

云南保山核桃坪铅锌矿床地球化学特征 及其成矿模式与找矿模型

陈永清¹ 卢映祥² 夏庆霖³ 蒋成兴² 刘红光⁴ 吕志成¹

(1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037; 2. 云南省地质调查院, 云南昆明 650011;
3. 中国地质大学资源学院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质图书馆, 北京 100083)

摘要:核桃坪铅锌矿床容矿地层地球化学特征研究表明:上寒武统核桃坪组下段、沙河厂组下段和保山组上段可能是 Cu 矿化的矿源层;核桃坪组中段和沙河厂组可能是 Zn 矿化的矿源层;核桃坪组中段可能是 Pb 矿化的矿源层。此外,上寒武统整体上以强烈富集($K \geq 5$)Bi、B,富集($K \geq 1.2$)Sb、As、W、Sn 为特征;Bi、Sb、As、B 等金属、半金属和非金属矿化剂元素在容矿地层中的普遍富集可能为在后期热液成矿作用过程中捕获成矿元素、导致成矿物质巨量堆积,最终形成工业矿床奠定了基础。基性岩脉以强烈富集($K \geq 5$)Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、As、Sb、Bi、F 为特征,富集元素的种类和矿石具有一致性。综合各类控矿因素,并结合稳定同位素和成矿流体特征等认为,矿床是在晚寒武世特定的沉积条件下形成矿源层和矿化剂的基础上,再经后期岩浆热液作用叠加,并在有利的构造部位形成的层控型热液矿床;成矿作用具多期、多阶段,成矿物质具多来源的特点。在上述基础上,初步建立了该矿床的成矿模式和找矿模型。

关键词:铅锌矿床;地球化学;成矿作用;成矿模式;找矿模型;云南保山

中图分类号:P618.42~43 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3657(2005)01-0090-10

核桃坪铅锌矿床的发现是近年来该区地质大调查的一项重要成果,目前仍处于详查阶段。矿床位于保山—镇康地块北部的保山—施甸复背斜北倾伏端与北西向的区域性断裂变质带交汇处。本区是一个构造变形、热液活动较为发育的地区,已获找矿初步突破的地段有:核桃坪、茅竹棚、打厂凹等矿段。区内地质构造发育,由寒武系、奥陶系、志留系、泥盆系组成的核桃坪背斜及一系列近南北向、北西向、北东向、近东西向断裂构成本区的基本构造格局。矿区主要出露上寒武统,自下而上进一步划分为核桃坪组、沙河厂组和保山组,主要岩性为砂岩、粉砂岩、板岩,局部夹大理岩化灰岩(图 1)。

矿床具体位于核桃坪背斜倾伏端,该背斜轴向 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$,北部向观音寺—大山头—茅竹棚一带倾伏。东翼地层倾向东,倾角 $40^{\circ} \sim 77^{\circ}$,西翼倾向西,倾角 $27^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。矿区断裂发育,沿轴部及东翼分布的近南北向及北北西向、北东向断裂与成矿关系密切。其中,南北向—北北西向断裂多沿背斜轴部及东翼分布,显示先张扭后压扭的特点,断裂两侧纵张裂隙和破碎带发育,为矿区主要导矿和容矿构造;北东向断裂为核桃坪背斜近轴部的左行横张扭性断裂,属矿区次要导矿及容矿断裂。矿区岩浆岩地表不发育,仅见华力西期辉绿岩、蚀变

辉绿岩以及辉长辉绿岩等呈脉状分布,展布方向为近南北—北西向及北东向,长几米至数百米,宽几厘米至数十米。辉绿岩体与围岩接触带局部显示有金多金属矿化。

1 地层地球化学特征与含矿性分析

核桃坪铅锌矿床容矿地层主要为上寒武统核桃坪组、沙河场组和保山组。因此,为了查明容矿围岩铅锌成矿元素及其相关元素的背景含量,本次研究工作从矿区外围李家山、大官市、金厂河和核桃坪剖面系统采集了上寒武统地层基岩样品 49 件,并在湖北省岩矿测试中心定量分析了 Au (C-OES);Ag、B (OES);As、Sb (AF);Cu、Zn、Sn、Bi、Co、Ni、V、Na₂O (ICP-AES);Pb、Cr、K₂O、SiO₂ (XRE);W、Mo (OP);F (IE)等 20 种元素,剔除核桃坪组 1 件异常样品,参加统计分析的样品 48 件,统计结果见表 1。

1.1 地层地球化学特征

研究表明,容矿地层具有下列特征:

1) 上寒武统整体上以强烈富集($K \geq 5$)Bi、B,富集($K \geq 1.2$)Sb、As、W、Sn,贫化($K \leq 0.8$)Mo、Cr、Co、Ni、Au、SiO₂、V、Ag 为特征;成矿元素 Zn($K=1.00$)和 Cu ($K=1.01$)的平均含

收稿日期:2004-02-02;改回日期:2004-10-08

基金项目:国家“十五”科技攻关课题(2003BA612A-02)及中国地质调查局地质大调查项目(200110200009)资助。

作者简介:陈永清,男,1960年生,博士,教授,主要从事矿产综合定量勘查与评价研究;E-mail:fczyongqing@cgs.gov.cn。

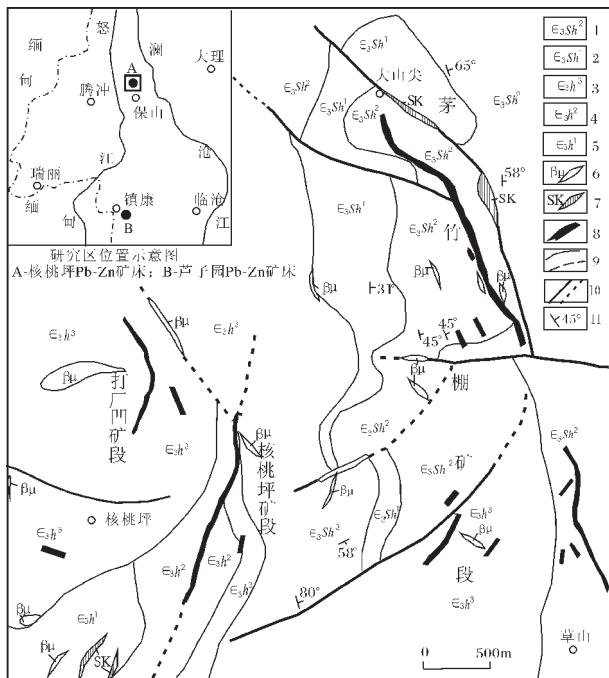


图 1 保山核桃坪铅锌矿区地质简图

(据云南省地质调查院●修编, 2003)

- 1—上寒武统沙河厂组上段; 2—上寒武统沙河厂组下段; 3—上寒武统核桃坪组上段; 4—上寒武统核桃坪组中段; 5—上寒武统核桃坪组下段; 6—基性岩脉; 7—夕卡岩; 8—矿体; 9—实测和推测地质界线; 10—实测和推测断层; 11—地层产状

Fig.1 Simplified geological map of the Hetaoping Pb-Zn district, Baoshan, Yunnan (modified from the Fourth Geological Survey Division, Yunnan Institute of Geological Survey, 2003)

- 1-Upper Member of the Upper Cambrian Shahechang Formation;
- 2-Lower Member of the Upper Cambrian Shahechang Formation;
- 3-Upper Member of the Upper Cambrian Hetaoping Formation;
- 4-Middle Member of the Upper Cambrian Hetaoping Formation;
- 5-Lower Member of the Upper Cambrian Hetaoping Formation;
- 6-Basic dike; 7- Skarn; 8-Orebody; 9-Geological boundary;
- 10-Fault measured and inferred; 11-Attitude of strata

量接近于克拉克值,成矿元素 Pb(K=0.81)的平均含量则低于其克拉克值。

2)核桃坪组以强烈富集(K≥5)Sb、Bi,富集(K≥1.2)B、As、Mo、W、Ag、Sn,贫化(K≤0.8)Ni、SiO₂、Cr、Co、Au、Cu、V、Pb、F为特征;成矿元素 Cu(K=0.58)、Zn(K=0.55)、Pb(K=0.46)的平均含量则显著低于克拉克值。沙河厂组以强烈富集(K≥5)As、Bi、Sb、B,富集(K≥1.2)W、Sn、Zn、Au,贫化(K≤0.8)Cr、Co、Ag、Ni为特征;成矿元素 Zn(K=1.62)的平均含量(105.17μg/g)显著高于克拉克值,Cu(K=1.17)和 Pb

(K=0.97)平均含量接近于克拉克值。保山组以强烈富集(K≥5)Bi、B,富集(K≥1.2)Sb、As、W、Sn,贫化(K≤0.8)Mo、Cr、Ni、Co、Ag、Au、SiO₂和V为特征;成矿元素 Cu(K=1.00)的平均含量接近于克拉克值,Pb(K=0.83)和Zn(K=0.81)的平均含量则低于其克拉克值。

1.2 含矿性分析

含矿性研究表明:①就整个下寒武统而言,成矿元素 Zn(K=1.00)、Cu(K=1.01)的平均含量接近于克拉克值,成矿元素 Pb(K=0.81)的平均含量则低于其克拉克值;这表明下寒武统整体上缺乏矿源层的基本特征。②但就下寒武统所属的3组而言,核桃坪组(Cu(K=0.58)、Zn(K=0.55)和Pb(K=0.46))和保山组(Cu(K=1.00)、Pb(K=0.83)、Zn(K=0.81))成矿元素的平均含量接近或显著低于其克拉克值,表明这两个组整体上缺乏矿源层的基本特征;而沙河厂组成矿元素 Zn(K=1.62)的平均含量(105.17μg/g)显著高于其克拉克值,其离差(35.29)远小于平均含量,则表明成矿元素 Zn在该层位具有高背景含量,且具有均一的含量分布,可能成为 Zn的矿源层。③就各组所属的段而言,核桃坪组下段成矿元素 Cu(K=1.68)的平均含量(42μg/g)显著高于其克拉克值,且离差(44.47)略大于平均含量,反映了成矿元素 Cu在该层位具有较高的背景含量,且分布具有较大的不均一性;核桃坪组中段成矿元素 Zn(K=6.87)的平均含量(446.25μg/g)显著高于克拉克值,且离差(160.54)远小于平均含量,反映了成矿元素 Zn在该层位具有高背景含量,且具有均一的含量分布;Pb(K=1.43)平均含量(21.20μg/g)高于其克拉克值,且离差(22.69)略大于平均含量,反映了成矿元素 Pb在该层位具有较高的背景含量,且分布具有一定的不均一性;沙河厂组上、下段都具有 Zn的高背景含量,Cu具有较高的背景含量;保山组上段成矿元素 Cu(K=1.32)、Zn(K=1.24)的平均含量高于克拉克值。这表明核桃坪组下段和沙河厂组下段、保山组上段可能是 Cu矿化的矿源层,核桃坪组中段和沙河厂组有可能是 Zn矿化的矿源层,核桃坪组中段可能是 Pb矿化的矿源层。④上寒武统整体上以强烈富集(K≥5)Bi、B,富集(K≥1.2)Sb、As、W、Sn为特征;Bi、Sb、As、B等这些金属、非金属和非金属矿化剂元素在容矿地层中的聚集可能为在后期热液成矿作用过程中捕获成矿元素、导致成矿物质巨量堆积,最终形成工业矿床奠定了基础。

2 脉岩地球化学特征与含矿性分析

矿区基性岩脉分布较广,主要有辉绿岩脉和辉长岩脉等,一般长几米至几百米,宽几十厘米至几米,岩脉延伸方向受局部断裂构造的控制,野外常见片理化变形的基性岩脉和黄铁矿化基性岩脉。本次研究工作采集各类基性岩脉样品 23 件,其化学组成见表 2。基性岩脉以强烈富集(K≥5)Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、As、Sb、Bi、F,富集(K≥1.2)Sn和贫化(K≤0.8)B、

① 云南省地质调查院. 西南三江南段成矿规律及找矿方向综合研究报告, 2003.

表 1 保山地块上寒武统地层元素平均含量

Table 1 Average contents of some elements in the Upper Cambrian strata in the Baoshan massif

参数		Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Sn	Mo	As	Sb	Bi	F	B	Cr	Ni	Co	V	
上寒武统 (48)	\bar{X}	1.46	0.05	25.29	12.04	65.24	2.58	4.24	0.37	7.6	1.99	0.75	847.33	62.92	52.70	27.52	11.63	66.20	
	S	1.36	0.04	21.34	11.5	52.87	1.37	1.69	0.10	7.32	1.69	0.57	541.04	43.15	28.84	16.71	7.99	52.59	
	K	0.58	0.72	1.01	0.81	1.00	2.58	1.84	0.34	4.47	6.63	8.82	0.86	5.72	0.42	0.49	0.48	0.68	
核桃坪组 (18)	\bar{X}	1.49	0.14	14.38	6.88	35.57	2.36	4.0	3.09	6.24	2.62	0.74	681	42.7	64.72	27.28	12.86	50.67	
	S	1.20	0.17	14.02	6.14	36.88	1.08	2.76	4.61	5.78	1.94	0.84	493.87	48.91	29.11	19.44	10.72	43.82	
	K	0.60	2.04	0.58	0.46	0.55	2.36	1.74	2.81	3.67	8.72	8.71	0.69	3.88	0.51	0.49	0.54	0.52	
核桃坪组	上段 (8)	\bar{X}	0.66	0.03	5.38	2.67	8.13	0.9	-	-	3.85	2.14	-	282.25	4.7	10.4	8.49	4.14	10.5
		S	0.29	0.01	1.69	1.51	2.85	0.32			3.51	1.80		171.54	1.66	5.20	1.46	0.65	4.66
		K	0.27	0.37	0.22	0.18	0.13	0.9			2.26	7.13		0.29	0.43	0.08	0.15	0.17	0.11
	中段 (5)	\bar{X}	2.66	0.31	29.25	21.2	446.25	2.12	2.5	0.51	97.1	6.24	1.04	933.6	83.35	72.58	31.88	12.18	69.2
		S	1.77	0.21	19.31	22.69	160.54	0.94	1.28	0.23	129.81	5.20	1.17	574.48	53.28	35.24	13.51	5.46	36.7
		K	1.06	4.49	1.17	1.43	6.87	2.12	1.09	0.46	57.12	20.8	12.24	0.94	7.58	0.58	0.57	0.51	0.71
	下段 (5)	\bar{X}	1.63	0.06	42	8.17	72.17	2.57	5	4.39	13.52	2.23	0.48	1002.2	35.48	77.58	48.5	25.07	127
		S	0.25	0.05	44.47	7.49	26.69	1.23	3.23	3.41	9.27	1.25	0.39	361.73	47.03	16.74	9.2	9.41	77.61
		K	0.65	0.86	1.68	0.55	1.11	2.57	2.17	3.99	7.95	7.44	5.65	1.01	3.23	0.62	0.87	1.04	1.3
沙河厂组 (12)	\bar{X}	1.48	0.04	29.33	14.42	105.17	3.41	4.36	-	12.18	2.15	0.75	1067.08	64.44	58.86	35.53	12.29	84.42	
	S	1.38	0.01	13.94	10.82	35.29	1.51	0.42		9.83	1.72	0.36	502.86	26.55	22.75	14.57	5.19	34.91	
	K	0.59	0.58	1.17	0.97	1.62	3.41	1.90		7.16	7.17	8.82	1.08	5.86	0.47	0.63	0.51	0.86	
沙河厂组	上段 (5)	\bar{X}	1.94	0.05	30.2	17.2	96.4	2.94	4.1	-	7.58	1.38	0.8	783.8	72.5	45.56	30.44	11.74	62.2
		S	1.75	0.02	16.66	14.77	38.06	1.7	2.25		4.50	0.80	0.5	557.32	50.12	31.75	19.66	6.18	47.40
		K	0.78	0.73	1.21	1.16	1.48	2.94	1.78		4.46	4.6	9.41	0.79	6.59	0.36	0.54	0.49	0.63
	下段 (7)	\bar{X}	4.5	0.03	28.71	12.43	111.43	3.74	4.47	-	32.65	2.12	0.73	1269.43	60.99	68.36	39.17	12.69	100.29
		S	4.77	0.01	13.03	7.61	34.75	1.39	0.46		40.33	1.45	0.36	376.67	19.68	4.93	9.72	4.85	5.59
		K	1.8	0.47	1.15	0.84	1.71	3.74	1.94		19.21	7.06	8.59	1.28	5.54	0.54	0.7	0.53	1.02
保山组 (18)	\bar{X}	1.09	0.04	25	12.33	52.5	2.14	4.38	0.32	5.01	1.25	0.75	876.39	78.07	39.88	22.43	9.89	57.72	
	S	0.79	0.02	13.56	8.91	41.86	1.17	1.06	0.06	3.32	1.10	0.45	582.01	47.21	28.81	13.36	5.97	42.96	
	K	0.44	0.54	1.0	0.83	0.81	2.14	1.90	0.29	2.94	4.17	8.82	0.89	7.1	0.32	0.40	0.41	0.59	
保山组	上段 (5)	\bar{X}	1.86	0.09	33	12.4	80.6	3.08	4.74	0.27	6.2	1.14	1.1	1333.2	96.78	71.9	34.86	13.9	103.8
		S	0.75	0.12	5.48	5.68	31.32	0.19	0.40	0.12	1.87	0.38	0.2	138.82	36.63	8.59	9.66	4.54	7.5
		K	0.74	1.25	1.32	0.84	1.24	3.08	2.06	0.25	3.65	3.8	12.94	1.35	8.8	0.57	0.623	0.58	1.06
	中段 (8)	\bar{X}	0.88	0.04	21.25	7.43	18.33	1.7	4.63	0.36	4.26	0.73	0.64	800.25	82.05	31.75	18.69	9.19	46.5
		S	0.77	0.02	16.32	2.88	14.67	1.36	2.42	0.13	4.2	0.42	0.45	726.12	56.81	26.22	13.7	7.08	44.86
		K	0.35	0.56	0.85	0.50	0.28	1.7	2.01	0.33	2.51	2.43	7.53	0.81	7.46	0.25	0.33	0.38	0.47
	下段 (5)	\bar{X}	0.68	-	23	13.6	39.8	1.1	1.8	-	5	1.3	0.15	541.4	23.35	16.13	16	7.02	29.6
		S	0.16		13.13	7.57	28.33	0.61	0.80		3.11	0.61	0.09	291.48	12.79	10.78	8.0	3.44	19.24
		K	0.27		0.92	0.92	0.61	1.1	0.78		2.94	4.33	1.76	0.55	2.12	0.13	0.29	0.29	0.30
陆壳丰度 *		2.5	0.07	25	14.8	65	1.0	2.3	1.1	1.7	0.3	0.085	990	11	126	56	24	98	

*据 K H Wedepohl^[1]; Au 单位为 ng/g, 其余元素为 $\mu\text{g/g}$; \bar{X} —平均含量, S—标准差, K—浓集系数, - —含量低于检出限。

Cr、Ni、V、K₂O、Na₂O 为特征。上述众多元素, 其中包括 Cu、Pb、Zn 等成矿元素在脉岩中的强烈富集表明脉岩与 Pb、Zn、Cu 矿化具有密切的关系, 可作为找矿的重要标志。

3 矿体地球化学特征

3.1 矿体地质特征

区内目前发现铅锌矿体多条, 主矿体 4 条(图 1), 矿化类型及矿物组分较为复杂, 矿化蚀变主要为 Pb-Zn、Cu、Au 矿

化, 近矿围岩蚀变主要有夕卡岩化、硅化、大理岩化、硫铁矿化、方解石化等。按矿物组合分为 Cu-Pb-Zn 矿体、Pb-Zn 矿体和 Au-Pb-Zn 矿体 3 类, 现以茅竹棚矿段(Cu-Pb-Zn 矿)、核桃坪矿段(Pb-Zn 矿)和打场凹矿段(Au-Pb-Zn 矿)为例分别说明其矿体主要特征。

1) 茅竹棚矿段 Cu-Pb-Zn 矿体。产于核桃坪背斜东翼上寒武统沙河厂组上段(\in_3Sh^2), 受层间断裂带控制, 呈脉状产出, 矿体总体走向北西, 主矿体长约 2 000 m, 厚 1.11~6.97 m, 平均厚

表 2 保山地块基性脉岩元素平均含量

Table 2 Average contents of some elements in basic dikes in the Baoshan massif

参数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Sn	Mo	As	Sb
\bar{X}	33.49	1.11	648.74	175.78	2760.65	16.35	1.50	0.37	43.37	13.33
<i>S</i>	126.23	2.09	2394.26	333.95	9688.75	27.78	1.09	0.31	73.2	14.64
<i>K</i>	37.21	16.57	11.19	11.72	26.54	32.7	1.5	0.82	28.91	83.31
中国基性岩*	0.90	0.067	58	15	104	0.5	1.0	0.45	1.5	0.16
参数	Bi	F	B	Cr	Ni	Co	V	K ₂ O	Na ₂ O	SiO ₂
\bar{X}	13.16	9835.48	6.75	97.89	62.22	54.51	140.04	0.76	1.08	39.67
<i>S</i>	37.33	17397.06	11.43	114.33	53.24	36.60	126.56	1.50	1.21	11.60
<i>K</i>	138.53	19.29	0.61	0.44	0.62	1.19	0.61	0.78	0.43	0.82
中国基性岩*	0.095	510	11	223	100	46	230	0.97	2.51	48.62

注: * 据郇明才等^[2]; Au 单位为 ng/g, K₂O、Na₂O、SiO₂ 单位为%, 其余元素为 μg/g; \bar{X} —平均含量, *S*—标准差, *K*—浓集系数; 样品由湖北省地勘局武汉岩矿测试中心分析测试。

表 3 核桃坪铅锌矿床矿石微量元素平均含量

Table 3 Average contents of some elements in various types of the Hetaoping Pb-Zn deposit

矿石类型	参数	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	W	Sn	Mo	As
铅锌矿床矿石 (38)	\bar{X}	7.8	70	13374	51326	49232	4.29	3.3	0.68	416
	<i>K</i>	5.4	1400	535	4277	757	1.66	0.78	1.84	55
大理岩型矿石(24)	\bar{X}	4.3	104	11500	47800	35500	2.42	2.52	0.27	53
	<i>K</i>	3.0	2088	454	3969	544	0.94	0.59	0.73	7
夕卡岩型矿石(10)	\bar{X}	12.2	81	17900	56000	60800	5.89	5.54	2.4	1823
	<i>K</i>	8.4	1620	716	4667	935	2.28	1.31	6.49	240
石英脉型矿石 (4)	\bar{X}	26.0	13	13300	31800	102700	14.1	4.4	0.39	420
	<i>K</i>	17.8	260	526	2639	1574	5.47	1.04	1.06	55
保山地块上寒武统		1.5	0.05	25	12	65	2.58	4.24	0.37	7.6
矿石类型	参数	Sb	Bi	F	B	Cr	Ni	Co	V	SiO ₂
铅锌矿床矿石 (38)	\bar{X}	18.3	107	1950	30.25	44.11	32.17	61.81	51.20	38.90
	<i>K</i>	9.21	143	2.30	0.48	0.84	1.17	5.31	0.77	1.09
大理岩型矿石 (24)	\bar{X}	13.9	167	1877	37.22	37.05	29.88	77.03	40.37	32.48
	<i>K</i>	7.0	223	2.22	0.59	0.70	1.09	6.62	0.61	0.91
夕卡岩型矿石 (10)	\bar{X}	30.7	5	1110	12.5	67.74	41.83	32.49	78.86	49.39
	<i>K</i>	15.41	6	1.31	0.2	1.29	1.52	2.79	1.19	1.39
石英脉型矿石 (4)	\bar{X}	25.3	3.55	4643	4.4	8.28	19.88	50.5	15.75	40.08
	<i>K</i>	12.71	4.73	5.48	0.07	0.16	0.72	4.34	0.24	1.13
保山地块上寒武统		2.0	0.75	847	62.92	52.70	27.52	11.63	66.20	35.58

注: Au 单位为 ng/g, SiO₂ 单位为%, 其余元素为 μg/g; \bar{X} —平均含量; *K*—浓集系数; 样品由湖北省地勘局武汉岩矿测试中心分析测试, 括号内数字为样品数。

度 4.29 m。主要成矿元素为 Cu-Pb-Zn, 伴生 Ag, 品位: Cu 0.02%~11.64%, 平均 1.46%; Pb 0.68%~7.07%, 平均 3.66%; Zn 0.22%~22.39%, 平均 5.75%; Ag 1.3~526g/t, 平均 81.66g/t。

2) 核桃坪矿段 Pb-Zn 矿体。产于核桃坪背斜西翼上寒武统核桃坪组中段的薄—中层状大理岩化灰岩、泥质条带灰岩断层破碎带及层间破碎带中, 呈脉状、似层状产出。矿体走向近南北, 倾向东, 倾角 30~43°, 与顶底板产状基本一致。主矿体长约 1 500 m, 厚 0.72~27.65 m, 平均厚度 8.14 m, 倾向

延伸大于 120 m, 矿石品位: Pb+Zn 1.54%~12.56%, 平均 8.53%, 铅锌比值约为 1:4。含矿岩石以阳起石夕卡岩为主, 顶底板为大理岩、钙质泥岩。矿化向深部具变富变厚趋势, 深部出现大量致密块状闪锌矿富矿体。

3) 打厂凹 Au-Pb-Zn 矿体。产于核桃坪背斜西翼的上寒武统核桃坪组上段的含泥质条带灰岩内的破碎带中, 呈脉状产出。控制矿体长约 800 m, 厚 4.40~14.18 m, 平均厚度 9.23 m; 品位: Pb 1.07%~4.74%, 平均 Pb 2.85%; Zn 0.34%~6.18%, 平均 Zn

2.59%; Au 0.41 ~ 4.91 g/t, 平均 Au 2.27 g/t。Pb、Zn、Au 成矿元素同体伴生。

3.2 矿石地球化学特征

本区矿石类型复杂, 按含矿岩石不同分为夕卡岩型、大理岩型、钙质泥岩型、角砾岩型和石英脉型铅锌矿石等, 其中, 大理岩型、夕卡岩型铅锌矿石为矿区主要矿石类型。按主要有用组分不同则分为铅矿石、锌矿石、铅锌矿石、铜铅锌矿石、含银铜铅锌矿石及金铅锌矿石等。为研究成矿元素富集特征, 从核桃坪矿床系统采集了各类矿石样品 35 件, 在湖北省地勘局岩矿测试中心定量测试了 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Mo、As、Sb、Bi、F、B、Cr、Ni、Co、V、K₂O、Na₂O、SiO₂ 等 20 种元素。结果(表 3)表明, 核桃坪铅锌矿床 Pb、Zn、Cu、Ag 平均品位分别为 5.13%、4.92%、1.34% 及 70 g/t, 与保山地块上寒武统地层平均含量相比, 分别富集了 4277、757、535 和 1400 倍, 其元素浓集序列 ($K \geq 1.2$) 为 Pb → Ag → Zn → Cu → Bi → As → Sb → Au → Co → F → Mo → W。其中, 大理岩型矿石 Pb 平均品位为 4.78%、Zn 为 3.55%、Cu 为 1.15%、Ag 为 104.4g/t, 其元素浓集序列 ($K \geq 1.2$) 为 Pb → Ag → Zn → Cu → Bi → Sb → As → Co → Au → F; 夕卡岩型矿石, Pb 平均品位为 5.60%、Zn 为 6.08%、Cu 为 1.79%、Ag 为 81g/t, 其元素浓集序列 ($K \geq 1.2$) 为 Pb → Ag → Zn → Cu → As → Bi → Co → W → Ni → Si → Cr → F → Sn; 石英脉型矿石 Pb 平均品位为 3.18%、Zn 为 10.27%、Cu 为 1.33%、Ag 为 12.97g/t, 其元素浓集序列 ($K \geq 1.2$) 为 Pb → Zn → Cu → Ag → As → Au → Sb → F → W → Bi → Co。

为进一步研究蚀变与矿化的关系, 按采样间距 10 m, 从核桃坪铅锌矿区穿脉平硐中系统采集样品 27 件, 定量测试了 Au、Ag、Cu、Pb、Zn、W、Sn、Mo、As、Sb、Bi、F、B、Cr、Ni、Co、V、K₂O、Na₂O、SiO₂ 等 20 种元素, 并编制了地质地球化学剖面图(图 2)。从图 2 可知, 核桃坪矿区夕卡岩化与成矿关系十分密切, 具体表现在: ①近矿围岩夕卡岩化现象较为普遍; ②存在夕卡岩化铅锌矿石; ③Pb、Zn、Cu、Ag、Au、W、Sn、Mo、As、Sb、Bi、F、B、K₂O、Na₂O、SiO₂ 的含量变化曲线等均在矿体和夕卡岩化处出现峰值, 而 Cr、Ni、Co、V 的含量变化曲线则

表 4 矿石硫同位素组成

Table 4 Sulfur isotopic composition of ores in the Hetaoping and Luziyuan ore deposits in the Baoshan-Zhenkang terrain

样号	样品名称	$\delta^{34}\text{S}$ (CDT‰)	矿石类型	采样地点
11	方铅矿	1.95	夕卡岩型	核桃坪矿床
12	方铅矿	0.99	方铅矿矿石	茅竹棚矿段
16	闪锌矿	10.17		
17	闪锌矿	9.89		
18	方铅矿	9.23	大理岩型铅锌矿石	芦子园矿床
19	方铅矿	9.37		I 号平硐

注: 样品由宜昌地质矿产研究所同位素地球化学开放实验室分析测试。

出现谷值。这表明, 夕卡岩化过程是一个成矿元素和酸碱组分带入, 并伴有基性组分带出的过程。

4 稳定同位素特征

4.1 硫同位素

硫是硫化物矿床中主要元素之一, 也是 Cu、Zn、Pb 等亲硫元素的主要沉淀剂。硫同位素组成是判断成矿物质来源的有效手段之一。在核桃坪茅竹棚矿段和芦子园矿床(位于镇康地块与核桃坪矿床类似的另一铅锌矿床, 另文论述)中共采集了 6 件矿石样品, 挑选方铅矿和闪锌矿单矿物后, 在宜昌地质矿产研究所同位素地球化学开放实验室进行了硫同位素分析测试。分析结果(表 4)表明, 核桃坪矿床茅竹棚矿段夕卡岩型矿石中的方铅矿硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S}$ 为 1.95‰~0.99‰, 与深部岩浆作用有关的硫同位素组成(5‰)相一致, 反映了深部岩浆硫源的同位素组成特点。芦子园铅锌矿床大理岩型矿石中的方铅矿和闪锌矿, 其硫同位素组成为 $\delta^{34}\text{S}$ 9.23‰~10.17‰, 平均为 9.36‰, 具有变化范围窄、硫同位素组成相对均一, 且相对富集 ^{34}S 的同位素组成特点; 其矿石硫同位素组成明显高于源于深部与岩浆作用有关的硫化物的硫同位素组成, 并大于其变化范围, 低于同期海水的硫同位素组成(寒武纪下限值为 15‰), 可能反映了岩浆源硫和地层中

表 5 矿石铅同位素组成

Table 5 Lead isotopic composition of ores in the Hetaoping and Luziyuan Pb-Zn deposits in the Baoshan-Zhenkang terrain

样号	矿物	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	ϕ	μ	年龄 (Ma) (H-H)	Th/U	矿石类型
11	方铅矿	18.249 ± 0.001	15.723 ± 0.001	38.446 ± 0.001	0.607	9.73	429	3.84	夕卡岩型方铅矿矿石
12	方铅矿	18.251 ± 0.002	15.723 ± 0.002	38.450 ± 0.007	0.607	9.73	428	3.84	夕卡岩型方铅矿矿石
16	闪锌矿	18.271 ± 0.003	15.715 ± 0.003	38.484 ± 0.010	0.605	9.71	405	3.85	大理岩型铅锌矿石
17	闪锌矿	18.247 ± 0.001	15.716 ± 0.001	38.446 ± 0.002	0.606	9.71	422	3.84	大理岩型铅锌矿石
18	方铅矿	18.224 ± 0.002	15.697 ± 0.002	38.381 ± 0.005	0.606	9.68	417	3.82	大理岩型铅锌矿石
19	方铅矿	18.338 ± 0.002	15.849 ± 0.002	38.874 ± 0.007	0.615	9.97	509	4.00	大理岩型铅锌矿石

注: 样品由宜昌地质矿产研究所同位素地球化学开放实验室分析测试。

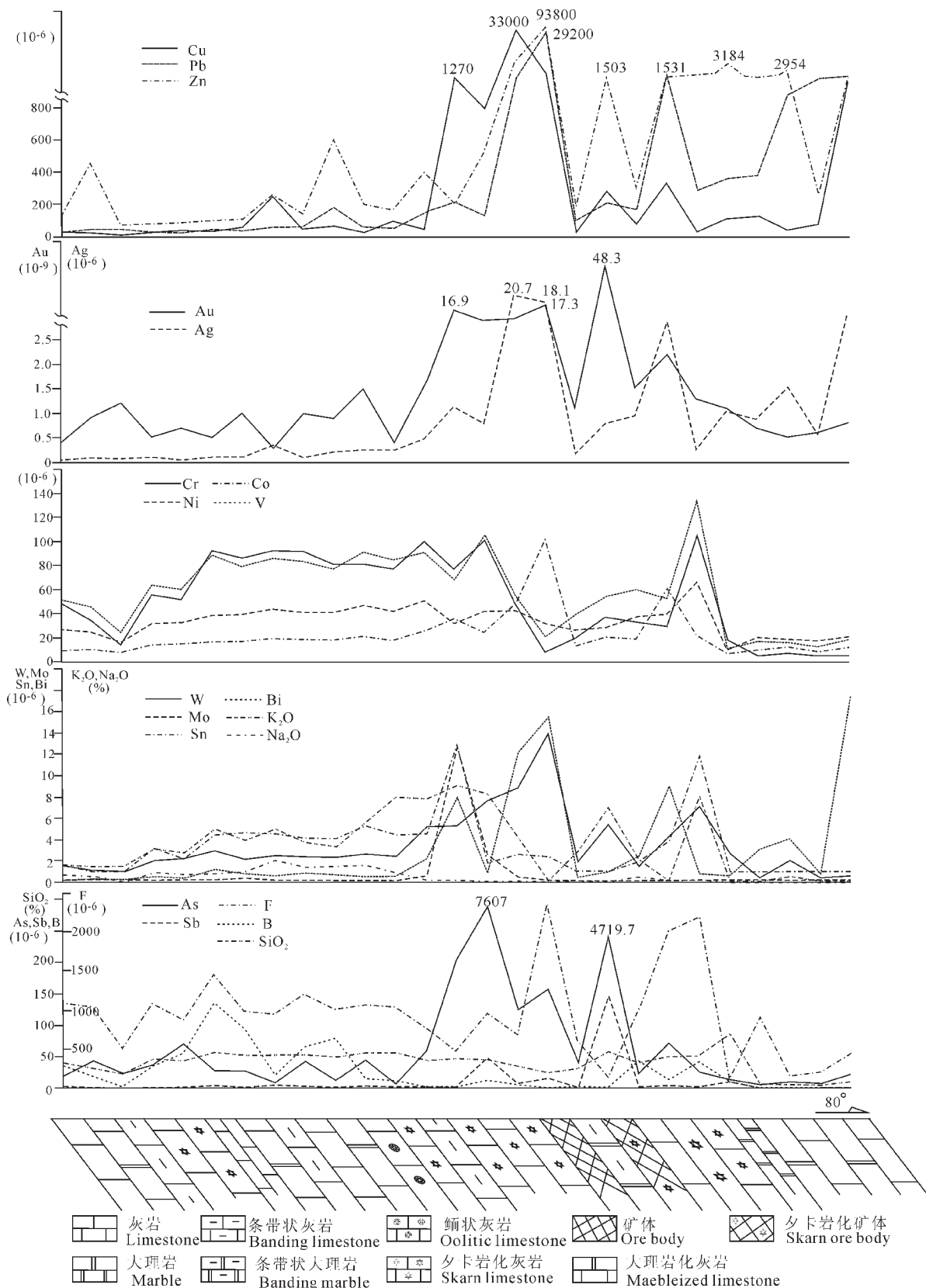


图 2 核桃坪铅锌矿区平洞地质及地球化学剖面图

Fig.2 Geological and geochemical section of an adit in the Hetaoping Pb-Zn district

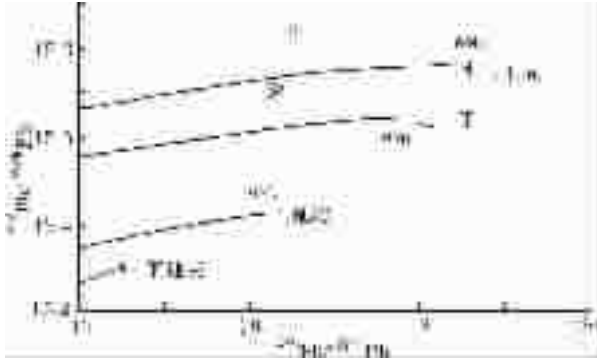


图3 核桃坪和芦子园 Pb-Zn 矿床矿石铅同位素组成(据 Zartman 和 Doe,1981 铅演化模式编绘)

Fig.3 Map showing the Pb isotopic composition of ores in the Hetaoping and Luzhiyuan Pb-Zn deposits (after Zartman and Doe, 1981)

海水源硫的混合特点。从核桃坪矿床到芦子园矿床,矿石中单矿物硫同位素组成的明显不同可能仅反映两矿床中岩浆热液参与程度的差异。

4.2 铅同位素

利用上述矿物样品在实验室同时进行了铅同位素分析,结果(表5)表明,核桃坪矿床与芦子园矿床的矿石铅同位素组成比较接近,且非常稳定,正常变化范围小于0.3%;因此,铅同位素组成基本上是均一的。 μ 值均在9~10之间,Th/U比值集中在3.82~4.0之间,且变化范围很小。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为18.224~18.338,离差为0.04; $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为15.715~15.849,离差为0.06; $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为38.381~38.874,离差为0.18。铅同位素组成属于正常铅。两矿床中闪锌矿和方铅矿的铅同位素数据点都落在正常铅演化线之上,数据点分布较集中,可能反映了两矿床中的铅具有相似的来源。铅同位素模式年龄在405~509 Ma,小于地层年龄。在 Zartman 等^[3]的铅构造模式演化曲线上(图3),数据点主要分布于上地壳演化线附近及其上部。在铅同位素的 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图解中(图4)^[4],矿石铅投影点多数位于壳源铅和与岩浆作用有关的铅源边界线上,仅一点的铅同位素表现为明显的壳源铅特点。矿床中矿石铅的同位素组成反映了壳源铅和与岩浆作用有关的铅相混合的特点。矿石铅同位素组成所反映的成矿过程曾受到岩浆活动影响的结论与硫同位素的研究结果是一致的。

5 成矿流体特征及成矿物理化学条件分析

核桃坪铅锌矿床的流体包裹体细小(3~15 μm),且以石英、方解石中最为发育。原生包裹体多呈负晶形、椭圆形和不规则形,常呈群状和孤立状分布,或平行主矿物生长线呈线状分布,常见富液二相包裹体和纯液相包裹体;其中富液二相包裹体的气液比为3%~10%。用核桃坪矿床石英-碳酸盐脉型铅锌矿石磨制的12片包裹体测温片测温结果(表6)表明:石英中包裹体的均一温度为98~306 $^{\circ}\text{C}$,盐度NaCl为

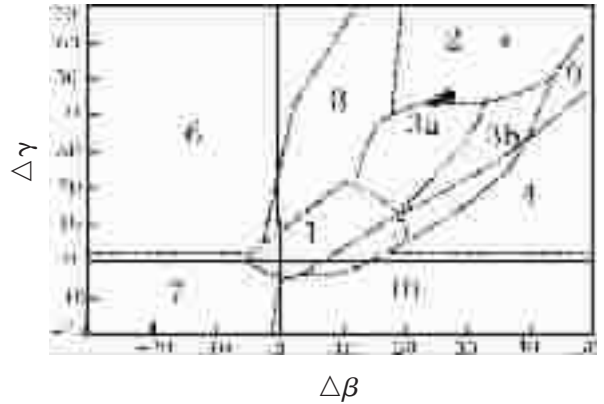


图4 核桃坪和芦子园铅锌矿床矿石铅的 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ 成因分类图(据朱炳泉,1998 编绘)^[4]

1—幔源铅;2—上地壳源铅;3—上地壳与地幔混合的俯冲带铅(3a—岩浆作用;3b—沉积作用);4—化学沉积型铅;5—海底热水作用铅;6—中深变质作用铅;7—深变质下地壳铅;8—造山带铅;9—古老页岩上地壳铅;10—退变质作用铅

Fig.4 $\Delta\beta-\Delta\gamma$ genetic classification map of ore Pb in the Hetaoping and Luzhiyuan Pb-Zn deposits (after Zhu Bing-Quan, 1998)

1—Mantle Pb;2—Upper crust Pb;3—Pb from the subduction zone where the upper crust and mantle mixed (3a. magmatism; 3b. sedimentation);4—Chemical sedimentary Pb;5—Submarine hydrothermal Pb;6—Pb from medium- and high-grade metamorphism;7—Pb from the high-grade metamorphic lower crust;8—Orogenic belt Pb;9—Pb from the old shale upper crust;10—Pb from retrograde metamorphism

1.0%~11.8%;方解石中包裹体的均一温度为85~214 $^{\circ}\text{C}$,盐度NaCl为0.5%~5.4%,成矿流体具有低温、低盐度的特点。

核桃坪矿床成矿流体包裹体测温频数直方图(图5)显示出明显的多峰分布,且数据集中分布在75~135 $^{\circ}\text{C}$ 和135~315 $^{\circ}\text{C}$ 两个温度范围内;由此,可划分出两个矿化阶段。表明了热液成矿大致经历了中高温和中低温两个热液成矿阶段;前者可能对应夕卡岩化阶段,后者对应脉状热液矿化阶段。根据均一温度和盐度可进一步推算出成矿流体的密度为0.959~1.004 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,均一压力为0.835 $\times 10^5\text{Pa}$ ~58.99 $\times 10^5\text{Pa}$ ^[5]。

在镜下观察到的大量“乳浊构造”(图6),反映了黄铜矿和闪锌矿同时形成,且成矿温度可能为350~400 $^{\circ}\text{C}$ ^[6],从而佐证了成矿流体经历了中高温矿化阶段。

总之,通过上述研究初步认为,核桃坪铅锌矿床为一层控型,且与后期岩浆热液活动有关的具有多个成矿阶段和多种矿质来源的热液型铅锌矿床。

6 成矿模式与找矿模型

6.1 成矿模式

矿产资源评价主要依靠两类矿床模型:描述性模型和品

表 6 核桃坪铅锌矿床流体包裹体特征及测定结果

Table 6 Features of fluid inclusions in the Hetaoping Pb-Zn deposit and their analytical results

样品编号	矿物	成矿阶段	类型	相态类型	形态	颜色	大小/ μm	气液比/%	均一温度/ $^{\circ}\text{C}$	冷冻温度/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/%
03B-T7	石英	成矿期	原生	富液二相	②③	无	5~8	5~10	158~194	-3.6~-1.3	2.2~5.8
	方解石	成矿期	原生	富液二相	②	无	5	5	96~129	-0.6~-0.3	0.5~1.0
03B-T8	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	5~6	5~7	161~193	-2.7~-1.3	2.2~4.5
	方解石	成矿期	原生	富液二相	①	无	3	5	92~103		
03B-T9	石英	成矿期	原生	富液二相	①③	无	5~6	5~7	143~197	-2.4~-1.3	2.2~4.0
	方解石	成矿期	原生	富液二相	②	无	5	3	101		
03B-T10	石英	成矿期	原生	富液二相	①③	无	5~6	5~6	122~207	-2.0~-0.9	1.4~3.6
	方解石	成矿期	原生	富液二相	①②	无	3~5	5	101~120	-2.3~-0.6	1.0~3.8
03B-T11	石英	成矿期	原生	富液二相	①③	无	3~10	5~10	169~306	-5.2~-3.1	5.1~8.2
	方解石	成矿期	原生	富液二相	①②	无	5~6	5~7	109~125	-2.3~-0.7	1.2~3.8
03B-T12	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	5~6	5~7	134~229	-5.5~-2.8	4.6~8.6
	方解石	成矿期	原生	富液二相	①②	无	5	5	86~143		
03B-T13	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	5~15	5~10	98~216	-2.0~-0.6	1.0~3.4
	方解石	成矿期	原生	富液二相	①②	无	5~6	5~10	206~214		
03B-T14	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	3~6	5~7	169~287	-3.8~-1.9	3.2~6.2
	方解石	成矿期	原生	富液二相	②	无	5	5	85~103		
03B-T15	石英	成矿期	原生	富液二相	①②③	无	5~8	5~10	126~202	-2.1~-0.7	1.2~3.5
	方解石	成矿期	原生	富液二相	①	无	3	5	97~102		
03B-T16	石英	成矿期	原生	富液二相	①③	无	5~8	5~7	154~220	-1.3~-0.6	1.0~2.2
03B-T17	石英	成矿期	原生	富液二相	③	无	8	10	203~222	-8.1~-5.6	8.7~11.8
	方解石	成矿期	原生	富液二相	②	无	5	5~7	99~160	-3.3~-1.6	2.7~5.4
03B-T18	石英	成矿期	原生	富液二相	①②	无	5	5~10	124~262	-8.0~-5.4	8.5~11.7
	方解石	成矿期	原生	富液二相	①②	无	5	5	100~143	-3.0~-1.3	2.2~5.0

注:①—椭圆形;②—负晶形;③—不规则型。

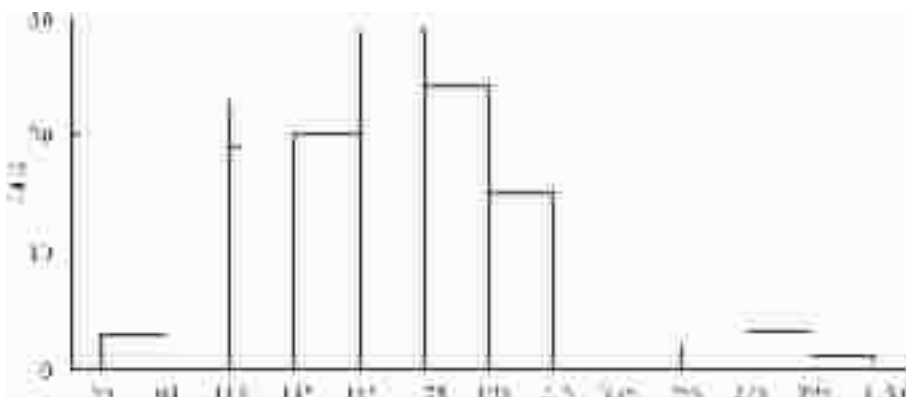


图 5 核桃坪铅锌矿床原生流体包裹体测温频数直方图

Fig.5 Temperature frequency histogram of primary fluid inclusions in the Hetaoping Pb-Zn deposit

位-吨位模型^[7]在资源评价中,矿床模型被用于圈定评价区域,划分矿化和非矿化环境,划分已知矿床类型;而矿床与矿点的划分取决于评价区域矿床数的估计。成矿远景区内的各类地学信息可被用于完成上述任务。综合离散信息的关键是矿床模型。建立的矿床模型允许地质学家将矿床类型与地质环境相联系。一个矿床就是一个具有足够规模和品位的,在最有利的环境下具有经济潜力的矿点。在资源评价中,这种矿点构成了评价的靶区总体。由于在某些方面,每个矿床之间是互不相同的,因此,矿床模型是对众多单个矿床的抽象表达,它必须高于单纯的对个体矿床的描述,而具有高度的

代表性。矿床模型代表了同类矿床的形成和演化。描述性矿床模型有两部分。第一部分描述了发现矿床的地质环境;第二部分描述了矿床的鉴别特征。第一部分在评价区圈定过程中起重要作用,这一部分描述了矿床类型的一般环境。第二部分有助于划分已知矿床和矿点到不同的类型,有助于评价区的圈定。在某些情况下,地质环境并没表达在地质图上,在这种情况下,地质环境根据已知矿床和矿点来鉴定。模型的组成构成了矿床的分类。这就提供了一条通过聚焦容矿岩的岩性和构造环境易于接近模型的路径,更易于从地质图上获取所需的信息特征。

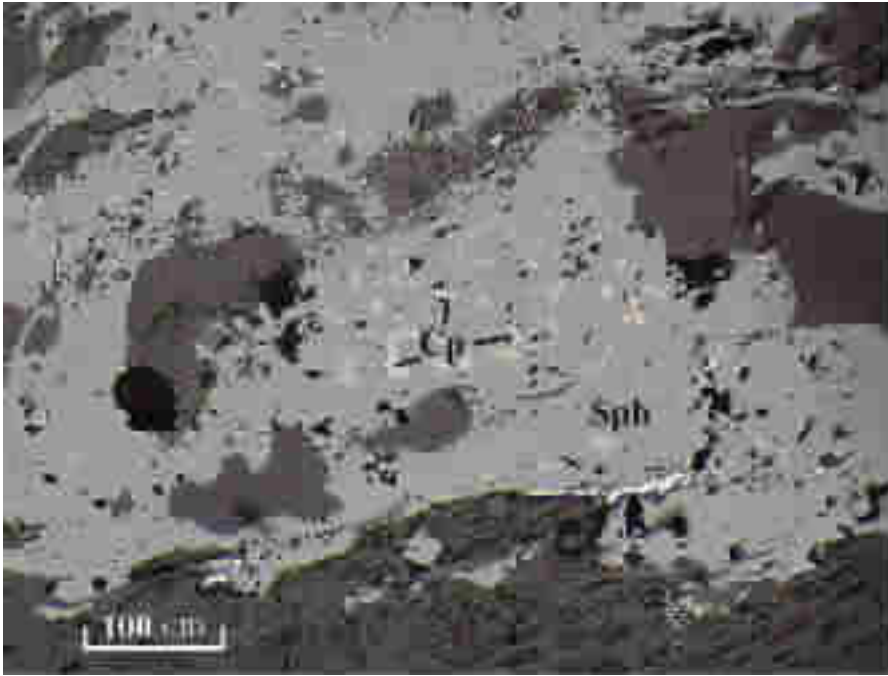


图 6 核桃坪 Pb-Zn 矿床黄铜矿和闪锌矿形成的乳浊构造

Cp—黄铜矿; Sph—闪锌矿

Fig.6 Emulsion texture resulting from the unmixing of a solid solution of chalcopyrite and sphalerite in the Hetaoping Pb-Zn deposit

Cp—chalcopyrite; Sph—sphalerite

核桃坪铅锌多金属矿床是在特定的沉积条件下形成了 Pb、Zn、Cu、Ag 等成矿元素局部初始富集和 As、Sb、Bi 等矿化剂元素的整体初始富集,再经后期岩浆热液作用叠加,并在有利的构造部位形成了层控型工业矿体;成矿作用具有多期、多阶段,成矿物质具有多来源的特点。综合各类控矿因素、稳定同位素和成矿流体特征等,矿床成矿模式大致可以概括为:①晚寒武世的沉积成岩作用局部形成富含 Pb、Zn、Cu、Ag 等成矿元素和整体富集 As、Sb、Bi 等矿化剂元素的层位;②岩浆上侵作用为铅锌矿床的形成提供了充分而必需的动力以及热源和矿源,从而构成了成矿的地质异常事件;③断裂构造及背斜倾伏端为矿质的沉淀提供了良好的通道和富集场所。

6.2 找矿模型

找矿模型是对矿床成矿模式的标志化,是对找矿标志的具体化。找矿模型是资源定量评价的基础,是资源评价变量选择和优化的依据。根据上述研究,研究区铅锌矿床的找矿模型概括如下:(1)有利地层和容矿围岩。某些地层层位选择富集某种成矿元素,而某些岩石具有有利于经济矿物质聚集的物理和化学特性。本区有利成矿的地层层位是:保山组上段、核桃坪组下段和沙河厂组下段(有可能是 Cu 矿化的矿源层),核桃坪组中段和沙河厂组(有可能是 Zn 矿化的矿源层)和核桃坪组中段(有可能是 Pb 矿化的矿源层);成矿有利的岩

性是:灰岩、白云质灰岩和大理岩,其次是板岩和粉砂岩。(2)有利构造。褶皱、断层和断裂是携带成矿元素溶液运移的通道,因此,有利于经济矿床的形成。本区成矿有利的构造是叠加与矿区背斜上的脆性和韧性断裂。(3)脉岩。本区成矿有利的脉岩有:辉绿岩脉和辉长岩脉、钾长石脉。(4)蚀变矿化迹象。矿石矿物或特征(诊断)矿物以及蚀变岩石的出现可以指示矿床的存在。譬如矿区发育的夕卡岩化、钾长石化、硅化和黄铁矿化等。(5)地球化学异常。成矿元素或痕量示踪元素浓集通常围绕矿床形成原生晕。譬如矿区可能发育的 Cu-Pb-Zn-Ag 组合异常和 Au-As-W-Sb 组合异常等。(6)地球物理异常。起源于区域梯度的磁场、重力场、放射性场和电场的变化有助于鉴别有利于矿物资源堆积的地质环境。本区有利的地球物理异常为一定规模的重力负异常,磁正异常和激电异常。(7)地质年代数据。同位素和地层年代数据揭示了矿化事件与围岩和结构构造的关系。

上述成矿模式和找矿模型的建立,为该区进一步开展找矿靶区的综合定量圈定和评价奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] Wedepohl K H. The composition of the continental crust [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59 (7): 1217~1232.
- [2] 鄯明才,迟清华. 中国东部地壳与岩石的化学组成 [M]. 北京:科学出版社,1997. 93~94.

- Yan Mingcai, Chi Qinghua. The Chemical Compositions of Continental Crust and Rocks in the Eastern Part of China [M]. Beijing: Science Press, 1997. 93~94 (in Chinese).
- [3] Zartman E R, Doe B R. Plumbotectonics: the model [J]. Tectonophysics, 1981, 75 (1): 135~162.
- [4] 朱炳泉. 地球科学中同位素体系理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 224~226.
- Zhu Bingquan. Theory and Application of Isotopic System in the Earth Science [M]. Beijing: Science Press, 1998. 224~226 (in Chinese).
- [5] 刘斌, 沈坤, 等. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社, 1990. 73~118.
- Liu Bin, Shen Kun, et al. Thermodynamics of Fluid Inclusions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999. 73~140 (in Chinese).
- [6] 徐国风. 矿相学教程[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1986. 140~141.
- Xu Guofeng. Textbook of Mineragraphy [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1986. 140~141 (in Chinese).
- [7] Singer D A. Basic concepts in three-part quantitative assessments of undiscovered mineral resources [J]. Nonrenewable Resources, 1993, 2 (2): 69~81
- [8] Taylor R B, Steven T A. Definition of mineral resource potential [J]. Economic Geology, 1983, 78: 1268~1270.

Geochemical characteristics of the Hetaoping Pb–Zn deposit, Baoshan, Yunnan, and its genetic model and ore prospecting model pattern

CHEN Yong-qing¹, LU Ying-xiang², XIA Qing-lin³,
JIANG Cheng-xing², LIU Hong-guang⁴, Lü Zhi-cheng¹

(1. *Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China;*

2. *Yunnan Institute of Geological Survey, Kunming 650011, Yunnan, China;*

3. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*

4. *Geological Library of China, Beijing 100083, China)*

Abstract: Study of the geochemical characteristics of the host strata of the Hetaoping Pb–Zn district, Baoshan, Yunnan, indicates that the Lower Member of the Upper Cambrian Hetaoping Formation, Lower the Member of the Shahechang Formation and Upper Member of the Baoshan Formation might be the source bed of Cu mineralization, that Middle Member of the Hetaoping Formation and Shahechang Formation might be the source bed of Zn mineralization, and that the Middle Member of the Hetaoping Formation might be the source bed of Pb mineralization. In addition, the Upper Cambrian as a whole is characterized by strong enrichment ($K \geq 5$) in Bi and B and enrichment ($K \geq 1.2$) in Sb, As, W and Sn. The pervasive enrichment of metallic, semi-metallic and nonmetallic mineralizer elements such as Bi, Sb, As and B in host strata may lay a material foundation for entrapping ore-forming elements, causing superaccumulation of ore-forming material and eventually forming a commercial ore deposit during the late hydrothermal ore-forming processes. Basic dike rocks are characterized by strong enrichment ($K \geq 5$) in Au, Ag, Cu, Pb, Zn, W, As, Sb, Bi and F and similar to ores in the element types. According to various ore-controlling factors, combined with a study of the features of stable isotopes and fluid inclusions, the Pb–Zn deposit is considered as a stratabound hydrothermal deposit that formed in a favorable tectonic area on the basis of ore source beds and mineralizers formed in Late Cambrian specific sedimentary conditions and through late hydrothermal superimposition. Mineralization shows multi-stages and multi-source features. The genetic model and prospecting model of this ore deposit are established on the basis of the above-mentioned study.

Key words: Pb–Zn deposit; geochemistry; ore-forming process; genetic model; prospecting model; Baoshan, Yunnan

About the first Author: CHEN Yong-qing, male, born in 1960, professor and Ph.D, engages in quantitative mineral exploration and assessment. E-mail; fzc Yongqing@cgs.gov.cn.