

doi:10.3799/dqkx.2014.063

# 内蒙古维拉斯托—拜仁达坝矿床 矿石特征及成矿机理

唐然坤<sup>1</sup>, 吕新彪<sup>1\*</sup>, 曹晓峰<sup>1</sup>, 梅微<sup>1</sup>, 尚世超<sup>1</sup>, 吴建亮<sup>1</sup>, 艾智龙<sup>2</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 湖北省地质调查院开发部, 湖北武汉 430074

**摘要:** 维拉斯托—拜仁达坝锌铜多金属矿床为近几年大兴安岭中南段西坡发现的较大的2个银多金属矿床, 主要对2个矿床矿石矿物组合分析和对比, 对主要的矿石矿物组合进行扫描电子显微镜—能谱分析和电子探针分析显示: 从早期到晚期, 矿物组合从高温钨酸盐和氧化物—复硫化物—硫化物—低温含锑硫盐矿物(锑化物); 银的赋存状态主要为可见银矿物, 其次为晶格银(类质同象)和次显微包裹银, 其中生成顺序依次为含银黝铜矿+银锑黝铜矿+黝锑银矿—辉锑铅银矿+柱硫锑银矿+深红银矿+锑银矿。根据不同成矿阶段的矿物组合和流体包裹体特征得出: 成矿早期在氧化偏酸性环境下, W、Sn等以钨酸、钨酸盐等形式迁移,  $Zn^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{+}$ 等金属离子以氯络合物形式迁移; 随着黑钨矿气化解沉淀及成矿流体物理化学条件的变化, 成矿中—晚期成矿环境变为弱碱性还原条件, 成矿流体中金属离子以硫氢络合物迁移为主, 伴着温度降低和围岩的水—岩作用, 硫氢络合物分解, 导致磁黄铁矿等硫化物、硫锑银矿物、硫锑铅矿等依次沉淀。

**关键词:** 维拉斯托—拜仁达坝; 银的赋存状态; 成矿机理; 成矿端员; 矿床; 矿物学。

中图分类号: P611

文章编号: 1000-2383(2014)06-0671-16

收稿日期: 2013-10-25

## Mineralogy and Metallogenic Mechanism of Weilasituo and Bairendaba Deposits, Inner Mongolia, China

Tang Rankun<sup>1</sup>, Lü Xinbiao<sup>1\*</sup>, Cao Xiaofeng<sup>1</sup>, Mei Wei<sup>1</sup>, Shang Shichao<sup>1</sup>, Wu Jianliang<sup>1</sup>, Ai Zhilong<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Development Department, Hubei Geological Survey, Wuhan 430074, China

**Abstract:** Weilasituo and Bairendaba are two large-scale silver polymetallic deposits, discovered in the western slope of the south and central sections of Great Hinggan Mountains in recent years. This study focuses on identifying and analyzing the mineral associations and occurrence of silver minerals using scanning electron microscopy-energy dispersive spectrometry and electron microprobe. The analyses suggest that mineral associations change from tungstate and oxide, to diatomic sulphide, to simple sulphide, to antimony sulfosalt mineral, to antimonide with decreasing temperature based on the microscopy observations. The silvers contained in the ore occur in several forms, including mainly visible silver minerals, followed by the lattice silver (isomorphous substitution) and sub-micron inclusion silver. The mineral sequence of visible silver's formation is Ag-bearing tetrahedrite-argentian tetrahedrite-freibergite-diaphorite-freieslebenite-pyrargyrite-dyscrasite. Ag occurs in lattice of chalcopyrite, bornite, chalcocite, pyrite and galena in isomorphism in small amount, and also as the microscopic wrappage in galena. The results, combined with the characteristics of mineral association and fluid inclusions in different mineralizing stages, indicate that W and Sn are transported as wolframic acid and tungstate at the early high-temperature meta-acid oxidizing environment, while  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{+}$  and other metalions are transported as chloride complexes. After wolframite's precipitation and the changes of metallogenetic fluid physical and chemical condition, the metallogenetic environment becomes slightly alkaline and reductive, and  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{+}$  and other metalions form  $HS^{-}$  complexes. The continuous drop of temperature and wa-

**基金项目:** 内蒙古基金中心矿调项目(No. NMKD2010-3)。

**作者简介:** 唐然坤(1988—), 女, 在读研究生, 主要从事矿物学、岩石学及矿床学方面的研究工作。E-mail: tangrankun@foxmail.com

\* 通讯作者: 吕新彪, E-mail: Lvxb\_01@163.com

ter-rock interaction lead to the separation of  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{+}$  with  $\text{HS}^{-}$  to form pyrrhotite, sphalerite etc. . In late phases,  $\text{Ag}^{+}$  can combine  $\text{Sb}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Sb}^{3-}$ ,  $\text{S}^{2-}$  etc. , which results in multiple silver antimony sulfide minerals, boulangerite etc. .

**Key words:** Weilasituo-Bairemdaba; occurrence of silver; metallogenic mechanism; metallogenic endmember; deposits; mineralogy.

内蒙古维拉斯托一拜仁达坝两个矿床为近几年大兴安岭中南段西坡发现的较大银多金属矿床. 维拉斯托位于拜仁达坝矿床西南 3 km 处, 这 2 个矿床距离较近, 同位于华北板块与西伯利亚板块之间的古生代褶皱带内, 锡林浩特微陆块的东端, 大兴安岭中南段西坡成矿带内(图 1a). 近年来, 众多学者对 2 个矿床的地质特征、地质年代学、成矿物质来源、成矿流体及形成条件等进行了较系统的研究(孙丰月和王力, 2008; 王力和孙丰月, 2008; 钟日晨等, 2008; 刘翼飞, 2009; 江思宏等, 2010; 刘翼飞等, 2012). 较多学者认为 2 个矿床距离较近, 矿床地质特征、成矿地质条件和成因关系上相似且联系紧密, 可看作 1 个矿田范围内的 2 个矿床. 本文通过对这 2 个矿床

矿石矿物特征进行对比分析, 查明了矿床中银的赋存状态, 有助于揭示矿质沉淀的物理化学条件和成矿机理; 对比 2 个矿床不同阶段的矿石特征包括野外矿化特征和矿物组合特征, 确定 2 个矿床在空间和成因的联系.

1 区域与矿床地质特征

本区位于大兴安岭中南段成矿带的西坡, 位于大兴安岭南段晚古生代增生造山带, 其大地构造隶属于天山—兴蒙褶皱系, 锡林浩特中间地块中部; 三级构造单元为锡林浩特复背斜东段, 即米生庙复背斜靠近轴部的南东翼. 区内地层出露齐全, 除广泛分

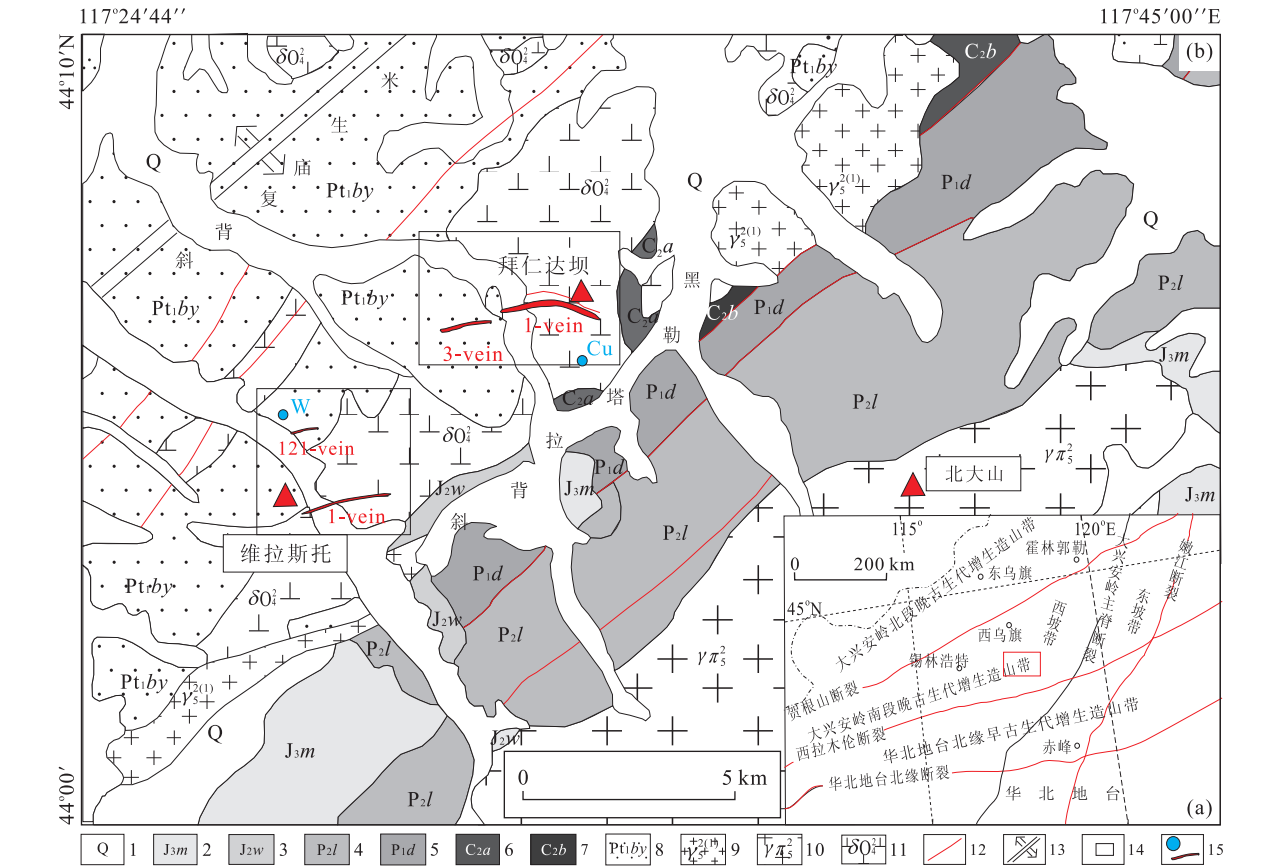


图 1 维拉斯托一拜仁达坝矿床区域地质简图

Fig. 1 Regional sketch geological map of Weilasituo-Bairemdaba deposits

a. 区域构造略图; b. 区域地质简图(据刘建明等, 2004 修改); 1. 第四系; 2. 上侏罗统满克头鄂博组; 3. 下侏罗统万宝组; 4. 上二叠统林西组; 5. 下二叠统大石寨组; 6. 上石炭统阿木山组; 7. 上石炭统本巴图组; 8. 下古生界宝音图组; 9. 燕山期花岗岩; 10. 燕山期花岗斑岩; 11. 海西期闪长岩; 12. 断裂; 13. 复背斜; 14. 矿区范围; 15. 矿点和主矿脉

布的第四系冲积层及风成砂土外,主要出露下古生界、上石炭统、二叠系、侏罗系地层。区域褶皱及断裂构造发育,主要有米生庙复背斜和一系列断裂构造,复背斜及以北东向为主的断裂,另外还有北西向及近东西向断裂。区域侵入岩体具有多期多阶段侵位特征,从海西期至燕山晚期,共有 5 个岩浆就位阶段。与矿床密切相关的主要是海西期中酸性岩体和近矿岩体燕山期花岗岩,其中燕山期第 2 次侵入的有矿田东南的北大山岩体(图 1b)。

2 个矿床均属内蒙古赤峰市克什克腾旗,其中维拉斯托矿床地理坐标为 117° 28′ 15″ ~ 117° 30′ 45″ E, 44° 04′ 00″ ~ 44° 05′ 45″ N, 面积为 10.79 km<sup>2</sup>;拜仁达坝矿床地理坐标为 117° 30′ 56″ ~ 117° 34′ 15″ E, 44° 05′ 54″ ~ 44° 07′ 32″ N, 面积约 16 km<sup>2</sup>,分为东西 2 个矿区。2 个矿床位于同一矿田范围内,地层出露简单,主要为中下古生界锡林浩特杂岩系,由黑云斜长片麻岩、二云斜长片麻岩和角闪斜长片麻岩组成。矿区内侵入岩主要为海西期石英闪长岩,为主要赋矿围岩,另外在 2 个矿区均可见少量燕山早期花岗岩发育。维拉矿区主要发育 NW 及近 EW 向断裂,其中燕山晚期 NW 向断裂为主要导矿构造,近 EW 向“S”型压扭性断裂为主要控矿构造(图 2a),拜仁矿区位于黑勒塔拉铜矿点背斜,断裂构造有 NE 向、NW 向和近 EW 向的“S”型断裂,其中近 EW 向和 NWW 向断裂控制着矿体的分布

(图 2b)。

2 个矿床矿体赋存于断裂带内,严格受构造控制。矿体与围岩界线清楚,顶底板围岩矿化弱,围岩以黑云斜长片麻岩、石英闪长岩为主。矿体呈脉状、似脉状、透镜状、层状、似层状,走向近 EW,向北倾,倾角 8°~50°,矿脉以硫化物充填型矿脉为主,规模大小不等,延伸数十至 2 000 余米,倾向延伸数十米至 1 000 余米,厚度一般 0.5 m 至几十米。维拉斯托矿床总资源储量(122b+333 级)为 881.14×10<sup>4</sup> t, Zn 和 Cu 矿床平均品位分别为 4.29%和 0.79%;拜仁达坝西矿区硫化矿石总资源储量为 921.57×10<sup>4</sup> t,3 号主矿体占总资源储量的 65%,长 1 200 m,延深 250~700 余米,规模较大,Ag、Pb、Cu 的平均品位分别为 65.4 g/t、0.29%、0.28%;拜仁达坝东矿区总资源储量为 1 781.35×10<sup>4</sup> t,硫化矿中 Ag、Pb、Zn 平均品位为 219.92 g/t、2.36 %、5.14 %。

2 矿石特征与围岩蚀变

2.1 矿化与围岩蚀变特征

维拉斯托一拜仁达坝矿床均为典型的热液脉状多金属矿床,成矿以充填作用为主,交代作用为辅。维拉斯托一拜仁达坝矿床的矿石矿物种类相近,其中主要金属矿物均有闪锌矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、毒砂、黄铁矿及相关银矿物;次要金属矿物有自

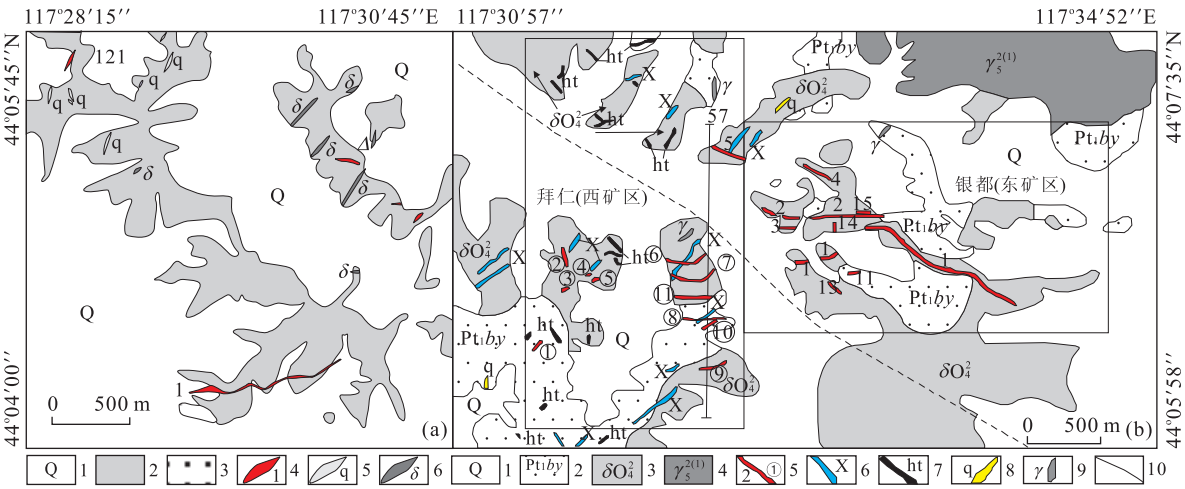


图 2 维拉斯托一拜仁达坝矿床矿区地质图

Fig. 2 The Geological sketch map of Weilasituo and Bairendaba deposits

图 a 为维拉斯托矿床,据内蒙古自治区克什克腾旗拜仁达坝矿区银都金属矿详查报告,内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院,2003;其中: 1. 第四系; 2. 下古生界黑云斜长片麻岩; 3. 海西期石英闪长岩; 4. 矿脉及编号; 5. 石英脉; 6. 闪长岩脉。图 b 为拜仁达坝矿床改自常勇和赖勇, 2010;其中: 1. 第四系; 2. 下元古界黑云斜长片麻岩; 3. 海西期石英闪长岩; 4. 燕山期花岗岩; 5. 斜长角闪岩脉; 6. 褐铁矿化带; 7. 石英脉; 8. 花岗岩脉; 9. 矿体及编号; 10. 推测的北西向断裂

然银、胶状黄铁矿、白铁矿、黝锡矿、脆硫锑铅矿、硫锑铅矿等。此外,维拉斯托矿床还发育黑钨矿、白钨矿、锡石等高温氧化物和钨酸盐;脉石矿物有长石、石英、萤石、碳酸盐矿物、绢云母、白云母等。矿石结构主要有自形一半自形—他形粒状结构、骸晶结构、交代残余结构、脉状穿插结构、网脉结构、固溶体分离结构、填隙结构、胶状结构;矿石构造主要有块状构造、网脉状构造、浸染状构造、斑杂状构造、角砾状构造、条带状构造。值得注意的是拜仁达坝矿床中磁黄铁矿—闪锌矿的“定向排列”构造,代表该地区成矿后受到构造作用影响。

维拉斯托矿床以黄铜矿化和闪锌矿化为主,其次为铅银和钨锡矿化,锌铜银矿化形成热液充填型锌多金属矿脉,为矿区内主要的矿体类型,形成矿石主要为块状构造的硫化物矿石;钨锡矿化形成石英脉型钨多金属矿脉,在深部和西北部 121 矿体较为发育(图 2a),矿石主要为石英和钨锡矿物等。围岩

蚀变按时间先后和从深部到浅部依次为角岩化(图 3a)、硅化(图 3b)、绿泥石化(图 3b,3c)、绢云母化、萤石化、碳酸盐化、高岭土化。以维拉斯托主矿脉 1 号斜井 1175 中段—1225 中段—1275 中段为例(图 3b,3c,3d),1175 中段为石英脉型多金属矿脉,以钨锡矿物为主,蚀变以强硅化为主,可见绿泥石化;1225 中段为以锌铜为主的充填型多金属矿脉,主要为绿泥石化和硅化;1275 中段可见铜锌矿脉中矿石的角砾状构造,稍早的矿石角砾被晚期的萤石绢云母胶结包围,其中亦可见氧化的褐铁矿化。

拜仁达坝矿床以铅锌银矿化为主,主要为方铅矿、闪锌矿和银矿物,其次为黄铜矿化。其中矿化特征变化如下:稍早期磁黄铁矿—闪锌矿(图 3e,3f),且矿物含量从以磁黄铁矿为主,到中期以闪锌矿为主,最后以闪锌矿矿化和铅银矿化为主,对应矿石构造为早期磁黄铁矿中少量闪锌矿“定向排列”(图 3g),到中期闪锌矿为主的脉状构造(图 3h),最

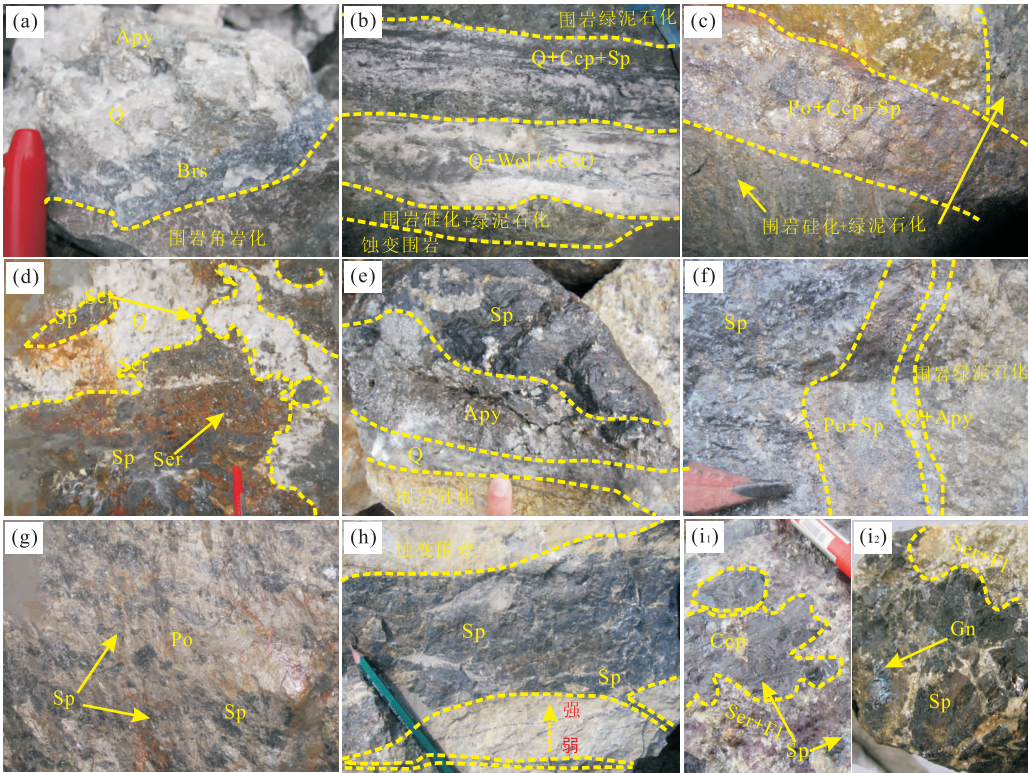


图 3 维拉斯托—拜仁达坝矿床矿化特征和矿石构造

Fig. 3 Features of mineralization and ores' structures in Weilasituo and Bairendaba

a~d. 维拉斯托矿床; e~i. 拜仁达坝矿床; a. 石英脉型矿石围岩角岩化—辉钼矿矿化—毒砂矿化; b. 1175 中段石英脉型钨锡多金属矿脉; c. 1225 中段锌铜多金属矿脉; d. 1275 中段胶结角砾状构造,角砾状锌铜矿石被晚期绢云母胶结; e. 早期硅化蚀变—Q-Apy-Sp; f. 矿脉和蚀变,从右到左依次为绿泥石化-Apy+Q-早期 Po+Sp-中期块状 Sp; g. 闪锌矿斑点呈定向以及受构造应力影响,定向性较好; h. 中期脉状闪锌矿化,围岩蚀变距矿脉越远越弱; i. 晚期绢云母萤石胶结角砾状铅锌矿石; i<sub>2</sub>. 晚期萤石和绢云母胶结锌铜角砾状矿石,黄铜矿细脉穿插闪锌矿; Sp. 闪锌矿(黑色); Apy. 毒砂(钢灰色); Po. 磁黄铁矿(暗黑铜黄色—褐铜色); Ccp. 黄铜矿(黄铜黄色—蓝紫褐色的斑状铜色); Gn. 方铅矿(铅灰色); Brs. 辉钼矿(亮铅灰色); Wol. 黑钨矿; Cst. 锡石; Q. 石英; Fl. 萤石(紫色); Ms. 白云母类(浅黄色)

后闪锌矿角砾被晚期绢云母和萤石胶结(图 3i<sub>1</sub>, 3i<sub>2</sub>). 围岩蚀变较发育,在时间和空间上均具明显分带性,从早到晚、由近矿体到远离矿体的蚀变分带为:硅化(图 3e)、绿泥石化(图 3f, 3h)、萤石化、绢云母化、碳酸盐化、锰菱铁矿化和褐铁矿化,一般矿体下盘比上盘围岩蚀变强烈.

2.2 成矿期与成矿阶段

维拉斯托一拜仁达坝矿床的矿石矿物组合有所

重叠,但不完全相同,对应成矿阶段划分亦有异同. 2 个矿床存在多阶段多种矿化,根据矿物组合特征和穿插关系,将 2 个矿床分为热液期和表生期 2 个成矿期(图 4 和图 5).

维拉斯托矿床热液期成矿阶段划分为:(I)高温钨锡多金属石英阶段:最早的钨锡矿物成矿阶段,以石英和黑钨矿等高温矿物的大量产出为标志,另见斜方砷铁矿以及浅色闪锌矿等硫化物,可见石英

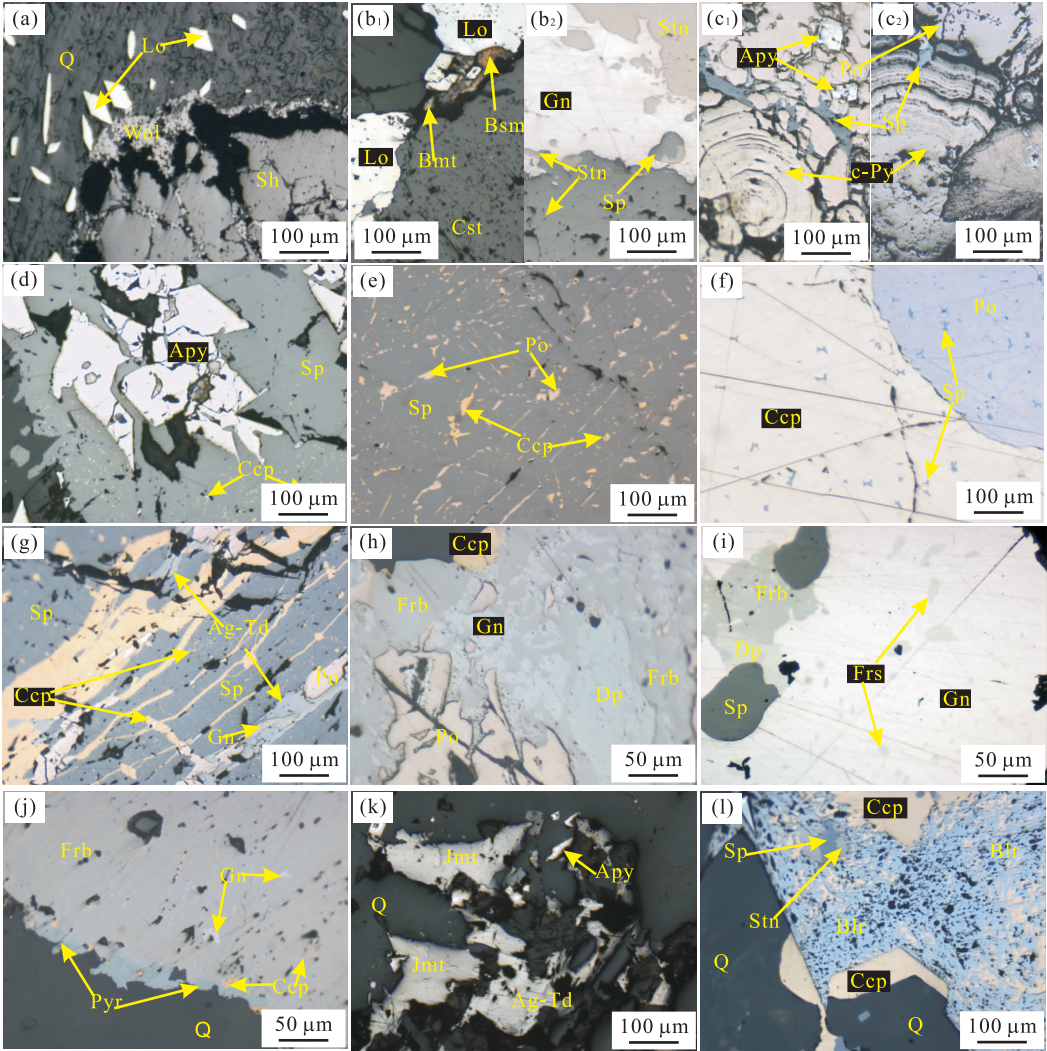


图 4 维拉斯托一拜仁达坝矿床主要矿物组成及其结构关系

Fig. 4 Composition of the main minerals and their texture relationships in Weilasituo and Bairendaba  
a, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d, f, i, j, l. 维拉斯托矿床照片(WL); b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, e, g, h, k. 拜仁达坝矿床照片(BR). a. WL-31, 黑钨矿—白钨矿—斜方砷铁矿,且黑钨矿分布在白钨矿裂隙中; b. WL-33; b<sub>1</sub>. 斜方砷铁矿镶嵌在锡石中,自然铋被辉铋矿交代溶蚀; b<sub>2</sub>. 方铅矿交代稍早的浅色闪锌矿和黝锡; c. WL-13&-BR-4, 矿物的生成交代顺序为早期毒砂和胶状黄铁矿—磁黄铁矿—铁闪锌矿; d. WL-43, 铁闪锌矿包围早期自形晶毒砂; e. BR-21, 铁闪锌矿中的磁黄铁矿和黄铜矿的固溶体出溶结构; f. WL-9, 磁黄铁矿和黄铜矿中的星状闪锌矿出溶结构; g. BR-10, 黄铜矿穿插铁闪锌矿的网脉结构; h. BR-36, 方铅矿中蠕虫状银锑铜矿和辉锑铅银矿; i. WL-39, 方铅矿中的柱硫锑铅银矿的出溶结构和银锑铜矿中方铅矿的不混溶结构; j. WL-55, 黝锡银矿中的黄铜矿和方铅矿的不混溶结构,深红银矿交代黝锡银矿分布在其边界; k. BR-38, 稍晚脆硫锑铅矿交代稍早银锑铜矿; l. WL-69, 针状硫锑铅矿穿插稍早黄铜矿; Wol. 黑钨矿; Sh. 白钨矿; Lo. 斜方砷铁矿; Cst. 锡石; Bsm. 自然铋; Bmt. 辉铋矿; Apy. 毒砂; c-Py. 胶状黄铁矿; Po. 磁黄铁矿; Sp. 闪锌矿; Stn. 黝锡矿; Ccp. 黄铜矿; Gn. 方铅矿; Ag-Td. 银锑黝铜矿; Frb. 黝锡银矿; Dp. 辉锑铅银矿; Frs. 柱硫锑铅银矿; Pyr. 深红银矿; Jmt. 脆硫锑铅矿; Blr. 硫锑铅矿; Q. 石英

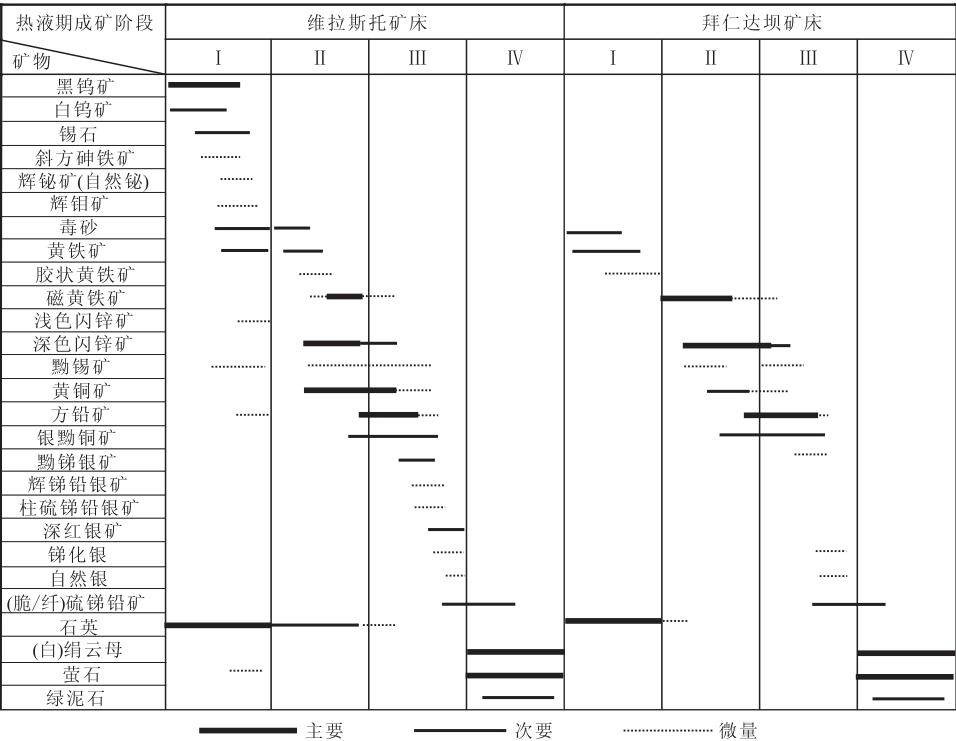


图 5 热液期成矿阶段及矿物生成顺序

Fig. 5 Stages of hydrothermal mineralization and corresponding mineral sequences

矿脉中可见稍晚硫化物包裹稍早黑钨矿和锡石晶体。本阶段矿石组合为黑钨矿+白钨矿+锡石—斜方砷铁矿+毒砂+黄铁矿+自然铋+辉钼矿+辉铋矿—浅色闪锌矿+黝锡矿+方铅矿+石英(图 4a, 4b);(II)铜多金属硫化物—石英阶段:主要为黄铜矿(主)、闪锌矿矿化,其次为毒砂和黄铁矿—胶状黄铁矿(图 4c<sub>1</sub>),可见闪锌矿—黄铜矿—磁黄铁矿的固溶体出溶结构(图 4e, 4f)。矿物组合为毒砂+黄铁矿(辉钴矿)+白铁矿+胶状黄铁矿+石英—磁黄铁矿+铁闪锌矿+黝锡矿+黄铜矿;(III)银多金属硫化物阶段:为方铅矿和银矿物的主要成矿阶段,可见方铅矿穿插早期磁黄铁矿等矿物,矿物组合为方铅矿+含银黝铜矿+银锑黝铜矿+黝锑银矿+辉锑铅银矿+柱硫锑铅银矿+硫银锡矿+深红银矿+锑银矿(自然银)—纤硫锑铅矿+板硫锑铅矿+硫锑铅矿等(图 4i, 4j, 4l);(IV)晚期萤石—绢云母—碳酸盐阶段:为晚期低温热液矿物脉石矿物,如绢云母、萤石、绿泥石等,见少量低温硫锑铅矿。表生氧化期主要为铜钨氧化矿石,有孔雀石、铜蓝、雌黄、雄黄和高岭土等。

拜仁达坝矿床热液期成矿阶段划分为:(I)早期毒砂—黄铁石英阶段:矿化较弱,矿物组合为毒砂—黄铁矿—白铁矿—胶状黄铁矿—石英(图

4c<sub>2</sub>)。毒砂和黄铁矿被晚生交代溶蚀(图 4c<sub>2</sub>),黄铁矿可见明显的胶状结构;(II)磁黄铁矿—闪锌矿硫化物阶段:是锌的主成矿阶段,以磁黄铁矿大量出现为特征。矿物组合为磁黄铁矿—铁闪锌矿—黄铜矿(少),磁黄铁矿、闪锌矿和黄铜矿发育固溶体出溶结构(图 4e, 4g, 4h);(III)银多金属硫化物阶段:是该区最重要的银铅阶段,以方铅矿、银矿物、硫锑盐矿物为主,矿物组合为磁黄铁矿+闪锌矿+黝锡矿+黄铜矿—方铅矿+黝铜矿+银锑黝铜矿+黝锑银矿—脆硫锑铅矿+硫锑铅矿+纤硫锑铅矿等(图 4h, 4k);(IV)晚期萤石—云母—碳酸盐阶段:无矿化热液阶段,矿物组合为绢云母—萤石—方解石等脉石矿物,纤硫锑铅矿亦少量发育。表生氧化期主要为褐铁矿、孔雀石、铅矾和针铁矿等次生氧化矿物。

由图 5 可以看出拜仁达坝矿床中(I)和(II)阶段与维拉斯托矿床中(II)阶段相对应,矿石矿物种类和矿石结构相同,区别仅在于前者矿床中以铅锌成矿为主,后者矿床以铜锌成矿为主。刘翼飞等(2012)根据维拉斯托—拜仁达坝矿床的地质、同位素地质特征空间关系等特征,说明维拉斯托矿床可能是该地区成矿系统中中等偏高温度的成矿端元。结合上述关于 2 个矿床的成矿阶段的划分,可从侧面反映出 2 个矿床可能为同一成矿体系的不同部分,

分别为此体系的高—中温和中—低温的2个端员。

### 3 样品的采集和分析测试方法

本次研究所取样品分别来自维拉斯托矿床主矿体1号脉以及西北部121号矿体,拜仁达坝东西2个矿区的主矿脉1号和3号矿脉。对不同阶段矿石矿物组合,分别进行取样。首先将样品磨制成标准探针片,通过偏光显微镜对探针片进行详细的矿相学观察,大致查明样品的矿物组成、共生关系和生成顺序;然后将探针片表面镀碳,于长安大学成矿作用及其动力学开放研究实验室进行SEM-EDS和EPMA分析。SEM-EDS分析(包括背散射扫描(BSE)和元素能谱面扫描(X-ray mapping)所用仪器为JEOL JSM-35CF环境扫描电子显微镜,实验条件为电压20 kV,束斑直径小于1  $\mu\text{m}$ ,元素能谱面扫描为单幅8帧。EPMA分析所用仪器为JEOL JXA-8100电子显微探针仪,实验条件为加速电压20 kV,电流20 nA,束斑直径5  $\mu\text{m}$ ,束流范围 $10^{-6}\sim 10^{-12}$ ,电子图像放大倍数:40~ $10^6$ ,元素探测:Be<sup>4</sup>-U<sup>92</sup>;定量分析精度:含量>5%时优于1%,含量1%~5%时优于5%;总量为 $100\pm 1.5\%$ ,电子图像分辨率为6 nm。测试元素及所用标样为Fe(FeS)、Cu(Cu)、Pb(PbS)、Zn(ZnS)、S(FeS)、As(KAs)、Sb(Sb)、Cd(CdS)、Bi(Bi)、Sn(Sn)、Co(Co)、Ni(Ni)和Ag(Ag)。

### 4 测试结果和分析

维拉斯托和拜仁达坝矿床中各种矿物的电子探针数据结果详见表1。2个矿床矿物组合主要差异:维拉斯托发育高温钨锡矿物,拜仁达坝矿床发育典型的低温硫锑矿物,根据矿物的生成温度和组分特征,具体分为以下5类。

#### 4.1 早期高温矿物+砷硫化物类

仅分布在维拉斯托矿床(I)高温钨锡多金属石英阶段,高温矿物有黑钨矿、白钨矿、锡石,砷硫化物有斜方砷铁矿、自然铋、辉钼矿、辉铋矿等。

(1)黑钨矿—白钨矿—锡石:[ $(\text{Fe}_{0.813}, \text{Mn}_{0.271})\text{WO}_4\text{-Ca}_{1.117}\text{WO}_4$ ](图4a,4b<sub>1</sub>;表1-1,2,3,4,5,6)黑钨矿因铁含量较高,主要为钨锰铁矿,呈粗大晶体,一般为板状自形晶;白钨矿[ $\text{Ca}(\text{WO}_4)$ ]切面呈菱形或棱柱形自形晶,黑钨矿沿白钨矿晶隙间充填交代,

但成分中含有部分锡;锡石,可见明显的自形晶颗粒或簇状集合体,被毒砂交代形成溶蚀边;常见黑钨矿、白钨矿、砷铁矿、锡石共生,同时与毒砂、斜方砷铁矿和辉铋矿等伴生。

(2)斜方砷铁矿:[ $\text{FeAs}_{1.94}$ ](图4a,4b<sub>1</sub>;表1-7,8),主要呈柱状自形晶,主要与黑钨矿和白钨矿伴生,另见少量被黄铁矿和毒砂交代的他形斜方砷铁矿。

(3)辉钼矿—铋矿物:[ $\text{Bi}_2\text{S}_3(\text{Bi}_2\text{O}_3)$ ](图4b<sub>1</sub>;表1-9,10,11)仅发育于早期钨锡成矿阶段,辉钼矿呈弯曲鳞片状、叶片状,具波状消光,可见解理。围岩蚀变见角岩化,主要有自然铋、黄铁矿、毒砂和辉铋矿等伴生矿物;铋矿物为辉铋矿—氧化铋—自然铋,辉铋矿呈粒状,包裹小点状自然铋,表面发育铋华。

#### 4.2 复硫化物类

主要为黄铁矿和毒砂,存在2个世代,分别产于早期钨锡成矿阶段和中期铜多金属硫化物—石英阶段。

(1)毒砂:[ $\text{FeAs}_{1.009}\text{S}_{0.961}\text{-FeAs}_{0.954}\text{S}_{1.011}$ ](图4c<sub>1</sub>,4d;表1-12,13,46,47),按成分和共生矿物分为2个世代,维拉斯托—拜仁达坝2个矿床毒砂成分差异较大,根据毒砂( $\text{FeAsS}$ )的标型矿物特征(赵珊茸等,2004),高温条件下As比S易进入矿物晶格,故 $\text{As/S}(\text{mol}\%)>1$ ,低温条件下则相反。以成分推测形成条件:维拉斯托早期毒砂的 $\text{As/S}(\text{mol}\%)>1$ ,说明其为较高温条件下形成,拜仁达坝毒砂 $\text{As/S}(\text{mol}\%)<1$ ,说明形成温度较低。

(2)黄铁矿族:[ $\text{FeS}_{1.955}\text{-FeS}_{1.14}$ 胶装黄铁矿](图4c<sub>1</sub>,4c<sub>2</sub>;表1-18~23,52~58)本矿田黄铁矿存在多种形态,黄铁矿—胶装黄铁矿。可见自形晶黄铁矿发育,或多被交代呈骸晶结构或他形晶,亦可见少量白铁矿;胶装黄铁矿发育明显的环带结构,环带从中心到边界Fe-S含量存在明显变化。根据内生条件和外生条件下生成的黄铁矿不同的Co/Ni比值可以确定黄铁矿的形成环境,其中沉积黄铁矿中 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})<1$ ,岩浆热液中 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})>1$ 。维拉斯托—拜仁达坝2个矿床黄铁矿—胶装黄铁矿中 $w(\text{Co})/w(\text{Ni})$ 均大于1,说明黄铁矿和胶装黄铁矿形成环境均为岩浆热液(韩吟文等,2003),说明胶装黄铁矿非原生热液沉积形成的矿物,而是受后期热液交代重结晶的产物,说明在早期黄铁矿形成后存在其他成矿热液叠加。

#### 4.3 简单硫化物类

主要有磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、黝锡矿、方

表 1 维拉斯托一拜仁达坝矿床矿石矿物成分电子探针数据

Table 1 EMP data of ore mineral from the Weilasituo and Bairendaba deposits

| 序号 | 矿物名称    | 样品编号     | O      | Mg     | Fe     | Ca    | Mn     | W      | Sn     | Co    | Ag     | Zn     | Sn     | Cd    | Sb     | Total   | 分子式                                                                                                   |
|----|---------|----------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|---------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 黑钨矿     | WL-65-1  | 20.71  | b. d.  | 14.39  | b. d. | 4.72   | 58.28  | b. d.  |       |        |        |        |       |        | 98.106  | (Fe <sub>0.813</sub> , Mn <sub>0.271</sub> )WO <sub>4</sub>                                           |
| 2  | 黑钨矿     | WL-65-2  | 20.97  | b. d.  | 14.32  | 0.05  | 4.75   | 59.23  | b. d.  |       |        |        |        |       |        | 99.323  | (Fe <sub>0.795</sub> , Mn <sub>0.269</sub> )WO <sub>4</sub>                                           |
| 3  | 白钨矿     | WL-31-1  | 22.38  | b. d.  | b. d.  | 15.21 | b. d.  | 62.45  | b. d.  |       |        |        |        |       |        | 100.037 | Ca <sub>1.117</sub> WO <sub>4</sub>                                                                   |
| 4  | 白钨矿     | WL-31-2  | 22.49  | 0.03   | b. d.  | 15.17 | b. d.  | 62.87  | b. d.  |       |        |        |        |       |        | 100.555 | Ca <sub>1.107</sub> WO <sub>4</sub>                                                                   |
| 5  | 锡石      | WL-33-1  | 21.66  | 0.03   | 0.06   | 4.62  | b. d.  | b. d.  | 73.37  |       |        |        |        |       |        | 99.733  | (CaO) <sub>0.186</sub> -SnO <sub>2</sub>                                                              |
| 6  | 锡石      | WL-33-2  | 22.01  | 0.05   | 0.03   | 4.68  | b. d.  | b. d.  | 74.00  |       |        |        |        |       |        | 100.762 | (CaO) <sub>0.187</sub> -SnO <sub>2</sub>                                                              |
| 序号 | 矿物名称    | 样品编号     | As     | Fe     | S      | Ni    | Pb     | Cu     | Bi     | Co    | Ag     | Zn     | Sn     | Cd    | Sb     | Total   | 分子式                                                                                                   |
| 7  | 斜方砷铁矿   | WL-33-5  | 71.750 | 27.640 | 0.304  | 0.007 | b. d.  | b. d.  | b. d.  | 0.109 | b. d.  | 0.011  | b. d.  | b. d. | b. d.  | 99.821  | FeAs <sub>1.935</sub> (S <sub>0.019</sub> )                                                           |
| 8  | 斜方砷铁矿   | WL-31-3  | 73.020 | 27.920 | 0.286  | 0.019 | b. d.  | 0.016  | b. d.  | 0.035 | 0.029  | b. d.  | 0.005  | b. d. | b. d.  | 101.330 | FeAs <sub>1.94</sub> (S <sub>0.02</sub> )                                                             |
| 9  | 辉铋矿     | WL-38-12 | 0.709  | 0.021  | 12.060 | 0.028 | 0.769  | b. d.  | 80.810 | 0.002 | 0.033  | 0.087  | b. d.  | b. d. | b. d.  | 94.519  | Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (-Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                                     |
| 10 | 自然铋     | WL-33-3  | 0.684  | 1.580  | 0.848  | b. d. | 0.740  | b. d.  | 96.010 | 0.039 | b. d.  | 0.009  | b. d.  | b. d. | b. d.  | 99.910  | Bi                                                                                                    |
| 11 | 自然铋     | WL-33-9  | 0.203  | 0.041  | b. d.  | b. d. | 0.181  | 0.032  | 91.790 | b. d. | 0.056  | 0.065  | b. d.  | b. d. | b. d.  | 92.367  | Bi(-Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                                                                  |
| 12 | 毒砂      | WL-33-8  | 45.980 | 33.970 | 18.730 | b. d. | 0.142  | b. d.  | b. d.  | 0.206 | 0.043  | 0.012  | 0.043  | 0.084 | b. d.  | 99.210  | FeAs <sub>1.009</sub> S <sub>0.961</sub>                                                              |
| 13 | 毒砂      | WL-38-11 | 43.860 | 34.260 | 19.880 | b. d. | 0.099  | 0.052  | b. d.  | 0.079 | b. d.  | 0.032  | b. d.  | 0.004 | b. d.  | 98.266  | FeAs <sub>0.954</sub> S <sub>1.011</sub>                                                              |
| 14 | 早一方铅锡矿  | WL-31-4  | b. d.  | 3.470  | 28.390 | b. d. | 0.029  | 29.740 | 0.038  | 0.001 | b. d.  | 10.960 | 25.330 | 0.011 | b. d.  | 97.970  | Cu <sub>2.194</sub> (Fe <sub>0.291</sub> , Zn <sub>0.786</sub> ) <sub>1.077</sub> SnS <sub>1.15</sub> |
| 15 | 早一方铅矿   | WL-31-5  | 0.032  | 0.042  | 12.140 | 0.014 | 85.010 | b. d.  | b. d.  | 0.031 | 0.404  | 0.001  | 0.040  | 0.353 | b. d.  | 98.066  | Pb <sub>1.08</sub> S(含 Ag)                                                                            |
| 16 | 浅色闪锌矿   | WL-33-7  | b. d.  | 0.615  | 32.560 | 0.015 | 0.161  | 0.030  | b. d.  | 0.002 | b. d.  | 65.000 | b. d.  | 0.691 | b. d.  | 99.074  | ZnS                                                                                                   |
| 17 | 浅色闪锌矿   | WL-10-3  | b. d.  | 2.400  | 33.920 | b. d. | 0.025  | 0.200  | b. d.  | 0.024 | b. d.  | 63.490 | b. d.  | b. d. | 0.030  | 100.089 | Zn <sub>0.92</sub> Fe <sub>0.04</sub> S                                                               |
| 18 | 黄铁矿     | WL-31-9  | 0.332  | 46.780 | 51.420 | 0.010 | 0.258  | 0.028  | b. d.  | 0.102 | 0.054  | 0.038  | b. d.  | b. d. | b. d.  | 99.022  | FeS <sub>2</sub>                                                                                      |
| 19 | 胶状黄铁矿   | WL-13-1  | 0.001  | 46.670 | 52.370 | 0.038 | 0.213  | 0.045  | b. d.  | 0.093 | 0.033  | 0.025  | b. d.  | b. d. | 0.030  | 99.517  | FeS <sub>1.955</sub>                                                                                  |
| 20 | 胶状黄铁矿   | WL-13-2  | b. d.  | 46.550 | 41.570 | 0.014 | b. d.  | 0.004  | b. d.  | 0.081 | b. d.  | 0.015  | 0.040  | 0.048 | b. d.  | 88.322  | FeS <sub>1.56</sub>                                                                                   |
| 21 | 胶状黄铁矿   | WL-13-3  | 0.035  | 46.630 | 51.290 | 0.006 | 0.296  | b. d.  | b. d.  | 0.079 | 0.021  | 0.014  | 0.012  | 0.011 | 0.011  | 98.404  | FeS <sub>1.916</sub>                                                                                  |
| 22 | 胶状黄铁矿   | WL-13-4  | 0.119  | 50.580 | 33.150 | 0.010 | 0.232  | 0.033  | b. d.  | 0.074 | b. d.  | b. d.  | b. d.  | b. d. | 0.024  | 84.222  | FeS <sub>1.14</sub>                                                                                   |
| 23 | 胶状黄铁矿   | WL-13-5  | 0.055  | 46.740 | 51.360 | b. d. | b. d.  | 0.045  | b. d.  | 0.085 | b. d.  | 0.020  | b. d.  | b. d. | 0.160  | 98.466  | FeS <sub>1.914</sub>                                                                                  |
| 24 | 铁闪锌矿    | WL-54-4  | b. d.  | 10.400 | 34.040 | 0.012 | 0.005  | b. d.  | b. d.  | b. d. | b. d.  | 55.250 | 0.093  | b. d. | 0.034  | 99.834  | Zn <sub>0.796</sub> Fe <sub>0.175</sub> S                                                             |
| 25 | 铁闪锌矿    | WL-57-3  | 0.089  | 10.450 | 33.520 | 0.014 | 0.195  | b. d.  | b. d.  | 0.019 | b. d.  | 54.520 | 0.014  | b. d. | b. d.  | 98.820  | Zn <sub>0.798</sub> Fe <sub>0.179</sub> S                                                             |
| 26 | 磁黄铁矿    | WL-9-2   | b. d.  | 60.130 | 39.890 | 0.040 | 0.112  | 0.061  | b. d.  | 0.093 | b. d.  | 0.008  | 0.100  | 0.022 | b. d.  | 100.456 | Fe <sub>0.865</sub> S                                                                                 |
| 27 | 磁黄铁矿    | WL-5-5   | b. d.  | 60.960 | 38.010 | 0.018 | 0.122  | b. d.  | b. d.  | 0.114 | 0.005  | b. d.  | b. d.  | 0.018 | b. d.  | 99.247  | Fe <sub>0.920</sub> S                                                                                 |
| 28 | 黄铜矿     | WL-11-12 | 0.020  | 28.800 | 32.220 | b. d. | 2.690  | 32.920 | b. d.  | 0.030 | 1.850  | 0.330  | b. d.  | b. d. | 1.150  | 100.010 | CuFeS <sub>2</sub>                                                                                    |
| 29 | (Ag)黄铜矿 | WL-55-3  | 0.008  | 24.700 | 31.270 | 0.026 | 0.197  | 29.140 | b. d.  | 0.030 | 9.630  | 0.315  | b. d.  | b. d. | 3.160  | 98.475  | Cu <sub>0.94</sub> Fe <sub>0.908</sub> Ag <sub>0.180</sub> Sb <sub>0.06</sub> S <sub>2</sub>          |
| 30 | 方铅矿     | WL-54-1  | b. d.  | 0.035  | 12.610 | b. d. | 86.660 | 0.015  | b. d.  | 0.003 | 0.277  | 0.516  | 0.004  | 0.453 | 0.263  | 100.837 | PbS(含 Ag, Zn, Cd)                                                                                     |
| 31 | (Ag)方铅矿 | WL-57-5  | b. d.  | b. d.  | 13.500 | 0.016 | 79.350 | 0.038  | b. d.  | 0.029 | 3.600  | b. d.  | b. d.  | 0.195 | 3.960  | 100.688 | Pb <sub>0.91</sub> Ag <sub>0.08</sub> Sb <sub>0.08</sub> S                                            |
| 32 | 含银黝铜矿   | WL-10-1  | 2.430  | 2.350  | 24.200 | 0.037 | b. d.  | 36.680 | 3.850  | 0.004 | 1.920  | 4.960  | b. d.  | b. d. | 21.350 | 97.780  | (Cu, Ag) <sub>10.037</sub> (Fe, Zn) <sub>2</sub> (As, Sb) <sub>3.815</sub> S <sub>12.733</sub>        |
| 33 | 含银黝铜矿   | WL-10-2  | 3.410  | 2.460  | 24.950 | 0.019 | 0.009  | 37.270 | 4.030  | b. d. | 1.870  | 4.800  | b. d.  | b. d. | 20.260 | 99.078  | (Cu, Ag) <sub>10.243</sub> (Fe, Zn) <sub>2</sub> (As, Sb) <sub>3.922</sub> S <sub>13.200</sub>        |
| 34 | 辉锑铅银矿   | WL-54-2  | 0.060  | 0.082  | 17.790 | b. d. | 30.720 | 0.002  | b. d.  | 0.018 | 23.560 | 0.404  | b. d.  | b. d. | 27.990 | 100.625 | Ag <sub>2.96</sub> Pb <sub>2</sub> Sb <sub>0.11</sub> S <sub>7.52</sub>                               |
| 35 | 辉锑铅银矿   | WL-57-1  | 0.105  | b. d.  | 17.870 | b. d. | 30.550 | b. d.  | b. d.  | b. d. | 23.790 | 0.002  | b. d.  | b. d. | 27.290 | 99.607  | Ag <sub>3.01</sub> Pb <sub>2</sub> Sb <sub>3.1</sub> S <sub>7.61</sub>                                |

续表 1

| 序号 | 矿物名称    | 样品编号    | As     | Fe     | S      | Ni    | Pb     | Cu     | Bi    | Co    | Ag     | Zn     | Sn     | Cd    | Sb     | Total   | 分子式                                                                                              |
|----|---------|---------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 36 | 黝锡银矿    | WL-11-1 | 0.190  | 4.690  | 20.100 | b, d  | 0.240  | 13.100 | b, d  | b, d  | 34.020 | 1.230  | b, d.  | b, d. | 26.420 | 100.010 | Ag <sub>3.07</sub> Cu <sub>2.00</sub> (Fe, Zn)(As, Sb) <sub>2.11</sub> S <sub>8.09</sub>         |
| 37 | 黝锡银矿    | WL-11-7 | b, d   | 4.570  | 20.030 | b, d  | 0.242  | 13.630 | 0.050 | 0.036 | 33.700 | 1.700  | b, d.  | b, d. | 26.150 | 100.108 | Ag <sub>2.90</sub> Cu <sub>1.99</sub> (Fe, Zn)(As, Sb) <sub>1.99</sub> S <sub>5.79</sub>         |
| 38 | 黝锡银矿    | WL-57-2 | 0.034  | 4.100  | 18.550 | b, d  | 18.990 | 10.400 | b, d  | 0.015 | 28.190 | 0.696  | b, d.  | b, d. | 20.780 | 101.755 | Ag <sub>2.90</sub> Cu <sub>1.99</sub> (Fe, Pb)(As, Sb) <sub>1.99</sub> S <sub>5.79</sub>         |
| 39 | 硫银锡矿    | WL-11-2 | 0.057  | 0.041  | 18.310 | b, d  | 0.316  | 0.149  | b, d  | b, d  | 67.810 | 0.079  | 11.960 | b, d. | b, d.  | 98.723  | Ag <sub>48.085</sub> Sn <sub>7.711</sub> S <sub>13.7</sub>                                       |
| 40 | 黝锡矿     | WL-55-5 | 0.077  | 12.400 | 29.090 | 0.009 | 0.026  | 29.010 | b, d  | b, d  | 0.709  | 1.020  | 25.840 | b, d. | b, d.  | 98.181  | Cu <sub>2.097</sub> Fe <sub>1.02</sub> SnS <sub>1.168</sub>                                      |
| 41 | 深红银矿    | WL-11-3 | b, d   | b, d   | 16.880 | b, d  | 0.089  | 0.010  | b, d  | 0.026 | 58.590 | 0.336  | b, d.  | b, d. | 21.490 | 97.421  | Ag <sub>2.98</sub> SbS <sub>3.08</sub>                                                           |
| 42 | 深红银矿    | WL-55-4 | 0.121  | 0.093  | 16.570 | 0.008 | 0.152  | 0.183  | b, d  | 0.024 | 58.080 | b, d.  | b, d.  | b, d. | 23.310 | 98.540  | Ag <sub>2.70</sub> SbS <sub>2.81</sub>                                                           |
| 43 | 柱硫锑银矿   | WL-57-4 | 0.114  | 0.036  | 16.800 | 0.006 | 44.350 | b, d.  | b, d  | b, d  | 18.330 | 0.015  | b, d.  | b, d. | 20.900 | 100.553 | PbAgSbS <sub>3</sub>                                                                             |
| 44 | 硫锑铅矿    | WL-69-5 | 0.125  | 0.099  | 17.470 | b, d  | 54.600 | 0.059  | b, d  | b, d  | 0.021  | 0.111  | b, d.  | 0.185 | 24.350 | 97.020  | Pb <sub>5</sub> Sb <sub>1</sub> S <sub>11</sub>                                                  |
| 45 | 硫锑铅矿    | WL-69-6 | 0.101  | 0.612  | 17.740 | b, d  | 54.730 | 0.169  | b, d  | 0.008 | b, d   | b, d.  | b, d.  | 0.230 | 25.440 | 99.030  | Pb <sub>5</sub> Sb <sub>1</sub> S <sub>11</sub>                                                  |
| 46 | 毒砂      | BR-4-9  | 44.870 | 34.830 | 20.820 | b, d  | b, d   | 0.026  | b, d  | 0.099 | b, d   | 0.041  | b, d.  | b, d. | 0.212  | 100.897 | FeAsS                                                                                            |
| 47 | 毒砂      | BR-7-5  | 44.030 | 35.230 | 20.130 | b, d  | 0.145  | 0.004  | b, d  | 0.047 | b, d   | 0.028  | 0.005  | b, d. | 0.076  | 99.696  | FeAsS                                                                                            |
| 48 | 磁黄铁矿    | BR-41-1 | 0.038  | 59.080 | 39.020 | b, d  | 0.154  | 0.001  | b, d  | 0.102 | 0.010  | 0.046  | b, d.  | b, d. | 0.062  | 98.514  | Fe <sub>0.869</sub> S                                                                            |
| 49 | 磁黄铁矿    | BR-4-1  | b, d   | 47.120 | 52.580 | b, d. | 0.060  | b, d   | b, d  | 0.060 | b, d.  | 0.160  | 0.010  | b, d. | b, d.  | 99.980  | Fe <sub>0.896</sub> S(出溶物)                                                                       |
| 50 | 磁黄铁矿    | BR-4-2  | b, d   | 59.960 | 39.100 | 0.044 | 0.112  | b, d   | b, d  | 0.128 | 0.003  | 1.090  | 0.022  | 0.014 | 0.041  | 100.514 | Fe <sub>0.880</sub> S                                                                            |
| 51 | 铁闪锌矿    | BR-4-3  | b, d   | 10.130 | 33.230 | b, d  | 0.275  | 0.004  | b, d  | 0.047 | b, d   | 54.870 | b, d.  | 0.007 | 0.038  | 98.600  | Zn <sub>0.810</sub> Fe <sub>0.175</sub> S                                                        |
| 52 | 黄铁矿     | BR-7-6  | 0.005  | 44.800 | 49.190 | 0.010 | 0.119  | 0.003  | b, d  | 0.099 | 0.026  | 0.104  | b, d.  | b, d. | 0.069  | 94.424  | FeS <sub>1.913</sub>                                                                             |
| 53 | 黄铁矿     | BR-7-4  | b, d   | 46.860 | 52.710 | b, d  | 0.100  | 0.010  | b, d  | 0.057 | 0.012  | 0.012  | 0.013  | 0.035 | 0.001  | 99.809  | FeS <sub>2</sub>                                                                                 |
| 54 | 胶状黄铁矿   | BR-4-4  | b, d   | 46.340 | 51.560 | b, d  | 0.117  | b, d   | b, d  | 0.079 | 0.040  | 0.045  | 0.012  | 0.030 | b, d.  | 98.222  | FeS <sub>1.94</sub>                                                                              |
| 55 | 胶状黄铁矿   | BR-4-5  | b, d   | 45.680 | 49.040 | b, d  | 0.128  | b, d   | b, d  | 0.049 | 0.046  | 0.066  | b, d.  | b, d. | b, d.  | 95.010  | FeS <sub>1.87</sub>                                                                              |
| 56 | 胶状黄铁矿   | BR-4-6  | b, d   | 46.510 | 50.580 | 0.010 | 0.137  | b, d   | b, d  | 0.076 | 0.003  | b, d.  | b, d.  | b, d. | 0.045  | 97.361  | FeS <sub>1.89</sub>                                                                              |
| 57 | 胶状黄铁矿   | BR-4-7  | 0.022  | 45.730 | 50.770 | 0.010 | 0.098  | b, d   | b, d  | 0.068 | b, d   | 0.051  | b, d.  | b, d. | 0.060  | 96.808  | FeS <sub>1.93</sub>                                                                              |
| 58 | 胶状黄铁矿   | BR-4-8  | 0.003  | 46.030 | 51.680 | b, d  | 0.104  | 0.049  | b, d  | 0.089 | 0.007  | 0.058  | b, d.  | b, d. | 0.015  | 98.036  | FeS <sub>1.95</sub>                                                                              |
| 59 | 黄铜矿     | BR-36-4 | b, d   | 30.390 | 34.300 | b, d  | 0.209  | 34.720 | b, d  | 0.036 | 0.037  | 0.003  | 0.232  | b, d. | b, d.  | 99.927  | CuFeS <sub>2</sub>                                                                               |
| 60 | (Ag)黄铜矿 | BR-13-4 | b, d.  | 28.470 | 33.350 | 0.020 | 0.130  | 31.740 | b, d  | 0.080 | 6.530  | 0.100  | 0.150  | 0.060 | 0.030  | 100.660 | Cu <sub>0.881</sub> Fe <sub>0.900</sub> Ag <sub>0.107</sub> S <sub>2</sub>                       |
| 61 | 黝锡矿     | BR-14-2 | b, d   | 11.990 | 30.180 | 0.030 | 0.330  | 30.150 | b, d  | 0.020 | 1.810  | 0.670  | 25.230 | 0.060 | b, d.  | 100.460 | Cu <sub>2.016</sub> (Fe <sub>0.912</sub> Zn <sub>0.044</sub> )Sn <sub>0.903</sub> S <sub>1</sub> |
| 62 | 方铅矿     | BR-41-3 | b, d   | 12.320 | 29.720 | b, d  | 0.251  | 29.200 | b, d  | 0.064 | 0.049  | 2.100  | 26.670 | b, d. | b, d.  | 100.374 | Cu <sub>1.983</sub> (Fe <sub>0.952</sub> Zn <sub>0.138</sub> )Sn <sub>0.969</sub> S <sub>1</sub> |
| 63 | 方铅矿     | BR-41-4 | 0.010  | b, d   | 12.660 | 0.008 | 86.010 | 0.017  | b, d  | b, d  | 0.206  | b, d.  | 0.053  | 0.102 | 0.110  | 99.176  | PbS                                                                                              |
| 64 | 银锑黝铜矿   | BR-10-1 | 0.196  | 5.710  | 23.660 | b, d  | 0.072  | 27.280 | 0.143 | b, d. | 15.560 | 2.010  | b, d.  | b, d. | 26.870 | 101.501 | (Cu, Ag) <sub>10.10</sub> (Fe, Zn) <sub>2.35</sub> (As, Sb) <sub>3.93</sub> S <sub>13</sub>      |
| 65 | 银锑黝铜矿   | BR-38-2 | 0.136  | 5.120  | 22.850 | b, d  | 0.143  | 23.830 | b, d  | b, d. | 19.120 | 1.430  | b, d.  | b, d. | 27.310 | 99.939  | (Cu, Ag) <sub>10.07</sub> (Fe, Zn) <sub>2.06</sub> (As, Sb) <sub>4.12</sub> S <sub>13</sub>      |
| 66 | 黝锡银矿    | BR-14-1 | 0.023  | 5.600  | 21.820 | b, d  | 1.050  | 20.990 | b, d  | b, d. | 22.520 | 0.458  | b, d.  | 0.132 | 27.100 | 99.692  | (Ag, Cu) <sub>10.30</sub> (Fe, Zn) <sub>2.15</sub> (As, Sb) <sub>4.25</sub> S <sub>13</sub>      |
| 67 | 黝锡银矿    | BR-41-2 | 0.104  | 5.610  | 22.350 | b, d  | 0.205  | 21.180 | 0.007 | 0.011 | 23.360 | 0.956  | b, d.  | 0.057 | 27.920 | 101.760 | (Ag, Cu) <sub>10.25</sub> (Fe, Zn) <sub>2.16</sub> (As, Sb) <sub>4.3</sub> S <sub>13</sub>       |
| 68 | 黝锡银矿    | BR-13-3 | 0.144  | 8.320  | 22.690 | 0.012 | 0.056  | 21.340 | b, d. | b, d. | 23.240 | 0.718  | b, d.  | 0.123 | 23.110 | 99.753  | (Ag, Cu) <sub>10.124</sub> (Fe, Zn) <sub>2.94</sub> (As, Sb) <sub>3.48</sub> S <sub>13</sub>     |
| 69 | 脆硫锑铅矿   | BR-38-1 | 0.154  | 2.590  | 20.450 | 0.011 | 39.260 | 0.021  | b, d. | b, d. | b, d.  | 0.056  | b, d.  | 0.117 | 34.980 | 97.639  | Pb <sub>2</sub> Pb <sub>2</sub> FeSb <sub>8</sub> S <sub>14</sub>                                |
| 70 | 脆硫锑铅矿   | BR-38-3 | 0.111  | 2.560  | 20.970 | 0.001 | 40.130 | 0.020  | b, d. | b, d. | b, d.  | b, d.  | b, d.  | 0.130 | 35.580 | 99.501  | Pb <sub>2</sub> Pb <sub>2</sub> FeSb <sub>8</sub> S <sub>14</sub>                                |
| 71 | 斜辉锑铅矿   | BR-36-2 | 0.099  | 0.023  | 16.890 | b, d. | 60.640 | 1.150  | b, d. | b, d. | b, d.  | 0.003  | b, d.  | 0.289 | 19.960 | 99.054  | Pb <sub>113</sub> CuSb <sub>7</sub> S <sub>24</sub>                                              |

注:单位为 wt.%; WL 代表维拉斯托矿床样品数据; BR 代表拜仁达坝矿床样品数据; b, d. 表示低于检测限的元素含量。

铅矿等。

(1)磁黄铁矿： $[\text{Fe}_{0.896}\text{S}-\text{Fe}_{0.865}\text{S}]$ (表 1-26, 27, 48-50)主要与闪锌矿共生，多为他形粒状集合体(图 4c<sub>1</sub>, 4c<sub>2</sub>)，其次呈乳滴状和板状自形晶分布于闪锌矿中(图 4e)，亦可见板状自形晶分布于方铅矿和闪锌矿边界。磁黄铁矿中 Fe/S(mol%)比值变化较大，据此可以推测其晶体形态并得到形成温度，其中他形 Fe/S(mol%)=0.865~0.874，他形磁黄铁矿为 320℃ 以下的低温单斜晶系变体，闪锌矿中出溶的磁黄铁矿 Fe/S(mol%)=0.892~0.896，出溶磁黄铁矿为 320℃ 以上六方晶系变体(相当于  $\text{FeS}-\text{Fe}_7\text{S}_8$ ) (周喜文和李宪洲, 2001)。此标型温度指示磁黄铁矿—闪锌矿形成阶段成矿在 300℃ 左右。磁黄铁矿中见闪锌矿和黝锡矿 2 种出溶物(图 4f)，另见磁黄铁矿多被黄铜矿、方铅矿溶蚀交代。

(2)闪锌矿： $[\text{Zn}_{0.92}\text{Fe}_{0.04}\text{S}-\text{Zn}_{0.796}\text{Fe}_{0.175}\text{S}]$ (表 1-16, 17, 24, 25, 51)存在浅色和深色 2 个世代，维拉斯托矿床 2 种均发育，拜仁达坝仅发育深色。早期钨锡成矿阶段闪锌矿为浅褐色，呈他形粒状集合体，偶见明显的环带结构， $w(\text{Fe})=0.615\%\sim2.400\%$ ，说明成矿温度较低，为浅色闪锌矿(图 4b<sub>2</sub>)；中晚期闪锌矿为深黑色， $w(\text{Fe})=8.22\%\sim12.31\%$ ，为铁闪锌矿，可见黝锡矿、黄铜矿及磁黄铁矿在闪锌矿主晶中呈出溶结构(图 4d, 4e, 4g)，亦可见闪锌矿出溶物分布在磁黄铁矿和黄铜矿中(图 4f)。

(3)黝锡矿(方黝锡矿)： $[\text{Cu}_{2.194}(\text{Fe}_{0.291}, \text{Zn}_{0.786})_{1.077}\text{SnS}_{4.15}, \text{Cu}_{2.016}(\text{Fe}_{0.912}, \text{Zn}_{0.044})\text{Sn}_{0.903}\text{S}_4]$ (图 4b<sub>2</sub>；表 1-14, 40, 61)为早期钨锡成矿阶段和中晚期多金属硫化物阶段均发育，土黄色，细粒他形集合体，中晚期在闪锌矿和黄铜矿呈乳浊状结构，其中与闪锌矿共生的黝锡矿富 Zn。

(4)黄铜矿： $[\text{CuFeS}_2-\text{Cu}_{0.881}\text{Fe}_{0.900}\text{Ag}_{0.107}\text{S}_2]$ (表 1-28, 29, 59, 60)主发育于多金属硫化物阶段，他形粒状集合体，黄铜矿呈出溶结构分布于闪锌矿中(图 4d, 4e)，同时见黄铜矿中黝锡矿—闪锌矿出溶物(图 4f)，另见黄铜矿脉状穿插闪锌矿(图 4g)。2 个矿床中均发育富 Ag 黄铜矿，含 Ag 分别为 9.53% 和 6.53%。

(5)方铅矿： $[\text{PbS}-\text{Pb}_{0.91}\text{Ag}_{0.08}\text{S}]$ (表 1-15, 30, 31, 63)据伴生矿物和成分分为 2 个世代，维拉斯托矿床早期高温钨锡阶段和晚期银成矿阶段的方铅矿 Ag 均较低，但发育柱硫锑铅银矿的方铅矿中含 Ag 3.6%，晚期方铅矿与多种银矿物和硫锑矿物伴生(图 4h, 4i)。

4.4 银矿物+硫锑盐矿物

维拉斯托—拜仁达坝矿床晚期均存在中低温银多金属硫化物阶段，对应的银矿物和硫盐矿物种类存在异同。维拉斯托矿床中晚期矿物组合为：含银黝铜矿+银锑黝铜矿+黝锑银矿+辉锑铅银矿+柱硫锑铅银矿+硫银锡矿+深红银矿+锑银矿(自然银)—纤硫锑铅矿+板硫锑铅矿+硫锑铅矿—纤硫锑铅矿+硫锑铅矿；拜仁达坝矿床矿物组合为银锑黝铜矿+黝锑银矿—脆硫锑铅矿+纤硫锑铅矿+斜辉锑铅矿。2 个矿床发育最多的银矿物均为银锑黝铜矿和黝锑银矿，占主要银矿物为 70% 左右。根据矿物种类进行分述如下。

(1)银锑黝铜矿类： $[(\text{Cu}, \text{Ag})_{10}(\text{Fe}, \text{Zn})_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}]$ 根据 Ag-Cu 含量分为含银锑黝铜矿—银锑黝铜矿—黝锑银矿，含银锑黝铜矿中 Ag 1.87%~1.92%(表 1-32, 33)，银锑黝铜矿中 Ag 15.56%~19.12%，达到银锑黝铜矿中 Ag 的最高含量。3 种矿物特征相近，仅 Ag 含量差别。含银锑黝铜矿—银锑黝铜矿—黝锑银矿产于维拉斯托矿床多金属银矿物阶段，拜仁银矿物为银锑黝铜矿—黝锑银矿。

黝锑银矿： $[(\text{Ag}, \text{Cu})_{10.30}(\text{Fe}, \text{Zn})_{2.15}(\text{As}, \text{Sb})_{4.25}\text{S}_{13}]$ (表 1-36~38, 66~68)，与银锑黝铜矿为等结构矿物，区别在于银锑黝铜矿中 Ag 小于 20%，黝锑银矿中 Ag 大于 20%(颜文等, 1994)。镜下可见明显的淡橄榄绿灰色、淡黄绿色，常分布在方铅矿中呈不混溶包裹物同时亦包裹方铅矿的细小颗粒(图 4h, 4i, 4j；图 6a, 6b, 6c)，类似出溶结构，含 Ag 34.02%~28.19%。

银锑黝铜矿： $[(\text{Cu}, \text{Ag})_{10.07}(\text{Fe}, \text{Zn})_{2.06}(\text{As}, \text{Sb})_{4.12}\text{S}_{13}]$ (表 1-64, 65)，反射色为灰白带橄榄褐色，主要以不规则他形粒状集合体形式产出，且以大小不等的不混溶包裹物单独或成群的嵌布于方铅矿等硫化物中(图 4k, 图 6d)，与其他银矿物共生。

(2)辉锑铅银矿： $[\text{Ag}_{3.01}\text{Pb}_2\text{Sb}_{3.1}\text{S}_{7.61}]$ (表 1-34, 35)，含 Ag 23.56%~23.79%，仅分布在维拉斯托矿床，反射率与方铅矿相近偏低，反射色为白色带奶油色，具显著多色性，常呈他形粒状结合体，多与黝锑银矿共生连晶(图 4i, 图 6a)。伴生矿物有方铅矿、黝铜矿、闪锌矿和硫锑铅矿等银—铅复硫盐。

(3)柱硫锑铅银矿： $[\text{AgPbSbS}_3]$ (图 4i；表 1-43)，含 Ag 18.33%，仅分布在维拉斯托矿床，常呈柱状集合体，多在方铅矿中形成细小的不混溶体，属于固溶体分离结构。

(4)硫银锡矿： $[\text{Ag}_8\text{SnS}_6]$ (图 6b；表 1-39)，含

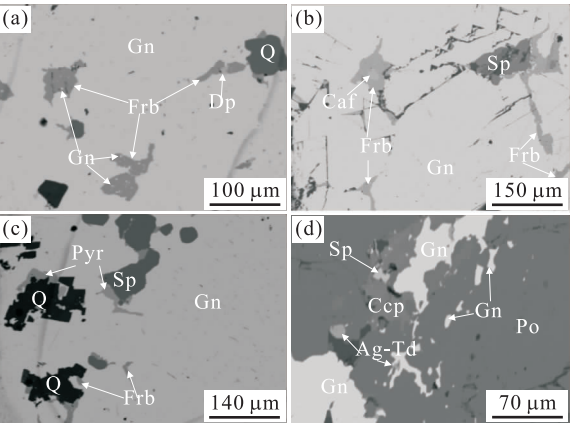


图 6 主要银矿物的背散射电子图像

Fig. 6 BSE images of the main silver minerals  
a. (WL-11)辉锑铅银矿和黝锑银矿呈不规则状分布在方铅矿中,黝锑银矿中方铅矿的不混溶包裹物;b. (WL-11)黝锑银矿包裹硫锑银矿,呈不规则状分布;c. (WL-11)深红银矿和黝锑银矿分布在方铅矿与石英边界;d. (BR-13)银黝铜矿分布在黄铜矿和方铅矿边界;CaF. 硫锑银矿,其他矿物代号同图 4

Ag 67.81%,仅分布于维拉斯托矿床,灰白色带粉棕色,不显多色性,为本矿床发现的唯一的富 Sn 的银矿物,被黝锑银矿包裹。

(5)深红银矿: $[Ag_3SbS_3]$ (表 1-41,42),含 Ag 58.08%~58.59%,仅分布于维拉斯托矿床,但前人研究拜仁达坝矿床亦发育深红银矿(许怀凤,2004)以显著的蓝灰色反射色为特征,深红色内反射色,弱非均质性,呈不规则他形粒状集合体,多包含在方铅矿中,或产于方铅矿与其它矿物颗粒间(图 4j,图 6c),亦可见脉状深红银矿穿插交代闪锌矿,伴生矿物主要有硫锑铅矿、银锑黝铜矿等。

(6)锑银矿: $[Ag_3Sb]$ 六方锑银矿和锑银矿,以浑圆粒状或不规则粒状产出,分布较集中,常与金银矿伴生,与磁黄铁矿和闪锌矿关系较密切,粒度以细粒浸染为主(刘妍等,2011)。

(7)(针)硫锑铅矿—脆硫锑铅矿—斜辉锑铅矿: $[Pb_5Sb_4S_{11}-Pb_2Pb_2FeSb_6S_{14}-Pb_{13}CuSb_7S_{24}]$ (表 1-44,45;69,70)2 个矿区均发育,白色微带淡绿色,显多色性,强非均质性,晶体粗大呈纤维状、针状(图 4l),与脆硫锑铅矿构成连晶大量形成于晚期银成矿阶段和萤石绢云母阶段,可见针硫锑铅矿在可成矿流体硫逸度升高和还原作用时形成,代表还原环境(刘家军等,2010)。

脆硫锑铅矿:反射色白色微带绿黄色、暗绿、橄榄绿,显多色性,强非均质性。镜下多为放射性集合体,典型的伴生矿物为银锑黝铜矿,交代银锑黝铜矿

(图 4k)。  
斜辉锑铅矿:(表 1-71)仅在拜仁达坝矿床产出,白色带褐黄色色调,显多色性,强非均质性。可能是 Pb 的加入而使黝铜矿分解的产物,伴生矿物有方铅矿、银锑黝铜矿、黄铜矿等。

4.5 自然银和自然金

自然银常与相关银矿物伴生或被包裹在方铅矿中,在细脉浸染状矿石和脉石矿物中与自然金伴生(刘妍等,2011),自然金主要发育于维拉斯托矿床。

5 银赋存状态及成矿机理

5.1 成矿元素的相关性分析

根据 2 个矿床 1 号主矿体取样获得的成矿元素数据,进行成矿元素的相关性分析,其中主要成矿元素相关系数见图 7,特征如下:拜仁达坝矿床中 Ag、Pb、Cu 这 3 种元素呈密切正相关,对应矿石矿物主要为方铅矿—银锑黝铜矿—黝锑银矿等;Pb 与 Cu、Sb 相关性较好,对应矿物为硫锑铅矿和较多的方铅矿和黄铜矿共生;Au 与 Zn 密切正相关,其中铁闪锌矿中 Au 含量较高均超过 0.21%,可达 0.46%(刘翼飞,2009),矿床中 Au 与 Pb、Ag、Cu 等无相关性;维拉斯托矿床中 Ag 主要与 Cu 密切正相关,对应主要的矿物为含银黝铜矿—银锑黝铜矿—黝锑银矿类;Au 与 W 呈正相关关系,对应矿物为石英脉型钨锡矿物组合,推测 Au 可能主要赋存于石英脉型矿石中;同时维拉斯托矿床早期和中期闪锌矿中 Au 含量均较高,说明本矿床中 Au 存在 2 个不同的富集机制,其中第 2 种富集机制可能与拜仁达坝矿床相同。

值得注意的是,刘妍等(2011)提到维拉斯托矿床中自然金呈裂隙金赋存在石英等裂隙中,同时钟日晨等(2008)和刘翼飞(2009)电子探针显示硫化物中 Au 含量较高(磁黄铁矿、黄铁矿中 Au 在 0.15% 以上,铁闪锌矿中 Au 达到 0.46% 左右),但未观察到金矿物及相关包裹物,说明 Au 可能为  $\mu\text{m}$  或  $\text{nm}$  的包裹物。结合上文 2 个矿床以及与 Au 相关性较好的元素组合不同,说明 2 个矿床中 Au 赋存机制可能不同,其赋存状态需进一步研究,本文不做详细讨论。

5.2 银的赋存状态分析

一般矿床中,Ag 的载体矿物主要有方铅矿、黄铜矿、黝铜矿等硫化物,主要赋存形式有 3 种:①独立银矿物;② $\mu\text{m}$  甚至  $\text{nm}$  级的包裹银矿物,可能为

|    |      |      |      |      |      |      |      |       |       |    |      |      |      |       |       |       |       |       |       |       |
|----|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|    | Ag   | Pb   | Zn   | S    | Cu   | As   | Sb   | Bi    | Au    |    | Zn   | Cu   | Ag   | Pb    | W     | Co    | Au    | Cd    | In    | Ga    |
| Ag | 1.00 | 0.85 | 0.39 | 0.36 | 0.63 | 0.39 | 0.06 | -0.19 | 0.27  | Zn | 1.00 | 0.40 | 0.32 | -0.30 | -0.33 | -0.12 | -0.30 | 0.99  | 0.47  | 0.27  |
| Pb |      | 1.00 | 0.45 | 0.43 | 0.77 | 0.49 | 0.52 | 0.49  | 0.49  | Cu |      | 1.00 | 0.75 | -0.19 | -0.30 | 0.49  | -0.11 | 0.40  | 0.81  | 0.20  |
| Zn |      |      | 1.00 | 0.80 | 0.80 | 0.11 | 0.23 | 0.80  | 0.80  | Ag |      |      | 1.00 | 0.26  | -0.23 | 0.24  | -0.13 | 0.32  | 0.66  | 0.03  |
| S  |      |      |      | 1.00 | 0.34 | 0.15 | 0.02 | 0.15  | 0.15  | Pb |      |      |      | 1.00  | 0.10  | -0.15 | 0.06  | -0.29 | -0.22 | -0.12 |
| Cu |      |      |      |      | 1.00 | 0.44 | 0.07 | -0.07 | 0.24  | W  |      |      |      |       | 1.00  | -0.14 | 0.95  | -0.32 | -0.27 | -0.40 |
| As |      |      |      |      |      | 1.00 | 0.11 | -0.11 | 0.39  | Co |      |      |      |       |       | 1.00  | 0.05  | -0.08 | 0.07  | 0.02  |
| Sb |      |      |      |      |      |      | 1.00 | -0.14 | 0.46  | Au |      |      |      |       |       |       | 1.00  | -0.28 | -0.14 | -0.21 |
| Bi |      |      |      |      |      |      |      | 1.00  | -0.18 | Cd |      |      |      |       |       |       |       | 1.00  | 0.44  | 0.31  |
| Au |      |      |      |      |      |      |      |       | 1.00  | In |      |      |      |       |       |       |       |       | 1.00  | 0.13  |
|    |      |      |      |      |      |      |      |       |       | Ga |      |      |      |       |       |       |       |       |       | 1.00  |

图 7 维拉斯托—拜仁达坝矿床成矿元素相关系数矩阵

Fig. 7 Metallicelement correlation coefficients of Weilasituo and Bairendaba deposits

左图为拜仁达坝矿床 1 号矿体,数据引自王力和孙丰月,2008;右图为维拉斯托矿床 1 号矿体,数据引自内蒙古自治区克什克腾旗维拉斯托矿区铜锌多金属矿详查报告内蒙古自治区第九地质矿产勘查开发院,2003

出溶或者不混溶的细小银矿物包裹物;③类质同象,  $\text{Ag}^+$  可以与  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^+$  进行交代类质同象,但所要求的条件不同,其中  $\text{Ag}^+$  和  $\text{Pb}^{2+}$  的离子半径接近,但电价不平衡,在有  $\text{Sb}^{3+}$  ( $\text{Bi}^{3+}$ ) 电价补偿时,可形成类质同象,例如进入方铅矿中,存在反应  $\text{Ag}^+ + \text{Sb}^{3+} = 2\text{Pb}^{2+}$ , 形成类质同象(李九玲和李树岩, 1990;帅德全,1990),表现为一般类质同象的方铅矿和黄铜矿中除 Ag 外,有相当含量的 Sb(Bi) 存在. Ag 与 Cu 在同一副族中(ⅠB),化学性质相似,  $\text{Ag}^+$  可直接取代  $\text{Cu}^+$  进入铜矿物晶格中呈类质同象替代,如黝铜矿和黝锡矿可见晶格 Ag,当 Ag 达到一定程度可视为独立银矿物,如银锑黝铜矿和黝锑银矿.

维拉斯托—拜仁达坝矿床矿石中银的赋存形式主要有 3 种:①可见银矿物,为 2 个矿床中银的主要赋存形式,主要银矿物为银锑黝铜矿、黝锑银矿,其次为辉锑铅银矿、深红银矿、柱硫锑铅银矿、硫银锡矿、锑银矿、自然银等,其中可见银矿物主要分布在方铅矿、黄铜矿等不同硫化物的矿物边界或者内部,或者银矿物之间互相交代穿插,本文将银锑黝铜矿视为独立 Ag 矿物,不同于黝铜矿中含少量 Ag 的晶格 Ag;②Ag 以类质同象存在于硫化物中,主要为方铅矿、黄铜矿、黝锡矿、黝铜矿等,即 Ag 以离子置换的方式进入矿物晶格中,表现为电子探针显示了 Ag 存在,但未观察到银矿物及相关包裹物,其中方铅矿中 Ag 可达 3.600%~0.277% (Sb 为 3.960%~0.263%),黄铜矿中 Ag 为 9.63%~1.85% (Sb 为 3.16%~1.15%),黝锡矿中 Ag 为 1.81%~0.71%,含银黝铜矿中 Ag 为 1.87%~

1.92%;③ $\mu\text{m}$  甚至 nm 的银包裹物,2 个矿床方铅矿中均发育银矿物出溶结构,其中维拉斯托矿床出溶  $\mu\text{m}$  级柱硫锑铅银矿,主矿物方铅矿中 Ag 比一般方铅矿含类质同象 Ag 的含量更高,同时在光学显微镜高倍镜下可观察到非常细小的出溶物,推测其中存在更细小 nm 级银矿物,在现有普通光学显微镜下不易观察到(图 4i;表 1-43).

5.3 成矿条件分析

维拉斯托—拜仁达坝 2 个矿床的矿物组合存在大程度叠加,说明其在成因方面联系紧密. 不同的矿物组合反映不同的沉淀结晶环境和氧化还原条件,同时对应不同的元素变化体系. 其中不同成矿期和成矿阶段的矿物组合特征见图 8.

从早期到晚期,矿物组合从高温氧化物和钨酸盐—复硫化物—硫化物—低温含锑硫盐矿物(锑化物),亦存在不同的元素演化序列(图 8). 其中阴离子从  $[\text{WO}_4]^{2-}$ — $\text{O}^{2-}$ — $[\text{As}_2]^{2-}$ — $[\text{AsS}]^{2-}$ — $[\text{S}_2]^{2-}$ — $\text{S}^{2-}$ — $[\text{SbS}_3]^{3-}$ — $\text{Sb}^{3-}$ . 2 个矿床中 Sb 的价态存在明显的变化,其中 Sb 从银锑黝铜矿中的 +3 到锑银矿的 -3,说明整个成矿中晚期过程是一个从弱氧化到还原环境的转变.

根据前人(肖利梅,2005;刘翼飞,2009;王瑾等, 2010)对维拉斯托—拜仁达坝 2 个矿床流体包裹体成分的分析,成矿流体为低盐度的  $\text{CO}_2$ - $\text{CH}_4$ - $\text{H}_2\text{O}$  体系,其中包裹体气相成分主要是主要为  $\text{CH}_4$  和  $\text{CO}_2$ ,液相成分无  $\text{CO}_2$ ,且在早期石英流体包裹体气相中富集  $\text{CO}_2$ ,亦含有  $\text{CH}_4$ ,晚期的石英和萤石包裹体气相成分主要为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$ ,说明成矿早期  $\text{CO}_2$  是参与成矿物质运移,同时随着温度的下降,

| WL                                                                                | BR                                                                                | 矿物组合(化学式)                                                                                                                                                                                              | 矿物组合类型                 | 元素变化体系                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------|
|  |  | 黑钨矿-白钨矿-锡石(Fe,Mn)WO <sub>4</sub> -CaWO <sub>4</sub> -SnO <sub>2</sub>                                                                                                                                  | 高温钨酸盐及氧化物              | Mn-Fe-Sn-W-O                                             |
|                                                                                   |                                                                                   | 斜方砷铁矿-毒砂-黄铁矿-辉钼矿-<br>[浅色闪锌矿-黝锡矿(方铅矿)]<br>FeAs <sub>2</sub> -FeAsS-FeS <sub>2</sub> -MoS <sub>2</sub> -[ZnS-Cu <sub>2</sub> FeSnS <sub>4</sub> ]                                                        | 高(-中)温砷硫化物             | Fe-(Mo-Zn)-As-S                                          |
|                                                                                   |                                                                                   | [毒砂-黄铁矿(胶状黄铁矿&白铁矿)]-<br>磁黄铁矿-深色闪锌矿-黄铜矿(黝锡矿)<br>[FeAsS-FeS <sub>2</sub> ]-Fe <sub>1-x</sub> S-ZnS-CuFeS <sub>2</sub>                                                                                    | 中(-高)温硫化物为主,<br>砷硫化物次要 | Fe-Zn-Cu-S                                               |
|                                                                                   |                                                                                   | 方铅矿-辉银锑矿-深红银矿-黝锑银矿-银锑黝<br>铜矿-锑银矿-(针)硫锑铅矿-脆硫锑铅矿<br>PbS-(Cu, Ag) <sub>10</sub> (Fe, Zn) <sub>3</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>13</sub> -Ag <sub>3</sub> Sb-Pb <sub>3</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>11</sub> | 中-低温硫锑化物和锑<br>化物       | (Cu, Ag)(Zn, Fe)-<br>Sb-S→Ag-Pb-Sb-S<br>→Pb(Cu, Fe)-Sb-S |
|                                                                                   |                                                                                   | 低温硫锑盐矿物-绢云母-萤石                                                                                                                                                                                         | 低温脉石矿物                 |                                                          |

图 8 不同矿物组合特征及成矿条件特征

Fig. 8 The characteristics of different mineral associations and metallogenic conditions

线长度代表矿物组合发育阶段,粗细代表相对含量

CO<sub>2</sub> 含量逐渐减少直至无。根据早期的石英脉型高温黑钨矿—白钨矿—锡石矿物组合(图 3a, 3b)以及矿脉顶部可见大量的萤石和白云母发育的现象(图 3d, 3i),可推断早期成矿为相对富 CO<sub>2</sub> 的偏氧化—偏酸性的高温成矿环境;到中晚期 CO<sub>2</sub> 的含量急剧减少至无,流体 pH 值上升,流体环境从偏酸性变为偏碱性,同时大量硫化物和针硫锑铅矿—一块硫锑铅矿矿物出现,根据刘家军等(2010)对该矿床针硫锑铅矿的研究:针硫锑铅矿在 Pb-Sb 硫盐矿物系列中,一般为成矿晚期低温产物,其可通过流体中硫逸度升高和还原作用形成,说明中晚期成矿环境为中—低温高硫逸度—偏碱性—还原条件。

5.4 成矿机理探讨

在钨矿床中,W 在流体中受助溶剂 CO<sub>2</sub> 含量影响主要以钨酸、钨酸盐及其离解形式如 WO<sub>3</sub>Cl<sup>-</sup>、WO<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub><sup>2-</sup>、WO<sub>3</sub>F<sup>-</sup>、WO<sub>2</sub>F<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HWO<sub>4</sub><sup>-</sup>和 WO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等迁移。其中 CO<sub>2</sub> 作为助溶剂在成矿流体中的含量,随热液体系的压力变化;当含矿流体沿断裂上升至深大断裂进入开放状态的成矿环境,热液体系压力释放,温度下降,CO<sub>2</sub> 大量逸出,同时大气降水等的混合,引起流体体系温度、压力、f<sub>O<sub>2</sub></sub>和 f<sub>S<sub>2</sub></sub>等物理化学条件的改变,W、Sn 络合物发生化学解析过程,进而导致钨的快速沉淀,形成含钨石英脉型矿床(郑大忠和郑若锋,2008;王永强和赵俊哲,2008)。同时其他成矿金属元素主要呈易溶络合物的形式在热液中迁移,其中氯络合物和硫氢络合物是金属元素中 2 种最重要迁移的络合物形式。一般来说金属离子(Ag<sup>+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>等)在高温(>350 ℃)、氧化偏酸性条件下多以氯(氟)络合物形式存在并运移,而在

中—低温(350~150 ℃或 300 ℃以下)还原中性—偏碱性的环境中易形成硫氢络合物运移(Seward, 1976, 1984; Barnes, 1979; Giordano and Barnes, 1979; Hayashi *et al.*, 1990; Stefansson and Seward, 2003)。成矿流体演化和物理化学条件是决定矿物在成矿过程中先后沉淀的主要因素,当温度、压力和酸碱度等物化条件变化超出络合物稳定范围时,金属离子将以新络合物形式稳定存在或发生饱和而沉淀。

早期高温钨锡阶段:根据维拉斯托矿床早期典型的石英脉型矿体和黑钨矿—白钨矿—锡石矿物组合以及黑钨矿气化后的少量硫化物矿化,同时矿脉顶部可见大量的萤石和白云母发育,结合早期低盐度富 CO<sub>2</sub> 流体,可推断早期流体为相对富 F 的偏氧化—偏酸性的高温成矿环境。因此 W、Sn 等以钨酸、钨酸盐以及离解形式存在,如 WO<sub>2</sub>F<sub>4</sub><sup>2-</sup>、WO<sub>3</sub>F<sup>-</sup>、HWO<sub>4</sub><sup>-</sup>和 WO<sub>4</sub><sup>2-</sup>等,而 Fe<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>等金属离子以氟络合物进行迁移。成矿早期随温度降低和体系压力的变化,CO<sub>2</sub> 逸出导致早期黑钨矿、白钨矿等早期钨酸盐气化沉淀,同时热液环境条件的变化,促使 Fe<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>等金属离子的氟络合物解体,造成早期少量硫化物富集。

中期多金属硫化物阶段:根据该阶段阶段矿物组合生成顺序:毒砂—黄铁矿—磁黄铁矿—深色闪锌矿—黄铜矿,同时流体为低盐度富 H<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 还原性流体体系,成矿环境为中—低温高硫逸度—偏碱性—还原条件。因此本阶段主要金属离子 Fe<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cu<sup>+</sup>、Pb<sup>2+</sup>等以硫氢络合物离子团存在。随着成矿热液上移,温度进一步降低,硫逸度升

高,阳离子按亲硫性排列  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 、 $(\text{Cu}^{+})$   $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  并先后沉淀(韩吟文等,2003),其中  $\text{Fe}^{2+}$  最容易先与  $\text{AsS}_2^-$ 、 $\text{S}_2^{2-}$ 、 $\text{S}^{2-}$  结合形成毒砂、黄铁矿、磁黄铁矿,同时  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $(\text{Cu}^{+})$   $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  等络合物分解形成闪锌矿、黄铜矿(黝锡矿)、方铅矿等硫化物.以上硫化物大量沉淀导致成矿流体中  $\text{S}^{2-}$  等急剧减少,促使水解反应  $\text{HS}^- \rightleftharpoons \text{S}^{2-} + \text{H}^+$  向右进行.

晚期多金属银矿物阶段:根据矿物之间自然连生组合判定,2个矿床银矿物主要为富锑硫盐矿物,如银锑黝铜矿+黝锑银矿—辉银锑矿+深红银矿+柱硫锑铅银矿等.以上银矿物组合说明  $\text{Ag}^+$  除以硫氢络合物形式存在外,在成矿流体中亦可能以硫锑银络阴离子团或锑银络阴离子团等形式运移,例如  $[\text{AgS}]^-$ 、 $[\text{Ag}_3\text{Sb}]^0$ 、 $[\text{Ag}_2\text{Sb}]^-$ 、 $[\text{AgSbS}_2]^0$ 、 $[\text{AgSbS}_3]^{2-}$  等形式(帅德全,1990).本阶段在还原硫逸度继续升高环境下,当温度降低至 200℃ 时(高建京,2007;黄崇轲和朱裕生,2002), $\text{Ag}^+$  可与  $\text{Cu}^+$  进行类质同象,同时在有  $\text{Sb}^{3+}$  电价补偿的情况下, $\text{Ag}^+$  +  $\text{Sb}^{3+}$  可取代  $2\text{Pb}^{2+}$ ,在方铅矿或不同矿物的接触边界直接沉淀或交代早期硫化物(如黄铜矿等)形成大量独立银的硫盐矿物;较早银矿物形成为  $(\text{Cu}, \text{Ag})(\text{Zn}, \text{Fe})-(\text{Sb}, \text{As})-\text{S}$  体系,其中黝铜矿中  $\text{Cu}$  与  $\text{Ag}$  为类质同象的负相关关系(徐启东和周炼,2004),随着温度下降和成矿流体运移演化, $\text{Sb}$  增加,黝铜矿中  $\text{Ag}$  增加,依次形成含银黝铜矿(1.92%)—银锑黝铜矿(15.56%~19.12%)—黝锑银矿(23.16%~34.02%);随成矿流体中  $\text{Ag}$  增加  $\text{Cu}$  减少,演化至  $\text{Ag}-\text{Pb}-\text{Sb}-\text{S}$  体系,辉锑铅银矿—柱硫锑铅银矿—深红银矿依次从方铅矿的固溶体体系中以独立的锑硫盐形式出现;最后银矿物结晶后,成矿流体演化至低温  $\text{Pb}(\text{Cu}, \text{Fe})-\text{Sb}-\text{S}$  体系,形成以硫锑铅矿—脆硫锑铅矿等低温矿物组合.

前人对维拉斯托—拜仁达坝矿床的成因总体有 3 种观点:①与燕山期侵入岩体有关的浅成中低温热液脉状矿床;②沉积变质—中低温热液改造成因;③造山型矿床与中低温热液脉型矿床叠加成因.根据黄铁矿—胶状黄铁矿的标型特征,证明矿床为岩浆热液成因,而非沉积成因;同时结合成矿的构造背景,区域动力变质作用发生在成矿之前,说明本矿田为典型岩浆热液矿床,而非沉积热液叠加和造山热液叠加型矿床.维拉斯托—拜仁达坝 2 个矿床的成矿时代下限分别为  $133.4 \pm 0.8 \text{ Ma}$ (潘小菲等,2009)和  $135 \pm 3 \text{ Ma}$ (常勇和赖勇,2010),该地区距矿床最近的北大山岩体最晚岩浆作用时间为  $140 \pm$

$3 \text{ Ma}$ (刘翼飞,2009),说明 2 个矿床形成均与北大山岩体的岩浆作用有关,其为第①种与燕山期侵入岩体有关的浅成中低温热液脉状矿床.随着近年来维拉斯托矿床深部和西北部 121 号石英脉型钨锡矿体发现,结合 2 个矿床矿石组合及成矿元素分带特征(刘翼飞等,2012),说明 2 个矿床可能为同一矿化中心的不同温度端员,其中维拉斯托矿床发育高温钨锡矿化,以铜锌矿化为主,铅银矿化为辅,拜仁达坝矿床以铅锌银矿化为主,铜矿化为辅;说明维拉斯托 121 矿体(石英脉型钨锡矿体)可能为本矿田的高温端员,维拉斯托钨铜矿化为中温过渡阶段,而拜仁达坝矿床可能为本矿田的中—低温端员.

6 结论

(1)维拉斯托—拜仁达坝矿床中银的赋存形式主要有 3 种,主要为可见银矿物,其次为晶格银(类质同象)和次显微包裹银.可见银主为银锑黝铜矿、黝锑银矿,其次为辉锑铅银矿、深红银矿、柱硫锑铅银矿、硫银锡矿、锑银矿等.生成顺序依次为含银黝铜矿+银锑黝铜矿+黝锑银矿—辉锑铅银矿+柱硫锑铅银矿+深红银矿+锑银矿,多分布于方铅矿中以及其他硫化物边界.

(2)整个矿田成矿过程,成矿早期钨锡等元素以钨酸、钨酸盐以及离解形式迁移, $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Ag}^+$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^+$  等金属离子以氟络合物形式进行迁移;随着成矿流体成分和的物理化学条件的变化,黑钨矿等高温氧化物气化沉淀,伴有少量硫化物沉淀,同时成矿流体由氟络合物为主变为以硫氢络合物形式为主;成矿中期,随温度进一步降低和围岩的水—岩作用,硫逸度继续升高,硫氢络合物分解,首先导致磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿、方铅矿等硫化物依次沉淀,随着流体中  $\text{Sb}^{3+}$  的增加, $\text{Ag}^+$  与  $\text{Sb}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^+$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Sb}^{3-}$ 、 $\text{S}^{2-}$  等离子结合依次形成多种银矿物,随后形成晚期的低温硫锑铅矿等矿物.

致谢:野外工作获得内蒙古赤峰市拜仁达坝矿业、银都矿业以及维拉斯托矿业有限公司的大力支持,感谢 3 个公司多位工程师的热情帮助;同时感谢多位老师在稿件审理过程中对文章评审提出的意见和建议.

References

Barnes, H. L., 1979. Solubilities of Ore Minerals. In: Barnes, H. L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Depos-*

- ites (2nd ed.). Wiley-Inter Science, New York, 404—406.
- Chang, Y., Lai, Y., 2010. Study on Characteristics of Ore-Forming Fluid and Chronology in the Yindu Ag-Pb-Zn Polymetallic Ore Deposit, Inner Mongolia. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46 (4): 581—593 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J. J., 2007. Geology and Ore-Forming Fluid of Silver-Lead-Zinc Lode Deposit of Shagou, Western Henan Province (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Giordano, T. H., Barnes, H. L., 1979. Ore Solution Chemistry VI. Pb-S Solubility in Bisulfide Solutions to 300 °C. *Economic Geology*, 74 (7): 1637—1646. doi: 10. 2113/ gsecongeo. 74. 7. 1637.
- Han, Y. W., Ma, Z. D., Zhang, H. F., et al., 2003. Geochemistry. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Hayashi, K., Sugaki, A., Kitakaze, A., 1990. Solubility of Sphalerite in Aqueous Sulfide Solutions at Temperatures between 25 and 240 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54 (3): 715—725. doi: 10. 1016/0016—7037 (90)90367—T
- Huang, C. K., Zhu, Y. S., 2002. Chinese Silver Deposits and Their Space-Time Distribution. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- Jiang, S. H., Nie, F. J., Liu, Y. F., et al., 2010. Sulfur and Lead Isotopic Compositions of Bairendaba and Weilasituo Silver-Polymetallic Deposits, Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 28 (1): 101—112 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. L., Li, S. Y., 1990. The Occurrence State of Silver in Gale-na in Relation to Antimony and Bismuth in the Baiyinno Deposit, Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 9 (4): 365—371 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. J., Xing, Y. L., Wang, J. P., et al., 2010. Discovery of Falkmanite from the Bairendaba Superlarge Ag-Pb-Zn Polymetallic Deposit, Inner Mongolia and Its Origin Significance. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 40 (3): 565—572 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. M., Zhang, R., Zhang, Q. Z., 2004. The Regional Metallogeny of Da Hinggan Ling, China. *Earth Science Frontiers*, 11 (1): 269—277 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Jiang, S. H., Zhang, Z. G., et al., 2011. Mineragraphy of Bairendaba and Weilasituo Silver Polymetallic Deposits in Inner Mongolia. *Mineral Deposits*, 30 (5): 837—854 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. F., 2009. Metallogenic Study of Bairendaba Ag Polymetallic Deposit in Hexigten Banner, Inner Mongolia (Dissertation). Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. F., Nie, F. J., Jiang, S. H., et al., 2012. Bairendaba Pb-Zn-Ag Polymetallic Deposit in Inner Mongolia: The Mineralization Zoning and Its Origin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42 (4): 1055—1068 (in Chinese with English abstract).
- Pan, X. F., Guo, L. J., Wang, S., et al., 2009. Laser Microprobe Ar-Ar Dating of Biotite from the Weilasituo Cu-Zn Polymetallic Deposit in Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 28 (5): 473—479 (in Chinese with English abstract).
- Seward, T. M., 1976. The Stability of Chloride Complexes of Silver in Hydrothermal Solutions up to 350 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40 (11): 1329—1341. doi: 10. 1016/0016—7037(76)90122—8
- Seward, T. M., 1984. The Formation of Lead (II) Chloride Complexes to 300 °C: A Spectrophotometric Study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48 (1): 121—134. doi: 10. 1016/0016—7037(84)90354—5
- Shuai, D. Q., 1990. The Silver-Tetrahedrite and Its Typomorphic Significance from Some Gold-Silver Deposits and Tin-Silver Polymetallic Deposits in South China. *Geology of Guangxi*, 3 (4): 15—25 (in Chinese with English abstract).
- Stefansson, A., Seward, T. M., 2003. Experimental Determination of the Stability and Stoichiometry of Sulphide Complexes of Silver (I) in Hydrothermal Solution to 400 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (7): 1395—1413. doi: 10. 1016/S0016—7037(02)01093—1
- Sun, F. Y., Wang, L., 2008. Ore-Forming Conditions of Bairendaba Ag-Pb-Zn Polymetallic Ore Deposit, Inner Mongolia. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38 (3): 376—383 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Hou, Q. Y., Chen, Y. L., et al., 2010. Fluid Inclusion Study of the Weilasituo Cu Polymetal Deposit in Inner Mongolia. *Geoscience*, 24 (5): 847—855 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L., Sun, F. Y., 2008. Geological Characteristics of Bairendaba Ag-Pb-Zn Polymetallic Ore Deposit in Inner Mongolia. *Global Geology*, 27 (3): 252—259 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. Q., Zhao, J. Z., 2008. Transport Form and Precipitation Mechanism of W and Sn in the Jiuyishan Tin Ore-field in the Central Nanling Region. *Geology and Min-*

- eral Resources of South China*, (1): 7—11 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, L. M., 2005. Discussion on Characteristics and Genesis of Formation of Bairendaba Polymetal Ag Deposit, Chifeng, Inner Mongolia (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Xu, H. F., 2004. Mineral Studies of Bairendaba Multimetal Deposits in Kesheketengqi. *Journal of Inner Mongolia Radio and TV University*, (2): 26, 41 (in Chinese).
- Xu, Q. D., Zhou, L., 2004. Ore-Forming Fluid Migration in Relation to Mineralization Zoning in Cu-Polymetallic Mineralization District of Northern Lanping, Yunnan: Evidence from Lead Isotope and Mineral Chemistry of Ores. *Mineral Deposits*, 23(4): 452—463 (in Chinese with English abstract).
- Yan, W., Ouyang, Z. Y., Li, C. Y., et al., 1994. Mineral Chemistry of Tetrahedrites from Lanping-Simao Vein Copper Deposits, Yunnan Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 14(4): 361—368 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, D. Z., Zheng, R. F., 2008. An Approach to Migration Forms and Ore-Forming Mechanism for Tungsten. *Acta Geologica Sichuan*, 28(4): 342—347 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, R. C., Yang, Y. F., Shi, Y. X., et al., 2008. Ore Characters and Ore Genesis of the Bairendaba Ag Polymetallic Ore Deposit in Keshiketeng Banner, Inner Mongolia. *Geology in China*, 35(6): 1274—1285 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X. W., Li, X. Z., 2001. Typomorphologic Characteristics and Metallogenic Significance of Pyrrhotites in Laozuoshan Gold Deposit. *World Geology*, 20(2): 133—137, 141 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, S. R., Bian, Q. J., Ling, Q. C., et al., 2004. Crystallography and Mineralogy. Higher Education Press, Beijing (in Chinese).
- 附中文参考文献**
- 常勇, 赖勇, 2010. 内蒙古银都银铅锌多金属矿床成矿流体特征及成矿年代学研究. 北京大学学报(自然科学版), 46(4): 581—593.
- 高建京, 2007. 豫西沙沟脉状 Ag-Pb-Zn 矿床地质特征和成矿流体研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等, 2003. 地球化学. 北京: 地质出版社.
- 黄崇轲, 朱裕生, 2002. 中国银矿床及其时空分布. 北京: 地震出版社.
- 江思宏, 聂凤军, 刘翼飞, 等, 2010. 内蒙古拜仁达坝及维拉斯托银多金属矿床的硫和铅同位素研究. 矿床地质, 28(1): 101—112.
- 李九玲, 李树岩, 1990. 内蒙古白音诺尔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, 9(4): 365—371.
- 刘家军, 邢永亮, 王建平, 等, 2010. 内蒙拜仁达坝超大型 Ag-Pb-Zn 多金属矿床中针硫锑铅矿的发现与成因意义. 吉林大学学报(地球科学版), 40(3): 565—572.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲, 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. 地质前缘, 11(1): 269—277.
- 刘妍, 江思宏, 张志刚, 等, 2011. 内蒙古拜仁达坝—维拉斯托银多金属矿床的矿相学. 矿床地质, 30(5): 837—854.
- 刘翼飞, 2009. 内蒙古克什克腾旗拜仁达坝银铅锌多金属矿床成因研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质科学院.
- 刘翼飞, 聂凤军, 江思宏, 等, 2012. 内蒙古拜仁达坝铅—锌—银矿床: 元素分带及其成因. 吉林大学学报(地球科学版), 42(4): 1055—1068.
- 潘小菲, 郭利军, 王硕, 等, 2009. 内蒙古维拉斯托铜锌矿床的白云母 Ar/Ar 年龄探讨. 岩石矿物学杂志, 28(5): 473—479.
- 帅德全, 1990. 我国南方一些金银矿床和锡—银多金属矿床中的银黝铜矿及其标型意义. 广西地质, 3(4): 15—25.
- 孙丰月, 王力, 2008. 内蒙拜仁达坝银铅锌多金属矿床成矿条件. 吉林大学学报(地球科学版), 38(3): 376—383.
- 王瑾, 侯青叶, 陈岳龙, 等, 2010. 内蒙古维拉斯托铜多金属矿床流体包裹体研究. 现代地质, 24(5): 847—855.
- 王力, 孙丰月, 2008. 内蒙拜仁达坝银铅锌多金属矿床地质特征. 世界地质, 27(3): 252—259.
- 王永强, 赵俊哲, 2008. 南岭中段九嶷山锡矿田 W、Sn 迁移形式与沉淀机制. 华南地质与矿产, (1): 7—11.
- 肖利梅, 2005. 内蒙古赤峰拜仁达坝银多金属矿床特征及成因探讨(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 许怀凤, 2004. 克什克腾旗拜仁达坝多金属矿物研究. 内蒙古电大学刊, (2): 26, 41.
- 徐启东, 周炼, 2004. 云南兰坪北部铜多金属矿化成矿流体流动与矿化分带. 矿床地质, 23(4): 452—463.
- 颜文, 欧阳自远, 李朝阳, 等, 1994. 兰坪—思茅盆地脉状铜矿床黝铜矿的矿物化学. 矿物学报, 14(4): 361—368.
- 郑大中, 郑若锋, 2008. 钨的迁移形式成矿机理新探. 四川地质学报, 28(4): 342—347.
- 钟日晨, 杨永飞, 石英霞, 等, 2008. 内蒙古拜仁达坝银多金属矿区矿石矿物特征及矿床成因. 中国地质, 35(6): 1274—1285.
- 周喜文, 李宪洲, 2001. 老柞山金矿磁黄铁矿的标型特征及其矿化指示意义. 世界地质, 20(2): 133—137, 141.
- 赵珊茸, 边秋娟, 凌其聪, 等, 2004. 结晶学及矿物学. 北京: 高等教育出版社.