

内蒙古大井铜锡多金属矿成矿物质来源 及成矿作用探讨

牛树银¹ 孙爱群¹ 王宝德¹ 刘建明² 郭利军³ 胡华斌¹ 许传诗¹

(1. 石家庄经济学院 资源学院, 河北 石家庄 050031; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;
3. 内蒙古地质矿产开发局, 内蒙古 呼和浩特 010020)

提要: 大井铜锡多金属矿以矿床规模大、伴生元素多、矿脉展布窄而密集、品位较高而著称。但是, 矿区范围勘探并没有发现燕山期岩体, 矿床成因众说纷纭。笔者从幔枝构造视角研究认为, 矿区位于大兴安岭幔枝构造核部, 地幔热柱多级演化沟通了深部含矿流体, 并沿途萃取部分成矿物质, 在有利的成矿构造裂隙中集聚成矿。而成矿控矿裂隙的方向性则与成矿阶段区域构造应力场密切相关。至于在矿区内部的 Sn、Cu、Au、Ag、Pb、Zn 成矿元素的分带性, 应与成矿作用及成矿物质结晶温度有关, 结晶温压条件较高的 Sn、Cu、Au 等元素矿化多位于矿区中部, 而结晶温压条件较低的 Ag、Pb、Zn 等元素矿化则多位于矿区的外围。

关 键 词: 幔枝构造; 成矿作用; 物质来源; 多金属矿; 大兴安岭

中图分类号: P618.44; P618.41 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2008)04-0714-11

大井铜锡多金属矿床位于大兴安岭南段, 内蒙古林西县境内。经 30 余年的探采和研究, 该矿床已发展成 Sn、Zn、Ag 为大型, Cu、Pb 为中型, S、Co、Ni 等多种伴生组分可综合利用的大型铜锡多金属矿床。特别是以多矿脉密集排列、多元素共生组合、矿脉薄而品位富而引人瞩目^[1-3]。

1 问题的提出

正因为大井铜锡多金属矿床的特殊性而吸引了不少中、外地质学家从不同专业开展了广泛的科学研究, 尤其对该矿的成矿作用及控矿构造关注较多, 研究成果颇丰^[4-6]。

但是, 该区的大、中型内生金属矿产, 包括黄岗铁锡矿床、大井铜锡矿床、白音诺尔铅锌矿床、拜仁达坝铅锌矿、浩布高铅锌矿床、莲花岗铜矿床、维拉斯托银铅锌矿等大型矿床及一大批中小型矿床, 却均展布于大兴安岭主轴的黄岗—白音诺尔—乌兰浩特地区。笔者拟从幔枝构造的视角, 简要论述该区成

矿地质背景、成矿控矿构造, 然后重点探讨大井铜锡多金属矿成矿物质来源及成矿作用特征。

2 区域成矿地质背景

大兴安岭中南段幔枝构造展布于内蒙古自治区的东南部, 呈北东向绵延数百千米。对 Sn、Pb、Zn、Ag、Cu、S 等成矿元素有明显的控制作用。

2.1 区域成矿地质概述

大兴安岭中南段是区域变形-变质作用和岩浆活动均较强烈的地区, 并形成了以其主轴为中心的环带状结构, 是一发育不太典型的幔枝构造^[7-9]。其下部构造层以中低级变质的二叠纪板岩、片岩、千枚岩、变质粉砂岩等, 并与侵入其中的燕山期中酸性侵入岩体共同构成岩浆-变质核部杂岩。在拜仁达坝—道伦达坝、双井子—巴林桥、罕山—巴代艾来等地区还出露了一定面积的古元古界片麻岩系。在某些区段中酸性侵入岩被改造成为变形强烈的糜棱岩^[9]; 中间构造层为一套浅变质的中侏罗世地层, 由粗粒—细粒砂岩

收稿日期: 2008-01-08; 改回日期: 2008-03-13

基金项目: 内蒙古地质勘查重大科技项目(内地研 2004-05)及中国地质调查局地质大调查项目(1212010631106)资助。

作者简介: 牛树银, 男, 1952 年生, 教授, 主要从事构造地质与构造成矿的教学和科研工作; Email: niusy@sjzue.edu.cn。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

及黑色板岩组成, 夹有少量安山玢岩和凝灰质砂砾岩。砂岩遭受了轻微变质, 某些区段形成了多硅白云母、石香肠、拖尾及一系列滑动面理; 上部构造层则由未发生变形变质的晚侏罗世火山岩组成。并形成了与下部地层不协调的宽缓褶皱, 局部可见沿与下伏构造层间的不整合面发生低角度拆离滑脱。慢枝构造的形成与演化, 不仅成为主要的成矿控矿构造, 甚至改造和影响生态环境^[10]。

大兴安岭地区中生代强烈的岩浆活动, 则表现为大面积的火山喷发和大规模的岩浆侵入^[11,12]。火山活动多发生在中侏罗世—早白垩世, 以中酸性火山岩为主, 夹有少量中基性熔岩。其中, 以晚侏罗世火山活动最为活跃, 具有中基性- 中性- 酸性火山喷发旋回, 且表现出火山溢流- 爆发相交替, 间夹河、湖相沉积。岩石化学元素分析表明, 大兴安岭中生代火山岩具有明显的地幔组分, 反映未分异、未亏损源区特征, 是大陆岩石圈内部伸展背景下幔源岩浆参与地壳演化的证据。大兴安岭深成侵入活动与火山喷发密切伴生, 它们是同源岩浆的两种表现形式, 只是侵位晚于火山喷发。侵入活动主要集中于晚侏罗—早白垩世, 两者构成规模巨大的火山- 侵入岩带。侵入岩的主要类型为角闪二长花岗岩- 二长花岗岩- 钾长花岗岩, 晚期有碱性钠闪花岗岩和少量的超基性岩。具有由钙碱性向亚碱性、碱性演化的趋势。总体具有壳幔混熔花岗岩的特征, (Nd/t) 集中在 0~3, (Sr) 大多数集中在 0~20, 说明花岗质岩石的部分物质来源于 Rb 未亏损的地幔^[13]。

在地球物理特征上, 沿大兴安岭 NNE 方向 4 次趋势分析剩余重力异常等值线呈正、负带状依次排列。在其主轴部位从林西—甘珠尔庙—乌兰浩特为负异常区, 该带延长近 600 km, 宽 80~140 km, 最高负异常值可达 -28, 表明有大量花岗质侵入岩展布, 亦是中新生代强烈上隆的慢枝构造核部岩浆- 变质杂岩分布区。而在其西、东两侧分别为锡林浩特—西乌珠穆沁旗正异常带和大板—白城正异常带。正异常带亦有较为连续的延伸。值得提出的是, 大兴安岭地区大中型内生矿床均分布在黄岗—白音诺尔—乌兰浩特负异常带上, 且多集中于核部, 并具有不同方向成组、不同组等间距分布的特征, 表明其成矿作用应与深部过程具有密切的相关性。

2.2 矿区成矿地质特征

大井铜锡矿区位于大兴安岭中南段慢枝构造的

南部, 官地—桑木沟倒转向斜南东翼(图 1)。

(1) 区内地层。矿区内大部分被第四系覆盖, 出露的地层主要为二叠系林西组(P_2)。按岩性由老至新可分为 4 个岩性段: 砂板碎屑岩段, 以砂板岩为主的碎屑岩, 局部为粉砂岩及细粒杂砂岩夹层; 含磷碎屑岩段, 为灰黑、灰绿色含磷粉砂岩、细砂岩及少量中粒杂砂岩; 泥灰岩段, 为灰色粉砂岩夹泥灰岩; 杂色碎屑岩段, 由砂质板岩、细粒杂砂岩、含自形晶黄铁矿粉砂岩及紫色板岩组成。大井铜锡多金属矿床主要赋存于 、 两个岩性段中, 但矿化对围岩并无明显选择性, 而严格受构造控制^[4]。

(2) 地质构造。区内断裂构造亦很发育, 按其产状可分为二类: 一类为 NE 向区域性断裂, 断裂规模较大, 形成时间较早, 对区域地质演化具有控制作用。另一类为 NW 向断裂, 在矿区亦较为发育, 是主要的控矿构造。

(3) 侵入岩。矿区范围尚未见到一定规模的中、深成岩体, 甚至矿区内施工多孔近千米的钻孔也未见到岩体, 但岩脉则相当发育, 其岩性从基性、中性到酸性均有, 从脉岩蚀变特征推测, 次流纹岩、闪长玢岩较早, 云斜煌斑岩较晚, 石英二长斑岩更晚。从区域地质演化、构造分析以及地质体相互关系分析, 岩脉侵入时代应为侏罗纪晚期。

(4) 围岩的蚀变改造。赋矿围岩在成矿过程中主要经受了硅化和绢云母- 绿帘石化的改造。在硅化作用较弱地段, 表现为硅化对原有泥岩进行改造, 沿微裂隙形成有方向性的长条状硅化石英, 构成网格状或定向的硅化石英, 长条形石英长 0.03~0.1 mm, 长宽比例为 6:1~3:1。长条状石英间有连续的硅质纹相连, 由长条形硅化石英分割泥岩残留, 残留体大小不等, 边界受长条形硅化石英制约, 有似方形、长条形或不规则形。

在绢云母- 绿帘石化过程中, 绢云母- 绿帘石化表现为以脉体贯入为主, 呈线状交代和以蚀变块体形式的面式交代作用为主。

硅化石英颗粒: 成分散状, 多边形或不规则形, 粒度大小为 0.01~0.04 mm, 沿微裂隙分布, 有一定方向性, 颗粒边部有分叉或向泥岩残留延伸。

绢云母和绿帘石团块: 大体垂直边部硅质脉方向成多边形、长条状、角棱状、次角棱状、板状、不规则形态, 大小 40 mm×10 mm~40 mm×15 mm, 粒度为 0.01 mm×0.03 mm~0.01 mm×0.15 mm, 部分硅化石

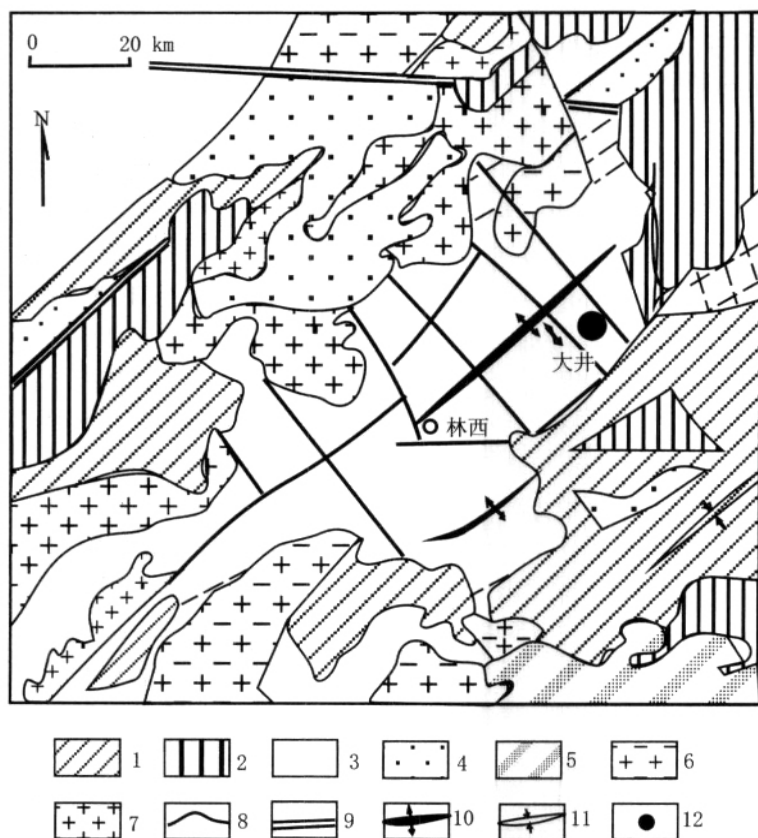


图1 林西地区地质简图

1—上侏罗统凝灰岩; 2—中侏罗统凝灰岩和碎屑岩; 3—上二叠统林西组; 4—下二叠统碎屑沉积岩;
5—志留系板岩、粉砂岩; 6—花岗岩闪长岩; 7—花岗岩; 8—地质界线; 9—主干断裂/断层; 10—背斜; 11—向斜; 12—矿床

Fig.1 Geological sketch map of Linxi area

1—Upper Jurassic tuff; 2—Middle Jurassic tuff and clastic rocks; 3—Upper Permian Linxi Formation;
4—Lower Permian clastic rocks; 5—Silurian slate and siltstone; 6—Granodiorite; 7—Granite; 8—Geological boundary;
9—Main fracture or fault; 10—Anticline; 11—Syncline; 12—Deposit

英被绢云母和绿帘石取代并保持原有硅化石英长条形状。

泥岩残留: 保持泥质颗粒结构特征, 多数成为后期萤石脉贯入的通道。

(5) 蚀变岩石结构构造。蚀变岩石的结构有粒状变晶结构、变余砂泥岩结构、交代变晶结构, 和脉状交代结构。蚀变岩石的构造有条带状构造、晶簇构造、滑动构造、脉状构造、角砾状构造、碎裂构造和块状构造。

2.3 矿床地质特征

矿区内已发现的矿体有 100 多个, 参与储量计算的 33 个。矿体形态复杂, 以不规则脉状为主。主矿体 1—8、10 号, 长 205~390 m, 其中 1 号矿体最大。

大井铜锡多金属矿床明显表现出热液充填交代

型特征:

(1) 该矿床是一个特大型铜锡多金属矿床。其中锡为大型, 锡品位为 0.2%~1.8%, 平均为 0.6%; 银为大型, 银品位为 40×10^{-6} ~ 150×10^{-6} , 平均为 100×10^{-6} ; 铅锌属大型, 铅+锌品位可达 5% 左右。铜为中型, 铜品位为 0.8%~15%, 平均为 2%。尽管单个矿脉较窄, 但是, 由于多成矿元素伴生, 且品位较富, 延深较稳定, 总体采矿效益较好。

(2) 矿带长 3 km, 宽约为 2 km, 已知矿脉数百条, 相应成群成带产出, 多呈 NW 走向, 倾向 NE, 矿体沿走向呈折线状, 沿倾向呈阶梯状。赋矿围岩为林西组含磷碎屑岩段和泥灰岩段为主。矿体绝大多数为盲矿体, 部分矿脉出露在地表。

(3) 矿体与构造裂隙和岩脉在空间、时间上密切

相关, 矿脉严格受构造裂隙控制, 往往呈裂隙充填式脉状产出, 也可沿岩脉上下盘贯入, 赋矿脉岩多是石英二长斑岩, 有时可切过赋矿脉岩, 甚至使岩脉全岩矿化。矿体一般呈裂隙脉状, 长度多在几十米至一、二百米, 脉宽多在 1~2 m, 延深 100~500 m, 矿脉的延深往往大于延长。也有部分复脉、交错脉展布, 甚至呈网脉状出现。

(4) 矿区围岩蚀变微弱, 蚀变带狭窄, 一般多在几个厘米, 多数不超出 10 cm。常见蚀变有硅化、绢云母化、绿泥石化、萤石化、碳酸盐化和地表局部岩石强赭石化。硅化、绢云母化主要与 Cu、Sn 矿化有关, 碳酸盐化主要与 Pb、Zn 矿化有关, 绿泥石化与两者均有伴随, 而萤石化往往偏晚。

(5) 矿石以块状硫化物为主, 矿石矿物主要为黄铜矿、黄铁矿、毒砂、锡石、方铅矿、闪锌矿、辉银矿、磁黄铁矿、铜蓝等。脉石矿物主要为石英、绢云母、绿泥石、方解石、萤石。

2.4 主要矿化特征

(1) 矿化特征。矿体数量众多, 成群成带产出, 矿化主要以充填脉状产出, 仅局部有浸染状和细脉-浸染状。矿体产状总体为走向北西, 倾向北东, 西部矿体倾角中等偏缓, 东部中等偏陡。矿化对地层和岩性无选择性, 矿床内林西组各段带和各种岩石中均有矿化赋存。

主要成矿元素铜、锡、铅、锌、银在宏观上具有明显的分带现象, 即平面上矿床中部以铜锡矿化为主, 向外过渡为以银铅锌; 剖面上浅部为银铅锌矿化, 向深部铜锡矿化逐渐增强。

(2) 矿化类型。矿石中金属矿物主要有黄铜矿、黄铁矿、毒砂、胶状黄铁矿、锡石、铁闪锌矿和方铅矿, 次为白铁矿、斑铜矿、银黝铜矿、砷黝铜矿、黝铜矿、磁黄铁矿、辉铜矿、方钴矿、辉钴矿、方黄铜矿、黄锡矿等。非金属矿物主要有石英、方解石、磷镁矿、萤石、绢云母、绿泥石等。氧化矿物有褐铁矿、孔雀石、蓝铜矿、铜蓝。

(3) 矿石结构。矿石结构以粒状结构为主, 其次为交代残留结构、交代穿孔结构、交代置换结构、乳滴状结构等; 矿石构造以脉状、细脉状、网脉浸染状构造、细脉浸染状构造和碎裂构造为主, 少量条带状构造、斑杂状构造、团块状构造。

矿石具有明显的灌入特征, 以黄铁黄铜矿石为例: 主要矿石成分为黄铁矿(60%), 黄铜矿(40%), 偶

见少量的金银矿。碎裂结构、交代结构。

黄铁矿: 黄铁矿成长条状—块状脉体沿裂隙贯入, 脉体中心为黄铁矿块体, 块体长度 3~6 mm, 边部黄铁矿粒度较小, 为 0.01~0.3 mm。黄铁矿黄色, 反射光下为淡黄色, 反射率中等, 反射率中强, 半自形—自形, 黄铁矿在围岩微裂隙中成 0.01~0.3 mm 的自形晶。黄铁矿形成之后有一次较强烈的破碎作用, 使黄铁矿表面形成强烈的破碎纹, 在颗粒边部破碎较强烈, 黄铁矿破碎成 0.02~0.2 mm 的碎块, 呈次圆状、次棱角状, 黄铜矿细脉沿破裂面贯入。

黄铜矿: 黄铜矿呈细脉状、枝杈状、团块状他形环绕在黄铁矿体的边部, 并沿裂隙贯入到黄铁矿中, 脉宽 0.02~0.6 mm, 在较大的黄铜矿块体内有次圆状、次棱角状黄铁矿碎粒, 黄铜矿细脉或黄铜矿交代成分较少时, 交代黄铜矿颜色较浅, 成浅黄铜色, 为交代的过渡产物。

金银矿: 含量较少, 偶见出现在黄铁矿与黄铜矿接触的边界, 沿裂隙边部和黄铁矿、黄铜矿的裂隙分布。

(4) 矿石矿物形成顺序。矿石矿物形成先后顺序往往根据它们之间的穿插关系来判断。在大井矿区矿石矿物较多, 也有明显的交切关系, 从统计学概念来分析, 一般表现出黄铜矿贯入黄铁矿, 方铅矿贯入黄铜矿, 金银矿沿裂隙贯入黄铁矿、黄铜矿和方铅矿。矿石形成先后为黄铁矿—黄铜矿—方铅矿—金银矿。矿石为多次成矿作用产物, 可分两个成矿阶段, 中高温热液成矿阶段: 为黄铁矿、黄铜矿成矿阶段; 中低温热液成矿阶段: 为方铅矿和金银矿成矿阶段。按矿石矿物的结构关系可分几个成矿期次, 黄铁矿—黄铜矿成矿期: 黄铁矿与黄铜矿常伴生在一起, 黄铁矿形成较早, 黄铁矿形成后有一次明显的破裂作用。方铅矿成矿期: 方铅矿贯入黄铜矿; 金银矿成矿期: 金银矿沿晚期全岩微破裂面贯入, 并在各种矿石矿物的裂隙边部沉淀。

3 成矿物质来源探讨

成矿物质来源是判定矿床成因类型的重要依据之一, 并决定着进一步找矿方向的确定。依据本课题所作测试数据及部分收集的资料, 重点探讨该区的成矿物质来源问题。

3.1 硫同位素特征

硫同位素组成可为硫的来源提供信息。来自地

球不同体系的硫同位素组成十分复杂。陨石、原始地幔的³⁴S变化范围在零值附近, 岛弧玄武岩- 安山岩、火山岩的³⁴S变化在 0‰ ~10‰, 花岗岩类一般为- 10‰ ~10‰, 现代海洋海水和海洋沉积物有较高的³⁴S, 淡水和淡水硫化物则有较大的值域范围, 一般为- 20‰ ~20‰。

大井铜锡矿床 68 件样品硫同位素测试分析表明, ³⁴S变化范围为- 2.5‰ ~3.4‰(表 1)。大兴安岭中南段幔枝构造区大部分矿床的³⁴S变化范围也多在- 3.0‰ ~3.0‰, 与陨石硫和地幔硫十分接近。且多数矿床硫同位素具有³⁴S黄铁矿>³⁴S闪锌

矿>³⁴S方铅矿变化规律。说明区内硫同位素基本已达到平衡, 硫同位素是来自未发生明显同位素分馏效应的原生硫, 反映其成矿物质总体具有深源性, 可能有少量来自围岩硫的加入。

3.2 铅同位素特征

铅同位素也是判断成矿物质来源的重要因素, 大井铜锡多金属矿床 32 件铅同位素组成²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.30 ~18.50, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.54 ~15.68, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 38.14 ~38.55(表 2), 大兴安岭中南段其他多金属矿床铅同位素测试结果为²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 17.70 ~18.40, ²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.53 ~15.61, ²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 37.78 ~38.47。铅同位

表 1 大井铜锡矿床与大兴安岭中南段多金属矿床硫同位素对比

Table 1 Correlation of sulfur isotopic compositions between the Dajing copper-tin deposits and polymetallic deposits in the south-central segment of the Da Hinggan Mountains

区类	矿区名称	样品数	变化区间	δ ³⁴ S 平均值	资料来源
研究区	大井铜锡矿床	2	-0.9~0.5	-0.2	本项目组*
		44	-2.5~3.4	0.1	冯建忠等 ^[14]
		22	-2~2.6	1.36	刘 伟 ^[15]
对比区	扁扁山铅矿	3	-2.5~0.07	-1.07	本项目组*
	拜仁达坝铅锌矿	3	-2.72~-0.16	-1.52	本项目组*
	花敖包特铅锌矿	3	-2.49~1.36	-0.58	本项目组*
	团结沟铅矿	1		3.3	本项目组*
	道仁达坝铜矿	1		-5.7	本项目组*
	白音诺尔铅锌矿	1		-0.7	本项目组*
		53		-3.45	张德全,1991

注: * 为中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈构造演化国家重点实验室稳定同位素实验室分析。

表 2 大井铜锡矿床与大兴安岭中南段多金属矿床铅同位素对比

Table 2 Correlation of lead isotopic compositions between the Dajing copper-tin deposits and polymetallic deposits in the south-central segment of the Da Hinggan Mountains

区类	矿床名称	样品数	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	资料来源
研究区	大井铜多金属矿床	2	18.33	15.56	38.20	本项目组*
		16	18.30	15.54	38.14	储雪蕾 ^[4]
		14	18.50	15.68	38.55	冯建忠等 ^[14]
对比区	扁扁山铅矿	3	17.70	15.53	37.78	本项目组*
	拜仁达坝银矿	3	18.40	15.61	38.47	本项目组*
	花敖包特铅锌银矿	3	18.23	15.55	38.12	本项目组*
	白音诺尔铅锌矿	1	18.31	15.55	38.16	本项目组*
		9	18.31	15.54	38.10	内蒙古三队
	团结沟铅锌矿	1	18.33	15.56	38.20	本项目组*
	道伦达坝铜矿	1	18.28	15.55	38.16	本项目组*

注: * 为中国地质科学院地质研究所同位素实验室分析。

素变化值界于赵伦山等(1988)划分的地幔与造山带之间。这可能是由于幔枝构造环带状结构,加之盖层厚度较大的原因,在成矿作用过程中,壳源物质加入的比例增多,反映在统计数字上,矿质具有多来源特征,但以地球深部为主。不同矿种也略现差异,其中铜金矿床铅同位素落入地幔演化线附近更多些,而银铅锌矿床落入造山带演化线附近较为普遍。

3.3 碳氢氧同位素特征

对于成矿热流体的来源,也即“水”的来源。常用的方法是测定各矿床石英或方解石中包体的氢、氧、碳同位素或热液包体的特征等。一般认为标准岩浆水 $^{18}\text{OH}_2\text{O} + 5\text{‰} \sim 10\text{‰}$, $\text{D}(\text{SMOW}) - 40\text{‰} \sim 80\text{‰}$, $^{13}\text{C} - 5\text{‰} \sim 8\text{‰}$ 。

大井铜锡矿床经测温后计算的 $^{18}\text{OH}_2\text{O}$ 值为 $16.9\text{‰} \sim 2.1\text{‰}$; DH_2O 值为 $-91\text{‰} \sim 105\text{‰}$; ^{13}C 值为 $-7.3\text{‰} \sim -4.7\text{‰}$ (表 3,图 2)。与大兴安岭中南段多金属矿床的碳、氢、氧同位素数据相近。将氧同位素值投点于 $\text{D}-^{18}\text{O}$ 坐标图,可见多数矿床氧同位素投点落在原生岩浆水附近,而远离大气水和变质水,表明氢、氧、碳同位素均支持本区内生多金属矿床的成矿流体主要来自岩浆水。储雪蕾等^[4]研究也表明,大井矿床不同矿化阶段的碳酸盐具有非常

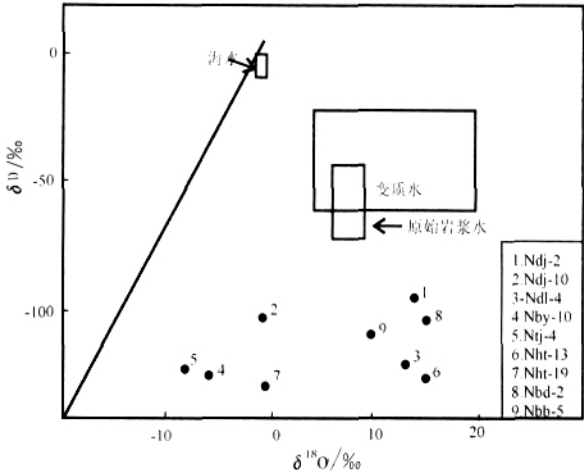


图 2 成矿流体 $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ 图解
Fig.2 Diagram of $\delta\text{D}-\delta^{18}\text{O}$ of ore-forming fluids

接近的 ^{13}C 值,这意味着热液流体各阶段的 CO_2 与硫相同,都来自深源岩浆,具有地幔硫和碳同位素特征,表明深源岩浆带有幔源岩浆的特点,但也确有少量大气水的加入。

3.4 氦氩同位素特征

本矿区挑选主要载体矿物黄铜矿和闪锌矿各 1 件样品,送中国地质科学院矿产资源研究所分析稀有气体氦、氩同位素。测得 $^3\text{He}/^4\text{He} (\times 10^{-6})$ 含量范围

表 3 大井铜锡矿床和大兴安岭中南段多金属矿床碳、氢、氧同位素特征
Table 3 Carbon, hydrogen and oxygen isotope characteristics of the Dajing copper-tin deposits and polymetallic deposits in the south-central segment of the Da Hinggan Mountains

区类	序号	矿床名称	测定矿物	$\delta^{18}\text{O}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$
研究区	Ndj-2	大井铜多金属矿	方解石	16.9 (CO_2)		-91	-7.3
	Ndj-10	大井铜多金属矿	方解石	-2.1 (CO_2)		-105	-4.7
对比区	Ndl-4	道伦达坝铜矿	石英	13.7		-122	
	Ndl-6	道伦达坝铜矿	石英			-108	
	Nby-10	白音诺尔铅矿	石英	-5.4		-125	
	Ntj-4	团结沟铅矿	石英	-7.6	13.30	-122	
	Nht-13	花敖包特铅锌银矿	石英	14.7	7.12	-126	1.81
	Nht-19	花敖包特铅锌银矿	方解石	-0.6 (CO_2)		-133	-5.2
	Nbd-2	拜仁大坝铅矿	石英	15.4	15.40	-104	5.41
	Nbb-5	扁扁山铅多金属矿	石英	10	10.00	-107	0.02

注:由中国地质科学院矿床资源研究所同位素实验室分析。

表4 大井矿床氦同位素特征

Table 4 Helium isotope characteristics of the Dajing deposit

样品号	样品名称	$^3\text{He}/^4\text{He}$ (10^{-6})	$^4\text{He}\times 10^{-7}$ $\text{cm}^3\text{STP/g}$	$^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$	$^{40}\text{Ar}\times 10^{-7}$ $\text{cm}^3\text{STP/g}$
Ndj—2	黄铜矿	4.39 ± 0.66	6.00	299 ± 3	1649 ± 13	5.50 ± 0.03	29.40
Ndj—2	闪锌矿	3.58 ± 0.68	2.22	307 ± 4	1666 ± 20	5.42 ± 0.14	10.74

注:由中国地质科学院矿产资源研究所同位素实验室分析。

为 3.58×10^{-6} ~ 4.39×10^{-6} (表4), 平均 3.99×10^{-6} 。将硫化物中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 与空气的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 相比, 其值域为 2.69~9.01R_a, 平均 5.3R_a。 $^{40}\text{Ar}/^{36}\text{Ar}$ 比值为 299~307, 同样显示了深部地幔流体参与了成矿作用。

3.5 稀土配分模式

大井主要矿石矿物黄铜矿、锡石的稀土配分模式与区内次火山脉岩的稀土配分模式十分相似, 表明成矿物质与成岩物质系来自同一岩浆源。王莉娟^[9]对铜铅锌阶段石英包裹体流体 REE 配分曲线均显示深源流体特征, 反映了成矿物质来源于地幔, 且表明大井矿区萤石中存在中- 高温、低盐度含锡和中- 低温、中等盐度含铜两种流体包裹体, 该两种流体包裹体的分布、气液比、温度- 盐度关系初步显示它们是两种不同的流体体系在同一空间上的叠加成矿的特征。

3.6 微量元素

黄铁矿中 Co、Ni、Mn 含量较高, 且 $\text{Co}/\text{Ni}>1$, 锡石中 Fe、Mn、In 高而 Nb、Ta 很低, 这些都表明了岩浆热液成矿的特点。

4 成岩成矿构造特征

从区域成矿特征分析, 很多成矿集中区的展布均与区域构造密切相关。而区域构造研究是地质学研究最活跃的领域之一^[16], 成矿作用与区域构造的关系亦是地质学家关注的重要内容^[17-19]。按照地幔热柱多级演化及幔枝构造成矿控矿作用特征分析, 地壳上绝大部分地区无矿化或矿化较弱是正常的, 而某些区段集中成矿则是异常现象, 说明有成矿物质的大规模聚集。很明显, 成矿作用发生的必要条件首先是成矿物质来源, 而成矿物质的来源有两种基本认识: 一种认为主要萃取自含矿围岩; 另一种认为主要来自深源。过去曾一度下大力气寻找矿源层, 但结果并不理想。而更多的证据表明成矿物质主要来自深源, 甚

至可能来自核—幔边界, 通过地幔热柱多级演化向上迁移。幔枝构造则是地幔热柱多级演化的第三级构造单元, 也是地幔热柱多级演化在地表(壳)的表现形式。具体的成矿控矿构造则是脆- 韧性剪切带, 主、次级拆离带, 铲状断裂, 岩体内、外接触带, 次火山岩构造, 不同方向、不同性质的断裂, 甚至裂隙, 它们分别控制着矿带、矿田、矿床、矿体、矿脉等的就位及储集, 是主要的成矿控矿构造^[9]。

具体到大井铜锡多金属矿区, 同样与深部成矿作用密切相关。首先, 大井铜锡多金属矿位于大兴安岭中南段幔枝构造的核部主轴隆起部位, 并且发育于具有一定等间距性的黄岗梁—大井成矿集中矿聚区; 其次, 区域构造上看, 大井铜锡矿床位于黄岗梁—白音诺尔复式背斜东南翼, 也有人称其为构造岩浆带。强烈的构造岩浆活动为深部矿源的上升打通了迁移通道。尽管矿区范围没有出露侵入岩体, 但是据地球物理推测, 其一定深度仍有燕山期侵入体存在; 第三, 从矿田构造角度上看, 大井矿区是一个穹隆构造, 总体上以二叠系为核部, 而以侏罗系为外围的隆起。矿区范围分布有大量中基性- 中性- 酸性脉岩, 其本身也表明穹隆下边可能存在着规模较大的燕山期侵入岩体, 它不仅是穹隆构造的形成原因, 同时也是岩体不同期次侵入活动的表现形式; 第四, 王玉往等^[3]所作大井矿区 600 m 标高矿体分布图上, 出现一个非常显著的特征, 那就是矿区中部矿脉宽而稀少, 向外围矿脉窄而密集, 这种特征本身也说明矿区中部是隆起中心, 形成围绕中心的一系列构造裂隙, 并为后期矿液流体的储集提供了集聚空间(图3); 第五, 赵利青等^[9]所作的大井矿区 700 m 标高矿化元素 (Cu、Sn、Pb、Zn、Ag) 品位之和趋势图, 在矿区中部具有非常明显的浓聚中心, 换句话说应该是含矿流体的扩散中心(图4); 第六, 成矿元素在垂直和水平方向具有明显的分带性, 即自下而

上或中心至边部依次为 Sn—Cu、Sn—Cu、Pb、Zn—Pb、Zn。这也表明, 含矿流体携带有多种成矿元素, 从下往上、从中心往外围扩散过程中, 成矿温度高的元素先结晶, 形成在中部, 而成矿温度低的元

素迁移距离较远, 在矿区的相对外围结晶, 以至于形成成矿物质的垂向和水平分带(图 5)。这种铜锡多金属伴生成矿, 并在成矿作用过程中表现出的垂向分带和水平分带本身, 就反映出了慢枝构造矿控

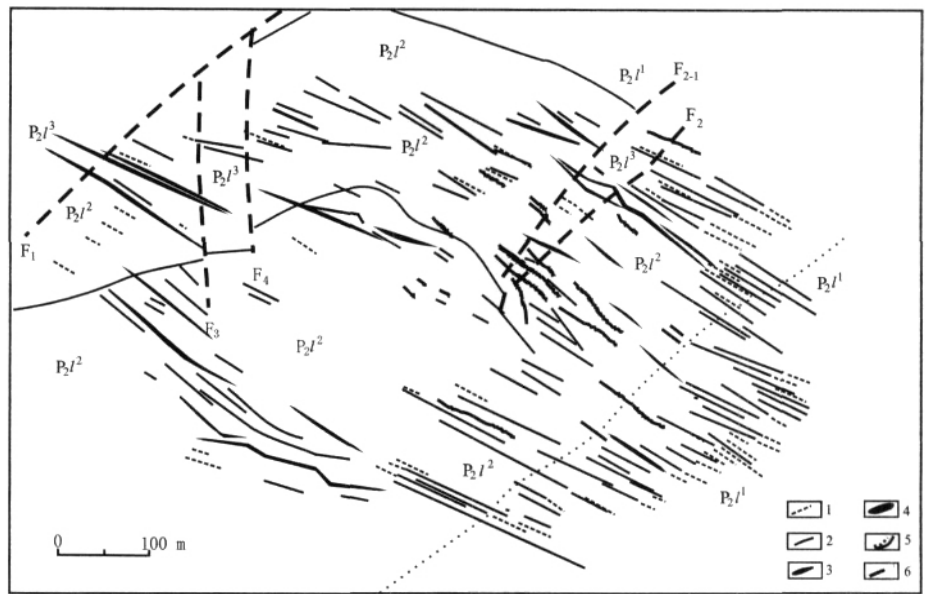


图 3 大井矿床 600 m 标高矿体分布图^[3]

1—勘探圈定的 Pb、Zn 矿体; 2—勘探圈定的 Cu、Pb、Zn 矿体; 3—勘探圈定的 Cu、Sn 矿体;
4—勘探圈定的 Sn 矿体; 5—地层界线; 6—断层

Fig.3 Distribution of orebodies at an elevation of 600 m in the Dajing deposit ^[3]

1—Lead-zinc orebody delineated by exploration; 2—Copper-lead-zinc orebody delineated by exploration;
3—Copper-tin orebody delineated by exploration; 4—Tin orebody delineated by exploration; 5—Geological boundary; 6—Fault

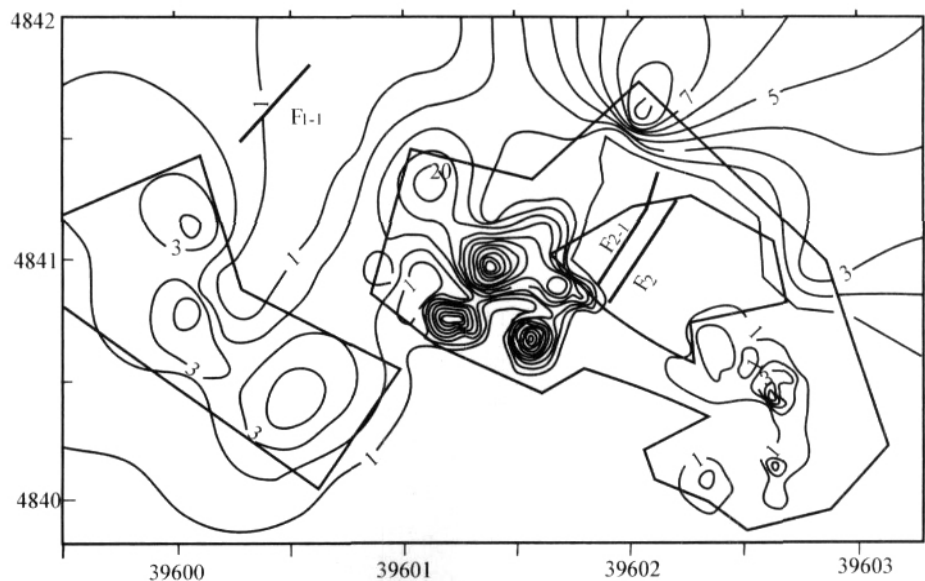


图 4 大井矿床 700 m 标高附近矿化元素(Cu、Sn、Pb、Zn、Ag)之和平面图(据赵利青等^[6]略修改)

Fig.4 Plan of the mineralized element (copper-tin-lead-zinc-silver) association at an elevation of 700 m in the Dajing deposit (after Zhao Liqing et al^[6])

矿构造特征。而矿脉主要延北西向展布的特征表明,在脉岩的形成及其成矿过程中,北西向构造处于区域性压扭性构造应力场。而据此归纳出来的成矿模式对在矿区深部及其外围找矿具有很好的指导作用,受到了勘查单位的高度评价。

5 基本认识

成矿作用是矿床学研究的前沿课题,它不仅涉及到成矿物质来源、迁移通道、储集场所、含矿流体特征,还要涉及到成矿地球化学场、地球物理场特征、成矿控矿构造、围岩条件等很多因素^[19-21]。

如果上述分析是客观的,真实的,那么,大井铜锡多金属矿床研究又一次表明:在地壳中绝大多数区域无矿(化)是正常的,而某些区段有矿(化)集中

展布则是异常现象,它往往位于慢枝构造的范围,甚至很可能表现出大中型矿床星罗棋布,连片分布的特征。如大兴安岭中南段,绝大多数 Sn、Cu、Au、Ag、Pb、Zn 等矿床集中分布于大兴安岭慢枝构造的轴部,实际上就是慢枝构造成矿控矿的典型实例。至于在矿区内部的 Sn、Cu、Au、Ag、Pb、Zn 成矿元素的分带性,则与成矿作用特征及结晶温度有关。慢枝活动时强时弱,成矿作用就会时断时续,时多时少。成矿元素的分布除受构造因素的控制以外,还与成矿元素的结晶温压条件相关,结晶温压条件较高的 Sn、Cu、Au 等矿化多位于矿区中部,而结晶温压条件较低的 Ag、Pb、Zn 等矿化则多位于矿区的外围。按上述成矿控矿构造分析,深部成矿流体是沿慢枝构造轴部局部燕山期岩浆隆起上部裂隙贯入,并依温压梯度分带集聚结晶成矿。按着这种成矿模式预测,脉状矿体下部应存在大脉型或断裂蚀变岩矿体,甚至有可能存在斑岩型矿床。当然,其赋矿深度也应该大一些,应在小面积有效地球物理探测资料的验证下开展深部地质勘探。

致谢:感谢大井铜锡多金属矿和天津华北地勘局地质普查大队在野外研究中所给予的热情支持。

参考文献 (References):

- [1] 王永争,覃功炯,欧强. 内蒙古林西大井铜锡多金属矿区构造与成矿[J]. 地质与勘探, 2001: 37(5): 19- 23.
Wang Yongzheng, Qin Gongjiong, Ou Qiang. The structure and mineralization of Dajing Copper-Tin-Polymetallic deposit in Linxi, Inner-Mongolia[J]. Geology and Prospecting, 2001: 37(5): 19- 23(in Chinese with English abstract).
- [2] 李如满,康利祥. 大井锡多金属成矿地质特征及找矿方向探讨[J]. 矿产与地质, 2004: 18(6): 517- 522.
Li Ruman, Kang Lixiang. Metallogenic characteristics of Dajing Tin polymetallic deposit and its prospecting direction[J]. Mineral Resources and Geology, 2004: 18(6): 517- 522(in Chinese with English abstract).
- [3] 王玉往,曲丽莉,王京彬,等. 大井锡多金属矿床矿石矿物成分及时空演化[J]. 矿床地质, 2002, 21(1): 23- 35.
Wang Yuwang, Qu Lili, Wang Jingbin, et al. Ore minerals in Dajing tin-polymetallic deposit, Inner Mongolia, and their temporal and spatial evolution [J]. Mineral Deposits, 2002, 21 (1): 23- 35(in Chinese with English abstract).
- [4] 储雪蕾,霍卫国,张巽. 内蒙古林西县大井铜多金属矿床的硫、碳和铅同位素及成矿物质来源[J]. 岩石学报, 2002, 18(4): 566- 574.
Chu Xueli, Huo Weiguo, Zhang Xun. S, C and Pb isotopes and sources of metallogenic elements of the Dajing Cu-polymetallic

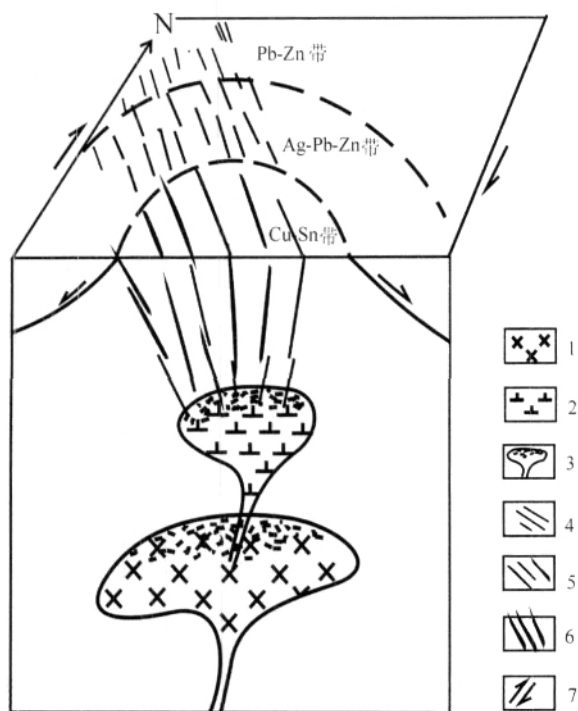


图5 大井铜锡多金属矿成矿模式

1—中基性深成侵入岩体;2—酸性侵入岩体;3—含矿流体;
4—Pb-Zn 矿化带;5—Ag-Pb-Zn 矿化带;6—Cu-Sn 矿化带;
7—区域构造应力场

Fig.5 Ore-forming model of the Dajing copper-tin polymetallic deposit

1-Intermediate-mafic pluton;2-Intermediate-acid intrusion;
3-Ore-bearing fluids;4- Lead-zinc mineralization zone;
5-Lead-zinc-copper mineralization zone;
6-Copper-tin mineralization zone;
7-Regional tectonic stress field

- deposit in Linxi County, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(4): 566- 574(in Chinese with English abstract).
- [5] 王莉娟, 王玉往, 王京斌, 等. 大井矿床锡铜矿体成矿流体研究及其成因意义[J]. *岩石学报*, 2000, 16(4): 609- 614.
- Wang Lijuan, Wang Yuwang, Wang Jingbin, et al. Study of tin and copper metallogenetic fluid from Dajing deposit and its genetic significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 16 (4): 609- 614(in Chinese with English abstract).
- [6] 赵利青, 上本武, 覃功炯, 等. 大井锡多金属矿床矿化元素分布特征研究[J]. *地质与勘探*, 2002, 38(4): 22- 27.
- Zhao Liqing, Uemoto Takeshi, Qin Gongjiong, et al. Distribution of mineralization elements in Dajing Tin—Polymetallic deposit, China[J]. *Geology and Prospecting*, 2002, 38(4): 22- 27(in Chinese with English abstract).
- [7] Niu Shuyin, Guo Lijun, Liu Janming, et al. Tectonic ore- controlling in the middle- southern segment of DaHingan Ling, Northeast China [J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2006, 25: 62- 70.
- [8] 牛树银, 郭利军, 刘建明, 等. 内蒙古白云诺尔铅锌矿的成矿作用与找矿预测[J]. *西部资源*, 2006, (1): 9- 12.
- Niu Shuyin, Guo Lijun, Liu Janming, et al. Mineralization and metallogenetic prognosis of Baiyinnuoer Lead- zinc Mine in Inner Mongolia[J]. *Resources of Western Regions of China*, 2006, (1): 9- 12(in Chinese).
- [9] 张履桥, 邵济安, 郑广瑞. 内蒙古甘珠尔庙变质核杂岩[J]. *地质科学*, 1998, 33(2): 140- 146.
- Zhang Luqiao, Shao Jan, Zheng Guangrui. Metamorphic core complex in Ganzhuermiao, Inner Mongolia [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1998, 33(2): 140- 146 (in Chinese with English abstract).
- [10] Niu Shuyin, Sun Aiqun, Li Hongyang, et al. Mantle/Crust eco- environmental effects as exemplified by Zhangjiakou- West Beijing Region[J]. *Chinese Journal of Geochemistry*, 2004, 23: 1- 14.
- [11] 邵济安, 张履桥, 牟保垒. 大兴安岭中南段中生代的构造热演化[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(3): 193- 200.
- Shao Jan, Zhang Luqiao, Mu Baolei. Tectono- thermal evolution of middle- south section of the Da Hinggan Mountains [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(3): 193- 200(in Chinese).
- [12] 邵济安, 张履桥, 贾文, 等. 内蒙古喀喇沁变质核杂岩及其隆升机制探讨[J]. *岩石学报*, 2001, 17 (2): 283- 290.
- Shao Jan, Zhang Luqiao, Ja Wen, et al. Harkin metamorphic core complex in Inner Mongolia and its upwelling mechanism [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17 (2): 283- 290 (in Chinese with English abstract).
- [13] 邵济安, 张履桥, 牟保垒. 大兴安岭中生代伸展造山过程中的岩浆作用[J]. *地学前缘*, 1999, 6(4): 339- 346.
- Shao Jan, Zhang Luqiao, Mu Baolei. Magmatism in the Mesozoic extending orogenic process of Da Hinggan TMS [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(4): 339- 346 (in Chinese with English abstract).
- [14] 冯建忠, 艾霞, 吴俞斌, 等. 内蒙大井多金属矿床稳定同位素地球化学特征[J]. *吉林地质*, 1994, 13(3): 60- 66.
- Feng Jianzhong, Ai Xia, Wu Yubin, et al. The stable isotopic geochemistry of the Dajing polymetallic deposit, Inner Mongolia[J]. *Jiling Geology*, 1994, 13(3): 60- 66.
- [15] 刘伟, 李新俊, 谭骥. 内蒙古大井铜- 锡- 银- 铅- 锌矿床的流体混合作用——流体包裹体和稳定同位素证据 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2002, 32(5): 405- 414.
- Liu Wei, Li Xinjun, Tan Jun. Fluid- mixing function of Dajing Cu- Sn- Ag- Pb- Zn deposits in Inner Mongolia——Evidence of fluid inclusions and stable isotopic [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 32(5): 405- 414(in Chinese).
- [16] 李廷栋. 中国岩石圈构造单元[J]. *中国地质*, 2006, 33(4): 700- 710.
- Li Tingdong. Lithospheric tectonic units of China [J]. *Geology in China*, 2006, 33(4): 700- 710(in Chinese with English abstract).
- [17] 袁学诚. 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因 [J]. *中国地质*, 2007, 34(5): 737- 758.
- Yuan Xuecheng. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: revisited [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (5): 737- 758(in Chinese with English abstract).
- [18] 程先琼, 朱介寿, 蔡学林, 等. 东亚地幔流动速度研究[J]. *中国地质*, 2006, 33(4): 896- 905.
- Cheng Xianqiong, Zhu Jieshou, Cai Xuelin, et al. Mantle flow velocity of East Asia[J]. *Geology in China*, 2006, 33(4): 896- 905 (in Chinese with English abstract).
- [19] 牛树银, 孙爱群, 邵振国, 等. 地幔热柱多级演化及其成矿作用 [M]. 北京: 地震出版社, 2001: 1- 225.
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Shao Zhenguo, et al. The Multistage Evolution of Mantle Plume and Its Mineralization [M]. Beijing: Seismological Press, 2001: 1- 225 (in Chinese with English abstract).
- [20] 牛树银, 李红阳, 孙爱群, 等. 幔枝构造理论与找矿实践 [M]. 北京: 地震出版社, 2002, 1- 243.
- Niu Shuyin, Li Hongyang, Sun Aiqun, et al. Mantle Branch Structure Theory and Exploration Practice [M]. Beijing: Seismological Press, 2007: 1- 243(in Chinese with English abstract).
- [21] 牛树银, 孙爱群, 王宝德. 地幔热柱与资源环境[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1- 264.
- Niu Shuyin, Sun Aiqun, Wang Baode. Mantle Plume and Natural Resources Environment [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1- 264 (in Chinese with English abstract).

Source of ore-forming materials and mineralization of the Dajing Cu-Sn polymetallic deposit, Inner Mongolia

NIU Shu-yin¹, SUN Ai-qun¹, WANG Bao-de¹, LIU Jan-ming²,
GUO Li-jun³, HU Hua-bin¹, XU Chuan-shi¹

(1. Resources College, Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang Hebei 050031, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

3. Bureau of Geology and Mineral Resources, Hohhot 010020, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Dajing Cu-Sn polymetallic deposit is characterized by its large size, many associated elements, narrow and dense ore veins and high grades. However, no Yanshanian intrusions were found within the limits of the ore field, so the genesis of the deposit is in controversy. From a viewpoint of mantle branch tectonics, the deposit is situated at the core of the Da Hinggan Mountains mantle branch, and the multiple evolution of the mantle hot plume linked up the deep hydrothermal ore fluids. The ore fluids extracted some ore materials on the way, which concentrated in favorable structural fractures and formed the deposit. The orientation of ore-controlling fractures is closely related with the regional structural stress field during mineralization. The zoning of the ore-forming elements Sn, Cu, Au, Ag, Pb and Zn within the deposit should be related to mineralization and crystallization temperatures of ore materials. The mineralizations of the elements such as Sn, Cu and Au, which crystallized under higher P-T conditions, are in the center of the ore field; whereas the mineralizations of the elements such as Ag, Pb and Zn, which crystallized under lower P-T conditions, were mostly localized in the surroundings of the deposit.

Key words mantle branch; mineralization; source of ore-forming materials; polymetallic deposit; Da Hinggan Mountains

About the first author: NIU Shu-yin, male, born in 1952, professor; engages in teaching and scientific research on tectonics and its related mineralization; E-mail: niusy@sjzue.edu.cn.