doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.09.015

大兴安岭中南段昌图锡力银铅锌锰矿床矿物学特征 及其对矿床成因的约束

何鹏^{1,2},郭硕^{1,2},苏航³,马一行⁴ HE Peng^{1,2}, GUO Shuo^{1,2}, SU Hang³, MA Yixing⁴

1.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170;

2.华北地质科技创新中心,天津 300170;

3.黑龙江省地质调查研究总院,黑龙江 哈尔滨 150036;

4.中国地质调查局发展研究中心,北京 100037

1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China;

3. Heilongjiang Institute of Geological Survey, Haerbin 150036, Heilongjiang China;

4. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China

摘要:昌图锡力银铅锌锰矿是近年在大兴安岭成矿带中南段锡林浩特-霍林郭勒多金属成矿亚带上新发现的1处银铅锌多金属矿床。矿床中的主要矿物分析结果表明:矿床中的银矿物有银黝铜矿、硫锑铜银矿、深红银矿等,主要以独立的银矿物分布 于金属硫化物中;银黝铜矿的Ag含量为8.25%~13.11%,平均为10.54%,Cu含量为27.65%~31.43%,平均为29.64%,面扫描 图像显示Ag以类质同像的形式赋存于银黝铜矿中。硫锑铜银矿的Ag含量较高,平均为68.99%,主要分布于方铅矿的边缘 及其裂隙中。闪锌矿的Fe含量为0.30%~0.38%,平均为0.33%,属于贫铁闪锌矿,Cd与Zn具有很好的相关性,可作为寻找 闪锌矿的地球化学标志。菱锰矿(MnCO₃)为晚期低温石英-碳酸盐阶段的产物,是主要的碳酸盐矿物;锰的氧化物主要为软 锰矿及硬锰矿,软锰矿呈环带结构、胶状构造。除Mn外,同时也富集高品位Pb。综合分析昌图锡力矿床的矿物学特征及矿 床地质特征,认为该矿为浅成低温热液型银铅锌锰多金属矿床。

关键词:矿物学;电子探针;银矿物;硫化物;锰矿物;银多金属矿床;大兴安岭;矿产勘查工程 中图分类号:P618.52;P618.2 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2022)09-1672-15

He P, Guo S, Su H, Ma Y X. Characteristics of ore minerals for the Changtuxili Ag-Pb-Zn-Mn deposit in the middlesouthern segment of Da Hinggan Mountains and its constraints on the genesis of the deposit. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(9):1672-1686

Abstract: The Changtuxili Ag-Pb-Zn-Mn deposit is a newly discovered polymetallic deposit in Xilinhaote-Huolinguole Pb-Zn-Ag-Cu-Mo polymetallic metallogenic subzone of the middle and southern Da Hinggan Mountains polymetallic metallogenic belt in recent years. In order to explore the mineral type, mineral occurrence state, and genesis of the Changtuxili deposit, the occurrence of silver minerals, sulfides and manganese minerals were studied by mineral phase observation and electron probe analysis. The silver minerals in the deposit are freibergite, polybasite, pyrargyrite, which are distributed as separate silver minerals in metal sulfides. The Ag content of freibergite ranges from 8.25% to 13.11% (10.54% on average), and the Cu content of freibergite ranges from 27.65% to 31.43%

作者简介:何鹏(1987-),男,高级工程师,从事区域矿产地质调查研究工作。E-mail:hepeng198761@163.com

收稿日期:2020-03-31;修订日期:2020-06-11

资助项目:中国地质调查局项目《内蒙古温都尔庙—镶黄旗地区域地质调查》(编号:DD20190038)、《渤海湾盆地氦气资源调查评价》(编号:DD20221668)

(29.64% on average). The element X-ray mappings show that Ag is present in freibergite in the form of isomorphism. The silver content of polybasite is relatively high(average 68.99%), mainly distributed in the edge of galena and its fissures, indicating that galena is an important silver-carrying mineral. The black manganese cap is a geological sign for finding Ag-Pb-Zn deposits. Sphalerite belongs to low iron sphalerite, and the content is $0.30\% \sim 0.38\%$, with an average value of 0.33%. Cd has a good correlation with Zn in sphalerite and can be used as a geochemical marker for sphalerite prospecting. Rhodochrosite is the product of late low-temperature quartz-carbonate stage. MnCO₃ is the main mineral component and rhodochrosite belongs to hydrothermal genesis. Manganese oxides are mainly pyrolusite and psilomelane. Pyrolusite shows ring and colloidal structure, and it enriches high - grade Pb and Zn besides Mn. Comprehensive analysis of the mineralogical characteristics and ore geological characteristics of the Changtuxili deposit, which is considered to be a hypothermal hydrothermal Ag-Pb-Zn-Mn polymetallic deposit.

Key words : mineralogy; electron probe; silver mineral; sulfide; manganese mineral; Ag polymetallic deposit; Da Hingan Mountains; mineral exploration engineering

昌图锡力银铅锌锰多金属矿位于内蒙古锡林 郭勒盟东乌旗地区,处于大兴安岭成矿带中南段, 是在区域地质调查工作中新发现的1处银铅锌锰多 金属矿床。大兴安岭中南段地区处于古生代古亚 洲构造成矿域与中生代环太平洋构造成矿域强烈 叠加区域,复杂的地质构造演化过程使其成为中国 重要的有色金属矿产基地[1-4]。区域上的大规模中 生代构造岩浆活动,为矿床的成矿作用提供了充足 的成矿物质来源,成为大兴安岭地区成矿种类多、 矿床类型丰富、成矿强度大的有利地质条件^[5]。近 年来,区域内新发现了拜仁达坝、维拉斯托、阿尔哈 达、花敖包特、扎木钦、大井、双尖子山等各类大型 多金属矿床[6-13],展现出巨大的找矿潜力,前人对这 些矿床开展过深入的研究,在成矿物质来源、矿物 学特征等方面取得了大量研究成果[6-12],为明确矿 床成因、指明下一步找矿方向提供了重要的参考 依据。

在昌图锡力矿区部署有效的物化探手段,并利 用勘探工程对深部矿体进行验证,已探明多处厚大 银铅锌锰矿体,目前已达大型银铅锌锰矿床规模。 受工作程度所限,矿床的相关研究仅限于矿床的发 现意义^[14]及找矿方法在矿产勘查中的应用^[15-16],而 矿床内矿物类型和赋存状态、矿物组合特征、矿床 的成因类型等问题还不明确。此外,除常见的硫化 物及银矿物外,该矿床中还分布有一定规模的锰矿 石,而前人对大兴安岭地区锰矿物的研究报道极 少。笔者通过对钻孔岩心样品开展矿相学显微观 察、电子探针分析,首次对昌图锡力银铅锌锰多金 属矿床中银矿物、硫化物、锰矿物的矿物学特征等 进行了研究,为下一步勘查工作提供了重要信息。

1 矿床地质特征

1.1 矿床地质概况

昌图锡力银铅锌锰多金属矿床在大地构造位 置上处于中亚造山带东段^[17],西伯利亚板块和华北 板块的结合部位,贺根山-黑河断裂以南,索伦山-西拉木伦缝合带以北(图1-a),属于大兴安岭成矿 带中南段锡林浩特-霍林郭勒铅-锌-银-铜-钼多金 属成矿亚带,是古亚洲洋及滨太平洋构造体系叠加 形成的巨型成矿域的重要组成部分^[18-20]。古生代 末期—中生代地质演化历程中,该区域先后经历了 碰撞造山过程、碰撞后伸展作用过程及其间的构造 大转换阶段^[17,23]。构造体制转换使区域上大规模 的岩浆活动在晚侏罗世—早白垩世达到鼎盛时期, 形成大面积北北东向展布的岩浆岩带,广泛发育以 酸性岩石组合为主的岩浆岩,对区域上的成矿作用 起到重要影响,形成众多不同成因、不同类型的多 金属矿床(图1-b)^[24-25]。

矿区出露地层主要为上侏罗统满克头鄂博组 和玛尼吐组、下白垩统白音高老组等(图2)。白音 高老组与成矿关系最密切,目前发现的矿体主要分 布于该地层中,为一套中酸性火山熔岩夹火山碎屑 岩组合,岩性包括流纹岩、英安岩、安山岩、流纹质 角砾晶屑凝灰岩、流纹质集块角砾岩、英安质晶屑 熔结凝灰岩等。矿区断裂构造极发育,北西向断裂 及北东向、北西向断裂交会部位是有利的成矿位 置,在矿区内形成以北西向为主的矿脉或矿化蚀变 带,这一特征与区域上及矿区内的主体构造格架一 致,表明构造控矿作用明显。另外,昌图锡力矿区 存在隐伏火山机构,通过大比例尺物探测量发现围 绕火山机构存在放射状、环状火山断裂,13个钻孔





图 1 大兴安岭地区大地构造简图(a)和大兴安岭中南段地质矿产简图(b)(a图据参考文献[18]修改,b图据参考文献[19]修改)
 Fig. 1 The geotectonic map of the Da Hinggan Mountains(a) and the geological and mineral map of the middle and southern segment of Da Hinggan Mountains(b)
 F₁—喜桂图-塔源断裂;F₂—贺根山-黑河断裂;F₃—索伦山-西拉木伦缝合带;F₄—化德-赤峰断裂;
 F₅—伊通-依兰断裂;F₆—敦化-密山断裂;F₇—牡丹江断裂

指示各类断裂构造及火山机构的交会部位赋存厚 大的银铅锌矿体,是成矿的有利空间。

1.2 矿体特征

昌图锡力矿床目前共划分出 6 个矿带,其中 I、 Ⅱ、Ⅲ号为主要矿带,矿体主要呈脉状、透镜状分布 于白音高老组中酸性火山岩中的构造破碎带、断裂 内。 I 号矿带共划分出 21 个银铅锌锰矿体,分布于 地表以下 200 m 以内,单矿体厚 2~13 m,圈定总厚 度达 50.1 m,矿石平均品位:Ag 173.68×10⁻⁶,Mn 15.79%,Pb 1.87%,Zn 0.75%。 Ⅱ号矿带划分出 23 个银铅矿体,单矿体厚 2~11 m,矿体总厚度 59 m,矿 石平均品位:Ag 121.36×10⁻⁶,Pb 平均 1.22%。 Ⅲ号矿 带共圈定 12 条银铅锌锰矿体,矿体总厚度 42.24 m, 单条矿体最大视厚度 21.28 m,矿石平均品位:Ag 146.25×10⁻⁶, Pb 1.47%, Zn 0.90%, Mn 12.56% °

矿体可划分为脉状矿体、透镜状矿体等,充填 于各类断裂、裂隙中,局部具有分支复合现象,以银 铅矿体、银铅锌锰矿体为主。矿体分布特征上,浅 部矿体以网脉状、透镜状的黑灰色氧化银锌锰矿为 主,深部为银铅锌锰脉状矿体。细脉状矿体常见于 陡立脉状裂隙内,个体规模小、数量极多,局部显示 雁列式排列,其分布空间主要是各类次级断裂裂隙 及火山活动中形成的张性断裂,主要矿体包括银铅 锌矿体、铅锌矿体、银铅锰矿体等。

2 矿石特征

2.1 矿物组成特征

对钻孔矿石进行详细的矿相学观察及测试分



Fig. 2 Geologic map of the Changtuxili mining area

1—全新统冲积层;2—全新统冲洪积层;3—全新统湖积层;4—新近系上新统宝格达乌拉组;5—下白垩统白音高老组二段;
 6—下白垩统白音高老组一段;7—上侏罗统玛尼吐组;8—流纹岩脉;9—安山玢岩;10—地质界线;11—断层;
 12—放射状断裂;13—环状断裂;14—矿体;15—强矿化带;16—矿带及编号

析,发现原生矿石中的金属矿物有方铅矿、闪锌矿、 银黝铜矿、硫锑铜银矿、深红银矿、菱锰矿、黄铁矿、 黄铜矿、毒砂等,氧化矿石中的金属矿物主要为软 锰矿、硬锰矿、锰钾矿、锰铅矿、褐铁矿、铅华及少量 闪锌矿、方铅矿、黄铁矿残留团块。脉石矿物主要 为方解石、石英、叶腊石、萤石、绢云母等。主要矿物 共生组合为方铅矿一闪锌矿组合、方铅矿一闪锌矿一黄 铁矿组合、方铅矿-闪锌矿-银黝铜矿-硫锑铜银矿 组合、方铅矿-深红银矿组合、锰银铅锌氧化物集合 体组合。矿区内由浅部到深部,锰、银矿物逐渐减 少,方铅矿、闪锌矿逐渐增加,总体表现为上部富集 锰银,下部富集铅锌。围岩蚀变强烈,主要有硅化、 褐铁矿化、绢云母化、叶腊石化、绿帘石化、碳酸盐 化、粘土化等。

2.2 矿石组构特征

矿床中矿石结构按成因可分为结晶结构、交代 结构、固溶体分离结构3类。

结晶结构:主要有自形、半自形、他形粒状结构 等。①自形粒状结构:具有这种结构的矿物主要为 黄铁矿,多呈立方体、五角十二面体,与早期石英共 生。②半自形粒状结构:以粗粒方铅矿、部分闪锌 矿为主。③他形粒状结构:绝大多数细粒方铅矿、 闪锌矿、硫锑铜银矿等均呈不规则他形粒状结构 (图版 I-a)。

交代结构:主要有裂隙充填交代、交代残余、假 象结构、交代星状结构等。①裂隙充填交代结构: 方解石、菱锰矿、后期黄铁矿充填在方铅矿、闪锌矿 的裂隙中(图版 I -b、c)。②交代残余结构:早期石 英、黄铁矿、闪锌矿等被方铅矿交代呈残余状。 ③假象结构:早期自形石英、黄铁矿被闪锌矿、方铅 矿交代,呈假象(骸晶)。④交代星状结构:方铅矿 呈星状分布于石英中。

固溶体分离结构:以乳滴状结构为主,细粒方

铅矿、黄铜矿呈乳滴状分布于闪锌矿中(图版 I-d)。

矿石构造主要包括:①脉状构造:方铅矿、闪锌 矿呈脉状填充于断裂或裂隙中,也见有方解石、菱 锰矿等脉石矿物呈脉状穿切铅锌矿石(图版Ⅱ-a、 d);②块状构造:方铅矿、闪锌矿等矿石呈厚大块 状,其中金属矿物分布量达75%以上,脉石矿物较 少(图版Ⅱ-b);③浸染状构造:矿石中金属矿物方 铅矿、闪锌矿和黄铁矿等以粒状、自形晶、半自形晶 颗粒分布在脉石矿物中;④团块状构造:在矿石中 见到方铅矿以粗粒集合体分布在脉石矿物中;⑤胶 状构造:主要表现于锰的氧化物中,如硬锰矿、软锰



a.早期形成的他形闪锌矿被方铅矿沿裂隙充填交代呈交代残余结构;b.他形黄铁矿、黄铜矿交代闪锌矿,他形方铅矿沿裂隙充填;c.半自形-自形黄铁矿沿闪锌矿边缘裂隙充填交代;d.黄铁矿呈他形交代闪锌矿,黄铜矿呈乳滴状出溶于闪锌矿,呈固溶体分离结构;e.硬锰矿的胶状结构显微特征;f.软锰矿的环带结构特征;Gn—方铅矿;Sp—闪锌矿;Cp—黄铜矿;Py—黄铁矿

矿等内部为平行的同心圆状,外部呈现为葡萄状、 球状、肾状等集合体形态(图版Ⅰ-e、图版Ⅱ-e)。

2.3 矿石成矿期次划分

根据矿床中矿石结构、构造及矿脉之间的穿插 关系,结合镜下矿物的共生组合特征生成及先后顺 序,将昌图锡力银铅锌锰多金属矿床划分为2个主 要成矿期:表生成矿期和热液成矿期。热液成矿期 可以分为4个成矿阶段(表1):①石英-黄铁矿阶段 (Ⅰ),该阶段主要产出毒砂、黄铁矿等形成温度较 高的金属矿物,后期被闪锌矿、方铅矿等其他硫化 物交代;②金属硫化物阶段(Ⅱ),这一阶段也是主 要成矿阶段,大量方铅矿、闪锌矿、黄铁矿等金属硫 化物在此阶段形成(图版Ⅱ-a、b),还包括少量磁黄 铁矿、黄铜矿等,金属硫化物以细脉状、浸染状、块 状构造为主,形成较晚的闪锌矿对早期的毒砂、黄 铁矿等进行交代、充填、包裹,该阶段银矿物也开始 出现;③银矿物阶段(Ⅲ),该阶段为银矿物的重要 形成阶段,主要矿物包括银黝铜矿、硫锑铜银矿、深 红银矿、方铅矿、细粒闪锌矿、石英等,银矿物沿闪 锌矿、方铅矿等的边缘或裂隙分布,金属硫化物是 重要的银矿物载体;④石英-碳酸盐阶段(Ⅳ),方解 石、石英、菱锰矿等典型低温矿物在这一阶段形成, 还包括少量方铅矿、黄铁矿、闪锌矿等金属硫化物, 该阶段形成的菱锰矿与近年新发现的西昆仑玛尔





a.银铅锌矿呈脉状填充于英安岩裂隙中;b.品位极高的块状银铅锌矿石;c.粉红色菱锰矿包裹少量英安岩碎块;d.粉红色 菱锰矿呈脉状充填于裂隙中,包裹早期形成的呈角砾状的铅锌矿;e.葡萄状硬锰矿矿石;f.软锰矿的节理特征;Gn一方铅 矿;Ro---菱锰矿

	8	8	-				8	1
矿物	石英-黄铁	;矿阶段	金属硫	化物阶段	银矿物阶目	没	石英-碳	酸盐阶段
黄铁矿								
黄铜矿			_					
闪锌矿						-		
方铅矿						-		
银黝铜矿								
硫锑铜银矿								
石英								
方解石								
菱锰矿								

表1 昌图锡力矿床矿物共生组合与生成顺序

Table 1 Paragenetic assemblage and sequence of hydrothermal minerals in the Changtuxili deposit

坎苏地区海相沉积型大型锰矿床中碳酸锰成因不同^[26],矿物特征指示其为热液成因,可见脉状菱锰 矿穿切、包裹角砾状铅锌矿石(图版Ⅱ-d)。另外, 表生成矿期也是昌图锡力矿床的重要成矿期,经历 地表氧化淋滤后,原生矿物逐步转变成各类金属氧 化物,造成矿物的二次富集,形成富含高品位银铅 锌的锰的氧化物,地表黑色的铁锰氧化物可作为直 接找矿标志(图版Ⅱ-e、f)。

3 样品来源、测试方法

3.1 样品来源

本次研究的样品均取自昌图锡力矿区岩心,重 点选取铅锌硫化物阶段的方铅矿、闪锌矿,银矿物 阶段的银矿物,石英-碳酸盐阶段的菱锰矿及表生 成矿期的锰的氧化物。将样品制作成标准探针片 后,通过偏光显微镜进行矿相学观察记录,明确样 品的矿物组成、共生关系和结构、构造特征。

3.2 测试方法

在矿相学研究的基础上,选取代表性矿物开展 电子探针分析。本次分析使用河北省区域地质矿 产调查研究所实验室的 JEOL JXA-8230 电子探针 显微分析仪。电子探针测试条件为:电压 15 kV,电 流 20 nA,温度 23 ℃,湿度 55%~60%,束斑直径 5 μm,ZAF 法校正。其中 Cu、Fe、S 采用黄铜矿作为 标样,Pb、Zn 分别采用方铅矿、闪锌矿作为标样,Ag 用其金属作标样。X 射线元素分布图像分析条件、 测试条件为加速电压 20 kV,电子束直径 1 μm,Cu、 Pb、S、Sb、Ag 元素分布及背散射电子图像采用激发 电流 50 nA。 4 分析结果

4.1 电子探针分析结果

4.1.1 银矿物

矿石中银矿物常以金属硫化物作为主要的载体矿物。通过矿相学观察和电子探针分析发现,在 方铅矿内部及裂隙中常包含有银黝铜矿、硫锑铜银 矿。银黝铜矿在方铅矿中多以粒状、不规则状产 出,也可见分布于方铅矿与闪锌矿或方铅矿与脉石 矿物间,少量包含在闪锌矿中。硫锑铜银矿呈不规 则状,局部可见沿方铅矿、黄铁矿边缘分布并贯穿 进入裂隙中。深红银矿多呈包体或不混溶体出现 在粗粒方铅矿中。

(1)银黝铜矿(Ag,Cu)₁₀(Fe,Zn)₂(As,Sb)₄S₁₃

银黝铜矿是本区矿石中重要的银矿物,反射 色为灰白色,带浅橄榄绿色调,内反射色呈深红 色,均质。银黝铜矿主要形成于热液成矿期的银 矿物阶段,呈半自形—他形粒状、乳滴状、细粒状 分布在方铅矿内部或方铅矿和闪锌矿的接触部 位,粒度变化很大,与方铅矿、黄铜矿、闪锌矿密切 共生。

银黝铜矿电子探针分析结果(表 2): Ag 8.25%~13.11%,平均10.54%,Cu 27.65%~31.43%, 平均29.64%,Sb 25.54%~28.35%,平均27.04%,S 23.82%~24.36%,平均24.01%,Zn 5.24%~6.90%, 平均5.84%,Fe 0.18%~1.84%,平均0.78%,As 0.12%~1.66%,平均0.77%,还含有少量的Ni、Pb。 其中,Ag和Cu 呈完全类质同像,Zn和Fe 呈完全类 质同像,贫Fe而富Zn。 (2)硫锑铜银矿(Ag,Cu)₁₆(As,Sb)₂S₁₁

硫锑铜银矿呈灰白色,略显绿色调,反射色为 灰绿色,反射率大于闪锌矿,小于方铅矿,呈片状或 粒状产出,粒径范围为 20~50 μm。常见硫锑铜银 矿填充交代方铅矿边缘或包裹于内部,偶见呈粒状 的硫锑铜银矿孤立分布在闪锌矿内部。

硫锑铜银矿电子探针分析结果(表 2):Ag为66.74%~72.47%,平均68.99%,S为13.70%~16.05%,平均15.37%,Cu为4.70%~8.40%,平均6.72%,Sb为3.60%~9.73%,平均6.79%,As为0.40%~3.99%,平均1.92%,As和Sb之间为完全类质同像,互相代替。

(3)深红银矿(Ag₃SbS₃)

深红银矿呈浅蓝、灰白色,多色性不明显,非均质。内反射深红色,常与硫锑铜银矿等紧密共生, 包含在方铅矿中或沿方铅矿解理裂隙分布。深红 银矿电子探针分析结果(表 2):Ag 59.50%,Sb 22.21%,S 17.35%,还有少量的 Pb、As 等。

4.1.2 其他硫化物

(1)方铅矿(PbS)

方铅矿是主要的矿石矿物,主要以半自形—自 形粒状及集合体形式产出,呈铅灰色,金属光泽明 显,反射色纯白,无内反射,均质体。常与闪锌矿共 生,溶蚀交代闪锌矿、黄铁矿,其粒度有粗有细,中 细粒方铅矿常呈脉状、网脉状、浸染状产出,粗粒方 铅矿呈囊状、团块状产出,形成高品位铅矿石。

方铅矿电子探针分析结果(表 2):Pb为 84.93%~87.63%,平均86.07%,S为13.12%~ 13.31%,平均13.23%,Fe为0.01%~0.37%,平均 0.18%,还含有微量的Cu、Zn、Co、Ni、Ge等。

(2)闪锌矿(ZnS)

闪锌矿反射色灰白带褐色,其粒度大部分大于 0.15 mm,多以他形粒状及粗大集合体产出,可见其 与其他矿物及脉石矿物相互嵌布。闪锌矿常与黄 铁矿、黄铜矿、方铅矿等共生并被它们交代,闪锌矿 中常见黄铜矿呈固溶体分离的乳滴状分布。

闪锌矿电子探针分析结果为(表 2): Zn 为 65.76%~67.20%,平均 66.50%,S 为 32.32%~ 32.93%,平均 32.62%,Cd 为 0.34%~0.68%,平均 0.48%,Fe 为0.30%~0.38%,平均 0.33%,还含有少 量的 Ni、Ge、As、Pb 等。

4.1.3 锰矿物

锰矿物主要包括原生菱锰矿及锰的氧化物。

(1)菱锰矿(MnCO₃)

菱锰矿呈粉红色、浅黄色,反射色具多色性,内 反射玫瑰红色,具强非均质性,他形粒状结构,块状 构造。菱锰矿主要成分为碳酸锰(MnCO₃),其中 的 Mn 可被 Fe、Ca、Mg 等少量代替,Fe 含量较高时 称为铁菱锰矿,Zn 含量较高时,称为锌菱锰矿。作 为晚期低温阶段的矿物,主要以脉状产出,常包裹 早期形成的铅锌矿,可见菱锰矿胶结矿化火山角砾 岩,具黄铁矿化、铅锌矿化的英安岩作为角砾被菱 锰矿胶结包裹。菱锰矿在空气中暴露后常发生氧 化,极易变为硬锰矿、软锰矿等氧化物。

对菱锰矿进行电子探针分析后,计算其中的 MnCO₃、FeCO₃、CaCO₃、MgCO₃分子比,计算结果 显示(表3):MnCO₃的分子比为0.925~0.948,平均 为0.936;FeCO₃的分子比为0.031~0.048,平均为 0.040;CaCO₃的分子比为0.012~0.026,平均为 0.020;MgCO₃的分子比为0.001~0.008,平均为 0.005。

(2) 锰的氧化物

锰的氧化物是一种次生矿物,在地表氧化条件 下由原生锰矿物风化淋滤形成,多呈隐晶质结构、 胶状结构、叶片结构,表现为胶状、葡萄状、肾状、蜂 窝状、块状构造,多以分散、多矿物的集合体出现。 由于其为原生矿石地表二次氧化淋滤形成,因此, 其中 Mn、Ag、Pb、Zn等成矿元素含量较高,常形成 富矿石,而且 Mn 对 Ag 有强烈的吸附作用,导致其 中的 Ag 含量极高。但本次选取的样品不理想,因 此未开展锰矿物中 Ag 含量的相关分析。

矿区中常见锰的氧化物主要为软锰矿及硬锰 矿。软锰矿(MnO₂)是矿区常见的锰矿物,常与硬 锰矿共生,颜色为浅灰色—黑色,具有金属光泽,其 集合体常呈放射状、纤维状、胶状。硬锰矿(mMnO・ MnO₂ · nH₂O)不是一个独立的矿物种,而是呈多 矿物集合体形态,其组成成分以锰的氧化物和氢氧 化物为主体,含有多种微量元素,在成因和形态上 都是外生成因的,为胶体或隐晶质,呈鲕状、葡萄 状、肾状、钟乳状、同心环带状等。

由于锰的氧化物为多种矿物集合体的形式聚 集,其中的杂质可能造成氧化锰的电子探针分析结 果总量较低,但 Mn 含量较高(表 4),且除 Mn 外, 还含有 Fe、Pb 及少量的 Zn、Ca 等,这与能谱图像的 分析结果一致。

0/

表 2 昌图锡力矿床单矿物电子探针分析结果

Table 2 EMPA results of polymetallic mineralization in the Changtuxili deposit

														70
矿物	分析点号	Pb	Zn	Fe	Со	Ni	Cu	Ge	S	Sb	Cd	Ag	As	总计
	ZK126G-1	85.83	0.03	-	-	0.03	-	0.07	13.28	-	_	-	-	99.23
	ZK126G-2	84.93	_	0.36	0.01	-	0.13	_	13.12	_	—	0.01	-	98.57
	ZK126G-3	86.90	_	0.05	0.01	-	0.15	-	13.25	-	-	-	-	100.36
力销机	ZK153G-1	87.63	0.06	0.04	0.01	0.02	0	0.01	13.31	_	—	0.03	-	101.07
	ZK153G-2	85.92	0.01	0.37	-	-	0.27	0.01	13.20	0.01	—	-	-	99.78
	ZK153G-3	85.23	0.01	0.28	0.02	-	0.25	0.02	13.20	0.00	—	0.01	-	99.00
	ZK126S-1	_	66.14	0.34	-	0.02	-	_	32.68	0.03	0.63	-	0.03	100.03
	ZK126S-2	-	66.85	0.34	-	0.03	0.06	-	32.50	_	0.68	-	-	100.53
NT 1-2 72	ZK126S-3	-	67.20	0.31	-	-	-	0.04	32.32	_	0.51	-	-	100.39
闪锌创	ZK153S-1	0.02	66.87	0.30	-	0.01	_	_	32.70	_	0.38	-	-	100.30
	ZK153S-2	0.08	65.76	0.38	-	0.02	-	0.01	32.62	0.01	0.34	-	-	99.32
	ZK153S-3	0.04	66.18	0.30	-	0.02	-	-	32.93	-	0.34	-	0.02	99.88
银黝铜矿	ZK153A-1	0.43	5.24	1.84	-	_	30.79	_	24.01	28.35	_	9.49	0.13	100.30
	ZK153A-2	0.47	5.96	0.46	-	-	31.43	-	24.36	28.16	-	8.25	0.12	99.22
	ZK153A-3	0.39	5.52	1.27	-	0.01	31.39	-	24.15	27.75	-	8.40	0.34	99.22
	ZK159A-1	0.58	5.31	0.56	-	0.01	27.65	-	23.82	26.23	-	13.11	1.09	98.36
	ZK159A-2	0.77	6.14	0.34	-	0.02	28.68	-	23.88	25.54	-	11.53	1.66	98.56
	ZK159A-3	0.76	6.90	0.18	-	-	27.87	_	23.86	26.20	—	12.43	1.26	99.45
	ZK164A-1	0.29	-	0.00	-	-	8.34	_	16.05	9.73	-	66.74	0.44	101.59
	ZK164A-2	0.21	-	0.07	-	-	8.14	-	15.41	9.15	-	66.94	0.40	100.31
7大 /: 治 /:曰 /:曰 7:-	ZK164A-3	0.28	0.03	0.00	-	0.02	8.40	-	15.63	9.44	-	66.85	0.50	101.15
航铘铜银矿	ZK166A-1	0.71	-	0.20	-	0.00	5.28	-	15.88	3.82	_	70.54	3.68	100.12
	ZK166A-2	0.43	_	0.05	-	-	5.45	_	15.56	3.60	—	70.40	3.99	99.48
	ZK166A-3	0.57	-	0.16	-	-	4.70	-	13.70	4.98	_	72.47	2.51	99.12
Ja la ha rè	ZK85A-1	0.08	-	0.00	_	-	_	-	17.56	22.05	_	59.72	0.06	99.47
深红银矿	ZK85A-2	0.18	-	0.01	-	-	-	-	17.13	22.37	-	59.28	0.09	99.06

表 3 昌图锡力矿床中菱锰矿组成

Table 3 Compositions of rhodoch rosite of the

Changtuxili d	leposit
---------------	---------

八七七日	组分/分子比								
刀 // 尽 ラ	$MnCO_3$	FeCO ₃	CaCO ₃	MgCO ₃					
ZK01-1	0.942	0.038	0.012	0.008					
ZK01-2	0.943	0.036	0.018	0.003					
ZK01-3	0.948	0.031	0.015	0.006					
ZK53-1	0.927	0.045	0.021	0.007					
ZK53-2	0.925	0.048	0.026	0.001					
ZK53-3	0.928	0.042	0.023	0.007					

4.2 面扫描图像分析结果

本次利用面扫描分析方法对银矿物和锰矿物 的赋存形态进行了研究。图像中元素点的分布密 集程度越高,图像亮度越高,指示该元素的相对含 量也较高。银黝铜矿的电子探针图像及 X 射线面 扫描图像(图 3)显示,Ag、Cu、Sb、S 等元素的对应 性较好且分布均匀。在硫锑铜银矿的面扫描图像 (图 4)中,Ag与 Cu元素的分布形态基本一致,Ag 的分布区亮度远大于 Cu。软锰矿的电子探针图 像(图 5)显示,矿物呈典型环带结构、胶状构造,面 扫描图像指示不同元素的环带特征不同,Mn 元素

1681	
------	--

									%
分析点号	K ₂ O	CaO	TiO ₂	PbO	MgO	MnO	FeO	ZnO	总计
ZK01-01	0.28	0.18	0.01	23.51	0	58.10	0.25	0.82	83.14
ZK01-02	1.57	0.43	0	0.78	0.02	74.73	0.34	1.44	79.32
ZK37401-01	0.34	0.77	0.01	0.08	0.08	74.67	0.73	0.91	77.59
ZK37401-02	0.43	0.86	0	0.10	0.10	69.70	1.05	1.07	73.33

表 4 昌图锡力矿床中氧化锰组成 Table 4 Compositions of manganese oxide of the Changtuxili deposit

的图像整体亮度较高,近于白色,因此环带特征不明显,K与Ca呈现较弱的环带特征,与之呈鲜明对比的是Pb元素环带特征明显,不同圈层环带的宽度和亮度均不同,内层环带较细、亮度稍暗,而外层环带较宽、亮度较高。

5 讨 论

5.1 银矿物的矿物学特征及赋存形式

Ag 在地壳中的丰度不高,但由于化学性质十分 活泼,能形成各类复杂的银矿物,目前已查明有 140 多种^[27]。通过矿相学分析、电子探针成分测定等方 法,发现昌图锡力矿床中主要的独立银矿物有银黝 铜矿、硫锑铜银矿、深红银矿等。 依据矿物在显微尺度上的大小,银的赋存状态 可分为:可见银(大于1μm)和不可见银(小于1 μm)。其中可见银分为独立银矿物(大于50μm) 和显微包体银(1~10μm)2类;不可见银的赋存状 态主要有晶格银和次显微包体银^[28],晶格银即类质 同像银,次显微包体银则多包含在与银矿化密切相 关的硫化物内。通过矿相学显微观察、电子探针分 析、图像扫描等方法,发现昌图锡力矿床中银矿物 的赋存形式主要有以下2种:①以独立银矿物的形 式分布于金属硫化物中或充填于其裂隙内,这也是 银矿物的主要赋存状态,如银黝铜矿嵌布在方铅 矿、闪锌矿中,硫锑铜银矿充填在方铅矿裂隙中;② 以显微包体的形式存在于金属硫化物中或以类质



图 3 银黝铜矿电子探针照片(a)及主要元素(Ag,Cu,Sb)面扫描图像(b,c,d) Fig. 3 BSE image(a) and element(Ag,Cu,Sb) X⁻ray mappings(b,c,d) of freibergite

同像形式参与到含银矿物、方铅矿、闪锌矿等矿物 晶格中。

面扫描图像(图 3)显示,Ag以类质同像的方式 赋存于银黝铜矿中,图像中 Ag 的亮度明显低于 Cu、Sb,说明 Ag 含量低于 Cu,结合电子探针分析结 果,6个银黝铜矿样品中Ag平均含量为10.54%,Cu 平均为29.64%,图像特征及元素含量均显示出Cu 含量高于 Ag, 而图像中的元素分布形态表明, Ag 以 类质同像的形式替代了部分 Cu,形成重要的含银矿 物银黝铜矿。硫锑铜银矿的面扫描图像(图4)显 示,Ag分布区亮度远大于 Cu,指示 Ag含量远高于 Cu含量,硫锑铜银矿的电子探针分析数据(Ag、Cu 平均值分别为 68.99% 、6.72%) 也表明, Ag 元素含量 高于 Cu 元素含量。图像中的矿物分布形态显示, 硫锑铜银矿主要分布于方铅矿的边缘及裂隙中,指 示方铅矿是重要的载银矿物,这也与浙江安吉银多 金属矿、贵州银厂坡银矿、河南沙沟银铅锌矿等矿 床表现出的方铅矿作为银矿物主要载体的特征 一致[29-31]。

银矿物的形成主要出现在热液成矿期的银矿 物阶段。热液中银的硫氢络合物随着外部环境温 度降低、压力及硫逸度减小等原因,部分银从热液 中沉淀出来,又因银与铜的地球化性质相似,可以 以类质同像的方式进行不同程度的代替,因此部分 银能够进入黝铜矿晶格替代铜的位置,形成银黝铜 矿^[29]。金属硫化物阶段形成大量方铅矿、闪锌矿、 黄铁矿等,部分被方铅矿等捕获的银矿物以固溶体 分离结构的银硫化物形式从中析出沉淀。其他银 多金属矿床中的银矿物往往以胶体、离子吸附态或 微细粒矿物包体形式赋存于锰的氧矿物中,形成富 银的银-锰矿物集合体[32-34]。而本次研究中未发现 这一赋存形式的直接证据,但勘查中发现氧化锰矿 石的化学样分析结果中 Ag 元素往往含量较高。导 致锰银相互伴生的原因可能有以下 2 种:一是在风 化淋滤作用下,近地表氧化带上的矿石由于赋存大 量富含铁质和锰质的疏松物质,对 Ag 具有强烈的 吸附作用^[35],锰矿物可吸附 80%~90%的 Ag;二是 Mn^{2+} 能促进 Ag^+ 沉淀, 而 Ag^+ 又是 Mn^{2+} 的沉淀 剂^[36-37],在一定条件下,Mn²⁺可以还原 Ag⁺,使 Mn²⁺ 被氧化形成 MnO, 而沉淀^[38], 进一步指示, 电子探针 分析结果中氧化锰总含量未达 100% 的原因除与存 在杂质有关外,还与 Mn⁴⁺以 MnO,形式存在有关,



图 4 硫锑铜银矿电子探针照片(a)及主要元素(S、Cu、Ag)面扫描图像(b、c、d) Fig. 4 BSE image(a) and element(S,Cu,Ag) X-ray mappings(b,c,d) of polybasite Gn-方铅矿; Cp-黄铜矿; Pol-硫锑铜银矿

5.2 硫化物矿物学特征及找矿指示意义

方铅矿是矿床中主要的金属硫化物,依据矿物 粒度可以划分为中细粒及粗粒方铅矿2类,中细粒 方铅矿矿石往往呈脉状、网脉状、浸染状产出,粗粒 方铅矿矿石则呈块状、透镜状产出。方铅矿按照生 成顺序、穿插关系、粒度大小等可划分为2期:第一 期为中细粒方铅矿,呈半自形—他形粒状集合体分 布在其他矿物的间隙及脉石中,交代溶蚀包裹闪锌 矿、黄铁矿,还可见呈固溶体分离的乳滴状结构分 布于闪锌矿中,一般与闪锌矿同期形成或稍晚;第 二期为半自形粗粒状集合体,也是方铅矿大规模形 成时期,发育特征性的黑三角解理。从电子探针分 析结果看,采自钻孔中不同位置的方铅矿,其矿物 组成均一稳定,S、Pb含量占据矿物组成的99%,属 于单一纯净的第二期方铅矿。

一般将闪锌矿中 Fe 含量大于等于 8% 或 Fe 含 量为 2%~8% 的一类统称为富铁闪锌矿^[39],Fe≤2% 的闪锌矿为贫铁闪锌矿^[40]。本矿区的闪锌矿 Fe 含 量为 0.30% ~ 0.38%, 平均 0.33%, 属于贫铁闪锌矿, 指示其形成温度较低,明显区别于区域上中高温热 液矿床中的闪锌矿。如维拉斯托银锡多金属矿床 中以富铁闪锌矿为主,闪锌矿中 Fe 含量大于 10%[41],且根据成矿地质条件分析,维拉斯托矿床 成矿地质体为高分异花岗岩[42],经历了中高温热液 成矿作用,发育高温标志矿物毒砂、锡石等。而昌 图锡力矿床是与中生代火山岩密切相关的一类中 低温热液矿床,以中低温矿石矿物方铅矿、闪锌矿、 银黝铜矿等为主,贫铁闪锌矿的分析结果进一步指 示矿床形成于中低温热液环境。结合矿物特征分 析,闪锌矿主要形成于金属硫化物阶段,大部分矿 物表面洁净,少量被方铅矿充填交代,还可见部分 矿物中黄铜矿呈乳滴状出溶。电子探针分析结果 显示,不同闪锌矿样品中均检测出了 Cd.同一钻孔 中采样位置自下而上,Cd含量平均值分别为 0.23%、0.38%、0.68%,展现出由低到高的变化趋势, 对应的 Zn 含量平均值为 65.68%、66.41%、66.81%, 也表现为由低到高的特征,因此,Cd与Zn具有很 好的相关性,是寻找闪锌矿的有利元素标志,进一 步印证了矿区1:1万土壤测量所显示的 Cd 与 Ag、 Pb、Zn 相互套合好、强度高的化探异常特征^[16],指 示其为找矿的重要地球化学标志。

5.3 锰矿物赋存特征

矿床中锰矿物主要包括原生菱锰矿及锰的氧 化物,菱锰矿为晚期低温石英-碳酸盐阶段的产物, 主要由 MnCO₃组成,成分较单一,与晚期银铅锌矿 石伴生,呈脉状充填于围岩裂隙中,或呈脉状穿切 早先形成的银铅锌矿石,还可见脉状菱锰矿包裹早 期形成的角砾状铅锌矿。通过对菱锰矿开展电子 探针分析(表 3), MnCO₃、FeCO₃、CaCO₃、MgCO₃ 的分子比数据显示,菱锰矿具有高锰低铁贫镁钙的 特征,属于狭义的菱锰矿范畴。姚敬幼[43] 对中国沉 积成因的菱锰矿成分进行了统计分析,结果表明 MnCO₃分子比基本都小于 0.910, CaCO₃分子比往 往变化于 0.06~0.130 之间。与之相比, 昌图锡力矿 床菱锰矿的 MnCO₃分子比为0.925~0.948,平均值 为0.936, CaCO₃的分子比为0.012~0.026, 平均值为 0.020, 明显与沉积成因的菱锰矿成分差异较大, 因 此,矿床中的菱锰矿并非沉积成因,结合菱锰矿的 碳、氧同位素指示成矿流体为深部岩浆来源[44],推 断菱锰矿为热液成因。

与菱锰矿相比,锰的氧化物成分复杂,表现为 多种矿物的集合体形态。本次选择矿床中常见的 软锰矿进行电子探针分析工作,软锰矿中 Mn 元素 含量较高,伴生有 Pb、K、Ca、Ag等其他元素。电子 探针图像(图 5~a)显示,软锰矿呈典型环带结构、胶 状构造。X 射线面扫描图像显示(图 5~b、c、d),Mn 元素图像整体亮度高,近于白色,环带不明显,这也 与分析结果指示的 Mn 的高含量特征一致,K 与 Ca 的弱环带特征指示,这 2 种元素含量不高,Pb 元素 在不同圈层环带的宽度和亮度均不同,内层环带较 细较暗,外层环带较宽较亮,代表了软锰矿在形成 过程中 Pb 含量不断增加,表明软锰矿中除 Mn 外, Pb 也是重要的富集元素。

5.4 矿物特征对矿床成因的指示意义

中生代以来,伴随蒙古-鄂霍次克洋及滨太平 洋的构造活动,内蒙古中东部及邻区的岩石圈遭受 了伸展及减薄作用的改造^[21,45],为大兴安岭地区的 大规模成矿作用奠定了基本的构造格架,提供了良 好的成矿地质条件。在区域成矿地质背景影响下, 昌图锡力矿区火山岩显示出伸展构造环境下 A 型 花岗岩的地球化学特征,赋矿围岩英安岩锆石U-Pb 年龄为 141 Ma,推测其成矿期与矿区周边的维拉斯 托锡银多金属矿、花敖包特银铅锌矿、沙麦钨矿、大



图 5 软锰矿电子探针照片(a)及主要元素(K、Ca、Pb)面扫描图像(b、c、d) Fig. 5 BSE image(a) and element(K,Ca,Pb) X-ray mappings(b,c,d) of pyrolusite

井锡多金属矿等矿床成岩成矿年龄一致^[46-49],形成 于 130~140 Ma 中生代成矿大爆发阶段。这一时 期,昌图锡力矿床处于伸展构造背景,富含成矿物 质的岩浆热液沿各类裂隙通道上升,形成大规模中 酸性火山岩及侵入岩,为矿床的形成提供了成矿物 质来源及热动力,并且在叠加改造早期构造的基础 上,构成了以北西向为主的次级断裂控矿系统,为 成矿元素的活化、沉淀和富集提供了运移通道及赋 矿空间,组成了区域上构造演化一岩浆活动一成矿作 用为一体的耦合成矿体系。

昌图锡力矿床与区域上的银铅锌多金属矿床 具有相似的成矿地质条件,矿床中矿体、矿石特征 显示矿床主要受构造控制,相对中低温的矿石矿物 组合、断裂控矿构造特征及广泛存在的热液蚀变均 指示,矿床并非喷流沉积成因而是与火山热液活动 有关。此外,矿石硫铅同位素组成特征表明成矿物 质主要来自深源岩浆^[44]。以上证据均指示矿床的 形成与热液交代作用密不可分。在成矿早期阶段, 石英、黄铁矿等相对高温矿物最早形成;随着成矿 系统由封闭体系向开放体系转变,伴随温度、盐度、 压力的降低,以及天水的加入造成流体系统物理化 学条件的改变,发生充填交代、流体沸腾、流体混合 等成矿作用,导致矿质逐步卸载、沉淀、富集,闪锌 矿、方铅矿等在金属硫化物阶段大量产生,各类矿 体呈脉状、透镜状赋存于北西向为主的构造破碎带 中;银矿物在硫化物阶段开始出现,在银矿物阶段 大规模形成,富银流体以银硫氢络合物的形式迁 移,随着温度的降低、压力和硫逸度的减小等物化 条件的变化,银硫络合物的平衡体系被破坏,部分 银从热液中析出沉淀,形成银黝铜矿、硫锑铜银矿 等银矿物,部分充填交代在方铅矿、闪锌矿等的内 部或裂隙中,部分以类质同像的形式分布在含银矿 物、方铅矿、闪锌矿等矿物晶格中。成矿晚期石英-碳酸盐阶段,形成菱锰矿、方解石、石英等典型低温 蚀变矿物,局部可见菱锰矿包裹早期形成的铅锌 矿。在表生成矿期,部分近地表矿体受风化淋滤及 氧化作用影响,导致早期形成的银铅锌锰矿体发生 二次氧化富集,银、铅、锰等矿物组分通过表生淋滤 作用从被氧化分解的金属硫化物中分离出来,并在 裂隙及溶蚀孔洞中形成锰铅银的氧化物等次生矿 物[50],进一步富集成品位较高的氧化矿体。综上所 述,昌图锡力矿床的矿物学特征及矿床基本地质特

征指示,该矿是受断裂构造、岩浆活动等多种地质 因素控制的浅成低温热液型银铅锌锰多金属矿床。

6 结 论

(1)昌图锡力银铅锌锰矿床成矿期可划分为热 液成矿期及表生成矿期,热液成矿期可进一步划分 出4个成矿阶段:石英-黄铁矿阶段、金属硫化物阶 段、银矿物阶段、石英-碳酸盐阶段。

(2) 矿床中的主要银矿物包括银黝铜矿、硫锑 铜银矿、深红银矿等,电子探针分析结果显示,在银 黝铜矿中 Ag 以类质同像的方式替代 Cu,方铅矿是 重要的载银矿物。

(3)金属硫化物主要为方铅矿和闪锌矿,方铅 矿按粒度可划分为2期,以第二期粗粒纯净的方铅 矿为主;闪锌矿属于形成于中低温环境的贫铁闪锌 矿,其中的Cd与Zn具有很好的相关性,是找矿的 重要地球化学标志。锰矿物主要包括菱锰矿及锰 的氧化物,菱锰矿为晚期低温石英-碳酸盐阶段的 产物,其形成非沉积成因而是热液成因;软锰矿电 子探针图像显示典型的环带状结构,除Mn外,还富 集 Pb 等其他元素。

(4) 昌图锡力矿床为浅成低温热液型银铅锌锰 多金属矿床。

致谢:本文实验测试工作得到河北省区域地质 矿产调查研究所实验室的大力帮助,审稿专家提出 了宝贵的修改意见,在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献

- [1] 刘建明,张锐,张庆洲.大兴安岭地区的区域成矿特征[J].地学前 缘,2004,11(1):269-277.
- [2] 葛文春,吴福元,周长勇,等.兴蒙造山带东段斑岩型 Cu、Mo 矿床 成矿时代及其地球动力学意义[J].科学通报,2007,52(20):2407-2417.
- [3] 武新丽,毛景文,周振华,等.大兴安岭中南段布敦化铜矿床 H-O-S-Pb 同位素特征及成矿指示[J].中国地质,2012,39(6):1812-1829.
- [4] Zeng Q D, Liu J M, Yu C M, et al. Metal deposits in the Hinggan Mountains, NE China: styles, characteristics and exploration potential [J]. International Geology Review, 2011, 53(7): 846–878.
- [5]陈良,张达,狄永军,等.大兴安岭中南段区域成矿规律初步研究[J]. 地质找矿论丛,2009,24(4):267-281.
- [6]张万益,聂凤军,刘妍,等.内蒙古东乌旗阿尔哈达铅-锌-银矿床 硫和铅同位素研究[J].吉林大学学报(地球科学版),2007,37(5): 868-877.
- [7] 江思宏,聂凤军,刘翼飞,等.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[J].矿床地质,2010,29(1):101-112.
- [8] 刘翼飞,樊志勇,蒋胡灿,等.内蒙古维拉斯托-拜仁达坝斑岩-热

液脉状成矿体系研究[J].地质学报,2014,88(12),2373-2385.

- [9] 匡永生,郑广瑞,卢民杰,等.内蒙古赤峰市双尖子山银多金属矿床的基本特征[J].矿床地质,2014,33(4):847-856.
- [10] 陈永清,黄静宁,卢映祥,等.中缅毗邻区金腊 Pb-Zn-Ag 多金属 矿田元素,稳定同位素和流体包裹体地球化学[J].地球科学, 2009,34(4):585-594.
- [11]何鹏,郭硕,张天福,等.大兴安岭中南段扎木钦铅锌银多金属矿 床成矿物质来源及矿床成因:来自 S、Pb 同位素的制约[J].岩石 学报,2018,34(12):3597-3610.
- [12] 江彪,武广,陈毓川,等.内蒙古巴林左旗双尖子山银多金属矿床 微量稀土元素特征及其矿床成因制约[J].地质学报,2008,92(4), 769-786.
- [13] 刘铭涛,陈向平,王居松,等.内蒙古大井铜多金属矿床流体包裹体研究及成矿作用探讨[J].地质调查与研究,2019,44(3):194-201.
- [14] 金若时, 刘永顺, 张跃龙, 等. 大兴安岭中南段昌图锡力锰、银、铅、 锌多金属矿床的发现及其意义[J].地质通报, 2017, 36(7): 1268-1275.
- [15] 郑全波,苏航,何鹏,等.内蒙古昌图锡力地区锰银铅锌多金属矿 的找矿标志[J].地质调查与研究,2019,42(1):39-46.
- [16]何鹏,张跃龙,苏航,等.综合找矿方法在内蒙古昌图锡力锰银铅 锌矿勘查中的应用[J].地质与勘探,2018,54(3):65-75.
- [17] Jahn B M, Wu F Y, Chen B. Grantitoids of the central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic. Transactions of the Royal Society of Edinburgh[J].Earth Sciences, 2000, 91: 181–193.
- [18]任纪舜,牛宝贵,刘志刚.软碰撞、叠覆造山和多旋回缝合作用[J].
 地学前缘,1999,6(3):85-93.
- [19] Ouyang H G, Wu X L, Mao J W, et al. The nature and timing of ore formation in the Budunhua Copper Deposit, southern great Xingan range: evidence from geology, fluid inclusions, and U–Pb and Re–Os geochronology[J].Ore Geology Reviews, 2014, 63: 238–251.
- [20] 赵一鸣.大兴安岭及其邻区铜多金属矿床成矿规律与远景评价[M]. 北京: 地震出版社, 1997: 125-144.
- [21] 聂凤军,温银维,赵元艺,等.内蒙古白音查干银多金属矿化区地 质特征及找矿方向[J].矿床地质,2007,26(2):213-220.
- [22]牛树银,孙爱群,王宝德,等.内蒙古大井铜锡多金属矿成矿物质 来源及成矿作用探讨[J].中国地质,2008,35(4):714-724.
- [23] 毛景文,谢桂青,张作衡,等.中国北方中生代大规模成矿作用的 期次及其地球动力学背景[J].岩石学报,2005,21(1):169-188.
- [24] 潘小菲, 王硕, 侯增谦, 等. 内蒙古道伦达坝铜多金属矿床特征研究[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(3): 402-410.
- [25]周振华,吕林素,冯佳睿,等.内蒙古黄岗夕卡岩型锡铁矿床辉钼 矿 Re-Os 年龄及其地质意义[J].岩石学报,2010,26(3):667-679.
- [26]张帮禄,张连昌,冯京,等.西昆仑玛尔坎苏地区奥尔托喀讷什大型 碳酸锰矿床地质特征及成因探讨[J].地质论评,2018,64(2):361-377.
- [27] 王璞, 潘兆橹, 翁玲宝. 系统矿物学(上、中、下册)[M]. 北京: 地质 出版社, 1982.
- [28] Sharp T G, Buseck P R. The distribution of Ag and Sb in Galena: Inclusions Versus Solid Solution [J]. American Mineralogist, 1993, 78 (1/2): 85–95.
- [29] 胡耀国,李朝阳,廖震文,等.贵州银厂坡银矿床银矿物特征及其 赋存状态[J].矿物学报,2000,20(2):150-159.

- [30]郑榕芬,毛景文,高建京.河南熊耳山沙沟银铅锌矿床中硫化物和 银矿物的矿物学特征及其意义[J].矿床地质,2006,25(6):715-726.
- [31] 唐燕文,谢玉玲,李应栩,等.浙江安吉多金属矿床金银赋存状态 及银矿物特征研究[J].岩石矿物学杂志,2012,31(3):393-402.
- [32] 王静纯,余大良.我国氧化矿石银的赋存状态研究[J].矿物岩石 地球化学通报,2006,25(2):129-132.
- [33] 赵留喜,孙亚光,余丽秀.中国锰银矿资源分布及特性[J].中国矿 业,2009,18(7):16-18.
- [34] 范晨子,王玲.河北相广锰银矿床中两种层状锰氧化物的矿物学 研究[J].矿物学报,2015,35(4):522-528.
- [35] 叶霖,刘铁庚.银和锰之间可能存在的联系[J].矿物岩石地球化 学通报,2000,19(4): 303-304.
- [36] 韩仲文,郭天威.中国银矿床的主要地质特征[J].中国地质,1990, (7):21-23.
- [37] 张百胜. 官地银金矿床氧化带划分的试验研究及物相锰在贫硫 化物型银矿床中的应用[J]. 矿产与地质, 1998, 12(5): 318-323.
- [38] 陈百友,王增润,彭省临,等.云南澜沧老厂红土型银锰矿床地质 特征及成因探讨[J].大地构造与成矿学,2002,26(1):86-91.
- [39] 黄民智,唐绍华.大厂锡矿石学概论[J].北京:科学技术出版社, 1998: 21-24.
- [40] 黄典豪.热液脉型铅-锌-银矿床富铁闪锌矿中硫化物包裹体成 因探讨[J].矿床地质,1999,18(3):244-252.

- [41] 钟日晨,杨永飞,石英霞,等.内蒙古拜仁达坝银多金属矿区矿石 矿物特征及矿床成因[J].中国地质,2008,35(6):1274-1285.
- [42] 张天福,郭硕,辛后田,等.大兴安岭南段维拉斯托高分异花岗岩体的成因与演化及其对 Sn-(Li-Rb-Nb-Ta)多金属成矿作用的制约[J].地球科学,2018,44(1):248-267.
- [43] 姚敬劬.我国沉积碳酸盐型锰矿中菱锰矿的成分特征[J].矿物学 报,1991,11(l):13-20.
- [44] 何鹏,郭硕,张阔,等.大兴安岭中南段昌图锡力银铅锌锰多金属 矿床成矿物质来源及矿床成因:来自 S-Pb-C-O 同位素的制约[J]. 地质学报,2019,93(8):2037-2054.
- [45] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 51-60.
- [46] 翟德高, 刘家军, 王建平, 等. 内蒙古甲乌拉大型矿床稳定同位素 地球化学研究[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 214-225.
- [47] 翟德高,刘家军,李俊明,等.内蒙古维拉斯托斑岩型锡矿床成岩、 成矿时代及其地质意义[J].矿床地质,2016,35(5):1011-1022.
- [48] 李俊建, 付超, 唐文龙, 等. 内蒙古东乌旗沙麦钨矿床的成矿时代[J]. 地 质通报, 2016, 35(4):524-530.
- [49] 梁小龙,孙景贵,邱殿明,等.大兴安岭西坡比利亚谷银铅锌多金 属矿床成因[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(3):781-799.
- [50] 田杰鹏,李俊建,宋立军,等.华北地区锰矿成矿规律初探[J].华北 地质,2021,44(3):58-64.