第 33 卷 第 1 期　　地 质 科 学　　Vol. 33, No. 1
1998 年 1 月　　SCIENTIA GEOLOGICA SINICA　　Jan., 1998

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*

陈学明　　林　棕　　谢富昌

(中国地质大学　北京　100083)

摘　要　白牛厂银铅锌硫化物矿体赋存在中寒武统海相细碎屑岩中,白垩纪花岗岩体接触带附近。矿床的形成经历了中寒武世海底喷溢沉积成矿作用和燕山期酸性岩浆热液叠加成矿作用,具多源、多成因和多旋回演化的特点,兼有外生和内生矿床的特征,是我国极具特色的细碎屑岩建造中 Sedex 型矿床。

关键词　中寒武世　细碎屑岩建造　海底喷溢沉积　后生岩浆热液作用

1　矿床地质特征

1.1　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。北西面以弥勒断裂与扬子地台分界,西南面以红河断裂为界与哀劳山断块毗邻,南连越北古陆,东部文麻断裂与南岭褶皱系连为一体(图 1)。各构造单元的构造演化对白牛厂矿床均有程度不同的影响,区内地质构造、岩浆活动和矿化作用均较复杂。

矿区出露最老的地层为下寒武统,缺失上寒武统、奥陶系和志留系地层。由于区域拉张作用,中寒武世白牛厂地区形成近东西向的断陷盆地。受盆地边缘同沉积断裂构造影响,盆地沉积物中含大量碎屑流沉积物。沿同生断裂喷溢到海底的热液沉积形成以微晶石英为主体的热水沉积岩和硫化物矿层。

1.2　矿体特征

白牛厂矿区面积约 25km^2,共圈出矿体 70 多个。按产状可分为与沉积岩层产状基本

* 地质矿产部和中国科学院地球化学所研究矿床地球化学开放实验室资助项目《中国若干超大型矿床研究》成果的一部分。

陈学明,男,1943 年 1 月生,副教授,矿床地质学专业。

1995-12-10 收稿,1997-08-02 第 2 次改回,王桂凤编辑。

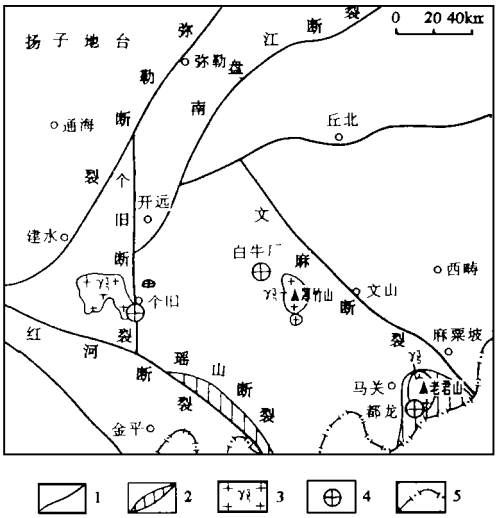

图 1 白牛厂矿床地质构造略图

1. 深大断裂; 2. 基底岩石; 3. 燕山期花岗岩; 4. 矿床; 5. 古陆界线

Fig. 1 Geological and tectonic sketch map of Bainiuchang doposit

多阶段矿化的反映。

2 矿石特征

2.1 矿石组构

矿床物质成分复杂, 组合多样, 矿物间的空间关系和时间关系也较复杂, 既有类似沉积岩中的沉积组构, 也有后生叠加矿化形成的组构。两期矿化作用之间明显存在强度较大的构造作用, 早期矿石被破碎、甚至糜棱岩化之后再被后期矿石交代和胶结。与此同时, 矿层围岩也发生强烈的构造揉皱(图版Ⅰ-2), 石英等矿物出现机械双晶、亚颗粒和碎裂现象。

2.1.1 与海底喷溢沉积作用有关的组构

在层状矿体的底部较常见的组构是块状构造, 中部则以条带状-条纹状和纹层状构造(图版Ⅰ-3)常见。

碎屑和内碎屑状构造(图版Ⅰ-4)多发育在同生断裂附近, 碎屑状硫化物有程度不同的碰撞、磨蚀, 略有分选。部分内碎屑颗粒为多种硫化物颗粒的集合体, 反映其经历过沉积—固结—搬运滚动—再沉积的过程。

豆状构造矿石局部分布在矿体的中上部。豆粒由黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿和菱铁矿一致的整合矿体, 如层状、似层状、透镜状等矿体; 另一类为与地层不整合的矿体, 如脉状、网脉状和其他不规则矿体等。

硫化物矿层中含有较多的陆源碎屑(泥质和粉砂质)、热水沉积成因的微晶石英以及海底滑塌形成碎屑流沉积物(图版Ⅰ-1)。

矿化元素在矿体中的分布特征既不同于沉积矿体均匀分布, 也不同于内生矿体局部富集的特点, 在各元素的分布总体比较均匀的背景上, 出现跳跃式高峰区。成矿元素主要是沉积作用富集成矿, 叠加作用使元素的进一步富集。Pb 在矿区中部和西北部出现跳跃式峰值区, Zn 的峰值区出现在中南部和西部, Ag 的峰值区分布在矿区的北部, Sn 和 Cu 的峰值区主要分布在矿区东南部隐伏花岗岩体附近。元素在矿体中的上述分布特征是多期

等矿物组成，粒径 3—5mm，表面呈次圆状，分选性较好。胶结物为热水沉积微晶石英和另一期更细粒硫化物、粘土质等。

胶状（变胶状）构造主要出现在白铁矿发育的薄层中，部分白铁矿已重结晶变成黄铁矿，但仍残留炉条状的外形。

浸染状砂屑构造常出现在贫矿之中，硫化物碎屑分散在粉砂岩之中或微晶石英、水云母之间。

2.1.2　与早期成岩作用有关的组构

晶簇状环边胶结构造是海底喷溢矿床常见的组构，晶簇状石英或方解石晶体环绕并垂直于硫化物颗粒晶面生长，被胶结的硫化物颗粒主要为黄铁矿和闪锌矿。晶簇状矿物可能由环流或停滞在粒间或晶间的溶液结晶而成。

梯状脉构造常发育在块状、条带状、条纹状矿石中。沉积物在埋藏压实或干裂过程中，形成垂直于层理和平行于层理的两组微细裂隙，被侧分泌作用形成的溶液充填而成梯状，范围一般仅数厘米，可穿纹层、条纹而不穿层面。

重结晶结构常见于黄铁矿和白铁矿发育的矿石中。黄铁矿常重结晶成自形–半自形立方体状，白铁矿重结晶成长条状或格架状。

2.1.3　与后生叠加作用有关的组构

角砾状构造在各矿体中均较发育。早期硫化物受构造应力作用碎裂，后期形成的硫化物充填、交代于其中（图版Ⅰ–5）。

糜棱状构造与角砾状构造均发育于长期多次活动的断裂带附近。糜棱状构造发育带也常是不规则网脉状构造发育的地带，晚期硫化物沿微细裂隙充填、交代（图版Ⅰ–6），沿断裂带呈线状分布。

脉状和网脉状构造常见于矿区东南部隐伏花岗岩体顶部及断裂带附近，以锡石–石英脉、黄铜矿–石英细脉最常见。此外，在其他硫化物矿体中细脉状构造和显微网状构造（图版Ⅰ–6）也较发育。显示矿体形成后仍遭显著的构造作用。

溶蚀交代结构较广泛发育于层状矿体边缘和后期构造矿化发育带，早期形成闪锌矿颗粒常被硫盐、黝锡矿、方铅矿和后期白铁矿环边交代。黄铁矿和矛头状毒砂则常被岩浆热液期磁黄铁矿交代（图版Ⅰ–7）。

固溶体分离结构普遍发育于岩浆热液期铁闪锌矿之中。

2.2　矿石物质成分特征

白牛厂矿床中矿物种类达 90 多种（李纯洁等，1994），常见矿物也有 20 多种（表 1）。不同成因、不同期次的矿物常叠加、混杂，不同期次的同种矿物标型特征有较大差异。

2.2.1　黄铁矿

矿区中两期黄铁矿分别为沉积–成岩期和岩浆热液叠加期黄铁矿。前者为粒度较粗、裂纹发育的立方体和五角十二面体，后者为他形微细粒状。黄铁矿的 Co/Ni 比值都小于 1，大部分样品的S/Se比值也小于 2×10^6，兼有沉积型和非沉积型黄铁矿的特征。

表 1 白牛厂矿床矿物一览表

Table 1 The mineral composition of the Bainiuchang deposit

成矿期	沉积—成岩期	后生叠加期
硫化物	黄铁矿、白铁矿、闪锌矿、方铅矿、黝锡矿	磁黄铁矿、黄铁矿、铁闪锌矿、方铅矿、毒砂、黄铜矿
硫盐矿物与含银矿物	硫锑铅矿、深红银矿、斜方辉锑铅矿、黝锑银矿、硫锑铜银矿、辉锑银矿	银黝铜矿、硫铋银矿、硫铜银矿、硫银铜矿、硫锑铜银矿
	末 分 期	
	辉锑银铅矿、脆硫锑铅矿、脆硫锑铅矿	
氧化物	锡石(浅色)	锡石(深色)、磁铁矿
脉石矿物	微晶石英、绢云母、钾长石、方解石、铁白云石、菱铁矿、菱镁矿	石英、透辉石、符山石、绿泥石、硅灰石、黝帘石、方解石

两期黄铁矿的热电性有显著差异。与沉积-成岩期有关的黄铁矿热电动势均为正值,属 P 型黄铁矿;与后期叠加矿化有关的黄铁矿热电动势多为负值,属 N 型黄铁矿。

2.2.2 闪锌矿

矿区闪锌矿的颜色普遍较深,粒度较粗,富 In 低 Ga、Ge。沉积-成岩期闪锌矿呈碎屑粒状,内部包含较多泥质,颜色呈棕褐色,Fe 含量 4% —7%,Cu 含量低于 0.1%,内部没有固溶体分离物。与岩浆热液作用有关的闪锌矿呈不规则形状,常交代早期硫化物,呈黑色,光泽强,Fe 含量达 8% —14%,矽卡岩中闪锌矿 Fe 含量可达 13% —15%。内部普遍有呈叶片状、线状的黄铜矿、磁黄铁矿固溶体分离物。

2.2.3 锡石

锡石是矿区主要赋锡矿物,主要形成于海底喷溢沉积-成岩期,部分形成于后期岩浆矿化作用。与海底喷溢沉积成矿作用有关的锡石颜色较浅,棕黄-褐黄色,粒径 0.003—0.15mm,个别达 1mm,呈不规则柱粒状、四方双锥状,双晶少见。该期锡石化学成分电子探针分析结果见表 2。

电子探针分析结果显示,锡石中 In_2O_3 含量平均达 2.748%,换算为铟的平均含量为 1.84%,远远高于滇东南和我国其他矿床锡石中的铟含量(杨世瑜,1990)。铟在锡石中含量大于 0.1%时,便可能呈单矿物或类质同象形式存在。电子探针 Inla 面扫描结果显示,铟在锡石中均匀分布(图版Ⅰ-8),呈类质同象存在。

自然界中锡石的铟富集主要与压力有关,随压力减少铟含量而增加。白牛厂浅色富铟锡石的存在可能是低压和中低温成矿环境的指示剂。此外,矿区浅色富铟锡石常与银的富集有关,因而有可能为找银矿体提供线索。

表 2　白牛厂矿区锡石电子探针分析结果(w_B/%)

Table 2　Electron microprobe analyses of assiterite from Bainiuchange deposite(w_B/%)

样号	01	02	03	04	05	06
Na_2O	0.31	0.16	0.00	0.26	0.33	0.05
MgO	0.07	0.24	0.13	0.29	0.11	0.00
Al_2O_3	0.08	0.12	0.16	0.08	0.20	0.00
SiO_2	0.23	0.00	0.02	0.17	0.00	0.05
K_2O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TiO_2	0.14	0.00	0.02	0.48	0.00	0.59
MnO	0.07	0.00	0.06	0.00	0.01	0.04
Cr_2O_3	0.15	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
NiO	0.00	0.00028	0.00	0.06	0.26	0.00
FeO	0.48	0.00	0.25	0.11	0.00	0.29
P_2O_5	0.00	95.17	0.15	0.00	0.21	0.00
SnO_2	95.11	3.00	94.18	95.58	91.75	94.06
In_2O_3	3.18	0.00	4.41	1.30	3.43	4.17
Nb_2O_5	0.00	0.00	0.02	0.00	0.22	0.00
Ta_2O_5	0.00	1.05	0.00	1.39	1.49	0.14
WO_3	0.17	0.00	0.42	0.00	2.00	0.42
ScO	0.13	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00
Sb_2O_3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V_2O_5	600		0.00	0.32	0.00	0.21
总计	100.03	100.03	100.02	100.03	100.02	100.02

注: 1. 中国地质大学(北京)电子探针室李树岩分析。

2. 锡石标样 00350 号, 纯度 99.999%; 铟标样 00156 号, 纯度 99.999%。

3　同位素地球化学特征

3.1　铅同位素组成特征

白牛厂矿石铅同位素变化范围大, 这是目前南岭地区 Sedex 型层探矿床中所少见的(涂光炽, 1988)。$^{206}Pb/^{204}Pb$ 为 17.284—18.700, $^{207}Pb/^{204}Pb$ 为 14.843—16.298, $^{208}Pb/^{204}Pb$ 为 27.289—38.995。

在 $^{207}Pb/^{204}Pb$ 投影图(图 2)上, 矿石中铅同位素投影点线性关系明显, 几乎呈一直线

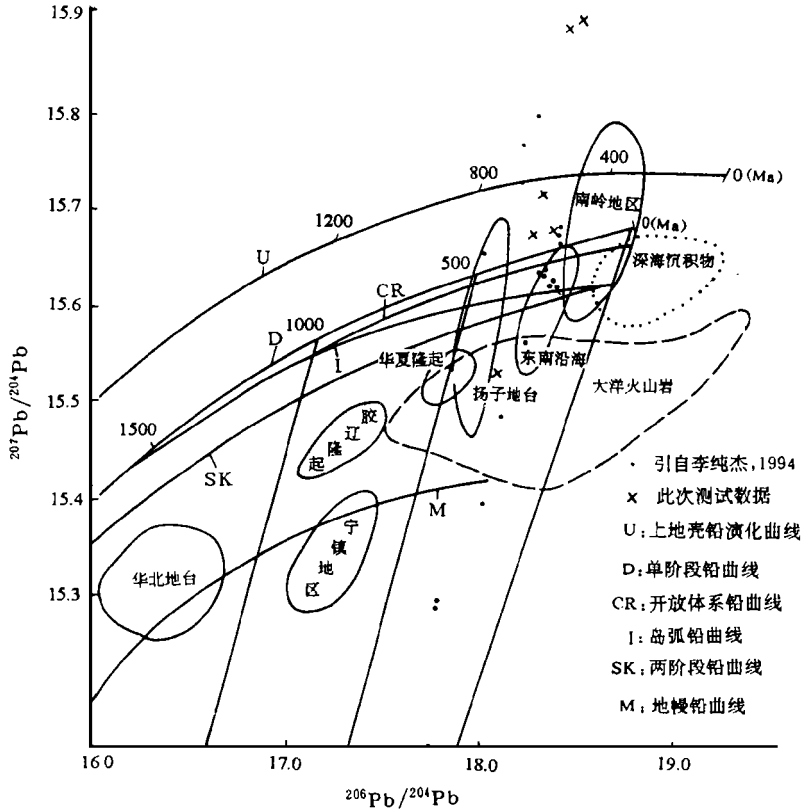

图 2 白牛厂矿区矿石铅同位素组成坐标图

(据陈好寿, 1981 改编)

Fig. 2 Plot of lead isotope composition of ores from the Bainiuchang deposite

穿越上地壳、岛弧直到地幔的演化曲线以下, 而且, 数值较低的样品分布在层状矿体上盘网脉状矿石(即晚期叠加矿化形成的矿石) 中。这可能反映由构造活动引起的成矿物质由浅源到深源进入成矿系统并就位于矿体的过程。样品投影点的年龄主要为 6 亿年左右, 这与自中寒武世成矿的地质事实基本一致。

铷锶同位素年龄值为 136—72Ma, 反映燕山期岩浆热液矿化作用的时间。

3.2 硫同位素组成特征

寒武纪海水硫酸盐 $\delta^{34}S$ 为 30‰, 矿区外围地层中硫化物 $\delta^{34}S$ 为 18.6‰和 23.4‰, 其硫源显然为海水硫酸盐。而矿石硫同位素组成范围很窄(图 3) , $\delta^{34}S$ 变化在- 4‰至+ 5.7‰之间, 平均值为+ 3.36‰, 峰值为+ 2‰—- 4‰。上述特征表明其矿石的硫源不是海水硫。矿区硫-铅同位素存在一定的相关性(图 4) , 反映硫与铅可能同为深部来源并具相似的演化史。

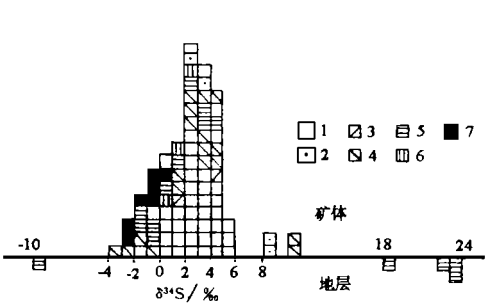

图 3　白牛厂矿区硫同位素组成直方图

1. 黄铁矿; 2. 磁黄铁矿; 3. 黄铜矿; 4. 闪锌矿; 5. 方铅矿; 6. 硫锑铅矿; 7. 毒砂

Fig. 3　Histogram showing the sulfur isotope composition of the Bainiuchang deposite

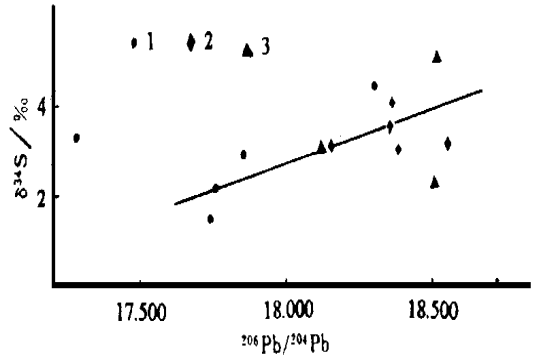

图 4　白牛厂矿区硫-铅同位素变化关系图

1. 脉状矿石; 2. 层纹状矿石; 3. 同生砾状矿石

Fig. 4　Correlations showing the change of Pb-S isotopes in Bainiuchang deposite

4　成矿流体性质

4.1　温度与盐度

前人[①②] 及本文测定硫化物样品共 500 余件, 爆裂温度范围 60—410℃, 盐度 3.7% —19%。以围岩中立方体黄铁矿为代表的成岩期矿物爆裂温度为 60—80℃; 以无固溶体分离物碎屑状闪锌矿为代表的热液沉积期矿物爆裂温度为 200—220℃, 盐度 5% —12% ; 以他形粒状、固溶体分离物发育的铁闪锌矿为代表的叠加矿化期爆裂温度为 280—320℃, 盐度 14% —19%, 矽卡岩矿物爆裂温度达 410℃, 盐度 19% 。

4.2　流体包裹体氢-氧同位素

据 $\delta^{18}O$-δD 相关图(图 5) 可见, 层状矿体中棕色闪锌矿(1 号点) 、条纹构造矿石(2 号点) 、碎屑砾状矿石(5 号点) δD 值为- 50‰—- 84‰, 其中 1、2 号点与变质水 δD 值接近; $\delta^{18}O$ 值为- 2.1‰—+ 1.2‰, 与海水氢同位素组成接近。上述 3 个点反映海底喷溢沉积矿化期成矿流体中以变质建造水或经过改造的海水为主。其他 4 个点的样品为矿层上盘地层的脉状或浸染状矿化体中的硫化物和碳酸盐, 代表叠加矿化期和晚期热液的性质。这 4 个点较靠近雨水线, 可以推断, 后期矿化流体含大量大气降水。图 5 中 1 号点、2 号点 δD 值与岩浆较接近, 不排除岩浆水参与成矿活动的可能。

① 云南地质二队, 1993, 云南白牛厂区调报告。

② 叶庆同, 1994, 云南白牛厂矿床同位素研究报告。

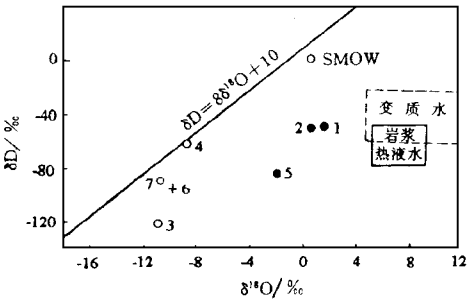

图 5 白牛厂矿区 δD-$\delta^{18}O$ 坐标图①

SMOW—现代海水; 1. 层状矿石; 2. 条纹状矿石; 3、4. 矿体上盘脉状矿石; 5. 碎屑状矿石; 6. 矿体上盘浸染状矿石; 7. 矿体上盘脉状矿石

Fig. 5 Plot of δD-$\delta^{18}O$ in Bainiuchang deposite

5 成矿作用讨论

白牛厂矿床经历了中寒武世海底喷溢沉积-成岩期和燕山期岩浆矿化作用的叠加, 形成了不同特征的矿体, 复杂的矿物成分并反映不同成因的矿石组构。

沿同生沉积断裂喷溢到海底、盐度较高的酸性含矿热液, 与底层偏碱性海水混合后, pH 值升高, 温度降低, 盐度稀释, 矿化热液发生卸载沉淀。胶状白铁矿、黄铁矿首先晶出, 伴随 SiO_2 沉降, 形成硅质热水沉积岩; 随着 pH 逐渐升高, 闪锌矿、方铅矿, 含银硫盐及碳酸盐矿物也随后晶出沉淀。硫化物与硅质、钙质化学沉积物的混杂, 是矿石贫化的原因之一。在化学沉积作用的过程中, 陆源碎屑沉积也同时进行。在同生构造作用和海底水的影响下, 硫化物堆积体与陆源碎屑沉积物发生震动、滑塌并沿海底斜坡流动, 互相混杂, 这是细碎屑岩建造中海底喷溢矿床矿石贫化的另一原因(Kerr, 1994)。

晚期岩浆热液矿化作用, 使层状矿体中成矿物质部分活化和重新组合, 与岩浆热液中矿质一起再次聚集, 在均匀矿化背景下形成矿体的局部富集; 在矿层以外构造带中, 形成形态各异的脉状矿体。两期成矿作用, 两种来源的矿质叠加, 造就超大型矿床的富集。

致谢 本项目得到朱上庆教授的指导, 在野外工作期间得到云南地矿局第二地质大队张力行总工程师、田秉钧副总工程师、江鑫培、沈世多、白金刚等工程师的大力帮助。文稿详细摘要得到涂光炽院士、宋叔和院士、李朝阳研究员、刘秉光研究员和翟裕生、冯钟燕、于耀先、黄华盛、池三川等教授的审阅和指教。中科院贵阳地化所、中科院高能物理所、中国地质大学测试中心等单位为项目完成各项测试工作。云南地矿区第二地质大队、中国地质科学院矿床地质研究所叶庆同研究员、李纯洁副研究员、韩发研究员等毫无保留地提供了他们的样品和研究成果。在此, 谨致以崇高的敬意和衷心的谢忱。

① 叶庆同, 1994, 云南白牛厂矿床同位素研究报告。

参 考 文 献

陈好寿. 1981. 我国层控多金属矿床 Pb 同位素特征及其成因意义. 科学通报, **26**(11): 614.

李纯洁, 史洪岳 . 1994. 云南蒙自县白牛厂银多金属矿床成矿机制的探讨 . 第五届全国矿床会议论文集 . 北京: 地质出版社, 247– 249

涂光炽 . 1988. 中国层控矿床地球化学. 第三卷 . 北京: 科学出版社

杨世瑜 . 1990. 滇东南锡矿时空分布特征及成矿模式 . 地质科学, (2): 138– 140

Kerr R A. 1994. German Super-Deep Hole Hits Bottom, Science, **266**, 28. Oct. 545

图 版 I 说 明

1. 硫化物(灰色)和硅质岩交错混杂堆积, 标本, $\times\frac{1}{3}$。
2. 矿体底板围岩的构造揉褶, 标本, $\times\frac{1}{3}$。
3. 黄铁矿、闪锌矿(灰色)与泥质(暗色)组成条纹状构造, 标本, $\times\frac{1}{3}$。
4. 闪锌矿内碎屑颗粒与纹层状黄铁矿、磁黄铁矿, 标本, ×2。
5. 硫化物(灰色)角砾与硅质岩(浅色)角砾, 标本, ×2。
6. 网脉状磁黄铁矿(灰色)与角砾状闪锌矿(暗色), 标本, ×1。
7. 磁黄铁矿交代黄铁矿(粒状)和毒砂(矛头状), 标本, ×2。
8. In 在锡石中呈固溶体均匀分布(电子探针 Inla 面扫描照片), 电流 2×10^{-8}A, 加速电压 15kV, In 标样纯度 99.9999%, 标号 00156。

GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE BAINIUCHANG SUPERLARGE SILVER POLYMETALLIC DEPOSIT OF SUPERIMPOSED MINERALIZATION, YUNNAN PROVINCE

Chen Xueming　　Lin Zong　　Xie Fuchang

(*China University of Geosicences, Beijing*　100083)

Abstract

Located in the western flank on Nanling Metallogenic Zone, the Bainiuchang deposit was controlled by Middle Cambrian aulacogen and Yanshanian magmatic activities. Orebodies occur in fine grained clastic formation of Middle Cambrain. There are both characteristic features of exogenic and endogenic origins in the Bainiuchang deposit. The

main orebodies are in the forms of both stratiform and veins of various dimensions, and some slump structures occur in sulfide accumulations. The mineralogical composition is very complex, and the kinds of the minerals are more than 90. The ore texture and structure are variouss: massive, laminated, clastic related to sedimentary and vein-like, stockwork and brecciated realted to deuterogenic. The sulfides in sedimentary orebodies often show interbedded and rhythmetic textures. The pyrites and the sphalerites are often in the form of granular aggregates with clastic and/or intraclastic features. Some aggregates show abrasion and impaction features, and some show an even more complex history of sedimentation - diagenesis - rewash and redeposition and recementation by microlitic quartz, argillite, sulfide of different generation. The pyrite is characterized by low contents of Co and Ni, and the avarage of the Co/Ni ratio is lower than unity. The S. Se ratio is lower than 2×10^6. The contents of Fe and In in the splalerites is high but the contents of Ga and Ge is low. The assiterite related to the sedimentation is characterized by high content of In, and the avarage of In is 1. 84%. The decrepitation temperatures of the fluid inclusions range from 60℃ to 410℃, and the contents salts range from 3. 1% to 10%. the $\delta^{34}S$ values of sulfids in orebodies are about - 4‰ - + 5. 5‰ but + 18. 6‰ - + 23. 4‰ insrata. The lead is normal lead and anomal lead. Majority of mineralization hydrothermal solution are from seawater and rainfall.

Key words Fine grained clastic formation, Submarine exhalative sedimentary, Late magmatic hydrothermal solution, Mineeralogical composition, Ore textures and structures