

内蒙古白音诺铅锌矿床 地质特征及成矿作用

张德全 雷蕴芬

罗太阳 鲍修坡 王胜利

(中国地质科学院矿床地质研究所)

(内蒙古地矿局第三地质大队)

内容提要: 内蒙东部的白音诺铅锌矿, 是产于中生代火山断陷区的局部隆起环境中的锰钙矽卡岩型矿床, 矿体主要分布于下二叠统大理岩与中生代中酸性超浅成/浅成侵入体接触带的锰钙辉石矽卡岩中, 受层间破碎带控制, 矿化体呈似层状。主要的铅锌矿石形成于400—220℃、盐度2.5—15wt%NaCl当量、压力 $160 \times 10^5 - 600 \times 10^5 \text{Pa}$ 、酸性、还原环境。从早期的矽卡岩到晚期的硫化物-硫盐, 水热流体的温度、盐度、压力逐步降低, 矿液由偏碱性—弱酸性—酸性—弱碱性, 介质由氧化—还原, f_{O_2} 逐渐降低、 f_{S_2} 增高, 金属矿物按氧化物—硫化物—硫盐的序列依次析出成矿。水热流体具异常低 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征, 表明该矿床属中生代岩浆活化大气降水成矿的矽卡岩型铅锌矿床。

主题词: 铅锌矿床 锰钙矽卡岩 成矿作用 内蒙古白音诺

白音诺铅锌矿床是我国东部近年探明的大而富的铅锌矿床之一。该矿床位于大兴安岭南段的锡林浩特—乌兰浩特矿带中段, 中生代火山断陷区的局部隆起(拗中隆)环境中。

一、矿区地质概况

矿区呈北东向(N50—65°E)狭长条带状, 西部及南部为晚侏罗世陆相火山岩所围限(图1)。矿区地层主要是下二叠统黄岗梁组(P_1h), 在矿区有砂质板岩(含凝灰碎屑)、大理岩(或结晶灰岩)、泥质板岩三个岩性段(由下而上)。其中, 大理岩(或结晶灰岩)是交代形成含矿矽卡岩的主要岩石。早二叠世地层构成轴向NE, 向SW倾伏的背斜构造。目前所发现的铅锌工业矿体大多赋存于背斜两翼的层间滑脱带和褶曲顶部虚脱带(图2), 少数矿体见于次级断裂裂隙带中。

矿区内外, 燕山期中酸性火山岩、超浅成—浅成小侵入体及中深成侵入体, 在空间上密切相伴, 时间上有先后, 但时距不大, 构成很有特色的火山—侵入杂岩^[1]。与成矿关系密切的是超浅成—浅成相小侵入体(主要是花岗闪长斑岩和石英正长斑岩), 其深部可能沿中生代火山机构侵位, 从而隐伏于矿床SW部深部, 地表及浅部则为岩枝、岩墙及岩脉群(系), 并沿下二叠统黄岗梁组层间破碎带侵入。这些中酸性小岩体为铅锌成矿提供了热源和主要的物源。其中花岗闪长斑岩和矿区火山岩的铷—锶等时线年龄分别为171Ma和160Ma, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值分别为0.7065和0.7077(地科院地质研究所同位素室测定), 石英正长斑岩既侵入于花岗闪长斑岩, 也侵入于火山岩中。

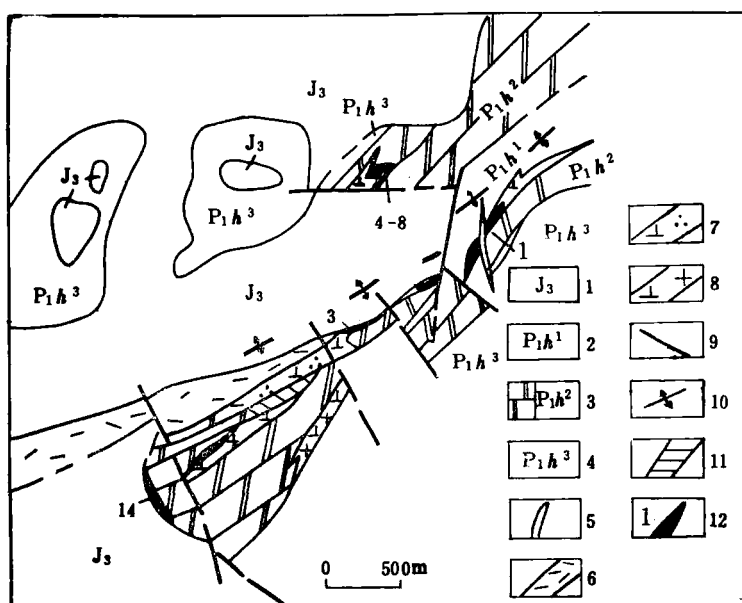


图 1 白音诺铅锌矿床地质略图

1—上侏罗统火山岩；2—4—下二叠统黄岗梁组：2—砂质板岩；3—大理岩；4—泥质板岩；5—石英斑岩；6—石英正长斑岩；7—石英闪长岩；8—花岗闪长斑岩；9—断裂；10—背斜轴；11—矽卡岩；12—矿体及编号

Fig. 1. Sketch geological map of the Baiyinnuo lead-zinc deposit.

1—Upper Jurassic volcanic rocks; 2—4—Lower Permian Huanggangliang Formation; 2—Sandy slate; 3—Marble; 4—Argillaceous slate; 5—Quartz porphyry; 6—Quartz syenite porphyry; 7—Quartz diorite; 8—Granodiorite porphyry; 9—Fault; 10—Anticlinal axis; 11—Skarn; 12—Orebody and its serial number.

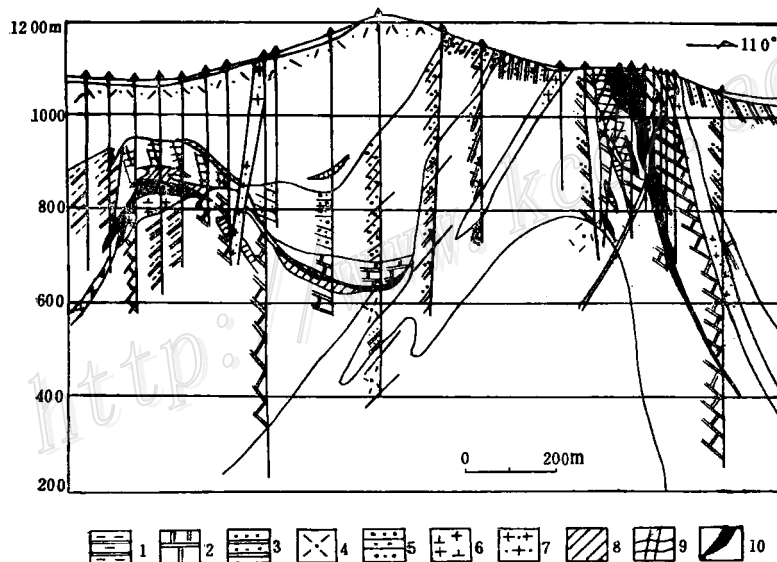


图 2 白音诺矿床79线地质剖面图

1—泥质板岩；2—大理岩；3—砂质板岩；4—流纹质凝灰熔岩；5—流纹质凝灰角砾岩；6—花岗闪长斑岩；7—石英斑岩；8—矽卡岩；9—角岩；10—铅锌矿体

Fig. 2. Geological section along No. 79 explorer line of the Baiyinnuo lead-zinc deposit.

1—Argillaceous slate; 2—Marble; 3—Sandy slate; 4—Rhyolitic tufflava; 5—Rhyolitic tuff breccia; 6—Granodiorite porphyry; 7—Quartz porphyry; 8—Skarn; 9—Hornfels; 10—Lead-zinc orebody.

二、矿床地质

1. 矿体

单个矿体常呈透镜状、鞍状、脉状，空间上多个矿体常组成和层面近于协调或斜交的似层状矿化体，产于层间破碎带中的矽卡岩内（图1、2）。以矿床中部NE向褶皱轴为界，将矿床分割为南北两个矿化带。北矿化带长1800m，主要由4—8号、11、12、15号等矿体组成（东段的矿体出露地表，西段的矿体隐伏于晚侏罗世火山岩之下）；南矿化带长约2800m，由南西往北东依次有14、铜锌、3、9、2、1号矿体。

矿床中主要矿体都分布于矽卡岩中。单个矿体呈NE向延长（走向一般 $N20-40^{\circ}E$ ），倾向南东或北西，倾角较陡（一般在 60° 上下）。矿体长100—450m不等，延深在250m左右，最大延深超过400m。矿体厚一般3—10m左右。空间上，矿体向SW侧伏，侧伏角 25° 左右。

2. 矽卡岩和矿石

区内矽卡岩常沿燕山期花岗闪长斑岩与下二叠统大理岩或结晶灰岩接触带分布，部分矽卡岩见于英正长斑岩与大理岩接触带，少量矽卡岩则分布于侏罗纪火山岩或二叠纪浅变质砂岩与大理岩接触带。由于中酸性小侵入体常顺地层层间贯入，因此矽卡岩亦呈较稳定的似层状体，沿层间破碎带，呈NE向带状展

布。矽卡岩在走向上比较稳定，厚数米至数十米不等。

内矽卡岩一般不发育，大部分为外矽卡岩。矽卡岩矿物主要为石榴石和单斜辉石，少量硅灰石、绿帘石、方柱石、符山石等。其退化蚀变矿物为石英、方解石、角闪石、黑柱石和绿泥石等。上述矿物常组成单矿物或复成分矽卡岩，常见的有：辉石矽卡岩、石榴石矽卡岩、石榴石辉石矽卡岩和辉石石榴石矽卡岩。局部地段因硅灰石富集，形成厚大的硅灰石矽卡岩，可作为陶瓷原料。在走向上，矿床西部（如14号矿体）以石榴石矽卡岩为主，矿床东部主要是辉石矽卡岩。从岩体到大理岩间，矽卡岩一般有下列交代分带（图3）：内矽卡岩（图3中的⑦—⑧）→辉石石榴石矽卡岩→石榴石辉石矽卡岩→辉石矽卡岩（含退化蚀变矿物）→大理岩。如表1所列，由内矽卡岩至大理岩， SiO_2 、 Al_2O_3 总体上有降低趋势，而 CaO 、 $(Fe_2O_3 + FeO)$ 、 MgO 、 MnO 则趋向于增高。尤其是 MnO ，主要富集于近大理岩的辉石矽卡岩中（辉石主要是锰钙铁辉石）。这反映了矽卡岩兼有接触双交代和渗透交代特点。铅锌工业矿体主要见于辉石矽卡岩中。

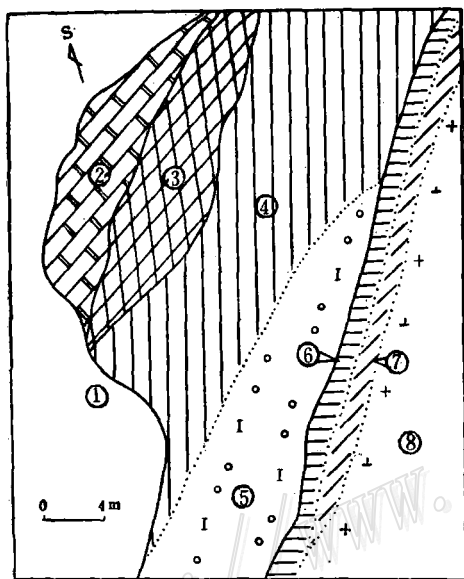


图3 4—8号矿体露采场矽卡岩分带平面图

①—浮土及碎石；②—大理岩；③—石英方解石辉石交代岩（富矿： $Pb + Zn > 10\%$ ）；④—石榴石辉石矽卡岩（贫矿： $Pb + Zn 2-5\%$ ）；⑤—辉石石榴石矽卡岩；⑥—绿帘石辉石矽卡岩；⑦—斜长石绿帘石矽卡岩；⑧—花岗闪长斑岩

Fig. 3. Plan showing skarn zonation in the open pit of the No. 4-8 ore body.

①—Regolite and debris; ②—Marble; ③—Quartz-calcite-pyroxene metasomatite (high grade ore: $Pb + Zn > 10\%$); ④—Garnet pyroxene skarn (low grade ore: $Pb + Zn 2-5\%$); ⑤—Pyroxene-garnet skarn; ⑥—Epidote pyroxene skarn; ⑦—Plagioclase epidote skarn; ⑧—Granodiorite porphyry.

表 1 矽卡岩平均化学成分 (wt%)

Table 1. Average composition of skarn (in percentage)

序 号	1	2	3	4	5	6	7
样数 (个)	1	3	1	2	1	1	1
岩 石 名 称	大 理 岩	锰钙铁辉 石矽卡岩	石榴石辉 石矽卡岩	辉石石榴 石矽卡岩	绿帘石辉 石矽卡岩	退色花岗 闪长斑岩	花岗闪长 斑 岩
SiO ₂	2.17	46.68	41.54	41.27	71.24	68.04	68.65
TiO ₂	0.03	0.07	1.14	0.13	0.33	0.29	0.60
Al ₂ O ₃	1.62	1.79	12.71	3.71	9.86	15.88	14.31
Fe ₂ O ₃	0.15	2.10	2.20	16.83	4.31	1.81	1.08
FeO	0.08	15.75	3.33	0.40	0.48	1.39	1.24
MgO	1.01	3.41	3.50	2.59	0.31	1.20	1.18
MnO	0.01	3.55	1.59	1.21	0.34	0.95	0.12
CaO	53.40	20.81	31.21	30.72	9.06	3.25	4.84
K ₂ O	0.14	0.19	0.021	0.09	0.066	1.65	4.47
Na ₂ O	0.14	0.36	0.047	0.06	0.017	6.05	2.89
P ₂ O ₅	0.05	0.09		0.10		0.14	0.14
CO ₂		0.56	0.65	2.86	0.14		0.03
H ₂ O ⁺		0.35	0.28	0.07	0.36		0.77
H ₂ O ⁻		0.30	0.20	0.07	0.27		0.19
F		0.02	0.43	0.07	0.021		
Cl		0.01	0.060	0.016	0.002		
S		1.26	0.057		0.025		
Pb		1.47	0.31		0.03		
Zn		1.06	0.02		1.45		
烧失量	41.49						
总 计	100.29	99.83	99.30	100.20	98.31	99.75	100.51

测试单位: 地矿部岩矿测试技术研究所

白音诺矿床矽卡岩中的辉石有透辉石、次透辉石、钙铁辉石和锰钙铁辉石, 其组分为: $\text{Di}_{96.7-1.8}\text{Bol}_{0.9-83.9}\text{Jo}_{1.3-56.8}$ 。透辉石和次透辉石形成较早, 钙铁辉石和锰钙铁辉石 (有些为锰钙辉石) 则晚于透辉石和次透辉石, 尤其是锰钙辉石, 形成最晚。石榴石则为钙铁榴石、钙铝榴石及二者间的过渡种属, 锰铝榴石及铁铝榴石 (Ald) 含量不高, 其组分为 $\text{Andr}_{93.2}\text{GrO}_{0.9-82.6}(\text{Mgn} + \text{Ald})_{1.0-27.2}$ 。在整个矿床中, 矽卡岩和矿化有极明显的分带现象 (关于这个问题, 我们将另文讨论), 矿区西南部 (如14号矿体), 矽卡岩中辉石以透辉石 (Di) 和次透辉石为主, 钙铝榴石 (Gro) 含量大于钙铁榴石 (Andr); 往矿区东北部, 辉石的钙铁辉石 (Bol) 和锰钙辉石 (Jo) 端员含量逐渐增高, 石榴石中钙铁榴石和锰铝榴石 (Mgn) 增多。有意义的是, 辉石和石榴石的 MnO 含量与其产出地段 Pb + Zn 的含量呈正消长关系, 其中尤其是辉石。透辉石和次透辉石一般粒度很细, 浅绿色, 含 MnO 较高的钙铁辉石或锰钙辉石墨绿色, 粒度较前者粗些, 矿区地质人员形象地称前者为“无矿辉石”, 后者为“含矿辉石”。据测试统计, “含矿辉石”的 Jo 一般大于 13.4% (即 $\text{MnO} \geq 3\%$)。与铅锌矿相伴的石榴石形成较晚, 锰铝榴石端员一般大于 3.5% (即 MnO 一般大于 0.8% 左右), 钙铁榴石端员含量一般 $\leq 50\%$ 。

上述矽卡岩的成分和矿物组成在空间上的变化, 从一个侧面反映矿区从西南往东北, 从岩体往大理岩, 蚀变水热流体中 MgO 化学位逐渐降低和 FeO、MnO 化学位逐渐增高的演化趋势。铅锌金属硫化物的析出, 主要与较富 MnO 化学位流体的交代过程相联系。这个事实, 符合矽卡岩的流体演化序列^[9], 与 Burton

和Gamble等人的实验结果也相吻合^[6,7]。

按主要金属组分及其矿物组成, 矿石类型分为: 铅锌矿石、锌矿石、铅矿石、铜锌矿石、含锡闪锌矿磁黄铁矿矿石和含铜磁铁矿矿石。其中, 铅锌矿石、锌矿石和铅矿石是工业矿体的主要矿石类型。矿石结构有结晶结构(自形一半自形—他形粒状结构)、交代结构(包括骸晶结构、镶边结构、假象结构等)和固溶体分解结构。矿石主要为浸染状和细脉浸染状构造, 其次有脉状构造、斑杂状构造、角砾状构造和块状构造。矿区中, 铅锌矿石、锌矿石和铅矿石主要见之于矿区东北部的4—8、1、2、3号等矿体中, 在垂向上, 锌矿石主要分布于矿体下部, 铅矿石和铅锌矿石主要分布于矿体上部, 因而Zn/Pb值由浅至深有逐渐增高的趋势。铜锌矿石、含锡闪锌矿磁黄铁矿矿石及含铜磁铁矿矿石则见之于矿区西南部和西部。

3. 金属矿物组合及成矿阶段

主要金属矿物有闪锌矿、方铅矿、磁黄铁矿、黄铜矿, 其次有黄铁矿、毒砂、磁铁矿, 另有少量及微量的黝铜矿、斑铜矿、辉银矿、浓红银矿、硫铁锡铜矿、自然铋、硫铋银铅矿、含银硫铋铅矿、哈硫铋铅铜矿、锌砷黝铜矿、自然银、含银黄铁矿、银金矿、银铋金矿、卡辉铅铋矿、斜方辉铅铋矿、红砷镍矿等。

方铅矿和闪锌矿的世代及主要共生组合见表2。从早世代的方铅矿到晚世代的方铅矿, 不但粒度、形态等有明显变化, 而且其Pb/S、Bi/(Bi + Ag + Sb)及Sb/(Bi + Ag + Sb)值呈规律性变化。而早世代的闪锌矿到晚世代的闪锌矿, 不但其颜色和透光性等有差别, 且Fe、Cu含量及Ga/In值亦呈规律性变化。这暗示铅锌成矿过程是一个降温过程。

表2 方铅矿和闪锌矿特征

Table 2. Characteristics of galena and sphalerite

矿物	世代	特征	主要共生组合
方铅矿	I	细粒(0.04—0.3mm), 他形粒状, 解理不发育, 反光镜下三角空洞不明显。常呈浸染状沿锰钙铁辉石解理、裂隙分布。Pb/S 6.28, Bi/(Bi + Ag + Sb) 0.862, Sb/(Bi + Ag + Sb) 0.022	Gn _I + Sph _I ± Cp
	II	中—细粒(0.1—0.5mm), 他形一半自形粒状, 立方解理较发育, 但三角空洞较少见。细脉浸染状集合体。Pb/S 6.44, (Bi/Bi + Ag + Sb) 0.278, Sb/(Bi + Ag + Sb) 0.230	Gn _{II} + Sph _{II} ± Cp Gn _{II} + Sph _{III}
	III	较粗(2—6mm), 半自形—自形晶, 多呈立方体, 三角空洞发育。常呈脉状或团块状集合体。Pb/S 6.38, Bi/(Bi + Ag + Sb) 0.032, Sb/(Bi + Ag + Sb) 0.254	Gn _{III} ± Py Gn _{III} ± 硫盐
闪锌矿	I	黑红—暗红色, 透光性微弱, 内反射暗褐, 黄铜矿乳滴较多。 Zn/Fe 8.4, Fe 6.95%, Cu 6429ppm, Ga/In 0.457	Sph _I + Gn _I ± Cp
	II	红—红褐色, 透光性较弱, 内反射暗红褐, 基本不含黄铜矿乳滴。 Zn/Fe 12.21, Fe 5.020%, Cu 31ppm, Ga/In < 0.082	Sph _{II} + Gn _{II} ± Cp Sph _{II} + Gn _{II} + Cp + Pyr + Ars
	III	褐色—棕色, 透光性一般, 内反射褐—棕, 无黄铜矿乳滴。 Zn/Fe 16.1, Fe 3.49%, Cu 766ppm, Ga/In 0.044	Sph _{III} + Gn _{III}
	IV	浅黄—浅绿色, 半透明—透明, 内反射浅棕, 无黄铜矿乳滴。 Zn/Fe 21.9, Fe 2.58%, Cu 460ppm, Ga/In 0.011	Sph _{IV} + 硫盐

注: 矿物代号: Gn—方铅矿, Sph—闪锌矿, Cp—黄铜矿, Py—黄铁矿, Pyr—磁黄铁矿, Ars—毒砂

根据野外和显微镜下观测, 矿床成矿过程大体上分为两期。早期为与花岗闪长斑岩有关、分布于花岗闪长斑岩和大理岩接触带砂卡岩中的铅锌矿, 晚期成矿主要是与石英正长斑岩有关, 分布于它和大理岩接

表 3 成矿阶段及矿物生成顺序

Table 3. Mineralization stages and mineral sequence

阶段 亚阶段 温度 (°C) 矿物	砂卡岩	石英-硫化物			硫化物 -硫盐
		方铅矿- 闪锌矿	闪锌矿-方 铅矿-黄铜矿	闪锌矿- 方铅矿	
	600-340	400-320	340-260	260-220	220-160
钙铝榴石	—				
钙铁榴石	—				
次透辉石	—				
钙铁辉石	—				
锰钙铁辉石	—				
硅灰石-锰硅灰石	—				
黄铁矿	—				—
磁铁矿	—				
毒砂	—				
黑柱石	—				
绿帘石	—				
石英	—	—	—	—	—
中细粒方铅矿	—	—	—	—	—
深色闪锌矿	—	—	—	—	—
磁黄铁矿	—	—	—	—	—
黄铜矿	—	—	—	—	—
硫铁锡铜矿	—	—	—	—	—
红色-浅色闪锌矿	—	—	—	—	—
中粗粒方铅矿	—	—	—	—	—
方解石	—	—	—	—	—
辉银矿	—	—	—	—	—
绿泥石	—	—	—	—	—
自然铋	—	—	—	—	—
铅铋硫酸盐类	—	—	—	—	—
铅铋硫酸盐类	—	—	—	—	—

触带的砂卡岩中。上述每期成矿作用又大致有三个不同的成矿阶段（表3）：

（1）砂卡岩阶段 偏碱性的岩浆期后水热流体，流经化学性质截然不同的岩石，交代形成一系列砂卡岩。该阶段主要由钙铝-钙铁榴石和透辉石-次透辉石-钙铁辉石-锰钙辉石构成不同的矿物组合。据薄片观测，钙铝榴石早于钙铁榴石，辉石大致依透辉石（次透辉石）—钙铁辉石—锰钙辉石的顺序先后晶出。这反映在砂卡岩化过程中，随酸度增高和氧逸度降低，溶液内 $MgO-FeO-MnO$ 化学位梯度依次增高。这种成分变化与辉石稳定关系的实验研究结果相吻合^{〔4〕}。在砂卡岩阶段晚期，伴随锰钙铁辉石有较多的深色（黑红色为主）闪锌矿析出。这是矿床中铅锌的初始成矿阶段。

（2）石英-硫化物阶段 是铅锌的主要成矿阶段。据矿物先后顺序，分成三个亚阶段：

a.方铅矿-闪锌矿亚阶段。由早世代的方铅矿、闪锌矿及少量黄铜矿组成（即 $GnI + SphI \pm Cp$ ）浸染状集合体。常见于14、3和铜锌矿体。另外，尚有 $Cp + Pyr$ 组合，主要见于铜锌矿体和14号矿体。

b.闪锌矿-方铅矿-黄铜矿亚阶段。以闪锌矿为主（ $SphII$ ），方铅矿（ $GnII$ ）和黄铜矿其次。它们常叠加于 $GnI + SphI$ 之上。主要见于1、2、3、4—8号矿体。

c.方铅矿-闪锌矿亚阶段。常以脉状穿插早期矿物集合体中。

（3）硫化物-硫盐阶段 铅锌矿化微弱，是银的主要成矿阶段。脉石矿物主要是方解石和石英。金属矿物含量低，但种属多。硫盐矿物主要有含铋硫盐和含锑硫盐两个系列，前者常出现在矿区西南部，后者主要见之于东北部。

4. 主要金属的分布、富集和银的赋存状态

Pb、Zn是矿床的主要工业元素, Cu、Ag、Sn为次要或伴生元素。矿床中Zn/Pb约为2.7(金属量)。从矿区西南往东北, 金属组分依次为Fe(Cu)→Zn(Sn)→Cu、Zn→Zn(Pb)→Pb、Zn(Ag)。从目前已探明的工业矿体来看, Zn主要在矿区中东部, 东北部有富集Pb和Ag的趋势。即使在一个矿体中, 或是在同一剖面上, Pb、Zn、Ag也各自分段富集。如13线的3号矿体、39线的2号矿体、79线的1号矿体和119线的4—8号矿体等, 剖面上均出现深部富集Zn、上部富集Pb和Ag的现象。又如58/79钻孔, 矿体中Pb/Zn值较小, 围岩中Pb/Zn值相对较高, 因而矿体两侧围岩Zn含量的衰减速率远比Pb大。上述现象反映, 成矿过程中, 受矿液流向制约, Pb、Zn表现出不同的地球化学行为。

矿床中的特定地段, Pb、Zn、Ag相关较好。如79线1号矿体中, γ_{Pb-Zn} (Pb-Zn的相关系数, 下同) $=0.82$, $\gamma_{Zn-Ag}=0.69$, $\gamma_{Pb-Ag}=0.92$ 。但整个矿床中Pb、Zn、Ag是不相关的, 其中(800多件样品计算结果), $\gamma_{Pb-Zn}=-0.04$, $\gamma_{Pb-Ag}=-0.12$, $\gamma_{Zn-Ag}=-0.08$ 。上述Pb、Zn、Ag的局部相关和整体不相关的现象说明, 总体上矿床中Pb、Zn、Ag有各自的富集部位; 但局部地段因Ag、Pb、Zn相互叠加, 三元素同时富集, 而且Ag的富集与Pb的关系更密切。

矿区勘查中大量样品分析表明, 在各矿体中Ag的含量平均仅十几至数十克/吨。矿区东北端的4—8号矿体含Ag最好, 其单样含Ag最高可达数百至1000g/t, 平均Ag 59g/t。银主要赋存于方铅矿中(Ag的分配比在方铅矿中占87.63—90.94%, 在闪锌矿中占10.95—5.91%), 原生矿石中以类质同象形式存在的Ag占48.64—50.94%(据内蒙地质实验室数据)⁽²⁾。方铅矿中含Ag 13—860g/t, 平均233g/t(13件样品, 地矿部岩矿测试技术研究所, 石墨炉无火焰原子吸收法分析)。在含Ag较高的方铅矿中常见独立的银矿物。矿床中银矿物有辉银矿、浓红银矿、辉铋银铅矿、含银硫铋铅矿、自然银、含银黄铁矿、银金矿、银铋金矿、硫铋银矿、硫铋铜银矿等, 它们多数常嵌布于方铅矿中, 有部分见于闪锌矿、黄铜矿、黄铁矿及石英中。因此, 含Ag较高的铅锌矿石, 其Ag主要呈独立矿物赋存于方铅矿中。

三、成矿作用

1. 温度、压力、盐度

两个不同成矿期各矿化阶段所形成的矿物, 如石英、方解石、闪锌矿、辉石和石榴石(按流体包裹体的发育程度由大到小的顺序)中, 均有流体包裹体。用法国产Chauxmeca显微冷热台, 对这些包裹体分别同时观测了共结温度、冰点和均一温度或盐晶熔化温度, 并据不同的体系相图, 分别求出了蚀变-成矿流体的温度(未作压力校正)、盐度、圈闭压力(图4)。对于成矿温度, 还采取其它方法分别进行了估算(表4)。最后, 根据对比, 基本采用均一法温度结果。

矽卡岩矿化阶段温度区间较宽(600—340℃), 圈闭压力为 200×10^5 — 700×10^5 Pa(平均 480×10^5 Pa)。其中, 早期矽卡岩(指石榴石和次透辉石、钙铁辉石)为600—480℃, 盐度45—47.5wt%NaCl当量, 晚期矽卡岩(主要是锰钙辉石)为460—340℃, 盐度15—42.5wt%NaCl当量。石英-硫化物阶段温度400—220℃, 盐度2.5—15wt%NaCl当量, 圈闭压力 160×10^5 — 600×10^5 Pa。硫化物-硫酸盐阶段温度为220—160℃, 盐度为2.5—5wt%NaCl当量, 压力为 150×10^5 — 480×10^5 Pa。显示出随时间推移, 成矿温度、盐度和压力递减的变化趋势。

在矿区的富矿包附近(如4—8号、3号矿体局部地段)发现有沸腾包裹体。这些沸腾包裹体的均一温度在300—360℃左右, 盐度变化大(5—40wt%NaCl当量), 圈闭压力为 40×10^5 — 300×10^5 Pa。这表明石英-硫化物阶段, 因减压引起流体沸腾, 分离出富Pb、Zn的高盐度流体。

2. 流体的pH、 f_{O_2} 、 f_{S_2}

根据矿床中不同矿化阶段的锰钙铁辉石、闪锌矿、石英等单矿物的包裹体成分分析结果, 采用李秉伦方法和Crerar方法⁽³⁾, 计算了蚀变-成矿流体的 f_{O_2} 、pH、Eh。结果是晚期矽卡岩阶段pH=5.1, f_{O_2} =

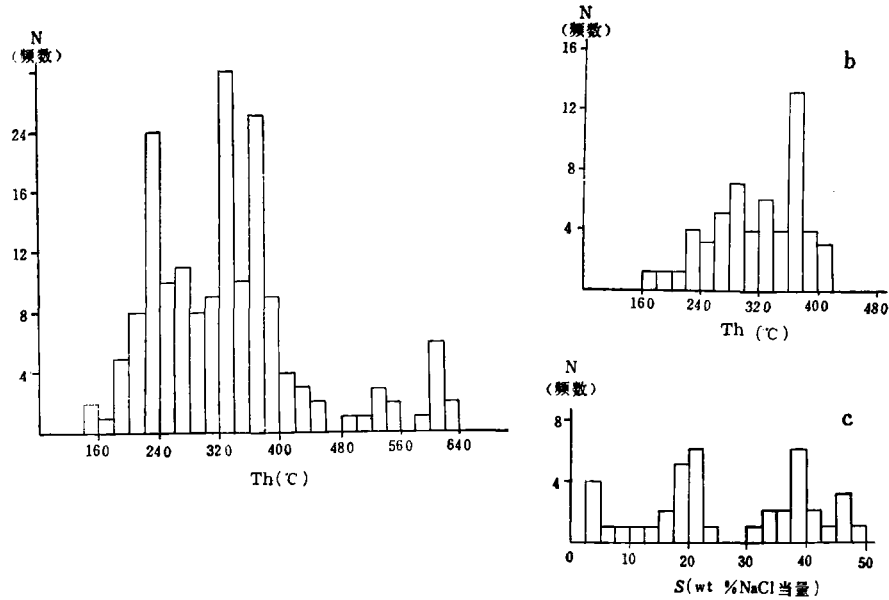


图 4 流体包裹体均一温度及盐度直方图

a. 石英、方解石、闪锌矿、辉石、石榴石的均一温度；b. 闪锌矿均一温度；c. 盐度

Fig. 4. Histogram showing homogenization temperature and salinity of the fluid inclusions.

a-Homogenization temperature of fluid inclusions in quartz, calcite, sphalerite, pyroxene and garnet;

b-Homogenization temperature of fluid inclusions in sphalerite; c-Salinity.

表 4 不同方法测温结果的比较

Table 4. Comparison of temperatures measured by different methods

阶段	亚阶段	温 度 (°C)				
		均一法	爆裂法	氧同位素法	硫同位素法	微量元素法
砂卡岩	早	600—480	417	617 (Gr-Mt)		
	晚	460—340	350	384(Gr-Mt) 383(Qz-Mp)	427, 512 (Sph-Gn)	403 (Sph-Gn/Mn)
石英、硫化物	早 方铅矿-闪锌矿	400—320	318—229		306, 356 (Sph-Gn)	357, 349 (Sph-Gn/Cd)
	中 闪锌矿-方铅矿-黄铜矿	340—260	290—190		234, 255 (Sph-Gn)	203 (Sph-Gn/Cd)
	晚 闪锌矿-方铅矿	260—220	230—122		198, 215 (Sph-Gn)	
硫化物-硫盐		220—160		235 (Qz-Cal)		

注: Gr—石榴石, Mt—磁铁矿, Qz—石英, Mp—单斜辉石, Cal—方解石, Sph—闪锌矿, Gn—方铅矿

10^{-22} Pa; 石英-硫化物阶段 $\text{pH} = 4.6 - 3.8$, $\text{Eh} = -0.4 - -0.6\text{eV}$, $f_{\text{O}_2} = 10^{-22} - 10^{-27}\text{Pa}$ 。与水的中性线比较 (250°C , $\text{pH} = 5.6$; 300°C , $\text{pH} = 5.65$; 350°C , $\text{pH} = 5.84$), 晚期矽卡岩溶液弱酸性 (推测早期矽卡岩阶段溶液偏碱性), 主要的铅锌矿化阶段溶液呈酸性、还原性质, 硫化物-硫盐阶段溶液弱碱性 (虽无数据, 但较多的碳酸盐矿物的出现, 可以证明此种推测)。

矿床中毒砂、磁黄铁矿、黄铁矿的组合, 使我们有可能运用 Fe-S-As 体系的实验结果, 利用上述金属成分分析数据, 来估计 f_{S_2} (Kretschman and Scott, 1976)。其结果是: 早期硫化物 $\lg f_{\text{S}_2} = -12$ ($f_{\text{S}_2} = 10^{-12}\text{Pa}$), 晚期硫化物 $\lg f_{\text{S}_2} = -10$ ($f_{\text{S}_2} = 10^{-10}\text{Pa}$), 反映石英-硫化物阶段由早至晚, 硫逸度是增高的。

图 5 是蚀变-成矿流体的温度-盐度-密度演化图解。它反映流体有两种主要的演化方式。其一是稀释

—冷却, 即由深部岩浆分凝的水热流体, 上升过程中不断与大气降水对流循环, 使高温、高盐度、高密度的岩浆期后流体渐趋冷却、稀释为低盐度、低温的低密度流体。其二是沸腾, 即在石英-硫化物阶段, 流体减压沸腾, 产生不混溶流体, 分凝出富金属离子的高盐度相成矿流体。

因此, 在蚀变-成矿过程中, 上升的流体的温度和压力降低, 体系的 f_{O_2} 逐渐减小, f_{S_2} 逐渐增高, 盐度急剧变化, 溶液由偏碱性→弱酸性→酸性→弱碱性, 并由氧化→还原环境。在这个过程中, 金属矿物大致按氧化物→硫化物→硫盐的顺序, 依次析出成矿。

3. 物质来源

(1) 40 件方铅矿和闪锌矿等的硫同位素分析, 方铅矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $0.4 - 5.4\%$, 闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 为 $0.26 - 4\%$, 其变化范围较窄, 具塔式分布, 表明硫源单一。

据方铅矿、闪锌矿成矿溶液的 pH 、 f_{O_2} 、 f_{S_2} 、

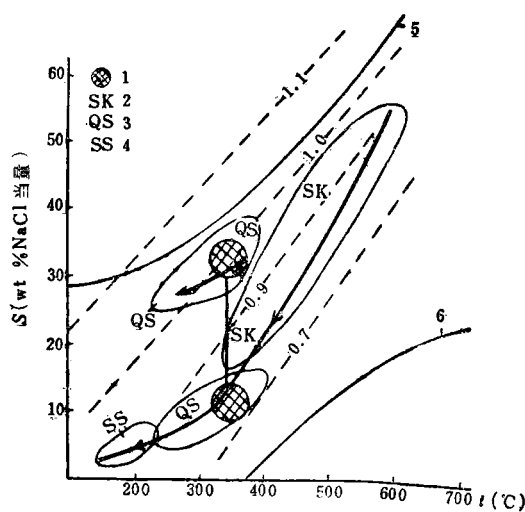


图 5 流体的温度-盐度-密度演化

1—流体沸腾; 2—矽卡岩; 3—石英-硫化物; 4—硫化物-硫盐;
5—NaCl 饱和曲线; 6—NaCl-H₂O 体系临界曲线

Fig. 5. Temperature-salinity-density evolution of the fluids.

1—Fluid boiling; 2—Skarn; 3—Quartz sulfide; 4—Sulfide-sulfate;
5—NaCl saturation curve; 6—NaCl-H₂O critical curve.

度, 推测体系 $\delta^{34}\text{S}_{\text{SS}}$ 应在 0% 左右 (据 H. Ohmoto, 1972), 具深源硫特点。

(2) 矽卡岩及矿石中的含氧矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 大多为负值 (表 5)。矿体围岩大理岩 $\delta^{18}\text{O}$ 为 15.34% , 与二叠纪海相灰岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 相差不大, 属正常范围。大多数矿物对的氧同位素计温结果, 与流体包裹体均一温度吻合 (表 4), 暗示这些矿物是平衡的矿物对。据矿物-水氧同位素分馏方程计算的流体中水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (表 5 中 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$) 是: 石榴石和磁铁矿 (早期矽卡岩) 流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-2.49 - -8.5\%$, 钙铁辉石和锰钙辉石 (晚期矽卡岩) 为 $-7.74 - -11.86\%$, 石英-硫化物阶段 (石英) 流体的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 为 $-10.93 - -12.17\%$, 硫化物-硫盐阶段 (方解石) 为 -17.9% 。这些数据说明蚀变-成矿流体异常低 $\delta^{18}\text{O}$ 。

与成矿有关的花岗闪长斑岩和石英正长斑岩全岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -1.6% 和 -4.3% 。与铅锌多金属成矿有关的花岗岩类小岩体异常低 $\delta^{18}\text{O}$, 这是大兴安岭南段燕山期小岩体的共同特点。对此, 我们在七五国家重点攻关项目的子课题 (赤峰市北部 (白音诺) 地区锡、铅、锌多金属矿成矿条件及隐伏矿床预测) 研究中, 作过较多的工作。研究认为, 这是由于岩浆晚期强烈的去气化作用和岩浆期后水-岩交换的结果。异常低 $\delta^{18}\text{O}$ 的花岗岩类岩浆, 演化出异常低 $\delta^{18}\text{O}$ 的水热流体, 即交代形成矽卡岩的流体相是在岩体与大气降水已发生过水-岩交换之后, 又有较多的大气降水渗入后形成的。铅锌矿化时, 流体的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 $-11.17 - -13.75\%$ 。

表 5 氧同位素分析结果 (SMOW)

Table 5. Oxygen isotopic analyses

序 号	采 样 位 置	矿物/岩石	$\delta^{18}\text{O}$ (样品) (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ (计算) (‰)
1	矿区最西端含铜磁铁矿体	石榴石	-9.56	-8.5
2	矿区最西端含铜磁铁矿体	磁铁矿	-15.06	-7.96
3	ZK58/79, 11号矿体	石榴石	-9.65	-8.47
4	ZK162/355, 14号矿体	石榴石	3.70	5.96
5	ZK61/79	石榴石	-4.26	-2.49
6	ZK62/79	石榴石	-7.31	-5.54
7	ZK206/14号矿体	磁铁矿	0.32	5.88
8	4-8号矿体, 露采场	钙铁-锰钙辉石	-7.70	-8.80
9	4-8号矿体, 露采场	钙铁-锰钙辉石	-6.00	-7.74
10	4-8号矿体, 露采场	钙铁-锰钙辉石	-12.46	-11.86
11	9号矿体	钙铁-锰钙辉石	-9.46	
12	1号矿体, QJ356	石 英	-4.87	-10.03
13	ZK6/水, 1号矿体	石 英	-5.93	-12.17
14	4-8号矿体, 露采场	石 英	-6.08	-11.17
15	4-8号矿体, 露采场	石 英	-2.78	-11.96
16	4-8号矿体, 露采场	石 英	-3.17	-11.49
17	4-8号矿体, 露采场	方解石	-7.28	
18	1号矿体, ZK6/水	方解石	-9.02	-17.90
19	钻孔中花岗闪长斑岩	全 岩	-1.6	
20	钻孔中石英正长斑岩	全 岩	-4.3	
21	矿区地表大理岩	全 岩	15.34	

注: 其中20、19、18、17、13、12、7号样品为矿床地质研究所七室分析, 其余样品为牟保磊副教授提供 (由北京大学地质系同位素室分析)

接近区域中生代雨水值。闪锌矿包体水的 δD 值 (1号矿体闪锌矿 $\delta\text{D} = -118\text{‰}$, 3号矿体闪锌矿 $\delta\text{D} = -120\text{‰}$), 亦与区域中生代雨水的 δD 值接近^[42]。据Taylor (1979)提供的水/岩(W/R)计算公式, 估算的W/R为: 早期矽卡岩 0.33—0.5; 晚期矽卡岩 0.46—0.74; 石英-硫化物 0.74—2.83。从矿化早期到晚期, 流体的水/岩值从0.33增大到2.83, 预示成矿过程中大气降水不断向流体中渗入, 主成矿阶段流体中的水主要是花岗岩类岩体加热的大气降水。

4—8号矿体中方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 -7.31‰ (PDB标准, 以下同), 大理岩全岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 0.21‰ , 表明热液中的碳主要来自深部岩浆。

(3) 矿石铅同位素组成变化不太大, 其16件样品的铅同位素数据, 分成斜率不同的两组 (图6)。第1组由3件样品构成, 第2组样品为13件。据Doe和Zartman提供的参数, 计算了假定为单阶段演化的 μ 值和模式年龄。第1组样品 μ 值为9.8—9.9, 模式年龄230—280Ma, 第2组样品 μ 值9.24—9.50, 模式年龄129—190Ma。这暗示着矿床中大部分的铅金属来自中生代岩浆, 少量铅是从区域二叠纪地槽沉积物中淋滤而来的。

四、结 论

白音诺铅锌矿床是一个主要与中生代中酸性超浅成/浅成侵入体有关的矽卡岩型矿床。其矿床地质特征及成矿机理可概括如下:

1. 资料表明, 白音诺铅锌矿床属燕山期成矿。矿区内外演化完善的火山-超浅成/浅成侵入体-深成侵

入体,是一套火山-侵入杂岩,成矿主要与其中的超浅成/浅成小侵入体有关。

2. 矿区内除出露晚侏罗世火山岩外,主要出露下二叠统黄岗梁组海相火山喷发沉积岩及大理岩黄。岗梁组地层构成轴向NE、向SW倾伏的背斜。背斜翼部的层间断裂及顶部虚脱带是最主要的容矿构造。黄岗梁组大理岩含较高的活动性化学组分,是成矿的地球化学障,其顶、底的泥质板岩和砂质板岩,为成

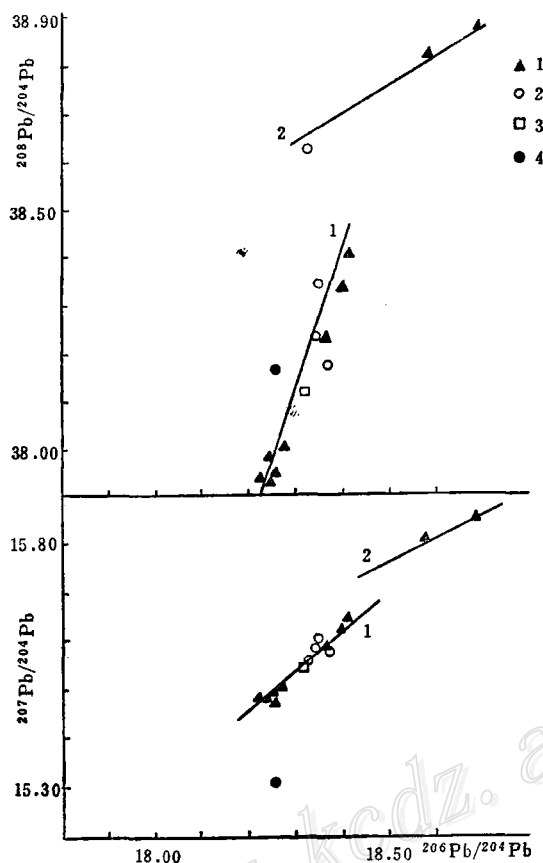


图 6 矿石铅同位素组成

1—方铅矿; 2—闪锌矿; 3—磁黄铁矿; 4—磁铁矿

Fig. 6. Lead isotope composition of ores.

1—Galena; 2—Sphalerite; 3—Pyrrhotite; 4—Magnetite.

矿提供了很好的物理障。

3. 矽卡岩及其退化蚀变是与成矿关系最密切的交代蚀变。矽卡岩沿中酸性超浅成/浅成侵入脉岩系与大理岩或灰岩接触带,呈似层状产出。铅锌矿体主要赋存在锰钙辉石矽卡岩中。因此,矽卡岩中辉石的MnO较高含量,是很好的找矿评价标志。

4. 矿体呈脉状、透镜状,走向上断续相连,构成似层状矽卡岩矿化带。

5. 成矿过程分为两期(花岗闪长斑岩、石英正长斑岩),每期大致有矽卡岩、石英-硫化物、硫化物-硫盐三个阶段。其中,石英-硫化物是铅锌的主要成矿阶段,硫化物-硫盐是银的主要成矿阶段。闪锌矿、方铅矿是最常见的金属矿物。银多赋存在方铅矿中,部分银呈独立银矿物,从而造成局部出现工业银矿石。

6. 主要的铅锌矿石形成于400—220℃、盐度2.5—15wt%NaCl当量、压力 160×10^5 — 600×10^5 Pa、酸

性、还原环境下。从成矿早期阶段到晚期阶段,体系的温度、盐度、压力逐渐降低,矿液由偏碱性向酸性、再向偏碱性演化,介质由氧化向还原环境转变, f_{O_2} 逐渐降低、 f_{S_2} 逐渐增高,金属矿物按氧化物-硫化物-硫盐的次序,依次析出成矿。在石英-硫化物阶段,由于构造系统由封闭转为开放,压力释放造成局部地段矿液沸腾,导致富矿地段的出现。

7. 晚侏罗世岩浆活动为成矿提供了热源,成矿金属组分主要是岩浆从深部携带而来,硫亦来自深部岩浆,二叠纪地层提供部分金属。矿液中的水主要是中生代大气降水。因此,白音诺矿床是中生代岩浆活化大气降水成矿的矽卡岩型矿床。

本文是集体劳动的成果,除署名者外,还有许多同志参加过部分工作。文中的地质特征部分主要是在内蒙地矿局第三地质大队勘查资料基础上,进一步工作写成的。野外工作期间,得到该队的大力支持。徐志刚副研究员对文稿提出许多宝贵意见。特致谢忱。

参 考 文 献

- [1] 张德全、鲍修坡 1990 内蒙古白音诺中酸性火山-深成杂岩体的岩石学、地球化学与成因研究 地质论评 第16卷 第4期 289—297页
- [2] 李九玲、李树岩 1990 内蒙白音诺等矿床中方铅矿中银的赋存形式及其与伴生元素锑、铋的关系 岩石矿物学杂志 第4期 365—370页
- [3] 卢焕章、李秉伦等 1990 包裹体地球化学 地质出版社 151—155页
- [4] 张理刚 1989 成岩成矿理论与找矿——中国主要类型矿床及花岗岩类岩石的稳定同位素地质学 北京工业大学出版社 115页
- [5] Burt, D. M., 1977, Mineralogy and petrology of skarn deposits. Soc. Italian Mineralogia Petrologia Rendiconti, Vol.33, p.895—873.
- [6] Gamble, R. P., 1982, An experimental study of sulfidation reactions involving andradite and hedenbergite. Econ. Geol., Vol.77, p.784—797.
- [7] Burton, J. C., Taylor, L. A. and Chou, I-M., 1982, The f_{O_2} -T and f_{S_2} -T stability relations of hedenbergite and hedenbergite-johannsenite solid solutions. Econ. Geol., Vol.77, p.764—783.

GEOLOGICAL CHARACTERISTICS AND METALLOGENY OF THE BAIYINNUO LEAD-ZINC DEPOSIT, INNER MONGOLIA

Zhang Dequan and Lei Yunfen

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

Luo Taiyang, Bao Xiupo and Wang Shengli

(No.3 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner
Mongolia, Chifeng, Inner Mongolia)

Abstract

The Baiyinnuo lead-zinc deposit of eastern Inner Mongolia is a calcio-manganoan skarn type deposit existing in a partially uplifted environment of

the Mesozoic volcanic fault depression. Veinlike and lenticular orebodies occur in skarn assuming rather stable stratoid bodies along the contact zone between Yanshanian hypogene-superhypogene intrusive bodies (granodiorite porphyry and quartz syenite porphyry) and Lower Permian marble or limestone. From southwest to northwest in the ore deposit, diopside member in the skarn pyroxene decreases whereas hedenbergite and johannsenite member increases, with the skarn-associated ore types being successively tin-bearing sphalerite-pyrrhotite, copper-zinc, zinc and lead-zinc(silver). Pyroxene associated with galena and sphalerite is rich in manganese, and its johannsenite member reaches 13.4—50.8% in content.

There exist two metallogenic epochs, related respectively to granodiorite and quartz syenite porphyry. Each epoch might be further divided into three stages, i. e., skarn, quartz sulfides and sulfides-sulfosalts. In the skarn stage, manganhedenbergite and johannsenite formed obviously later than diopside and sahlite. Quartz-sulfide stage, the main metallogenic stage for lead-zinc ore, is characterized by galena, sphalerite, pyrrhotite, arsenopyrite, chalcopyrite and minor quartz replacing garnet and pyroxene. The sulfide-sulfosalt stage is noted for calcite, galena, sphalerite and bismuth-antimony sulfosalts. Horizontally, pyrrhotite, chalcopyrite and bismuth sulfosalts are commonly observed in the southwest part, while galena, sphalerite and antimony sulfosalts tend to concentrate in the northeast.

Fluid inclusion determination and calculation indicate that, from the early skarn stage to late sulfide-sulfosalt stage, temperature, salinity, pressure and f_{O_2} of hot fluids decreased steadily while f_{S_2} increased gradually, with the hot fluid system changing from alkaline through acid to weak alkaline and the environment from oxidation to reduction. Ore minerals precipitated approximately in order of oxides-sulfides-sulfosalts, and lead-zinc ores formed in an acid and reducing environment with temperature 400—220°C, concentration 2.5—15wt% (NaCl equivalent) and pressure 160×10^5 — 600×10^5 Pa.

The extremely low $\delta^{18}O$ values of garnet (3.70—-9.65‰—SMOW), clinopyroxene(-6.00—-12.46‰) and quartz (-2.78—-6.08‰) are very peculiar. The $\delta^{18}O_{H_2O}$ (-11.17—-13.75‰) and δD (-118—-120‰) values coincide with the hydrogen and oxygen isotopic composition of Mesozoic meteoric water of this region. This suggests that the Baiyinnuo lead-zinc deposit must have been a product of meteoric water activated by Mesozoic magma.