

河北蔡家营铅-锌-银矿床 地球化学特征及成因探讨^①

潘家永 张 乾

芮宗瑶

(中国科学院地球化学研究所, 贵阳, 50002) (中国地质科学院矿床地质研究所, 北京, 100037)

提 要 通过矿石矿物微量元素, 流体包裹体与稳定同位素研究表明蔡家营矿床是成矿物质与成矿流体多来源, 而热源与矿区斑岩脉密切相关的中温热液矿床。铅、锌、银等成矿元素来自下元古界红旗营子群角闪岩相变质岩; 硫来源于深部硫(火山与次火山热液来源)与地层硫的混合; 成矿流体在成矿早阶段以岩浆水为主, 到成矿晚阶段, 大气降水含量逐渐增多。该矿床主成矿阶段流体包裹体均一温度平均212.5℃, 流体盐度平均10.82wt%·NaCl, 属于中温中低盐度矿床。成矿温度与盐度从成矿早阶段到晚阶段逐渐降低, 且Ⅲ矿带(矿区东北部)成矿温度与流体盐度都高于Ⅴ矿带(矿区西南部), 反映成矿流体可能由矿区东北流向西南。

关键词 蔡家营铅-锌-银矿床 微量元素 流体包裹体 稳定同位素 矿床成因

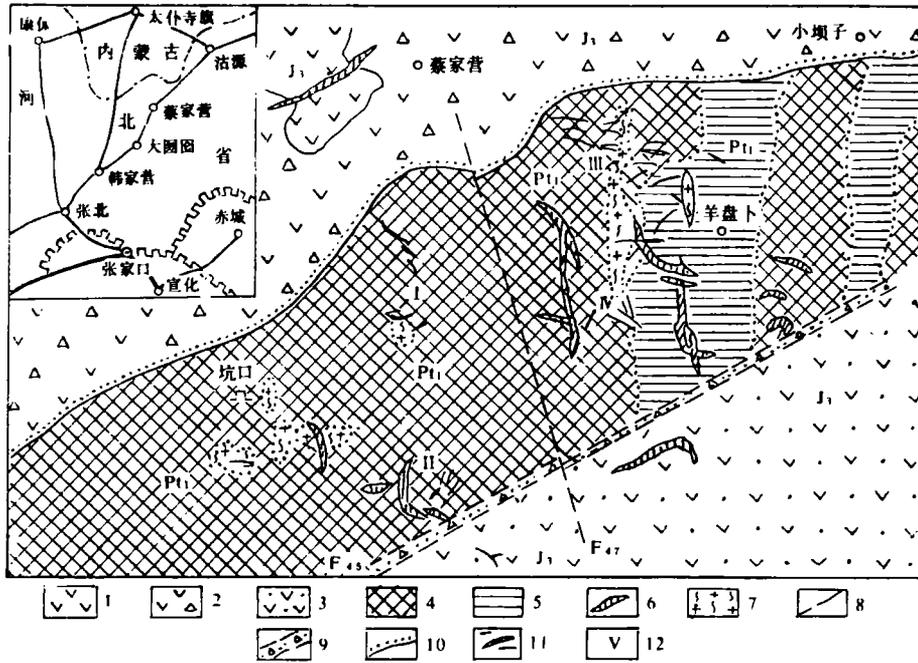
蔡家营矿床位于河北省西北部, 是1982年以来探明的一个大型铅-锌-银多金属矿床。矿床成因一直存在着争议, 主要有两种观点, 一种认为该矿床是沉积改造型层控矿床^[1], 另一种认为是中高温火山热液矿床^[2]。本文从矿床主要矿石矿物微量元素、矿床流体包裹体及稳定同位素多方面证据表明: 该矿床是成矿物质与成矿流体多来源, 热源与矿区斑岩脉密切相关的中温热液矿床。

1 矿床地质特征

蔡家营矿床位于华北地台北缘内蒙地轴与燕山台背斜的交接部位^[3]。矿区出露的地层为侏罗系及下元古界, 两者呈不整合接触。其中侏罗系为一套中基性-中酸性火山-沉积建造, 岩性为安山玄武岩、凝灰质角砾岩及流纹质晶屑凝灰岩; 下元古界为红旗营子群角闪岩相变质岩、(锆石铀-铅不一致线年龄为 $1825 \pm 13 \text{Ma}$ ^[3]), 其岩性主要是角闪黑云斜长变粒岩与砂线石榴斜长变粒岩, 且遭受不同程度的混合化和钾长石化。

^① 第一作者简介: 潘家永, 男, 25岁, 硕士, 矿床地球化学专业

矿区断裂构造很发育。F₄₅号断裂是矿区的导矿构造;而其派生的羽状剪切断裂为其储矿构造;近南北向的断裂(如F₄₇号断裂)为晚期断裂,切断了矿脉(图1)。



上侏罗统(J₃): 1.安山玄武岩 2.凝灰质角砾岩 3.流纹质晶屑凝灰岩;下元古界(Pt₁):4.角闪黑云斜长变粒岩 5.砂线石榴斜长变粒岩;6.燕山期石英斑岩(花岗斑岩)脉;7.加里东期花岗质混合岩;8.断层 9.断裂带 10.地层不整合界线 11.矿脉 12.矿段编号

图1 蔡家营矿床地质略图

(据黄典豪等,1991,根据地表坑探与钻孔去掉第四纪沉积物)

Fig. 1 Schematic geological map of the Caijiaying Pb-Zn-Ag deposit (Huang Dianhao et al. ,1991, Based on surface exposures and drilling data, the Quaternary overburden is not shown)

矿区无岩体出露,但斑岩脉处处可见,主要是石英斑岩与花岗斑岩(锆石铀-铅不一致线年龄为142±3Ma^[3]),斑岩中偶尔可见细粒黄铁矿、闪锌矿。

矿体主要呈脉状产于下元古界红旗营子群变质岩中,有少部分呈脉状产于侏罗系火山岩中,产于这两种围岩中的矿体是同一热液成矿系统形成,且受相同的裂隙系统所控制。矿区分五个矿带,其中Ⅲ矿带规模最大,Ⅴ矿带次之,其余三个矿带规模较小,勘探程度较低。

由于矿区围岩既遭受了成矿前加里东期混合岩化和钾交代作用(混合岩中钾长石 K-Ar 年龄为195.8±7.2Ma^[3])引起的诸如钾化、绢云母化等蚀变作用,又在成矿作用中,热液流体活动使围岩遭受大面积的青磐岩化,因此矿区围岩蚀变较强,且很复杂,主要为硅化、绿泥石

化、钾长石化、绢云母化、碳酸盐化等蚀变,无明显的分带现象。

矿脉是由同一热液成矿系统形成,根据矿脉及矿化脉的交代穿插关系,可分为三个成矿阶段。成矿早阶段为矿化石英脉,石英脉中可见少量星点状细粒黄铁矿、闪锌矿,且有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿脉穿插其中;主成矿阶段为块状、团块状、浸染状及脉状矿石的形成阶段;成矿晚阶段形成矿化方解石脉,脉中可见呈星点状分布的粗粒方铅矿,偶尔可见闪锌矿。

矿床主要矿石矿物为闪锌矿、方铅矿、黄铁矿,次要矿石矿物有毒砂、磁黄铁矿、黄铜矿等;主要脉石矿物为石英、方解石、绢云母、绿泥石等。

2 矿石矿物中微量元素含量特征

该矿床方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿主元素及微量元素含量见表1。

2.1 方铅矿中微量元素

方铅矿中 Ag(107.74~2600ppm)、Sb(640.73~3300ppm)、As(445~861.7ppm)、Bi(59.9~243ppm)、Se(92~209.4ppm)含量较高,而 Te(0.285~6.18ppm)含量低,Co、Ni 含量均低于检出限。块状矿石中方铅矿(与深色闪锌矿及乳白色粒状石英共生)中 Ag、As、Bi、Sb 含量比方解石脉粗粒方铅矿中高,而 Sr、Te 含量后者比前者高。

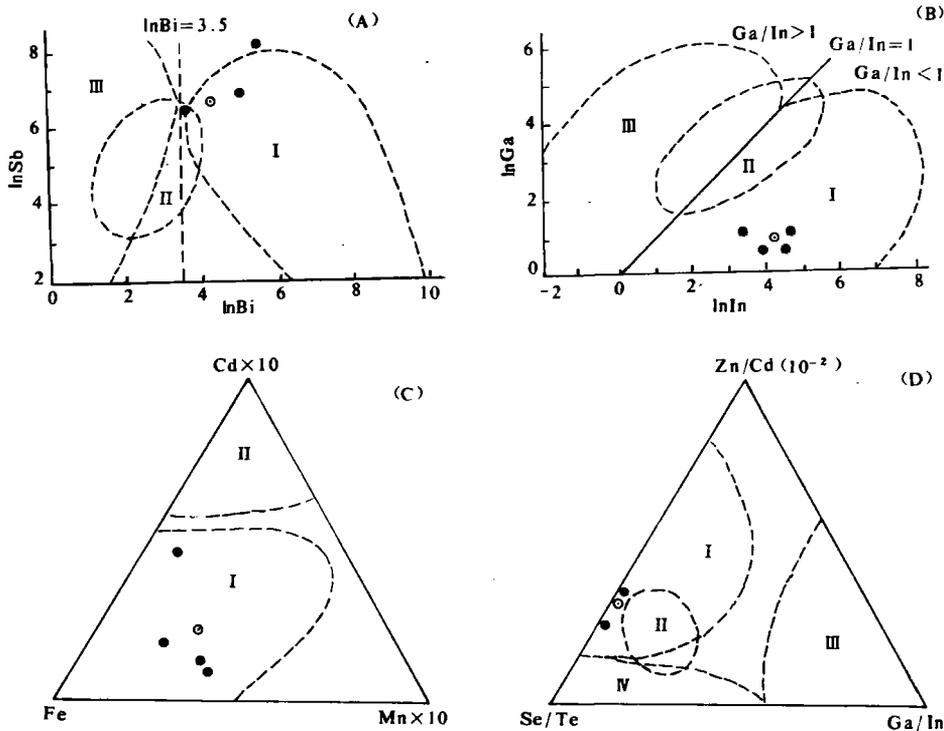
根据 Zhangqian(1987)^[4]对国内外64个不同成因类型典型铅-锌(银)矿床方铅矿中微量元素含量所作的 $\ln\text{Bi}-\ln\text{Sb}$ 关系图(图2A),蔡家营矿床样品点一部分落入岩浆热液矿床区内,一部分落入火山热液矿床区内,其平均值落入岩浆热液矿床区内。

表1 蔡家营矿床方铅矿、闪锌矿、黄铁矿、磁黄铁矿单矿物化学成分(单位:S、Pb、Zn、Fe为%,其余为ppm)

Table 1 Chemical composition of galena, sphalerite, pyrite and pyrrhotite from the Caijiayong

元素 含量 矿物	S	Pb	Zn	Fe	As	Mn	Cd	Ag	Sb	Bi	Co	Ni	Se	Te	Ga	Ge	In	Au
块状矿石中方铅矿	14.76	79.51			861.7			2600	3300	243	0.00	0.00	92.0	0.285				
方解石脉中方铅矿	12.76	85.05			445			535.6	900	152.5	0.00	0.00	209.4	6.18				
方铅矿(10)*		85.65	0.448	0.275			8.19	107.74	640.73	59.9							<2.0	2.98
方铅矿(6)**	13.452	86.698	0	0.0487		986	286	2054	1980								1	0
浅棕色闪锌矿	32.24		63.63	3.10		600	3200	39.5					197.2	51.6	3.39	10.9	27.8	
黑色闪锌矿	32.89		57.30	8.82		2900	2500	14.7					81.6	12.3	2.82	2.13	108.1	
闪锌矿**	33.576		55.95	9.172		5800	1500	700							2	0	51	1580
闪锌矿**	33.52		61.75	5.3			5000	110								0		0.00
闪锌矿**	33.186		59.19	7.214		4100	1500	0.00							2	0	82	20
闪锌矿(23)*		0.394	56.01	9.89			1632.8	100.5	99.7	84.4							56.9	20.1
黄铁矿	50.81			44.39	2200		0.00		13.5		398.5	194.2	41.5					
黄铁矿(16)*		0.287	0.141	45.72			10.1	44.44	54.17	88.93							<3.0	22.49
黄铁矿(13)*	51.493	0.0204	0.0065	45.69	8931		27	197	2	0	137	111.6						718
磁黄铁矿	37.79	0.0748		57.87	212			7.97	14.2	30.0	72.9	126.0	33.9	0.410			2.45	

* 据黄典豪等(1991) ** 据张长江(1990),括号内为样品数,其余为本文资料,中国地质大学(北京)测试中心龙梅测



A. 方铅矿 $\ln\text{Sb}-\ln\text{Bi}$ 关系 B. 闪锌矿 $\ln\text{In}-\ln\text{Ga}$ 关系 C. 闪锌矿 $\text{Fe}-\text{Mn} \times 10-\text{Cd} \times 10$ 关系 D. 闪锌矿 $\text{Se}/\text{Te}-\text{Ga}/\text{In}-\text{Zn}/\text{Cd}(10^{-2})$ 关系

I. 岩浆热液矿床区 II. 火山热液矿床区 III. 沉积改造矿床区 IV. 沉积-变质-混合岩化矿床区
 (●) 蔡家营矿床样品点 (○) 蔡家营样品平均值投影点

图2 方铅矿、闪锌矿中微量元素关系图

Fig. 2 Diagram among trace elements of galena and sphalerite

2.2 闪锌矿中微量元素

闪锌矿 Fe (3.1% ~ 9.89%)、Cd (1500 ~ 5000ppm)、Se (81.6 ~ 192.2ppm)、In (27.8 ~ 108.1ppm) 含量较高, 而 Ga (2 ~ 3.39ppm)、Ge (0 ~ 10.9ppm) 含量低, Ag (0.00 ~ 700ppm)、Au (0.00 ~ 1580ppm) 含量变化很大。随着闪锌矿中铁含量的增高, 锌含量有规律地降低, 闪锌矿中 In、Mn、Ag、Au 含量也有随铁含量增高而增高的趋势; 而 Cd、Ga 含量则有随铁含量增高而降低的趋势; Ge、Se、Te 含量均低, 变化不明显。

根据 Zhangqian (1987) 对国内外 36 个不同成因类型典型铅-锌(银)矿床闪锌矿中微量元素含量所做的 $\ln\text{In}-\ln\text{Ga}$ 、 $\text{Fe}-\text{Mn} \times 10-\text{Cd} \times 10$ 、 $\text{Se}/\text{Te}-\text{Ga}/\text{In}-\text{Zn}/\text{Cd}(10^{-2})$ 关系图, 蔡家营矿床样品点均落入岩浆热液矿床区内(图 2B、C、D)。

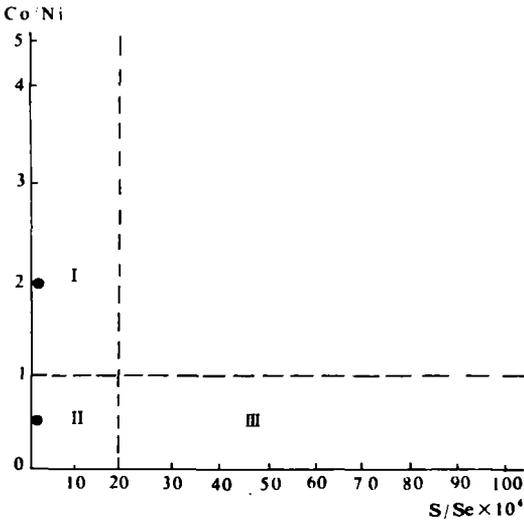
2.3 黄铁矿、磁黄铁矿中微量元素

黄铁矿中 As (2200 ~ 8931ppm)、Co (137 ~ 398.5ppm)、Ni (116.6 ~ 194.2ppm)、Ag (44.44 ~ 197ppm)、Se (41.5ppm) 含量较高, 而 Cd (0 ~ 27ppm)、In (< 3.0ppm) 含量低, Bi (0 ~ 88.93ppm)、

Sb(2~54.17ppm)含量变化较大。

许多学者研究认为:同生沉积与沉积-改造矿床黄铁矿中 $Co/Ni < 1$, 而 $S/Se \times 10^4$ 比值为20左右, 岩浆(火山)热液矿床 $Co/Ni > 1$, $S/Se \times 10^4$ 比值在1.0~2.0之间。蔡家营矿床黄铁矿 Co/Ni 比值为1.23~2.05, $S/Se \times 10^4$ 比值为1.22, 显示了岩浆(火山)热液成因特征。

根据葛朝华等(1987)^[5]对国内20多个典型铅锌(银)矿床所做的黄铁矿、磁黄铁矿中 $Co/Ni \sim S/Se$ 关系图, 蔡家营矿床样品点一个落入岩浆(火山)热液区, 一个落入过渡区(图3), 说明蔡家营矿床与岩浆(火山)热液成因关系更密切。



1. 岩浆(火山)热液矿床区 II. 过渡区 III. 沉积(包括热液沉积)成因区(图点为蔡家营矿床样品投影点)

图3 黄铁矿与磁黄铁矿 $Co/Ni-S/Se$ 关系

Fig. 3 $Co/Ni-S/Se$ diagram of pyrite and pyrrhotite

种包裹体体积小(一般 $< 5\mu m$)未加以研究。原生包裹体根据其气-液比不同,可分为以下三种类型:

A. 纯液相包裹体,只有一个液体相,大多小于 $10\mu m$ 。

B. 气-液包裹体:是该矿床主要类型包裹体,也是本文研究的重点。包裹体形态大多不规则,也有呈规则状副晶形的包裹体;包裹体大多不规则地分布于矿物中,其大小变化大,小的不到 $5\mu m$,大的达 $40\mu m$,一般 $10 \sim 25\mu m$;气液比变化也大,但大多为 $5\% \sim 20\%$ 。

C. 气体包裹体:该矿床气体包裹体主要存在于成矿早阶段的矿化石英脉中,形状规则,体积大,一般 $30 \sim 40\mu m$,气液比 $50\% \sim 70\%$,加热到均一时气泡扩大至整个体腔而均一成气相。

3.2 包裹体均一温度、含盐度及流体密度

本文所测的均一温度与冰点是作者在 Chaixmica (Nancy France) 冷热台上测得,测定矿物为石英、闪锌矿、方解石三种。均一温度采用气泡消失时温度与降温时气泡出现时温度平均,两

3 矿物流体包裹体地球化学特征

3.1 流体包裹体的类型及特征

从包裹体所赋存的矿物看,不管是成矿早阶段的矿化石英脉还是主成矿阶段的富矿石,石英中气-液包裹体多而大,包裹体一般 $10 \sim 25\mu m$,最大可达 $40\mu m$,气液比为 $5\% \sim 60\%$;而闪锌矿中包裹体数量相对少,大小悬殊,为 $5 \sim 40\mu m$,一般 $15 \sim 25\mu m$,气液比 $5\% \sim 10\%$;方解石中包裹体不仅数量少,且小,为 $5 \sim 15\mu m$,气液比也较小,为 5% 左右。

该矿床包裹体绝大部分为原生包裹体,有少量呈线状分布的次生包裹体,这

个温度值误差均在5%内,由于该矿床成矿深度不大,因此未进行压力校正。包裹体冷冻后温度回升过程中最后一块小冰晶消失的温度即为冰点,测试前先用纯水和标准盐水对仪器进行校正而得出校正曲线,利用获得的经校正的冰点数据,根据盐度-冰点关系的理论曲线,获得流体盐度数据,再根据均一温度-含盐度-密度间关系图解,得出流体密度^[6]。所得样品统计数据见表2。

表2 蔡家营矿床不同矿带不同成矿阶段流体包裹体均一温度、盐度与密度

Table 2 The homogenization temperatures, salinities and densities of the ore-forming fluids from the different ore-forming stage and the different ore zone in the Caijiaying deposit

成矿阶段	地质特征及矿化特征	矿带	所测包裹体数	均一温度(°C)			盐度(wt%·NaCl)			密度(g/cm ³)		
				变化范围	平均	方差	变化范围	平均	方差	变化范围	平均	方差
成矿早阶段	为石英脉,脉中可见少量细粒闪锌矿、黄铁矿,且有闪锌矿、黄铁矿、方铅矿呈细脉状穿插于其中	Ⅲ矿带	19	220~387	320	49	9.2~15.0	12.75	1.9	0.74~0.91	0.847	0.065
		V矿带	10	268~355	306.3	29	10.1~12.8	11.23	1.1	0.77~0.86	0.799	0.030
		Ⅲ+Ⅰ矿带	29	220~387	315.5	43	9.2~15.0	12.12	1.7	0.74~0.91	0.827	0.057
主成矿阶段	块状、团块状、脉状及浸染状矿石,矿石矿物以闪锌矿、方铅矿、黄铁矿为主,脉石矿物以石英、绿泥石、绢云母、方解石为主	Ⅲ矿带	15	182~313	217.4	35.7	11.3~11.9	11.65	0.252	0.93~0.97	0.95	0.016
		V矿带	9	189~227	204.3	11.6	9.7~11.3	10.4	0.588	0.93~0.95	0.942	0.007
		Ⅲ+V矿带	24	182~313	212.5	29.4	9.7~11.9	10.82	0.763	0.93~0.97	0.945	0.011
成矿晚阶段	方解石脉,可见粗粒方铅矿矿化	I矿带	6	181~217	199.2	12.5	5.7~9.4	7.7	1.57	0.96~0.93	0.924	0.005
石英斑岩	呈脉状,可见黄铁矿,闪锌矿矿化	Ⅳ矿带	7	209~428	299	63.1						

从不同的成矿阶段看:成矿早阶段均一温度平均315.5°C,盐度平均12.12wt%·NaCl,流体密度平均0.827(g/cm³);主成矿阶段均一温度平均212.5°C,盐度平均10.82wt%·NaCl,流体密度平均0.945(g/cm³);成矿晚阶段成矿温度平均199.2°C,盐度平均7.7wt%·NaCl,流体密度平均0.924(g/cm³)。显然从成矿早阶段到晚阶段,均一温度、盐度有规律地降低,而流体密度主成矿阶段最大。

从空间上看,表2清楚地表明:无论是成矿早阶段还是主成矿阶段,Ⅲ矿带(东北部)均一温度与流体盐度均比V矿带(西南部)高,这很可能反映成矿流体疏动方向从矿区东北至西南部。

3.3 流体液相与气相成分

矿物流体包裹体液相成分主要为Na⁺、K⁺、Ca²⁺、Cl⁻、SO₄²⁻,有少量的Mg²⁺,其K⁺/Na⁺比值平均0.44,Ca²⁺/Na⁺比值平均0.29,SO₄²⁻/Cl⁻比值平均0.13,矿区热流体为Na⁺、K⁺(Ca²⁺)—Cl⁻(SO₄²⁻)型水,液相成分中大量的Cl⁻存在,使Pb、Zn等成矿物质很容易以氯的络合物迁移。气相成份除H₂O外,以CO₂和N₂为主,有一定量的H₂,反应流体处于弱还原或还原环境(表3)

表3 矿物包裹体气、液相化学成分

Table 3 Chemical composition of the liquid facies and the gaseous phase in mineral inclusions from the Caijiaying deposit

样号	测试矿物	液相成分(mg/g)								气相成分(p.p.m)						
		F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	H ₂ O	CO ₂	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO
C _{3K-23}	石英	0	7.81	0	0.66	5.72	2.21	0.25	0.36	477.48	48.65	0.6	0	8.31	0	0
C _{3K-9}	石英	0	15.85	0	2.78	4.93	2.22	0.13	2.53	769.17	33.36	0.68	0	7.35	0	0
平均	石英	0	11.83	0	1.72	5.10	2.22	0.19	1.45	623.33	41.01	0.64	0	7.83	0	0

注:测试者,中国地质大学(北京)找矿勘探室

4 矿床硫、氢、氧稳定同位素地球化学特征

4.1 硫同位素

蔡家营矿床黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为4.4‰~9.8‰,平均6.11‰;磁黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为5.9‰;闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为-0.5‰~7.16‰,平均4.75‰;方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为1.03‰~7.5‰,平均4.20‰(表4)。显然从整体上看 $\delta^{34}\text{S}$ (黄铁矿、磁黄铁矿) > $\delta^{34}\text{S}$ (闪锌矿) > $\delta^{34}\text{S}$ (方铅矿),说明成矿整体上是平衡体系中形成。

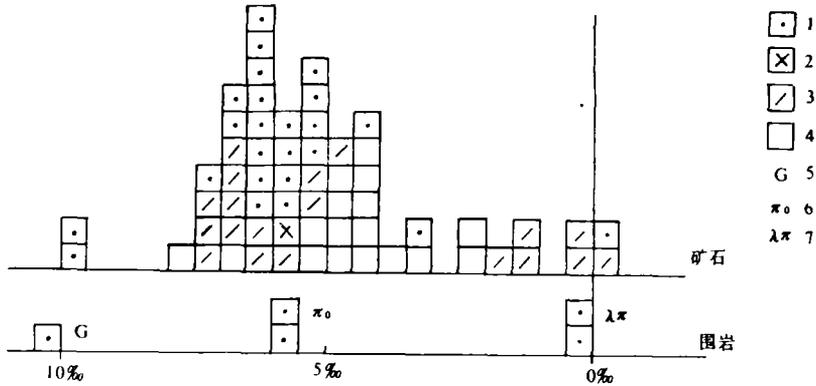
表4 蔡家营矿床硫同位素组成

Table 4 Sulfur isotopic composition of the Caijiaying deposit

地质产状	矿物	样品数	$\delta^{34}\text{S}$ ‰组成		
			变化范围	平均值	极差
矿体	黄铁矿	24	4.4~9.8	6.11	5.4
	磁黄铁矿	1		5.9	
	闪锌矿	18	-0.5~7.16	4.75	7.66
	方铅矿	18	1.03~7.50	4.20	6.47
	矿石矿物平均	61	-0.5~9.8	5.16	10.3
蚀变岩	黄铁矿	2	5.56~5.62	5.57	0.06
岩浆岩(石英斑岩与流纹岩)	黄铁矿	2	0.11~0.38	0.25	0.27
赋矿地层(变粒岩)	黄铁矿	1		10.15	

注:资料一部分来自本文,其余据张长江(1990)

由于矿石中未发现原生硫酸盐矿物,可以认为硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值能代表成矿流体的硫同位素组成(Ohmoto and Rye, 1979)^[7]。该矿床硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值为5.16‰,可将其看成是成矿流体的硫同位素组成。该矿床矿石硫同位素组成主要分布于4‰~7‰之间,且具有明显塔式分布特征(图4),与火山(次火山)热液型的铁钴街铅锌矿、白银厂铜矿 $\delta^{34}\text{S}$ 组成很相似(其硫源



1. 黄铁矿 2. 磁黄铁矿 3. 闪锌矿 4. 方铅矿 5. 红旗营子群变粒岩 6. 蚀变岩 7. 石英斑岩及流纹岩

图4 蔡家营矿床硫同位素组成频率直方图

Fig. 4 Histogram showing the sulfur isotope composition of the Caijiaying deposit

认为是与海相火山活动有关,并混有均一化了的沉积硫^[8]。

从不同地质体中 $\delta^{34}\text{S}$ 组成看,矿体中 $\delta^{34}\text{S}$ (平均5.16‰)与矿体蚀变岩 $\delta^{34}\text{S}$ (平均5.57‰)相似,但高于矿区石英斑岩与流纹岩中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ (平均0.25‰)组成,且低于未蚀变的赋矿地层——变粒岩中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ (为10.15‰)组成,这进一步说明矿石与蚀变岩中硫可能是深部硫(火山、次火山热源来源)与地层硫的混合。

4.2 氢、氧同位素组成

该矿床流体包裹体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}\text{‰}$ 变化为3.20~6.02,而 $\delta\text{D}\text{‰}$ 变化为-85~-99.544(表5)。从氢-氧同位素关系图上明显看出(图5):蔡家营矿床成矿早阶段两个样品点都靠近岩浆水域边上,因此成矿早阶段流体以岩浆热液为主;到主成矿阶段,两个样品点均不同程度地离开岩浆水域,说明成矿流体大气降水所占的比例增加。

表5 蔡家营矿床流体包裹体氢、氧同位素组成

Table 5 H and O isotopic composition of ore-forming fluid in the Caijiaying deposit

样号	地质产状	测定矿物	$\delta\text{D}\text{‰}$ (SMOW)	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (SMOW)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{水}}\text{‰}$ (SMOW)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)	资料来源
C _{3k} -23	矿化石英脉	石英	-89	12.73	6.02	320	本文*
C _{3k} -9	矿化石英脉	石英	-85	11.46	4.75	320	本文*
(863)1	铅锌矿石	石英	-99.544	10.97	3.39	295	张长江(1990)
(873)1	铅锌矿石	石英	-98.7	10.89	3.20	292	张长江(1990)

注:测试者,地矿部矿床所同位素室

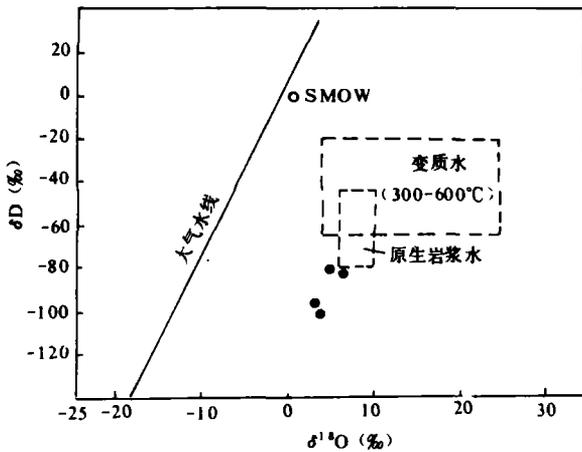


图5 蔡家营矿床 $\delta D \sim \delta^{18}O$ 同位素关系(圆点为矿床样品点)

Fig. 5 H and O isotopic composition of ore-forming fluid

铅、锌矿化也强,显示出矿化与斑岩脉的密切关系。

5.2 成矿的主要物理化学参数

流体包裹体研究表明:从成矿早阶段到晚阶段,成矿温度与流体盐度逐渐降低。主成矿阶段成矿温度为 $182 \sim 313^{\circ}\text{C}$;流体盐度为 $9.7 \sim 11.9\text{wt}\% \cdot \text{NaCl}$,平均 $10.82\text{wt}\% \cdot \text{NaCl}$,因此该矿床为中温中低盐度热液矿床。

该矿床成矿早阶段矿化石英脉的石英中可见液相包裹体、气-液包裹体与气体包裹体三者共存,成矿流体具有沸腾现象特征,根据 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系的沸腾曲线^[9]可求得成矿深度为 1030m ,按每 km 压力估算,即成矿压力为 36MPa 这与该矿区石英斑岩与花岗斑岩的形成深度($1 \sim 1.5\text{km}$)相一致(据张长江,1990)。

5.3 成矿物质与成矿流体来源

区域地层成矿元素含量表明:下元古界红旗营子群变质岩 Pb 、 Zn 、 Ag 等成矿元素都有一定程度的富集,尤其是角闪斜长变粒岩, Pb 、 Zn 、 Ag 分别是地壳克拉克值的 6.46 、 6.93 、 8.29 倍;通过对矿区蚀变岩与未蚀变的变质岩所做的成矿元素含量分析表明:岩石蚀变(主要是绿泥石化、绢云母化、硅化)越强, Pb 、 Zn 、 Ag 成矿元素含量也越低(据张长江,1990),反映了下元古界变粒岩成矿元素因热液蚀变而部分或大部分析出;矿石铅同位素组成均一, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $16.700 \sim 16.826$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $15.049 \sim 15.644$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 $36.223 \sim 37.841$,具有低放射性成因铅的古老铅特征,反映铅主要来源于老地层——即下元古界红旗营子群变质岩^[2]。综上所述,下元古界红旗营子群变质岩很可能是矿床的矿源层。

矿石硫化物 $\delta^{34}\text{S}$ 组成均一,平均 5.16% ,具有明显的塔式分布特征,其组成介于岩浆岩(石英斑岩、流纹岩)与赋矿地层(变粒岩)之间,反映矿石硫来源于深部硫(火山、次火山热液来源)与地层硫的混合。

5 矿床成因探讨

5.1 矿床与矿区次火山岩的关系

在方铅矿中 $\text{InSb}-\text{InBi}$ 关系图、闪锌矿的 $\text{InIn}-\text{InGa}$ 、 $\text{Fe}-\text{Mn} \times 10^{-\text{Cd}} \times 10$ 、 $\text{Se/Te}-\text{Ga/In}-\text{Zn/Cd} (10^{-2})$ 关系图及黄铁矿与磁黄铁矿 $\text{Co/Ni}-\text{S/Se}$ 关系图中,蔡家营矿床样品点均落入岩浆(火山)热液矿床区内;黄铁矿中 $\text{Co/Ni} > 1$, $\text{S/Se} = 1.12 \times 10^4$ 也反映该矿床成因与岩浆(火山)作用的密切关系。

矿区次火山岩脉(石英斑岩、花岗斑岩)密集分布区的变质岩、混合岩中

流体包裹体氢氧同位素组成反映出,成矿早阶段成矿流体以岩浆热液为主,但到主成矿阶段,大气降水加入而使成矿热液呈混合水。

综上所述,蔡家营矿床其成因是成矿物质与成矿流体多来源而热源与燕山期次火山岩有关的中温热液矿床,成矿机理阐述如下:

由于燕山期次火山岩脉侵入及火山岩喷发,带来了热液及富含硫的热流体,成矿热液经导矿构造而流经富含 Pb、Zn、Ag 等成矿物质的矿源层——下元古界红旗营子群变质岩,使矿源层中 Pb、Zn、Ag 等成矿元素随围岩的热液蚀变而析出并进入成矿溶液,主要呈氯络合物迁移。随着成矿溶液物理化学性质变化(如温度、压力降低,PH 值增加等),Pb、Zn、Ag 络合物变得不稳定而在有利的储矿构造中分解成硫化物沉淀。靠近 F₄₅号断裂的Ⅲ矿带(矿区东北部)成矿温度、流体盐度均比Ⅴ矿带(矿区西南部)高,说明成矿流体很可能从矿区东北流向西南。

参考文献

- 1 王金瑛. 张家口地区铅-锌-银多金属矿成矿控制因素及找矿靶区的选择. 张家口地质, 1990, (16)
- 2 张长江. 河北蔡家营铅-锌-银矿区及其外围成矿地质特征和找矿方向的研究. 张家口地质, 1990, (17)
- 3 黄典豪, 等. 河北蔡家营铅锌银矿床矿物特征和金、银、铋赋存状态研究. 地质学报, 1991, (2)
- 4 Zhang Qian. Trace Elements in Galena and Sphalerite and Their Geochemical Significance in Distinguishing the Genetic Types of Pb-Zn Deposits. *Geochemistry*, 1987, 6(2)
- 5 葛朝华, 韩发著. 广东大宝山矿床喷气-沉积成因地质地球化学特征. 北京: 科学技术出版社, 1987, 56~68
- 6 中国科学院贵阳地化所包裹体实验室. 矿物中的包裹体及其在地质上的应用, 地质出版社, 1977
- 7 Ohmoto H and Rye R O. Isotopes of Sulfur and Carbon. *Geochemistry of Hydrothermal Deposits*(2nd edition) by Barnes H L. 1979, 509~567
- 8 叶庆桐. 赣东北铅锌矿床成矿系列和成矿机理. 北京: 科学技术出版社, 1987, 42~47
- 9 卢焕章. 包裹体地质压力计. 矿产地质动态, 1987, (2)

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS AND GENETIC STUDY OF THE CAIJIAYING Pb-Zn-Ag DEPOSIT, HEBEI

Pan Jiayong, Zhang Qian

(Institute of Geochemistry, Academia Sinica)

Rui Zongyao

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences)

Abstract

Through studies of ore mineral trace elements, fluid inclusions and stable isotopes, the Caijiaying Pb-Zn-Ag deposit is considered as mid-temperature hydrothermal deposit whose ore-forming material and hydrothermal solution are polygenetic. Lead, zinc and silver et al. ore-forming materials are supplied from the metamorphic rock (pt1). The source of sulfur in orebodies is estimated from a mix of igneous rock sulfur and sedimentary rock sulfur. The ore-forming fluid is mainly from magmatic hydrothermal water at early ore-forming stage, but meteoric water increases at late ore-forming stage. The ore-forming temperatures and the salinities of fluids drop from the early to the late and from north-eastern to south-western of the deposit.