠为特征,主要分布铜、银、锌多金属异常。矿床类型主要有热液充填-交代型铅银矿床、矽卡岩型铜锌多金属矿床以及层控碳酸盐岩型铅锌矿床^[1]。

白库铅锌银矿属该区域典型的层控碳酸盐岩型铅锌矿床,本文基于区域地质矿产研究成果及勘查工作的实际资料,通过对区域地质特征、矿床地质特征、矿床地球化学特征和比如盆地构造演化综合分析研究,力图阐述白库铅锌银矿的成矿物源、成矿流体来源、运移及富集成矿机制,进而对矿床的成因进

1 区域地质特征

白库铅锌矿区大地构造位置位于班戈-腾冲燕山晚期岩浆弧带,属冈瓦纳地层大区,冈底斯-念青唐古拉分区(图 1a)。地理位置位于边坝县加贡乡,地处比如盆地南缘,区内地形切割强烈,褶皱发育,地层产状陡倾。

(1) 地层

区域出露地层由老到新分别有中-上侏罗统拉贡塘组(图 1b)、下白垩统多尼组、上白垩统竟柱山组。

拉贡塘组($J_{2-3}l$)。被前人^[2-4]长期认为是一套深海相类复理石建造,高密度浊流沉积。根据最新研究发现,该组地层为浅海相碎屑流沉积^[5]。上部岩性以黑色页岩、粉砂岩、板岩为主夹紫红色厚层砂岩、含砾砂岩,含砾砂岩中发育石膏晶体;中部以石

收稿日期: 2022-05-10; 责任编辑: 王传泰

作者简介: 高启荣(1987—),高级工程师,主要从事地质找矿等工作。通信地址:河南省郑州市郑东新区郑开大道与康庄路交叉口郑东
地矿大厦 1527 号,河南省地质矿产勘查开发局第四地质矿产调查院;邮政编码:450003。E-mail:441751313@qq.com

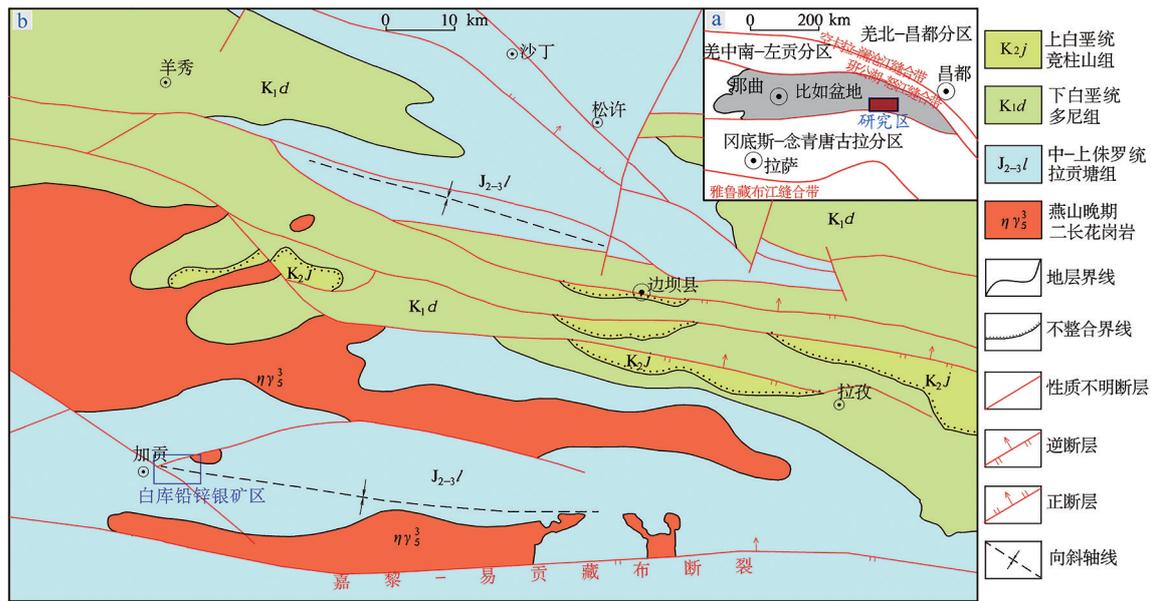


图1 区域地质及大地构造位置图

Fig. 1 Map showing regional geology and geotectonic position of the study area

英千枚岩、变质石英砂岩为主，夹少量灰岩及薄层白云岩，局部含饼状结核及黄铁矿晶粒；下部岩性以红色底砾岩为主，局部有凝灰岩、安山岩等。

多尼组(K_1d)。该组为一套滨海-浅海相沉积建造，上部为一套火山碎屑岩，岩性为灰紫色-灰绿色凝灰岩、安山岩；中部为灰岩、细粒砂岩、石英杂砂岩为主的韵律互层；下部以灰白色石英砂岩及杂色泥(页)岩、紫红色钙质砂岩为主，夹煤线。其空间上与下伏竟柱山组(K_2j)平行不整合接触。

竟柱山组(K_2j)。该组为一套河流-湖泊相红色磨拉石建造，岩性以紫红色陆源碎屑为主的复成分砾岩、含砾砂岩、砂岩、粉砂岩^[6]。与下伏多尼组(K_1d)平行不整合接触，标志着比如盆地海相沉积的结束^[1]。

(2) 岩浆岩

区域上岩浆岩主要为班戈-腾冲岩浆岩带，岩浆岩体呈椭圆状岩株产出，岩性主要为燕山晚期二长花岗岩。岩石主要矿物组分有斜长石、钾长石、石英、黑云母及白云母，副矿物组合为磁铁矿、磷灰石、榍石、金红石等。岩石化学成分以富 SiO_2 、 Al_2O_3 ，贫 MgO 和 $w(Na_2O) > w(K_2O)$ 为特征；里特曼指数 σ 值为 0.98，属钙性系列； A/CNK 值为 1.7，CIPW 标准矿物组合中刚玉和石英含量均较高，属硅铝过饱和型；显示为 S 型花岗岩特征。岩石中微量元素 Sr 含量高 ($w(Sr) = 506 \times 10^{-6}$)， $w(Rb)/w(Sr) = 0.087$ ，远低于维氏比值(0.67)，

Y、Yb 含量也异常低，轻稀土富集且无 Eu 异常，其特征类似埃达克岩。

(3) 变质岩

变质岩以轻微的区域动力变质作用为主，形成板岩、大理岩、变质砂岩、二云片岩、石英千枚岩等，表现为新生绢云母和绿泥石、石英增生、碳酸盐重结晶等。

(4) 地质构造

区内褶皱及断裂均较发育。断裂类型为较大规模的逆冲断裂，沿断裂发育碎裂岩。主断裂嘉黎-易贡藏布断裂走向 $110^\circ \sim 290^\circ$ ，产状 $30^\circ \sim 40^\circ \angle 52^\circ \sim 60^\circ$ ，该断裂控制了拉贡塘组($J_{2-3}l$)及比如盆地的南边界。区内由于构造挤压作用，形成不协调褶皱。

2 矿区成矿地质特征

2.1 矿区地质特征

矿区内出露地层为侏罗系中-上统拉贡塘组($J_{2-3}l$) (图 2)，该组地层为浅海相碎屑流沉积，以槽模、滑塌变形、冲刷构造、包卷层理等沉积构造为特征。由上至下出露岩性分别为含碳质泥质板岩、二云片岩夹变质石英砂岩、白云石大理岩、白云岩、绢云石英千枚岩、变质石英砂岩等。地层走向 $115^\circ \sim 295^\circ$ ，倾角为 $40^\circ \sim 80^\circ$ 。矿区地层以轻微的区域动力变质作用为主，表现为碳酸盐重结晶、新生绢云母

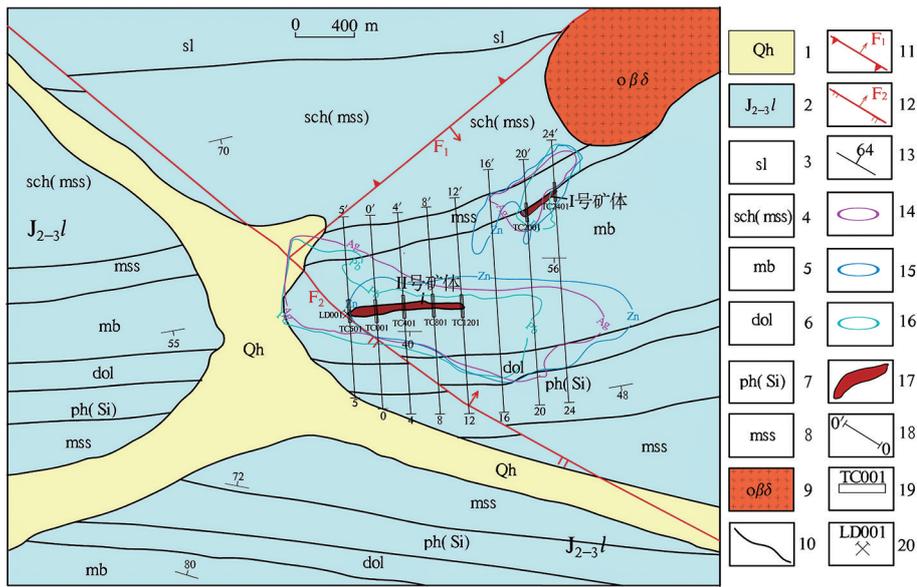


图 2 矿区地质简图及元素组合异常图

Fig. 2 Geological sketch with element combination anomlies

- 1. 全新统; 2. 中-上侏罗统拉贡塘组; 3. 含碳质泥质板岩; 4. 二云片岩夹变质石英砂岩;
- 5. 白云石大理岩; 6. 白云岩; 7. 绢云石英千枚岩; 8. 变质石英砂岩; 9. 燕山晚期英云闪长岩;
- 10. 岩性界线; 11. 实测逆冲断层; 12. 实测逆断层; 13. 地层产状;
- 14. Ag 元素异常范围; 15. Zn 元素异常范围; 16. Pb 元素异常范围; 17. 矿体;
- 18. 勘探线位置及编号; 19. 探槽位置及编号; 20. 老硐位置及编号

和绿泥石、石英增生等。

矿区构造发育, F_1 断层为一逆冲断层, 产状 $45^\circ \sim 52^\circ \angle 40^\circ \sim 51^\circ$ 。该断裂带内岩石挤压破碎强烈, 发育构造角砾岩, 被后期的 NW 向 F_2 逆断层截切。 F_2 断层产状 $127^\circ \sim 135^\circ \angle 60^\circ \sim 65^\circ$, 断裂带内矿化蚀变较发育, 主要有方铅矿化、闪锌矿化及黄铁矿化等。矿区褶皱构造为单一向斜, 北翼产状 $150^\circ \sim 170^\circ \angle 40^\circ \sim 70^\circ$, 南翼产状 $10^\circ \sim 20^\circ \angle 72^\circ \sim 80^\circ$ 。

矿区东北侧出露燕山晚期英云闪长岩, 该岩体侵入到了拉贡塘组 ($J_{2-3}l$) 中。岩石具有半自形粒状结构、块状构造, 主要矿物成分为斜长石、石英, 次为角闪石, 含少量铁质等。

2.2 矿体特征

矿体赋存于中-上侏罗统拉贡塘组 ($J_{2-3}l$) 中, 矿区内已发现 2 条高品位铅锌银矿体 (图 2, 表 1), 分别编号为 I 号矿体、II 号矿体。

I 号矿体。该矿体产于矿区东北部大理岩与变质石英砂岩接触部位, 矿体顶板为变质石英砂岩, 底板为大理岩, 围岩界线清晰。围岩蚀变有硅化、碳酸盐化。矿体呈似层状顺层产出, 其产状为 $120^\circ \sim 135^\circ \angle 40^\circ \sim 50^\circ$, 目前地表控制矿体长度约 300 m, 矿体

厚度 3.2 ~ 9.27 m, 平均 6.59 m。矿石品位为 $\omega(Pb)_{平均} = 2.98\%$, $\omega(Zn)_{平均} = 15.95\%$, $\omega(Ag)_{平均} = 228.4 \times 10^{-6}$ 。

II 号矿体。该矿体产于矿区中部大理岩中, 产状为 $175^\circ \sim 180^\circ \angle 40^\circ \sim 45^\circ$, 矿体厚 2.2 ~ 7.3 m, 平均 4.2 m。地表控制矿体长约 600 m, 层位稳定, 品位较均匀。顶板和底板均为大理岩, 界线清晰。围岩蚀变有碳酸盐化、绢云母化等, 矿体顺大理岩层理面呈囊状-似层状产出 (图 3a), 矿石品位为 $\omega(Pb)_{平均} = 2.44\%$, $\omega(Zn)_{平均} = 14.69\%$, $\omega(Ag)_{平均} = 154.5 \times 10^{-6}$ 。

2.3 矿石特征

(1) 矿石矿物组合

白库铅锌银矿的矿石类型以硫化物矿石为主。矿石矿物主要为闪锌矿 (图 4), 次为方铅矿, 含少量黄铁矿、白铅矿及褐铁矿; 以富锌贫铅共生银为特征。近地表矿化体有氧化现象。脉石矿物主要为方解石、白云石。

闪锌矿。灰色, 自形-半自形粒状, 反光镜下透明, 粒径 0.2 ~ 5.4 mm, 多与方铅矿一起分布, 部分闪锌矿呈粒状分布于碳酸盐矿物粒间, 部分闪锌矿呈不规则断续脉状分布。

表1 白库矿区铅锌银矿石基本分析结果

Table 1 Basic analysis of ore from mining district of Baiku Pb-Zn-Ag deposit

样号	Pb	Zn	Ag	样号	Pb	Zn	Ag	样号	Pb	Zn	Ag
BKLD01-H2	3.52	26.78	199	BKTC401-H5	4.78	20.33	353	BKTC1201-H3	0.28	0.99	17.8
BKLD01-H3	0.61	13.30	123	BKTC401-H6	3.10	13.87	176	BKTC1201-H4	5.57	21.14	342
BKTC501-H1	0.98	10.64	82.5	BKTC801-H2	0.89	9.75	87.8	BKTC1201-H5	0.82	25.17	160
BKTC001-H2	4.63	18.58	130	BKTC801-H3	0.14	0.53	4.72	BKTC1601-H2	2.89	28.10	231
BKTC001-H3	1.46	12.88	84.3	BKTC801-H4	2.33	16.10	790	BKTC2001-H2	3.23	20.61	190
BKTC401-H2	5.52	29.64	395	BKTC801-H5	6.74	25.94	485	BKTC2401-H2	1.64	8.77	119
BKTC401-H3	0.62	2.63	24.4	BKTC801-H6	3.14	5.38	59.6	量单位: $w_B/\%$, $w(Ag)/10^{-6}$			
BKTC401-H4	2.41	15.20	246	BKTC1201-H2	9.16	22.10	577	测试单位: 河南省岩石矿物测试中心			

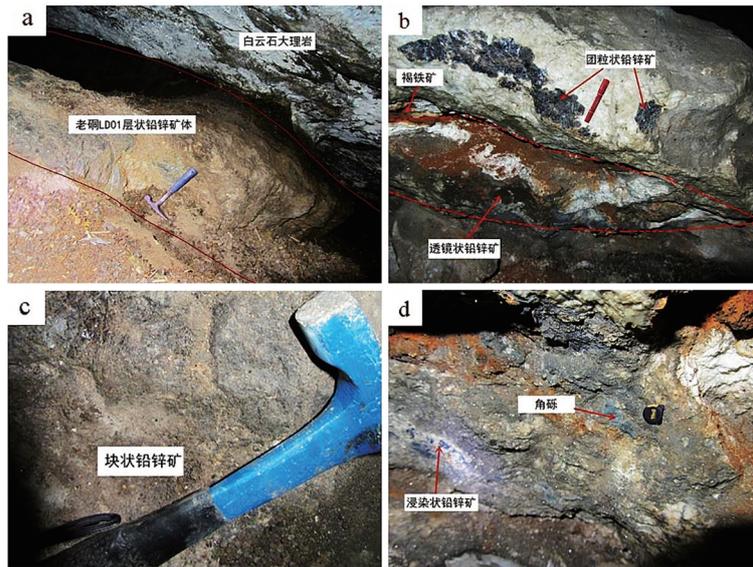


图3 白库矿区铅锌矿石照片

Fig. 3 Photos of ore of Baiku Pb-Zn-Ag deposit

a. 层状铅锌矿体; b. 透镜状、团粒状铅锌矿; c. 块状铅锌矿; d. 浸染状矿体、角砾构造

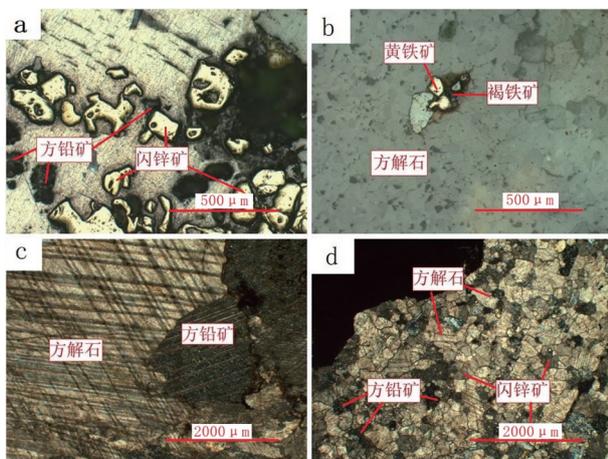


图4 白库矿区矿石结构特征

Fig. 4 Textural characteristics of ore of Baiku

Pb-Zn-Ag deposit

a. 小包体状-不规则断续脉状闪锌矿; b. 褐铁矿交代黄铁矿;
c. 自形粒状铅矿; d. 自形-它形粒状铅锌矿石

方铅矿。亮白-亮灰色, 自形-半自形粒状, 偏光镜下不透明, 粒径 0.6~4 mm, 多与闪锌矿一起混杂分布, 部分呈不规则断续脉状或呈粒状分布于碳酸盐矿物粒间。

黄铁矿。自形-半自形粒状, 部分被褐铁矿交代, 不均匀分布于碳酸盐矿物粒间。

白铅矿。呈灰色, 分布于方铅矿的边缘。

褐铁矿。呈粒状, 与黄铁矿连生, 零星分布。见残留有少量的黄铁矿。

(2) 矿石组构

铅锌银矿石呈灰白色, 矿石结构有自形-它形粒状、交代残余结构(图4), 构造以块状为主, 次为浸染状、团粒状、透镜状、角砾状构造(图3)。

2.4 成矿阶段划分

根据矿石结构构造及矿物特征分析, 对白库矿床的形成过程初步划分为以下几个阶段, 即区域白云岩

化期、热液期 I 阶段、热液期 II 阶段和表生期(表 2)。

表 2 白库矿区成矿序列

Table 2 Metallogenic sequence of Baiku pb-Zn-Ag deposit

矿化阶段 矿物	区域白云岩化	热液期		表生期
		I阶段	II阶段	
方解石	-----	=====	=====	
白云石	=====	-----	-----	
黄铁矿	-----	=====	=====	
闪锌矿		=====	=====	
方铅矿			=====	
褐铁矿				=====
白铅矿				=====

区域白云岩化的灰岩,被第 I、II 阶段的矿石穿插,近地表矿体后期被氧化。

热液期 I 阶段以形成大量的黄铁矿和方解石为主,形成脉状充填结构、条带状构造,黄铁矿不均匀分布于方解石粒间。闪锌矿、方铅矿主要形成于第 II 阶段,以闪锌矿为主。

表生期,早期形成的金属硫化物在地表附近被氧化成为褐铁矿、白铅矿等较为稳定的矿物,分布不均匀,含量较少。

3 地球化学特征

3.1 土壤地球化学特征

通过开展 1 : 10000 土壤地球化学测量,区内 Pb、Zn、Ag、W、Sb、As 等元素呈高背景分布或出现异常(见图 2)。其中, $w(\text{Ag})_{\text{平均}} = 111 \times 10^{-9}$, 最高为 618×10^{-9} ; $w(\text{Pb})_{\text{平均}} = 81 \times 10^{-6}$, 最高为 452×10^{-6} ; $w(\text{Zn})_{\text{平均}} = 122 \times 10^{-6}$, 最高为 290×10^{-6} ; 各

元素呈串珠状、马鞍状分布,强度较高,分带较明显。

矿区中部分布于 F₂ 断裂东北侧的异常浓集中心带长 1300~1500 m,宽 300~500 m,该异常规模大、强度高,与 II 号矿体套合好。

位于矿区东北部变质石英砂岩与大理岩接触带的 Pb、Zn 异常浓集中心带长 800~1100 m,宽 200~300 m,该异常规模较小、强度高,与 I 号矿体套合好。

3.2 R 型聚类分析

在处理化探数据方面,为了解元素之间的亲疏关系,R 型聚类分析是一种较为普遍的数理统计方法。元素之间聚集和分离可以通过多个变量之间的相关系数来定量研究^[7]。根据 1 : 10000 土壤地球化学测量,对全区进行 R 型聚类分析,其分析结果如下表 3、图 5。

从图 5 不难看出,相关系数以 0.5 为标准,将微量元素分为 4 组。第一组 Pb、Zn、Ag 组合,矿区主成矿元素,其中 Zn、Ag 高度密切相关;第二组为 Au、As、Cu、Mo 组合,指示气化-高温阶段,As、Mo 高度相关指示不明,可能与东北部二长花岗岩体有关;第三组 Sb 及第四组 W 单独成组。Au、As 与 Sb 为负相关,与低温热液成矿组合规律相违背;Cu、Au 相关性较好,但与 Pb、Zn、Ag 负相关,这与中-低温热液成矿组合规律相违背,Sb 与 Pb、Zn、Ag 弱相关,推测 Sb 可能来自盆地红层。

基于以上相关组合分析,推断白库矿区 Pb、Zn、Ag 矿源层为拉贡塘组(J₂₋₃l),与矿区东北部燕山晚期二长花岗岩体无直接关联。

表 3 白库矿区微量元素相关矩阵

Table 3 Correlation matrix of trace elements of Baiku deposit

	Au	Ag	As	Sb	Cu	Zn	Mo	W	Pb
Au	1								
Ag	-0.579	1							
As	0.645	-0.769	1						
Sb	0.201	0.423	0.2	1					
Cu	0.592	-0.676	0.437	-0.233	1				
Zn	-0.6	0.939	-0.825	0.178	-0.714	1			
Mo	0.673	-0.837	0.910	0.1	0.608	-0.89	1		
W	0.399	-0.217	0.454	0.261	0.21	-0.363	0.468	1	
Pb	-0.216	0.785	-0.519	0.675	-0.452	0.729	-0.544	-0.108	1

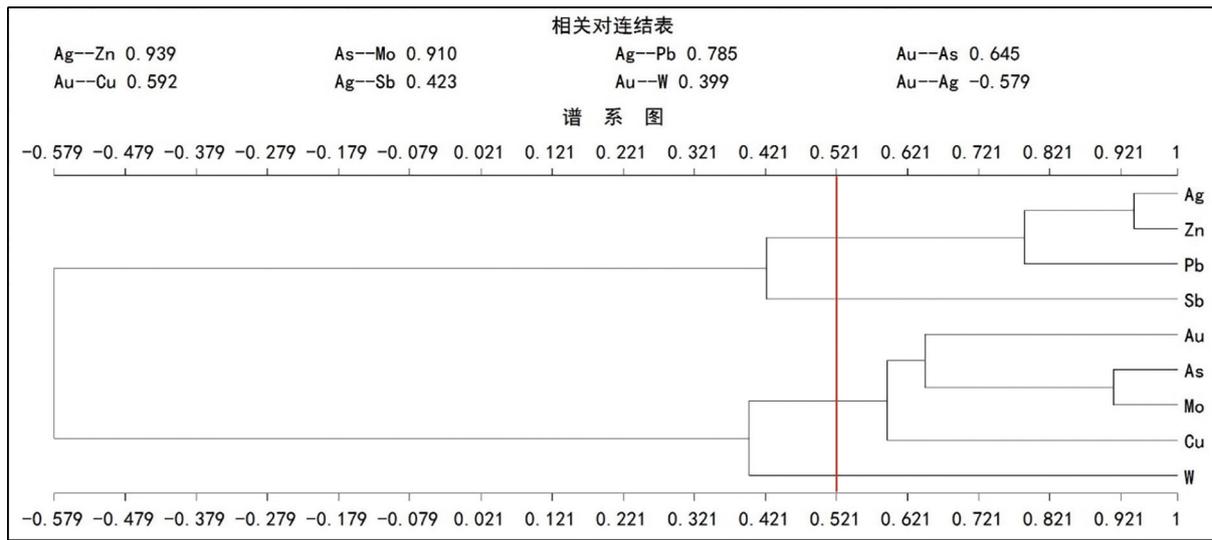


图5 白库矿区型因子分析结果

Fig. 5 R-type factor analysis of Baikou deposit

3.3 微量元素特征

对矿区拉贡塘组(J₂₋₃l)各个岩性段及侵入岩体采集了一定数量的样品进行光谱分析统计(表4),并与地球元素丰度值进行对比(图6)。由对比结果可知,拉贡塘组各种岩性相对于上地壳元素丰度值,Ag、Pb、Zn、As、Sb、V、Ni均高于地壳丰度值,其中主成矿元素Ag高于地壳丰度值4.83~19.11倍、Pb高于地壳丰度值8.0~10.84倍、Zn高于地壳丰度值2.67~2.83倍;Cu、W、Co与地壳丰度值相似,Mn、Ba、Ti均低于地壳丰度值。燕山晚期二长花岗岩除Pb略高于地壳丰度值、Mn高于地壳丰度值2.2倍,其他微量元素均低于地壳丰度值。

综上所述,白库铅锌银矿成矿流体中的成矿元素Ag、Pb、Zn在拉贡塘组沉积时已初步富集,Sb、As、V可能来自于盆地红层;其微量元素特征与1:

10000土壤地球化学测量显示基本一致。

3.4 硫同位素

为了分析矿床硫的来源,采集、测试了27件样品(表5),分别来自I号矿体、II号矿体、F₂断层、矿区北部黄铁矿化大理岩和黄铁矿化变质石英砂岩。其中,8个闪锌矿的 $\delta(^{34}\text{S}) = -5.68 \times 10^{-3} \sim 15.60 \times 10^{-3}$,均值为 -0.81×10^{-3} ,主要集中在 $-5.68 \times 10^{-3} \sim -2.14 \times 10^{-3}$ 之间;11个方铅矿的 $\delta(^{34}\text{S}) = -7.31 \times 10^{-3} \sim 16.30 \times 10^{-3}$,均值为 -4.49×10^{-3} ,主要集中在 $-7.31 \times 10^{-3} \sim -4.31 \times 10^{-3}$ 之间;8个黄铁矿的 $\delta(^{34}\text{S}) = 6.77 \times 10^{-3} \sim 22.3 \times 10^{-3}$,均值为 14.63×10^{-3} 。硫同位素特征主要富集轻硫,少数富集重硫,总体较分散。 $\delta(^{34}\text{S})$ 值分布在较宽范围内,极差大(图7),表明存在不同来源的硫。

表4 白库矿区拉贡塘组岩性及岩浆岩微量元素含量统计结果

Table 4 Statistics of trace element contents of lithologies and magmatic rocks of Lagongtang formation in Baikou deposit

岩性	送样号	Ag	As	Sb	Cu	Zn	Mo	W	Pb	Mn	Ni	Ba
白云石大理岩	GP1	0.13	8.76	0.93	51	211	0.46	1.21	112	2102	103	503
白云岩	GP2	0.14	10.23	0.94	42	224	0.43	1.24	132	1902	113	511
变质石英砂岩	GP3	1.14	9.51	0.88	42	224	0.39	1.32	132	1902	113	455
含碳质泥质板岩	GP4	2.14	16.87	1.22	42	224	0.37	1.14	132	1902	113	462
绢云石英千枚岩	GP5	3.14	13.43	1.01	42	224	0.63	1.33	132	1902	113	392
全区平均值		1.34	11.76	1.00	43.80	221.40	0.46	1.25	128	1942	111	464.6
地壳丰度		0.07	1.7	0.5	47	83	1.1	1.3	16	1000	58	650
全区/地壳丰度		19.11	6.92	1.99	0.93	2.67	0.41	0.96	8.00	1.94	1.91	0.71
二长花岗岩	GP6	0.05	1.39	0.05	2.18	61.58	0.20	0.19	21.78	2203	43	256
土壤化探平均值		0.34	15.06	2.07	25.06	234.73	1.09	2.75	173.52	×	×	×
土壤化探平均值/地壳丰度		4.83	8.86	4.13	0.53	2.83	0.99	2.11	10.84	×	×	×

量单位: $w_B/10^{-6}$; $w(\text{Ag})/10^{-9}$ 。×代表未做该项。地壳丰度值,据维诺格拉多夫(1962)资料。

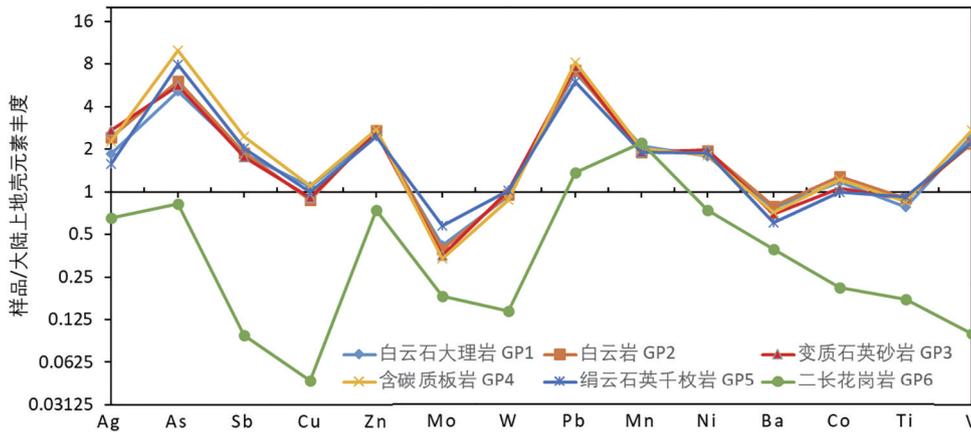


图 6 白库矿区各岩性相对上地壳微量元素丰度蛛网图

Fig. 6 Spider diagram of trace element abundance of each lithology in Baiku area relative to those of the upper crust

表 5 白库矿区同位素分析结果

Table 5 Isotopic analysis of Baiku deposit

样号	取样地点	样品名称	测试矿物	$\delta(^{34}\text{S})/10^{-3}$
BK-T1	白库矿区 II 号矿体 LD-01	铅锌矿石	方铅矿	-7.13
BK-T2	白库矿区 II 号矿体 LD-01	铅锌矿石	闪锌矿	-4.51
BK-T3	白库矿区 II 号矿体 LD-01	铅锌矿石	黄铁矿	10.3
BK-T4	白库矿区 II 号矿体 TC001	铅锌矿石	方铅矿	-6.87
BK-T5	白库矿区 II 号矿体 TC001	铅锌矿石	闪锌矿	-4.52
BK-T6	白库矿区 II 号矿体 TC401	铅锌矿石	方铅矿	-6.94
BK-T7	白库矿区 II 号矿体 TC401	铅锌矿石	方铅矿	-7.31
BK-T8	白库矿区 II 号矿体 TC401	铅锌矿石	闪锌矿	-5.24
BK-T9	白库矿区 II 号矿体 TC401	铅锌矿石	闪锌矿	-3.58
BK-T10	白库矿区 II 号矿体 TC801	铅锌矿石	方铅矿	-6.67
BK-T11	白库矿区 II 号矿体 TC801	铅锌矿石	黄铁矿	6.77
BK-T12	白库矿区 II 号矿体 TC1201	铅锌矿石	方铅矿	-7.31
BK-T13	白库矿区 I 号矿体 TC2001	铅锌矿石	方铅矿	-7.14
BK-T14	白库矿区 I 号矿体 TC2001	铅锌矿石	闪锌矿	-5.68
BK-T15	白库矿区 I 号矿体 TC2001	铅锌矿石	方铅矿	-6.01
BK-T16	白库矿区 I 号矿体 TC2001	铅锌矿石	方铅矿	-5.97
BK-T17	白库矿区 I 号矿体 TC2001	铅锌矿石	黄铁矿	8.65
BK-T18	白库矿区 I 号矿体 TC2001	铅锌矿石	闪锌矿	-2.14
BK-T19	白库矿区 I 号矿体 TC2401	铅锌矿石	方铅矿	-4.31
BK-T20	白库矿区 I 号矿体 TC2401	铅锌矿石	闪锌矿	3.56
BK-T21	F ₂ 断层	多金属硫化物矿石	黄铁矿	21.3
BK-T22	F ₂ 断层	多金属硫化物矿石	黄铁矿	20.4
BK-T23	F ₂ 断层	多金属硫化物矿石	闪锌矿	15.6
BK-T24	F ₂ 断层	多金属硫化物矿石	方铅矿	16.3
BK-T25	矿区北部大理岩	黄铁矿化大理岩	黄铁矿	22.3
BK-T26	矿区北部大理岩	黄铁矿化大理岩	黄铁矿	19.7
BK-T27	矿区北部变质石英砂岩	含黄铁矿化变质石英砂岩	黄铁矿	7.58

测试单位:国土资源部郑州矿产资源监督检测中心(河南省岩石矿物测试中心)。

I、II 号矿体中 $\delta(^{34}\text{S}) = -7.31 \times 10^{-3} \sim 10.30 \times 10^{-3}$, 主要集中在 $-7.31 \times 10^{-3} \sim -2.14 \times 10^{-3}$, 硫主要来源于生物成因硫化氢, 少部分来源于蒸发

岩。F₂ 断层和矿体下部岩石 $\delta(^{34}\text{S}) = 7.58 \times 10^{-3} \sim 22.3 \times 10^{-3}$, 硫主要来源于盆地红层蒸发岩或储存于盆地基底的海水硫酸盐^[8-11]。

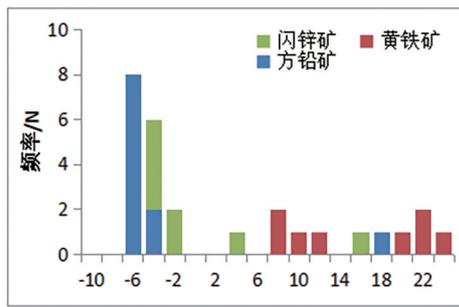


图7 白库矿区硫同位素直方图

Fig. 7 The S-isotopic histogram of Baiku deposit

4 矿床的成因分析

根据白库铅锌银矿床地质特征,其成因与地层、构造及古地理位置关系密不可分。拉贡塘组($J_{2-3}l$)中所含 Pb、Zn、Ag 及部分微量元素远高于地壳丰度值,其可为成矿流体提供丰富的矿物源。受断裂及向斜控制,矿体顺层产于拉贡塘组($J_{2-3}l$)逆冲断裂上盘、向斜北翼平缓部位白云石大理岩中。矿区处于生烃层盆地南缘且区域上红层发育,含矿岩层上部透水率相对较低的盖层阻止了成矿热液散失,下部岩性为透水率相对较高的变质砂岩等碎屑岩,有利于成矿热液的运移与富集。

4.1 控矿因素

(1) 地层与成矿

白库矿区地处比如盆地南缘,中-上侏罗统拉贡塘组($J_{2-3}l$)地层为一套浅海相碎屑流沉积地层。上部含碳质泥质板岩为低渗透率的泥质岩,能够防止成矿热液散失,为成矿元素的富集起到隔挡作用。中部的白云石大理岩、白云石大理岩与变质石英岩转换部位为矿体的赋存提供了空间,矿体呈囊状-似层状-层状产出;下部石英砂岩、含砾杂砂岩等高渗透率的碎屑岩有利于成矿流体中金属离子的富集、运移。区域上该组地层有机质丰度较高,属于好-中等烃源岩,有机质处于高演化阶段^[2,12-16]。有机质在成矿过程中起到了还原、活化及运载等作用,一般认为烃源岩经早期热演化形成的富有机酸流体,可能是矿源层中 Ag、Pb、Zn 等金属元素的活化剂,富烃卤水能够作为成矿流体并为金属元素的迁移提供载体,在成矿晚期阶段富烃卤水还原硫酸盐,为 Ag、Pb、Zn 的沉淀提供了还原剂^[17]。根据矿区光谱样品分析结果和 1:10000 土壤地球化学测量数据,赋矿地层拉贡塘组($J_{2-3}l$)中 Ag、Pb、Zn 元素丰度值分

别高于地壳丰度值 4.83~19.11 倍、8.0~10.84 倍、2.67~2.83 倍,为后期矿体的富集提供了丰富的物源。矿区外围北部白垩系竞柱山组(K_1j)为一套河流-湖泊相红色磨拉石建造,白垩系多尼组(K_1d)局部发育红层,拉贡塘组($J_{2-3}l$)上部含砾砂岩中发育石膏晶体。盆地红层中的膏盐层为成矿卤水的形成提供了前提条件,并创造了重要的还原硫^[18]。

(2) 构造与成矿

白库铅锌银矿床明显受到断裂构造与褶皱的控制。NE 向 F_1 断裂与嘉黎-易贡藏布断裂贯通,断裂带内发育角砾岩,为流体的长距离运移提供了通道,为矿区导矿控矿构造。NW 向 F_2 断层内发育黄铁矿化及少量铅锌矿化和方铅矿化,其控制了矿体的西边界,并为流体提供了运移通道,为矿区导矿控矿构造。铅锌矿化体形成于 F_1 断裂与 F_2 断裂交汇地带的地层中。矿区内近 EW 向向斜控制了矿体分布及产状,矿体产于向斜北翼,该翼产状较缓,为成矿元素的富集沉淀提供了有利的地质条件。

(3) 古地理与成矿

白库铅锌银矿床是大地构造演化、水圈与大气圈演化等因素综合作用的结果。矿区位于比如盆地南缘冒地槽中,该盆地是一个以震旦系变质结晶岩和古生界褶皱变质岩为基底的中-新生代被动大陆边缘盆地。自晚白垩世至新近纪,先后经历了被动边缘盆地演化、复合弧后盆地演化和隆升消亡演化 3 个阶段,最终形成断陷盆地^[19]。盆地的构造演化控制着区域内断层及褶皱的分布,同时也影响着气候环境和水循环,并为成矿流体提供了封闭环境和流体来源。

4.2 成矿模式

综合地层、构造、古地理、土壤地球化学测量、微量元素及同位素特征,白库铅锌银矿床具有典型的后生矿床特征,其成矿模式如图 8 所示。

拉贡塘组($J_{2-3}l$)为成矿流体提供了丰富的 Pb、Zn、Ag 物源,流体主要为大气降水和少量储存于盆地中的海水。一方面大气降水淋滤盆地白垩系竞柱山组(K_2j)和多尼组(K_1d)中的蒸发岩以及侏罗系拉贡塘组($J_{2-3}l$)上部的膏盐层,形成富含 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 等离子的盆地卤水,在构造应力和重力作用的驱动下,盆地卤水沿断裂下渗并萃取拉贡塘组($J_{2-3}l$)中的 Pb、Zn、Ag 等元素形成成矿流体^[8,20]。另一方面比如盆地受白垩纪

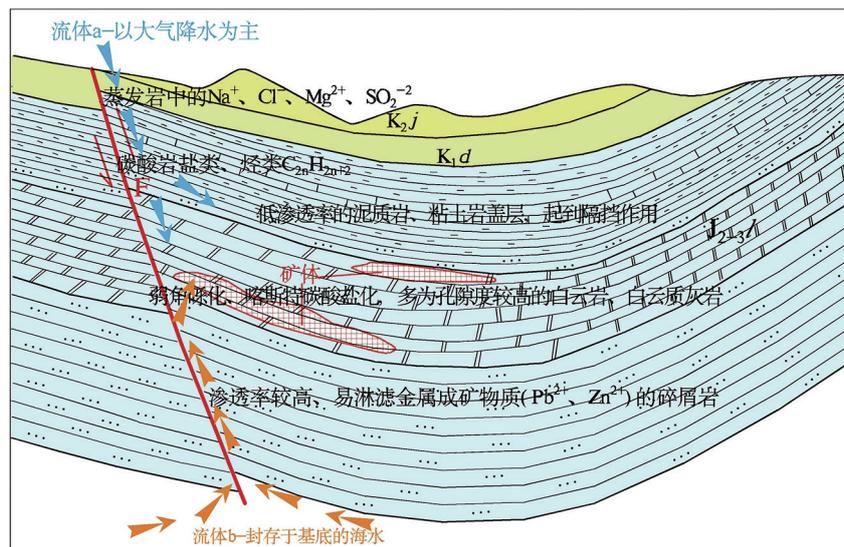


图 8 白库矿区成矿模式图

Fig. 8 Metallogenic model of Baiku deposit

表 6 白库铅锌银矿床与密西西比河谷型(MVT)铅锌银矿床特征对比

Table 6 Characteristic comparison between Baiku deposit and Mississippi valley type Pb-Zn-Ag deposits

矿床名称	白库铅锌银矿床	密西西比河型铅锌银矿床
容矿围岩	白云岩、白云石大理岩	白云岩为主,仅有少数矿床产于灰岩中
成因	后生	后生
与岩浆关系	无明显直接关系	无明显直接关系
所处盆地位置	比如盆地南缘,被动大陆边缘盆地	造山带边缘前陆环境或靠近克拉通一侧的沉积盆地环境
生烃层	拉贡塘组(J ₂₋₃ l)为有机质处于高演化阶段的中-好生烃层	矿床附近发育烃源岩
矿床规模	中型	具有群聚性,单个为中小型,矿区可达大型
矿石品位	w(Pb+Zn)=8.52%~35.16%,w(Zn)/w(Zn+Pb)=0.63~0.96	w(Pb+Zn)=5%~15%,w(Zn)/w(Zn+Pb)多数为0.5~1.0
矿体形态	层状、似层状、囊状、透镜状	形态复杂,多为层状、似层状、囊状、筒状、透镜状、不规则状等
矿化组合	Pb+Zn 硫化物,共生 Ag	主要为 Pb+Zn+铁硫化物,部分矿床共生 Ag、Cu 等
矿物组合	主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿、褐铁矿、白云石、方解石	矿物组合简单,主要为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、白铁矿、白云石、方解石和石英,仅在少数矿床/矿区发育重晶石和萤石,个别矿区发育有含银或者含铜的矿物
结构构造	结构有自形-它形粒状、交代残余结构;构造以块状为主,次为浸染状、团粒状、角砾状构造	结构以粒装结构、胶状结构、交代结构、草莓状结构、团粒状结构为主;构造主要为块状、浸染状、葡萄状、脉状、伪角砾状、条带状、断层角砾和沉积角砾构造等
围岩蚀变	白云岩化、方解石化、绢云母化	白云岩化、方解石化和硅化,主要涉及围岩溶解作用和重结晶作用等
控矿因素	层控、断层控制、碳酸盐岩溶蚀	层控、断层控制、溶解坍塌角砾岩等
成矿物质来源	矿源层为拉贡塘组(J ₂₋₃ l),硫来自于盆地卤水和储存于盆地的海水	金属矿物来自含矿地层和区域盆地卤水,硫来自含矿地层中海水硫酸盐的还原
S 同位素	I、II号矿体中δ(34S)=-7.31×10 ⁻³ ~10.30×10 ⁻³ ,F ₂ 断层和矿体下部岩石δ(34S)=7.58×10 ⁻³ ~22.3×10 ⁻³ ,主要富集轻硫,少数富集重硫,总体较分散	δ(34S)=-25×10 ⁻³ ~+30×10 ⁻³ ,总体较分散,主要富集重硫

班公湖-怒江弧后洋盆闭合碰撞的影响,由弧后伸展盆地向挤压性质的弧后前陆盆地转换,盆地内地层受到持续的挤压,活化了储存于盆地基底的海水,沿区域逆冲断裂迁移,迁移过程中淋滤萃取拉贡塘组(J₂₋₃l)中的金属物质,形成富含Pb、Zn、Ag、卤素,以及少量CO₂和有机气体的热液流体。流体在运移过程中,拉贡塘组(J₂₋₃l)生烃层对硫酸盐还原形成了H₂S、HS⁻,为金属矿物的沉淀提供了硫源。还原形成的H₂S与流体中的Pb、Zn、Ag元素反应形成铅锌银硫化物,在拉贡塘组(J₂₋₃l)白云质灰岩及向斜较缓地带富集沉淀(HS⁻+ [Zn, Pb, Ag]Cl₂ → [Zn, Pb, Ag]S↓ + H⁺ + Cl⁻)^[17],最终形成矿体^[21-22]。

白库铅锌银矿床与密西西比河谷型(MVT)铅锌银矿床特征对比见表6。

5 结语

白库铅锌银矿床矿体呈层状-似层状、囊状产于中-上侏罗统拉贡塘组(J₂₋₃l)中,矿石类型以硫化物矿石为主,结构有自形-它形粒状、交代残余结构;构造以块状为主,次为浸染状、团粒状、角砾状构造。围岩蚀变微弱。

白库铅锌银矿床形成机制主要受地层、构造的控制。主成矿元素来自于容矿地层,其特殊的岩性组合为成矿元素的富集沉淀提供了条件:下部高渗透率的碎屑岩有利于成矿流体运移,中部的碳酸盐岩与碎屑岩转换部位为矿体的赋存提供了空间,上部含碳质泥质板岩为低渗透率的泥质岩能够防止成矿热液散失。受白垩纪班公湖-怒江弧后洋盆闭合碰撞影响,在研究区产生了嘉黎-易贡藏布断裂逆冲断裂及一系列次级断裂,逆冲推覆作用激活了“盆地水”循环并形成地下“卤水”,卤水在运移过程中不断萃取地层中的金属元素形成成矿流体,流体沿断裂迁移中与生烃层中的有机质发生一系列热化学还原反应,最终在构造有利部位的碳酸岩地层中富集沉淀,形成MVT型铅锌银矿床。

参考文献:

[1] 王先美,伍新和,郑和荣,等. 青藏高原比如盆地中-上侏罗统烃源岩[J]. 石油学报,2011,32(1):41-48.

- [2] 武景龙. 班公湖-怒江结合带地质特征[J]. 内蒙古石油化工, 2011,37(1):130-131.
- [3] 李祥辉,王成善,胡修棉. 深海相中的砂质碎屑流沉积——以西藏特提斯喜马拉雅侏罗-白垩系为例[J]. 矿物岩石,2000(1):45-51.
- [4] 喻安光. 西藏康玉地区拉贡塘组的重力流沉积[J]. 岩相古地理,1997(6):41-46.
- [5] 李奋其,郑荣才,张士贞,等. 西藏那曲地区中晚侏罗世拉贡塘组深水碎屑流沉积特征和沉积模式[J/OL]. 中国地质:1-15 [2022-4-8].
- [6] 连永牢,曹新志,燕长海,等. 西藏念青唐古拉地区铅锌银多金属矿床特征及找矿方向[J]. 四川地质学报,2010,30(4):442-446.
- [7] 于俊博,宋云涛,郭志娟,等. R型聚类分析在区域化探元素分组中的作用探讨[J]. 物探化探计算技术,2014,36(6):771-776.
- [8] 任顺利,李延河,曾普胜,等. 膏盐层在云南会泽和毛坪铅锌矿成矿中的作用:硫同位素证据[J]. 地质学报,2018,92(5):1041-1055.
- [9] 祝新友,甄世民,程细音,等. 华南地区泥盆系MVT铅锌矿床S、Pb同位素特征[J]. 地质学报,2017,91(1):213-231.
- [10] 王磊,韩润生,张艳,等. 云南会泽铅锌矿田硫同位素研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,2016,35(6):1248-1257.
- [11] 张立新,吴越,田广,等. 云南乐红铅锌矿床成矿时代与成矿物质来源:Rb-Sr和S同位素制约[J]. 矿物学报,2014,34(3):305-311.
- [12] 王先美,郑和荣,王毅,等. 西藏比如盆地地下白垩统烃源岩特征[J]. 石油学报,2012,33(5):822-829.
- [13] 彭少南,李亚林. 比如盆地北部碎屑岩储层特征及评价[J]. 沉积与特提斯地质,2009,29(4):73-78.
- [14] 周亚龙,张树林. 西藏比如盆地中生代构造演化[J]. 沉积与特提斯地质,2009,29(3):95-100.
- [15] 张长青,余金杰,毛景文,等. 密西西比型(MVT)铅-锌矿床研究进展[J]. 矿床地质,2009,28(2):195-210.
- [16] 李光明,雍永源. 藏北那曲盆地中-上侏罗统拉贡塘组浊流沉积特征及微量元素地球化学[J]. 地球学报,2000(4):373-378.
- [17] 李荣西,毛景文,赵帮胜,等. 烃类流体在MVT型铅锌矿成矿中角色与作用:研究进展与展望[J]. 地球科学进展,2021,36(4):335-345.
- [18] 甄世民,祝新友,李永胜,等. 关于密西西比河谷型(MVT)铅锌矿床的一些探讨[J]. 矿床地质,2013,32(2):367-379.
- [19] 程顶胜,韩慧,李永铁,等. 藏北比如盆地油气地表地球化学勘探[J]. 石油勘探与开发,2001(1):45-47+13-5+4.
- [20] 常华进,储雪蕾,黄晶,等. 沉积环境细菌作用下的硫同位素分馏[J]. 地质论评,2007(6):807-813.
- [21] 宋世伟,张成江,宋昊,等. 藏东波里拉组地层中类MVT型铅锌矿床成矿机制分析[J]. 地质与勘探,2014,50(1):96-104.
- [22] 匡文龙,刘继顺,朱自强,等. 塔西南MVT型铅锌矿床成矿作用机制研究——以卡兰古铅锌矿为例[J]. 新疆地质,2003(1):136-140.

Geological and geochemical characteristics of Baiku Pb-Zn-Ag deposit in Bianba county, Tibet and analysis of its genesis

GAO Qirong, WANG Dongfang, BAI Zhihong

(The Fourth Geological and Mineral Survey Institute of Henan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The Baiku Pb-Zn-Ag deposit is located in Gangdise-Nianqing Tangulashan arc basin system at southern side of Bangonghu-Nujiang suture belt. Palaeogeographically it is located in the southern margin of Biru basin. The shallow marine sedimentary formation of Gongtang Formation ($J_{2-3}l$) of Middle-Upper Jurassic Series is the ore-bearing stratum that is indicated by characteristics of geochemistry and trace elements of soil above the stratum. Value of $\delta(^{34}S)$ indicates that the sulfur is mainly derived from biogenic hydrogen sulfide and a small part from evaporate and sulfate in sea water at basement of the basin. During Cretaceous period collision of Bangonghu lake-Nujiang back arc basin closure activate brine underground and the brine moves along fractures and extracts metal elements to be formed as ore fluid. A series of chemical reduction take place between the ore fluid and organic matter in the hydrocarbon-generated layer and precipitate as ore with enrichment of metals in the fluid at favorable structural position of carbonate rocks. Integration of regional geological background, structural evolution history of the basin and geochemical characteristics of the deposit shows that Baiku Pb-Zn-Ag deposit belongs to MTV type Pb-Zn-Ag deposit.

Key Words: ore deposit geology; geochemistry; ore fluid; MTV type Pb-Zn-Ag deposit; Biru basin; Tibet