

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

柞水银洞子银铅多金属矿床地球化学特征、成矿模式及找矿预测

王瑞廷¹⁾, 任涛²⁾, 李建斌²⁾, 代军治¹⁾, 王东生¹⁾, 王义天³⁾, 闫臻⁴⁾

- 1) 西北有色地质勘查局, 西安, 710054; 2) 西北有色地质勘查局七一三总队, 陕西商洛, 726000; 3) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 4) 中国地质科学院地质研究所, 北京, 100037

内容提要:柞水银洞子银铅多金属矿床岩、矿石稀土总量变化较大, 稀土分配模式总体均为右倾型, 富集轻稀土, 重稀土分异不明显, 重晶石脉、矿石皆呈负铈异常, 铈亏损这一特征反映了成矿过程中的海底热水溶液作用。该矿床硫同位素组成变化范围大, 且以重硫为主, 主矿体含矿溶液总硫值与泥盆纪海水基本一致, 反映硫源来自半封闭还原条件的泥盆纪海水。铅同位素分析表明矿床铅来源主要为深源, 与海底火山活动存在一定关系。已有的同位素年龄数据和研究分析表明该矿床形成于中泥盆世, 成矿作用与热水沉积成岩作用同时发生, 相关证据也证明热水沉积作用是主要的成矿方式。研究认为, 该矿床属热水喷流沉积成因, 银洞子银铅多金属矿床的形成可以分为海底喷气沉积成矿和改造成矿期两个成矿期, 前者是本矿床最主要的成矿期, 形成了热水沉积岩(重晶石岩、硅质岩等)以及细粒金属矿物, 建立了成矿模式。结合区内地质勘查工作, 提出了 5 条找矿标志, 并通过资料研究分析, 从矿区外围找矿和新区找矿两个方面进行找矿预测, 指出了 8 片预测靶区。这为深化认识柞水-山阳沉积盆地内成矿机理和指导找矿指明了方向。

关键词: 银洞子银铅多金属矿床; 地球化学; 热水沉积; 成矿模式; 找矿预测

银洞子银铅多金属矿床地处秦岭造山带柞水-山阳泥盆纪沉积盆地(矿集区)西部(图 1), 位于陕西省柞水县以东 16 km 处, 是一个以银为主, 伴生铅、铜、锌、钴及铁等元素的多金属矿床。该矿床发现于 1970 年, 1979 年曾获金属储量银 2216 吨、铅 21.78 万吨和铜 6.39 万吨, 1981 年提交矿床地质勘探报告, 20 世纪 90 年代初建成大型矿山(陕西银矿)。1987~1994 年深部找矿新增金属储量铜 6.64 万吨、银 1058 吨和铅 10.9 万吨, 矿床向北深部仍有延伸。前人就该矿床的地质特征、沉积环境、矿物学、成矿机制、成矿物质来源及矿床成因等方面进行过大量的研究工作, 取得了一些重要的成果(张本仁等, 1989, 1994; 黄宾等, 1991; 薛春纪, 1991; 王焰等, 1994; 炎金才, 1995; 王相等, 1996; 李延河等, 1997; 方维萱, 1999; 方维萱等, 2000; 王贵荣等, 2002; 端木合顺, 2003; 朱华平等, 2003; 朱华平, 2004^①; 王瑞廷, 2005^②; 王瑞廷等, 2008)。总体认为该矿床受特定层位控制, 同生沉积构造明显, 后期改造作用弱,

基本完整地保存了原始热水沉积的特征, 属于热水沉积-弱改造矿床, 但对矿床地球化学特征和成矿模式等方面缺乏系统研究。本文针对该矿床地球化学特征进行系统深入研究, 应用硫、硅、氧、铅等同位素资料, 详细探讨了矿床地球化学特征及规律, 提出成矿模式和找矿标志, 并进而开展找矿预测, 为该矿床及其外围进一步的找矿工作提供理论依据和科学指导。

1 成矿地质背景

银洞子银铅多金属矿床处于南秦岭加里东-华力西期铅、锌、铜、银、铁、锰、钒、重晶石成矿带, 该矿床与其西侧的大西沟铁矿床产于同一地层中, 二者以车房沟为界, 西部系以菱铁矿、含铜重晶石为主的大西沟铁矿床, 东部主要是产出多金属硫化物矿石和含铜磁铁矿石的银洞子多金属矿床(图 2)。矿床所处的柞-山盆地北以商丹断裂为界, 南为山阳-凤镇断裂所限, 晚古生代时期演化为弧前盆地(王宗起

注: 本文为“十一五”国家科技支撑计划项目(编号 2006BAB01A11)资助的成果。

收稿日期: 2009-06-28; 改回日期: 2009-10-07; 责任编辑: 郝梓园。

作者简介: 王瑞廷, 男, 1969 年生。博士, 教授级高工。主要从事矿床地球化学研究与勘查技术管理工作。Email: wrtyf@163.com。

等,2009),盆地中沉积了一套半深海至深海相类复理岩沉积建造,厚度愈万米。出露地层主要为泥盆系中、上统牛耳川组(D_2n)、大西沟(青石砭)(D_2d)组、下东沟组(D_3xd)、桐峪寺组(D_3ty),为一套岩石类型简单,沉积韵律发育的热液沉积复理岩建造,主要岩石为泥、碎屑岩、碳酸盐岩,生物化石极少,属浅海-半深海浊流沉积。

区域上岩浆岩发育,主要有三个期次的岩浆作用。加里东期岩体主要沿凤镇—山阳断裂侵入,较为典型的有小岭花岗岩、李家砭辉绿-辉长岩、迷魂阵石英闪长岩和冷水沟闪长岩,相关的矿化较弱,主要为铜、磁铁矿和黄铁矿化;印支期花岗岩沿商丹大断裂侵入,规模较大,且呈岩基状分布于该区北部,自西而东主要有柞水二长-闪长花岗岩岩体、曹坪石英二长-二长花岗岩岩体(基)和沙河湾岩体,岩体与古生代地层接触带常形成较宽的热蚀变角岩化带;燕山期岩浆活动主要发生在柞-山地区的东部,形成中酸性小斑岩体(株)群,同时伴有少量爆发角砾岩,主要有袁家沟、二元沟、小河口、原子街、土地沟、下官坊等单元,围岩接触带普遍发育矽卡岩化、角岩化,常伴有铜、铁、钼、金矿化,个别能达到小型矿床规模,如小河口铜矿床。研究表明,印支期、燕山期岩浆作用对柞-山地区层控金属矿床的成矿有一定的改造作用。

矿区出露地层主要为中泥盆统大西沟组第二岩性段中、上部及第三岩性段的下部,岩石组成以千枚岩为主,碳酸盐岩次之,少量细砂岩和硫酸盐岩。在横向上岩性变化很大。其中,第二岩性段上部是银洞子矿床主要含矿层位(图3),层厚295~538 m,岩性主要为绿泥绢云千枚岩、铁白云质千枚岩、铁白云质结晶灰岩、绢云母结晶灰岩、(含重晶石)粉砂质千枚岩、似碧玉岩及钠长岩。

矿区位于文公庙向斜南翼,其构造形态为一向北倾的单斜层。片理构造甚为发育,主要见于各类千枚岩中,一般走向与褶皱轴线一致,稳定北倾,当地层绕曲时,片理不变,因而产生切穿层理现象,使层理破坏而难以辨认,而砂质及碳酸盐岩石片理则不明显(黄宾等,1991;王相等,1996)。区内最大的断裂是NNW向马耳峡断裂及与之平行的韭菜沟断裂。断层产状 $80^\circ\sim 85^\circ/\angle 70^\circ\sim 80^\circ$,长数千米,具多期活动性特点,其内发育有宽数米至十余米的破碎带,属张扭性断裂。此外,区内NW向、NE向、近SN向小断裂发育且对层状矿体均具有轻微破坏作用,局部也充填有后期改造形成的磁铁矿脉或多金

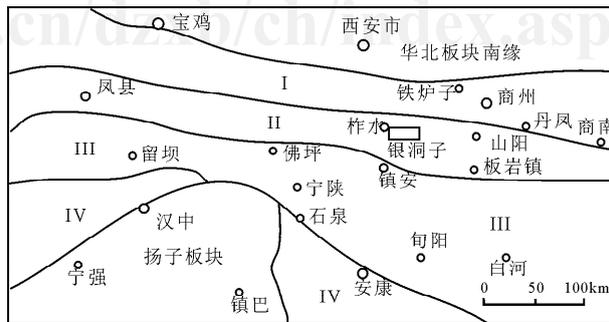


图1 秦岭造山带构造单元及矿区大地构造位置

Fig. 1 Geotectonic location of structure unit and ore field in QinBa region

I—北秦岭早古生代褶皱隆起带; II—凤县-柞水-山阳华力西褶皱带; III—留凤关-旬阳-白河印支褶皱带; IV—北大巴早古生代褶皱带

I—Lower Paleozoic fold belt of north Qinling; II—Fengxian-Zhazhui-Shanyang Variscan fold belt; III—Liufengguan-Xunyang-Baihe Indosinian fold belt; IV—Lower Paleozoic fold belt of north Daba mountain

属矿脉。

区内岩浆岩不发育,除少数顺层产出的煌斑岩脉和石英铁白云石脉外,仅在大西沟矿床西北部约4~5 km处出露柞水二长-闪长花岗岩岩体,其单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为 213.6 ± 1.8 Ma(胡健民等,2004),属印支期产物,岩体与层状矿体无直接关系。刘树文等(2008)获得柞水岩体似斑状黑云二长花岗岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年龄为 209 ± 1.7 Ma 和 198.8 ± 2.1 Ma,并研究认为其早期岩浆侵位时代为 219 ± 2 Ma;中期阶段侵位时代为 210 ± 4 Ma;晚期岩浆侵位时代为 199 ± 2 Ma(课题内交流待发表资料),这些年龄数据基本吻合,表明区内印支期构造岩浆活动相对较发育。

2 矿床地质特征

银洞子矿床范围西自车房沟东到马耳峡,长3.3 km,宽1.4 km,面积约4.6 km²。矿区构造呈一个弧形的缓倾单斜层,走向 NWW 至 SN,倾向 NNE 至 E,倾角 $20^\circ\sim 35^\circ$ 。这个单斜层上有时叠加次级的膝状绕曲,其长虽不过数百米,但可以造成鞍部矿层加厚,并伴生走向小断层。矿区内还见有少数横向的充填矽岩脉的断裂及一组 X 型剪切小断层,它们的错距一般不过数米至十数米,其应力条件显示与褶皱同时生成的除外,没有发现大的断层。矿区西北被一巨大的花岗岩基——柞水岩体所截断,它是

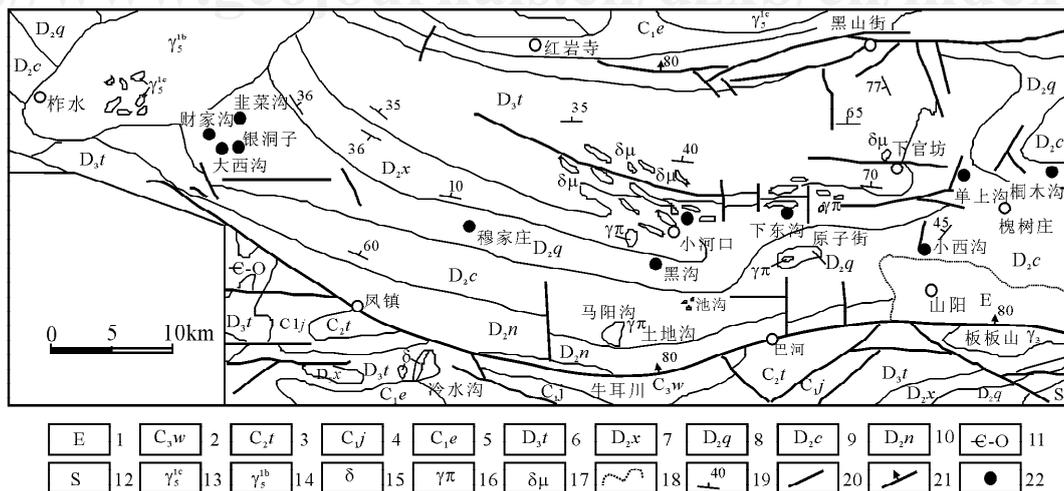


图2 柞水-山阳矿集区地质矿产略图

Fig. 2 Geological and minerals sketch map of the Zhashui-Shanyang ore deposits cluster

1—第三系;2—上石炭统武王沟组;3—中石炭统铁厂锅组;4—下石炭统介河组;5—下石炭统二峪组;6—上泥盆统桐峪寺组;7—上泥盆统下东沟组;8—中泥盆统青石垭组;9—中泥盆统池沟组;10—中泥盆统牛耳川组;11—寒武-奥陶系;12—志留系;13—细粒斑状花岗岩;14—黑云母花岗岩、角闪黑云花岗岩;15—花岗闪长岩;16—花岗斑岩;17—闪长玢岩;18—角度不整合;19—地层产状;20—断层;21—深大断裂;22—矿床及矿点

1—Tertiary; 2—Upper Carboniferous Wuwangou Group; 3—Middle Carboniferous Tiechangguo Group; 4—Lower Carboniferous Jiehe Group; 5—Lower Carboniferous Eryuhe Group; 6—Upper Devonian Tongyusi Group; 7—Upper Devonian Xiadonggou Group; 8—Middle Devonian Qingshiya Group; 9—Middle Devonian Chigou Group; 10—Middle Devonian Niuerchuan Group; 11—Cambrian-Ordovician System; 12—Silurian System; 13—fine-grained porphyritic granite; 14—biotite granite, hornblende biotite granite; 15—granodiorite; 16—granite porphyry; 17—dioritized porphyrite; 18—angular discordance; 19—Stratigraphy dip; 20—fault; 21—large and deep fracture; 22—ore deposit and occurrence

晚海西-印支期构造岩浆活动的产物,外侧围岩有数百米宽的热变质带,但无任何热液蚀变现象。

矿区内蚀变作用较弱或无明显围岩蚀变,仅在矿体上下盘附近围岩有褪色化现象和弱的绿泥石化、硅化、黄铁矿化及碳酸盐化。在层状矿体中及其上下盘附近,出现典型热水沉积标志的化学沉积作用形成的硅质岩、钠长岩及重晶石岩等。

银洞子银铅多金属矿床所有矿体均产于大西沟组地层第二岩性段上部层位,呈层状、似层状平行排列,与围岩产状一致,界限清楚,且同步发生褶曲。赋矿围岩是经区域变质作用而形成的,为一套浅海相泥质-碳酸盐建造,其岩性为绿泥绢云千枚岩、磁铁(菱铁)千枚岩、铁白云质绿泥绢云千枚岩、绢云母结晶灰岩、粉砂质(板状)千枚岩夹重晶石岩、似碧玉岩、钠长岩。矿体呈层状、似层状,形态简单,产状稳定,具多层性。各矿体相互平行排列,其间夹层厚度为3~30m。现已圈出Ag、Cu、Pb、Zn各类矿体(组)35个,各矿体沿走向有明显的分带,铁矿体分布在2线以西,小铜矿体分布在7~33线间,主矿

体和小铅锌矿体分布在矿区东部的25~101线间。其中13号矿体是该矿床的主要矿体,分布于矿层最下部(图4),向上依次为10、9、8、7、21、20、19和18号等小铅锌矿体组。银洞子矿床各矿体呈现出明显的水平分带特征,沿走向自西而东为:Cu-Fe→Cu-Ag→Pb-(Zn)-Ag→Ag-Cu→Pb。倾向上自浅(南)至深(北)垂直分带为:Pb→Pb-Ag→Ag-Cu→Cu。时间上的演化规律自早到晚(剖面中自下而上)为:Cu-Ag→Zn-Pb→Pb。

13号矿体为Ag-Cu-Pb-Zn的综合矿体,分布于25~101勘探线之间,长1900m,厚0.75~23m,平均厚4.44m。集中了全矿床Ag储量的72%,Pb储量的72.4%,Zn储量的100%和Cu储量的44.6%,构成了本矿床最主要的矿体。矿体连续性较好,厚度变化不大,矿体底板为板状,倾向NNE,倾角30°~45°。矿体比较稳定,形态较为简单,仅在65~69勘探线间矿体厚度变化较大,并有少数分枝。

该矿体的主要特点是:①层位固定,即产于大西

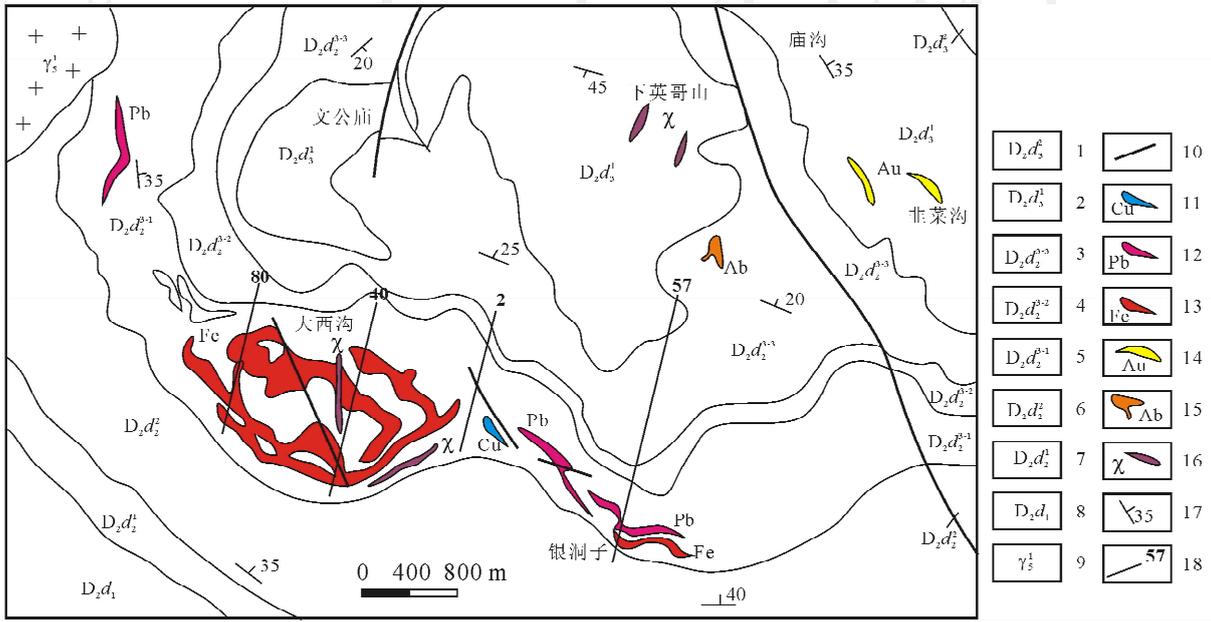


图 3 大西沟-银洞子菱铁多金属矿田地质图

Fig. 3 Geological sketch map of Daxigou-Yindongzi polymetallic ore field

1—大西沟组第三岩性段第二层; 2—大西沟组第三岩性段第一层; 3~5—大西沟组第三岩性段第三层; 6—大西沟组第二岩性段第二层; 7—大西沟组第二岩性段第一层; 8—大西沟组第一岩性段; 9—印支期花岗岩; 10—断层; 11—铜矿体; 12—铅矿体; 13—铁矿体; 14—金矿体; 15—石英钠长岩脉; 16—煌斑岩脉; 17—地层产状; 18—勘探线

1—The second layer of the third lithologic section in Daxigou Group; 2—the first layer of the third lithologic section in Daxigou Group; 3~5—the third layer of the third lithologic section in Daxigou Group; 6—the second layer of the second lithologic section in Daxigou Group; 7—the first layer of the second lithologic section in Daxigou Group; 8—the first lithologic section in Daxigou Group; 9—Indosinian granite; 10—fault; 11—copper orebody; 12—lead orebody; 13—iron orebody; 14—gold orebody; 15—imandrite dike; 16—lamprophyre dike; 17—stratigraphy occurrence; 18—exploration line

沟组地层第二段的中下部, 其下盘以含炭质为主, 多为深灰色-灰黑色的含炭绢云千枚岩、含炭绿泥绢云千枚岩和含炭钙质千枚岩, 夹有结晶灰岩、白云岩和菱铁矿的透镜体; 上盘主要为绢云结晶灰岩和含铁白云质结晶灰岩夹绢云千枚岩。②组成矿体的含矿岩石以含有含铁白云石、绿泥石和黄铁矿为主要特征, 并夹有特有的重晶石岩, 似碧玉岩和钠长岩的透镜体或条带, 含矿岩石的岩性特殊。③矿体和近矿围岩普遍褪色而呈灰白色-淡灰色。④普遍含有闪锌矿, 银含量也较高。

纵观 13 号矿体主要成矿元素产出分布特征, 沿矿体走向、倾向(水平、垂向)成矿元素均有明显的分带现象, 总体规律为: 走向上自西向东表现为: Fe→Pb(Cu)→Pb、Ag→Cu、Ag→Pb; 沿倾向自浅(南)至深(北)为: Pb→Pb、Ag→Ag、Cu→Cu。

金属矿物有方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、黄铁矿、毒砂、砷黝铜矿、磁铁矿、磁黄铁矿、菱铁矿和银矿物等。银矿物主要为辉银矿和自然银, 分布在黝铜矿、方铅矿中。脉石矿物主要为重晶石和钠长石, 其次

为绿泥石、方解石、石英、含铁白云石和绢云母等。

矿石结构主要为他形中细粒-均粒结构、斑状结构、溶蚀交代结构、交代结构、固溶体析离结构、包含结构、共生边结构、碎裂结构和残碎斑结构; 矿石构造主要为条纹、条带状构造, 其次为角砾状构造、斑杂状构造、脉状构造。

根据矿石构造特征, 可划分出以下矿石类型: ①条纹、条带浸染状矿石; ②条纹、条带状矿石; ③细脉浸染状矿石; ④斑杂状矿石。根据矿石中主要金属元素组合和矿石技术加工性能, 并参考矿床工业指标, 可划分出银矿石(分为含铅银矿石、含铜银矿石和银矿石)、铅矿石、铜矿石 3 种矿石类型。

3 矿床地球化学特征

3.1 岩石地球化学分析

3.1.1 常量元素

银洞子银铅多金属矿床岩、矿石化学成分分析表明(表 1), 矿区岩石总体以富含 FeO、CaO、MgO、Na₂O、TiO₂, 而贫 Fe₂O₃、SiO₂、Al₂O₃ 等组分, 而且

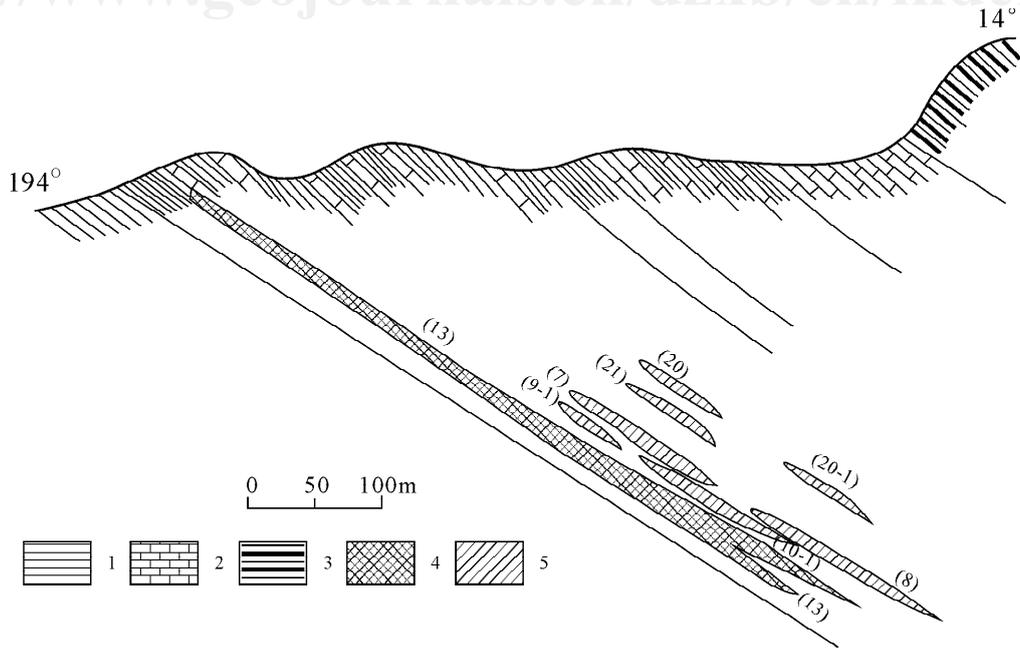


图 4 银洞子银铅多金属矿床 57 号勘探线地质剖面图(据炎金才,1995)

Fig. 4 Geological section map for NO. 57 exploration line of the Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit (after Yan Jincai,1995)

1—千枚岩;2—灰岩;3—炭质板岩;4—银铅矿体;5—铅矿体;(7)—括号中数字为矿体编号

1—phyllite; 2—limestone; 3—carbonaceous slate; 4—silver and lead orebody; 5—lead orebody; (7)—the orebody number

Fe^{2+}/Fe^{3+} 值高,反映了该区泥盆纪沉积盆地总体为还原性质。与围岩相比较,矿石中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 K_2O 较低,而 FeO 、 Fe_2O_3 、 MgO 、 Na_2O 、 MnO 等组分含量高,这与热液改造作用有关。矿石的平均 FeO/Fe_2O_3 值高于岩石的相应值,说明矿层形成时的环境更为还原。

3.1.2 微量元素

朱上庆等(1988)、张本仁等(1989)和王焰等(1994)对银洞子银铅多金属矿床矿体和地层中黄铁矿的 Co 、 Ni 、 S 、 Se 分析表明,矿体中黄铁矿的 Co/Ni 值平均 >1 ,显示出热液改造特征,而矿区沉积地层中黄铁矿的 Co/Ni 值平均 <1 ,反映了典型的正

表 1 银洞子银铅多金属矿床岩、矿石化学成分(%)

Table 1 Chemical composition of rock and ore in the Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit (%)

样号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	Na_2O	K_2O	CaO	P_2O_5	H_2O^+	Los	Total
E5	53.41	/	17.53	1.85	4.13	0.18	2.52	0.47	4.48	5.03	0.11	1.2	7.79	98.94
E4	53.95	/	18.20	2.03	6.98	0.18	1.70	0.97	3.67	4.51	0.12	2.68	3.98	99.07
E3	52.99	/	17.94	1.49	5.82	0.23	1.70	0.90	1.25	4.33	0.08	2.60	5.93	95.35
E2	21.6	/	6.02	0.86	2.63	0.20	0.65	0.15	1.67	34.31	0.05	0.72	20.16	89.41
E11	54.33	/	16.30	1.95	6.21	0.26	1.46	0.29	4.38	3.75	0.17	1.90	7.38	98.45
E14	53.65	/	19.94	2.05	1.51	0.11	1.30	0.71	4.82	3.72	0.12	3.18	3.16	94.35
M377	52.89	0.65	18.49	2.81	2.62	0.13	1.32	3.73	4.23	1.37	0.14	0.43	1.46	90.38
SPC	57.15	0.68	17.42	0.78	0.62	0.02	0.89	3.96	2.43	0.75	0.28	0.32	0.40	85.70
E15	33.98	/	9.45	5.49	21.19	0.93	1.65	2.25	1.61	1.95	0.13	1.32	12.91	93.17
E16	41.41	/	12.85	5.59	16.4	0.93	1.05	2.62	1.97	1.57	0.10	1.50	9.98	96.18
E7	49.94	/	17.04	1.63	7.11	0.25	1.46	0.54	3.72	4.8	0.11	1.32	5.73	93.83

注:据张本仁等,1989;薛春纪,1997;E5—条带状铁白云岩,E4—绿泥绢云母千枚岩,E3—铁白云质绢云千枚岩,E2—绢云结晶灰岩,E11—铁白云质千枚岩,E14—绢云千枚岩,M377—硅质岩,SPC—硅质岩,E15—含铜银矿石,E16—银矿石,E7—铅矿石;采用化学方法分析,/为未分析 TiO_2 。

常沉积成因。矿体中黄铁矿的 S/Se 值一般 $>3 \times 10^4$, 具有沉积成因黄铁矿特征。

3.1.3 稀土元素

表 2、表 3 列出了银洞子银铅多金属矿床岩(矿)石稀土元素含量及其特征参数。由表可以看出白云质千枚岩、千枚岩的稀土总量不高, 轻度富集轻稀土, 重稀土分异中等, 稀土分配模式为右倾型, Σ REE 分别为 56.3×10^{-6} 和 69.29×10^{-6} , $(La/Yb)_N$ 为 4.23、9.57, δCe 为 0.90、1.06, 白云质千枚岩具负铈异常, 千枚岩具正铈异常, δEu 为 1.27、1.26, 均为正铈异常(图 5、图 6), 这与本区正常沉积岩的 Eu 亏损特征(薛春纪, 1997)不一致; 硅质白云岩稀土总量较高, 富集轻稀土, 重稀土分异不明显, 稀土分配模式为右倾型, Σ REE 为 122.6×10^{-6} , $(La/Yb)_N$ 为 7.75, δCe 为 0.78, δEu 为 1.60, 亦为正铈异常, 这些正铈异常可能与热液作用有关, 暗示了矿区热液作用的存在; 铁白云石脉稀土总量也较高, 富集轻稀土, 重稀土分异不明显, 稀土分配模式为右倾型, Σ REE 为 119.2×10^{-6} , $(La/Yb)_N$ 为 7.03, δCe 为 0.84, δEu 为 1.01, 为负铈正铈异常; 重晶石脉的稀土总量极低, 略富集轻稀土, 重稀土分异不明显, 稀土分配模式为近平缓的右倾型, Σ REE 仅为 16.1×10^{-6} , $(La/Yb)_N$ 为 3.52, δCe 为 0.87, δEu 为 1.09, 亦为负铈正铈异常, 与海水特征相似, 其正铈异常与钠长石的存在有密切关系; 铅(银)矿石稀土总量变化较大, 稀土分配模式总体也为右倾型, Σ REE 变化范围为 $6.2 \times 10^{-6} \sim 149.58 \times 10^{-6}$, $(La/Yb)_N$ 为 3.49~8.99, δCe 为 0.78~0.89, δEu 为 0.69~1.85, 矿石均为负铈异常, 铈亏损这一特征反映了成矿过程中海底热水溶液的作用。

3.2 同位素地球化学分析

3.2.1 硫同位素

张本仁等(1989)和炎金才(1995)先后从矿区围岩到矿石对该矿床硫同位素进行了全面分析, 分析表明: ① 13 号银铅矿体的硫化物硫同位素值为 $+4.0\% \sim +22.7\%$, 除个别样品较低外, 多集中在 $+13\% \sim +19\%$ 之间, 平均为 $+15.1\%$ 。此外, 对构成矿体主要组成部分的重晶石的分析表明, 重晶石的 $\delta^{34}S$ 全为较高的正值, 分布范围为 $+21\% \sim +28.48\%$ 。张本仁等(1989)利用黄铁矿、方铅矿、闪锌矿矿物共生对, 计算了 13 号矿体成矿热液系统的总硫值为 $+22.6\% \sim +23.8\%$, 与硫化物硫同位素值接近, 表明含矿溶液的硫同位素已经达到了平衡状态。② 13 号矿体的底板绿泥绢云千枚岩中的

$\delta^{34}S$ 值为 $+10.2\% \sim +22.1\%$, 与下部非含矿地层中的硫化物明显不同, 具有偏富 ^{34}S 。③ 位于 13 号矿体之上的小铅矿体群的硫同位素值较小, 在 $-1.69\% \sim +2.36\%$, 富集 ^{32}S 。④ 小铅矿体群顶板围岩的硫同位素值是接近于零的负值 ($-0.12\% \sim -0.3\%$), 富集 ^{32}S 。⑤ 矿区千枚岩中硫化物的硫同位素组成为 $-3.2\% \sim +6.5\%$, 平均为 $+2.37\%$, 与矿体相比明显偏富 ^{32}S 。硫同位素分布总特征是: ① 全矿床 $\delta^{34}S$ 值的特征是变化范围大, 其分布范围为 $-3.5\% \sim +28.48\%$, 极差 31.98% (炎金才, 1995), 以正值为主, 在频率直方图(图 7)上分布不均一, 但在矿床的不同部位 $\delta^{34}S$ 值具有相对集中的趋势, 其分布形态既不同于岩浆热液矿床的塔式分布, 也不同于弥散状的典型沉积矿床。② 硫化物 $\delta^{34}S$ 值具有明显的分带性, 即从矿体到围岩, 硫化物 $\delta^{34}S$ 值有逐渐降低的趋势, 13 号矿体及其底板硫化物的 $\delta^{34}S$ 值最高, 向上、向下均变低。这可能是由于在热水沉积作用发生的深水滞流洼地中, 当热水喷溢到海底时, 因含矿热水密度大于海水密度, 从而产生双层水体沉积体系, 形成了对 SO_4^{2-} 的封闭系统。即硫酸盐还原作用的速率比硫酸盐供给速率大, 从而造成这种成矿环境中硫化物富 $\delta^{34}S$ 的特点(王贵荣等, 2002)。③ 在横向上, 同一矿体硫化物的 $\delta^{34}S$ 值变化不大, 如 13 号矿体黄铁矿和方铅矿的 $\delta^{34}S$ 值基本在 $+15\%$ 附近, 黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值略大, 方铅矿略小; 小铅矿体群黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值略大于 0, 而方铅矿略小于 0。④ 在后期热液改造过程中, 随着改造作用的加强, 原生沉积的条带状或层块状矿石常重结晶变为团块状矿石, 粒度变粗, 矿物的 $\delta^{34}S$ 值也呈增大趋势。

综上所述, 银洞子矿床硫同位素组成变化范围大, 且以重硫为主, 主矿体含矿溶液总硫值与泥盆纪海水 ($\delta^{34}S = +17\% \sim +22\%$) 基本一致, 反映硫源来自半封闭还原条件的泥盆纪海水。银洞子矿床成矿期热水的 pH 值为 7~8, Eh 值是 $-0.40 \sim -0.17$ V, 成矿环境参数 $\log fO_2 = -44.91 \sim -38.12$ (陈德兴等, 1990), 这也说明成矿期热(海)水为还原介质条件。

3.2.2 硅氧同位素

银洞子银铅多金属矿床含矿硅质岩的 $\delta^{30}Si = -0.2\% \sim 0.1\%$, 平均 -0.1% ; $\delta^{18}O = 19.1\% \sim 19.6\%$, 平均 19.4% (表 4)。硅同位素在自然界中的变化主要由硅同位素动力学分馏引起, 硅同位素动力学分馏的实验研究表明, 溶液中 SiO_2 的沉淀速

表 2 银洞子银铅多金属矿床岩、矿石稀土元素含量($\times 10^{-6}$)Table 2 REE contents of rock and ore in the Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit($\times 10^{-6}$)

样号	YD01	YD02	YD03	YD04	YD05	YD06	YD07	93-83	YD08	YD09	YD10	YD11	YD12	YD13	YD14	93-96
岩(矿) 石性质	银(铅) 矿石	银矿石	贫铅 矿石	银铅 矿石	铅矿石	铁白云 石脉	重晶 石脉	银矿石	贫铅 矿石	贫铅 矿石	白云质 千枚岩	铅矿石	硅质条 带矿石	条带状 矿石	硅质 白云岩	千枚岩
La	12	21	16	4	5	24	2	30.25	21	26	6	3	9	1	29	12.88
Ce	28	40	29	8	12	47	6	60.31	37	49	19	5	16	2	46	26.83
Pr	4.6	6.3	4.6	1.4	1.9	7.2	1.0	6.76	5.9	7.5	4.0	0.8	2.6	0.4	6.5	2.71
Nd	13	18	14	4	6	21	3	30.84	17	20	14	2	8	1	17	15.07
Sm	3.3	5.0	4.1	1.3	1.6	5.0	0.9	5.49	4.3	4.7	4.0	0.5	2.0	0.3	4.1	2.57
Eu	0.8	1.4	1.8	0.8	0.6	1.5	0.3	1.12	1.4	1.4	1.5	0.1	0.7	0.1	2.5	1.08
Gd	2.9	4.8	4.8	1.4	1.8	4.5	1.0	4.71	4.5	4.5	3.4	0.5	1.8	0.3	5.8	2.73
Tb	0.5	1.0	0.9	0.3	0.4	0.9	0.2	0.65	0.9	0.9	0.6	0.1	0.4	0.1	0.9	0.39
Dy	2.0	3.7	3.4	1.1	1.5	3.3	0.8	3.97	3.4	3.6	1.9	0.4	1.5	0.2	3.9	2.49
Ho	0.6	1.2	1.0	0.3	0.5	1.0	0.2	0.81	1.1	1.1	0.5	0.1	0.5	0.1	1.2	0.45
Er	1.1	2.0	1.8	0.6	0.8	1.9	0.4	2.07	1.9	2.0	0.8	0.2	0.9	0.1	2.2	1.03
Tm	0.3	0.5	0.4	0.1	0.2	0.5	0.1	0.34	0.5	0.5	0.2	0.1	0.2	0.1	0.5	0.16
Yb	1.1	2.0	1.8	0.6	0.9	1.9	0.4	1.95	1.9	2.0	0.8	0.2	0.9	0.1	2.2	0.78
Lu	0.3	0.5	0.5	0.1	0.2	0.5	0.1	0.31	0.5	0.5	0.2	0.1	0.2	0.1	0.6	0.12

注: 93-83、93-96 据朱华平, 2004; 其它为本文数据, 样品由有色金属西北矿产地质测试中心采用 ICP-MS 分析完成, 所用等离子体质谱仪型号为 ELAN 6100DRC。

表 3 银洞子银铅多金属矿床岩、矿石稀土元素特征参数

Table 3 REE feature parameter of rock and ore in the Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit

样号	YD01	YD02	YD03	YD04	YD05	YD06	YD07	93-83	YD08	YD09	YD10	YD11	YD12	YD13	YD14	93-96
Σ REE	71.5	108.4	83.8	25.1	33.2	119.2	16.1	149.58	101.5	124.2	56.3	12.6	44.3	6.2	122.6	69.29
LREE	62.7	92.8	69.1	20.4	26.9	104.9	13.0	133.65	86.8	109.1	47.8	11.0	37.9	5.2	105.4	60.06
HREE	8.8	15.6	14.7	4.7	6.3	14.4	3.2	15.93	14.7	15.1	8.5	1.7	6.4	1.1	17.3	9.23
LREE/ HREE	7.10	5.96	4.72	4.36	4.26	7.29	4.12	8.39	5.90	7.23	5.61	6.65	5.94	4.75	6.10	6.51
La/Yb	11.54	10.87	8.69	7.43	6.02	12.14	6.07	15.51	10.84	13.24	7.31	12.34	9.64	6.87	13.37	16.51
Ce/Yb	26.49	20.48	16.16	14.09	13.56	24.06	14.43	30.93	19.12	24.35	23.15	24.40	17.36	17.39	21.13	34.40
La/Sm	3.75	4.29	3.84	3.39	3.22	4.74	2.77	5.51	4.87	5.62	1.49	4.81	4.46	2.59	7.10	5.01
Eu/Sm	0.23	0.28	0.43	0.63	0.34	0.31	0.37	0.20	0.33	0.29	0.38	0.24	0.34	0.30	0.62	0.42
(La/Yb) _N	6.69	6.30	5.03	4.30	3.49	7.03	3.52	8.99	6.28	7.67	4.23	7.15	5.59	3.98	7.75	9.57
δ Eu	0.76	0.87	1.23	1.85	1.00	1.01	1.09	0.69	1.00	0.91	1.27	0.74	1.10	0.95	1.60	1.26
δ Ce	0.88	0.81	0.80	0.78	0.87	0.84	0.87	0.99	0.78	0.81	0.90	0.84	0.78	0.89	0.78	1.06

表 4 银洞子银铅多金属矿床岩石和矿物的硅、氧同位素分析结果

Table 4 Silicon and oxygen isotope compositions of rocks and minerals from Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit

样品编号	样品性质	采样位置	$\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS228}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$
Ag-3	含方柱石板岩	车房沟, 池沟组上部	0.1	17.3
Ag-4	方柱黑云岩	车房沟, 池沟组上部	-0.3	17.2
Ag-2	硅质岩	车房沟, 池沟组上部, 不含矿	-0.3	19.0
Ag-10	硅质岩	车房沟, 青石垭组, 不含矿	-0.3	16.0
Ag-11	钠长石岩	车房沟, 青石垭组, 不含矿	-0.4	
Ag-16	方柱黑云岩	车房沟, 青石垭组	-0.3	19.3
Ag-26	石英	1170 m 中段 45 线, 含矿石英脉	-0.1	22.6
Ag-27	钠长石岩	1170m 中段 45 线, 钠长石层纹	-0.2	20.4
Ag-28	硅质岩	1170m 中段 45 线, 硅质岩层纹	0.1	19.6
Ag-28	石英	1170m 中段 45 线, 含矿石英脉	-0.1	23.0
Ag-29	硅质岩	1090m 中段 53 线, 矿体顶板	-0.1	
Ag-33	含毒砂板岩	1090m 中段 53 线, 矿体底板	-0.2	16.4
Ag-36	硅质岩	1090 m 中段 47 线, 硅质岩	-0.2	19.1
Ag-36	石英	硅质岩中石英脉	0.0	23.2
Ag-37	石英	1090m 中段 47 线, 块状矿石	-0.1	21.7

注: 据李延河等, 1997。

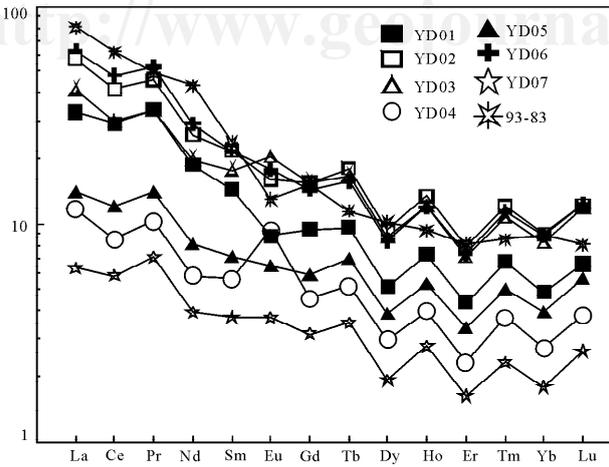


图 5 银洞子银铅多金属矿床岩、矿石稀土元素配分模式图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns for rock and ore Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit

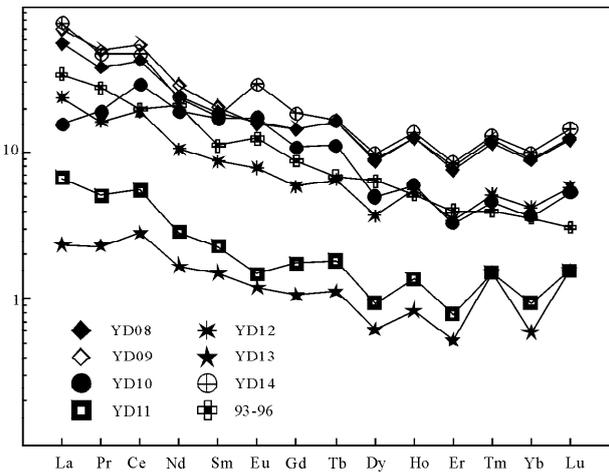


图 6 银洞子银铅多金属矿床岩、矿石稀土元素配分模式

Fig. 6 Chondrite-normalized REE distribution patterns for rock and ore Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit

云岩的硅同位素组成基本一致,说明不含矿硅质岩的形成与早期的中基性火山活动有关(李延河等,1997)。

3.2.3 铅同位素

银洞子银铅多金属矿床 16 件矿石样品(表 5)的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.01~18.25,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.55~15.85,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 37.97~38.94,铅同位素模式年龄为 399~576 Ma,平均 482 Ma;两件地层样品的²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 为 18.28~18.32,²⁰⁷Pb/²⁰⁴Pb 为 15.63~15.71,²⁰⁸Pb/²⁰⁴Pb 为 38.81~38.70,铅同位素模式年龄为 263~385 Ma。铅同位素组成和模式年龄显示,矿石与地层存在一定差异性,矿石与地层相比具有较大的铅同位素组成和模式年龄。在铅同位素组成图解上(图 7),矿石铅和地层铅投点主要都落在下地壳演化线附近,少数落在洋岛火山岩范围内,表明矿床铅来源主要为深源,同时也与海底火山活动存在一定关系。

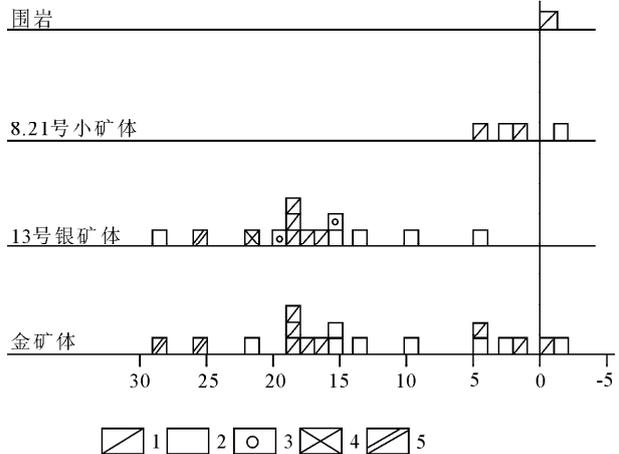


图 7 银洞子银铅多金属矿床硫同位素组成频率分布图

Fig. 7 Sulfur isotope composition frequency distribution diagram for Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit

1—黄铁矿;2—方铅矿;3—闪锌矿;4—黄铜矿;5—重晶石
1—Pyrite; 2—galena; 3—sphalerite; 4—chalcopyrite; 5—barite

度越快,温度越高,其动力学分馏就愈小;沉淀硅的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值就愈接近初始溶液(母岩)的 $\delta^{30}\text{Si}$ 值(李延河等,1994)。银洞子矿床含矿硅质岩的 $\delta^{30}\text{Si}$ 相对较高,说明含矿硅质岩是由海底喷气作用在较高的温度下快速沉淀形成的。这与根据硫同位素得出的结论完全吻合。含矿硅质岩与矿体下盘的特征岩石——黑云方柱石岩的硅同位素组成($\delta^{30}\text{Si} = -0.2\text{‰} \sim -0.1\text{‰}$,平均 0.0‰)非常一致,说明海底喷气成矿作用与酸性火山活动有关;矿体下部层位中不含矿硅质岩、钠长石岩的 $\delta^{30}\text{Si} = -0.4\text{‰} \sim -0.3\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} = 16.0\text{‰} \sim 19.0\text{‰}$,与伴生的方柱黑

4 成矿时代

银洞子银铅多金属矿床含矿层的 Rb-Sr 等时线年龄为 342 ± 32 Ma,该矿床的铅模式年龄为 378 ± 8 Ma,13 号矿体的 Rb-Sr 等时线年龄为 374 Ma,13 号矿体的铅模式年龄为 399~576 Ma(张本仁等,1989;王相等,1996),这些年龄与该区热水沉积钠长石岩的 Rb-Sr 等时线年龄 364.9 ± 10.9 Ma(薛春纪,1997)相对接近,表明成矿作用与热水沉积成岩

作用同时发生,结合前述证据,表明热水沉积作用是主要的成矿方式。热水沉积成岩成矿作用时代又与中泥盆世正常沉积作用时代相同,指示热水沉积作用与正常沉积作用是在中泥盆世同时发生的地质事件。王平安等(1998)、汤中立等(2005)研究也认为,该矿床属于与泥盆纪热水沉积有关的铅锌铜银铁(金)重晶石成矿系列。笔者分析研究认为,该矿床形成于中泥盆世(约 374~386Ma),其铅模式年龄精确度不高,对成矿年龄的精确测定有望提供进一步的支撑。

5 矿床成因

矿区地质特征表明,沉积作用是矿床形成的主导作用,后期改造作用很微弱。结合近几年来在大西沟—银洞子一带的研究工作成果,认为该矿床属海底热水喷流沉积成因(SEDEX型)。其主要证据如下:

(1)矿体呈层状、似层状,与围岩层理一致,矿石具层纹、条带状构造,条纹条带与层理一致,显示其同生沉积之特征。

表 5 银洞子银铅多金属矿床铅同位素组成及模式年龄

Table 5 Pb isotopic composition and model age for the Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit

样号	矿物	地质产状	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁴ Pb	Doe 年龄 (Ma)
DSW-2	黄铁矿	含矿地层	18.317	15.626	38.805	263
DSW-3	黄铁矿	含矿地层	18.283	15.709	38.699	385
D-M ₃ -I-3	毒砂	13号矿体底板围岩	18.202	15.738	38.589	475
AT-44	方铅矿	13号矿体	18.001	15.55	37.965	399
AT-15	方铅矿	13号矿体	18.167	15.706	38.455	463
AT-40	方铅矿	13号矿体	18.236	15.851	38.935	576
D-M ₁ -I-4	黄铁矿	21号小铅矿体	18.195	15.729	38.39	468
		大西沟铁矿	18.08	15.7	38.75	517
		大西沟铁矿	18.03	15.66	38.84	516
		大西沟铁矿	18.05	15.69	38.78	526
ZK87121	方铅矿	13号浸染状矿体	18.133	15.702	38.443	482
ZK87126	方铅矿	13号条带状矿体	18.13	15.666	38.345	443
ZK87092	方铅矿	13号块状矿体	18.191	15.792	38.482	542
ZK87096	方铅矿	13号块状矿体	18.146	15.646	38.626	409
ZK87113	方铅矿	13号顺层矿体	18.174	15.719	38.316	473
ZK87090	方铅矿	13号斜切矿体	18.141	15.74	38.554	519
ZK87085	方铅矿	10号矿体	18.252	15.682	38.344	465
ZK87093	方铅矿	7号矿体	18.141	15.677	38.389	448

注:据张本仁等,1989;王相等,1996。

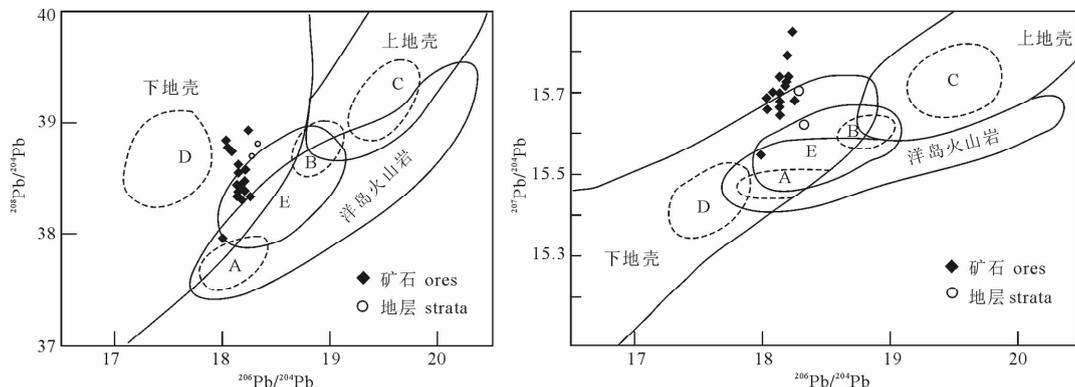


图 8 银洞子银铅多金属矿床铅同位素组成图解(底图据 Zartman et al., 1988)

Fig. 8 Diagram showing Pb isotopic compositions and sources of ore and host rock in the Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit(the base map by Zartman et al., 1988)

A—地幔;B—造山带;C—上地壳;D—下地壳;E—大陆岩石圈;实线圈出了各区 80% 的投点,虚线圈出了可能的平均值

A—The mantle; B—orogenic belt; C—the upper crust; D—the lower crust; E—the continental lithosphere; the solid line delineates 80% plot point in every block, the dot line delineates possible average value

(2)层状矿体中心矿石矿物含量高,上下两侧则变少。这种现象说明层矿体的形成过程代表热水喷流作用的一个周期,中心富矿石为喷流作用的最盛期产物,下盘和上盘的贫矿石分别代表喷流作用开始和结束时期的产物。

(3)矿体一般无围岩蚀变,但矿体底盘围岩常有褪色化现象和弱的绿泥石化和硅化,下盘围岩中硫及成矿元素也比上盘围岩高。这种现象是热水溶液作用于下伏软沉积物造成的。

(4)层状矿体中及其上下盘附近,出现化学沉积的硅质岩、钠长岩及重晶石岩等,它们发育齐全、分异良好,这些岩石目前被认为是典型热水沉积岩的标志(韩发等,1999;肖荣阁等,2001;Leach et al.,2005)。

(5)矿化有明显的侧向分带和垂向分带,且以侧向分带占主导地位,银洞子矿床北部为单铜矿段,其南紧邻铅银矿段,其东有一近东西向展布的铜银(铅)矿段,再向东为单铅矿段;而西侧大西沟一带为以菱铁矿为主的铁矿段。这种分带现象与一些产在沉积岩中的海底喷出的铅锌矿床以及近年来海底地质考察发现的正在形成的热水沉积矿床相似(表6)。它是由于喷出的热液(流)遇到海水迅速冷却并且稀释,使矿物按照它们各自的溶解度依次沉淀的结果。

(6)常量元素分析表明,矿石有比泥盆系地层更强的还原性;微量元素表明,矿石中黄铁矿具有沉积成因和热液改造2种类型;稀土元素分析表明,矿区地层与正常沉积岩的稀土配分模式不一致,有热液改造的特征,矿石稀土特征与海底热水作用有关。

(7)硫同位素分析表明,矿床硫同位素以重硫为主,主矿体含矿溶液总硫值与泥盆纪海水基本一致,反映硫源来自半封闭还原条件的泥盆纪海水;矿石

铅同位素分析表明,铅主要来自深源,同时也与海底火山活动存在一定关系。

6 成矿模式

泥盆纪沉积期间,由于商-丹和山阳-凤镇南北两条岩石圈断裂发生走滑作用,在大西沟-银洞子三级热水沉积成矿盆地内形成一系列次级、镶嵌配套的同生断裂体系,其主要方向为NE向。同生断裂-古地热体系因压应力减少而导致含矿热水沿同生断裂上升迁移到三级盆地之中。由于断陷作用十分强烈,柞-山盆地沉积厚度特别大,在深部构造作用下,下部地壳-盆地内沉积地层柱、陆表海域的水-岩界面之间形成了宏大的热流体系。另外,区域岩石圈近SN向收缩导致热流体被挤压排出,同时成为热传输的主要驱动力,使下渗的海水被加热,并萃取前泥盆纪地层中的成矿元素,而后沿同生断裂进入成矿盆地中。通过同生断裂的活动及海底喷气和同生热液(热水)成矿作用,从而形成了著名的秦岭泥盆系柞水-山阳铅、银、铁、铜多金属矿集区。

由前述可知,柞-山多金属矿集区中的银洞子银铅多金属矿床产于一套浅变质岩系中,矿体位于从千枚岩、板岩向碳酸盐岩开始增多的部位。矿体呈层状、似层状,产状与层理构造一致,容矿岩石主要为重晶石岩和硅质岩。矿石具细粒结构,条纹条带状构造,反映了矿床的沉积特征。同生断裂活动对成矿具有重要意义。

银洞子银铅多金属矿床的形成可以分为两个成矿期:

(1)海底喷气沉积成矿期,为主矿体及各层状小矿体形成期,也是本矿床最主要的成矿期,形成了热液沉积岩(重晶石岩、硅质岩等)以及细粒金属矿物。

表6 产在沉积岩系中的海底喷流 Pb-Zn 矿床金属分带

Table 6 Metal zoning of sedimentary rock-hosted seafloor exhalative Ag-Pb deposit

矿床	层状矿化金属(矿物)分带
红海、阿特兰提斯 II 号海沟	从喷口向外依次为 Cu 的硫化物-Pb 的硫化物-锰菱铁矿-硅铁胶体(进一步形成铁蒙脱石、镁绿泥石)
Remmolsberg	从层状矿体底板向上为 Cu-Zn-Pb-Ba 的垂直分带
Meggen	在矿体所在层位上于矿体周围有 Mn 的晕圈,层状硫化物矿体两侧有同期生成的重晶石矿体
MCArthur	层状矿体中有 Pb-Zn-Fe 的侧向分带
Tom	层状矿体中的 Pb/Zn 从块状矿体和其下交叉矿化体向外递减
克朗盆地成矿区	矿化分带明显,由东至西,从阿巴宫→铁木尔特→乌拉斯沟,依次为铁→铁铅锌→铅锌→铜金铅锌→铜金
大西沟-银洞子菱铁多金属矿床	从银洞子矿床北部 ZK4121 孔为中心,向东为 Cu-CuAg(Pb)-Pb 的侧向分带,向南为 Cu-CuAg-Pb-Ag 侧向分带,向西为 Cu-Fe 侧向分带。大西沟矿床,自上而下具有菱铁矿(上盘局部有小贫铜矿体)-重晶石磁铁矿矿体-重晶石矿体的垂直分带

注:据王相等,1996;李红阳等,2006 整理。

(2) 改造成矿期,本期成矿较为次要,主要形成一些具有粗粒金属矿物的脉体,进一步可划分为较早的石英-铁白云石-硫化物阶段和较晚的方解石-硫化物阶段。

全面综合前述矿床成因、成矿物质来源及成矿机理等内容,结合当前热水沉积矿床的研究成果,该矿床的成矿模式可描述为:在秦岭造山带演化的过程中,中泥盆世在柞山一带产生了东西向裂陷带,形成一系列规模、方向各异的基底断裂构造,各断裂构造的差异运动导致在东西向裂陷带中形成二级和三级凹陷盆地。来自构造运动和地壳深部的热流使前泥盆纪系地层发生变质、重熔,产生变质(分泌)热水溶液、重熔岩浆热水溶液或加热从大断裂下渗的大气降水形成溶液,这些热流体循环于基底地层中,萃取其中的 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} 等离子而演变为热卤水。这种热卤水具有较高的盐度和较低的 pH 值,能溶解、萃取构造带岩石中的 Pb、Ag、Cu、Zn 等成矿物质,形成含矿热卤水。含矿热卤水周期性沿海底活动性断裂减压处喷流到海底水岩界面,在局限盆地中形成大量成矿物质的堆积及相应的硅质岩、钠质岩及重晶石岩等热水喷流岩。由于盆地中微环境的差别及距离喷口远近有别,出现矿化分带。强还原酸性环境有利于形成硫化物(银洞子),而弱还原偏碱性环境有利于形成菱铁矿、重晶石(大西沟);在喷口附近及通道中可能形成网脉状矿化,而远离喷口形成层状矿化;在喷口处首先沉积了铜的硫化物、向外依次为铜银—铅银—铅等的硫化物,最外形成菱铁矿和重晶石的大量堆积。

矿层形成后,很快被来自大陆斜坡上的浊积物覆盖掩埋而免遭海水底流的破坏得以完整保存。后期构造作用对层状矿体有轻微改造作用,但矿层的沉积特征保存完好(王相等,1996;王瑞廷,2005)。

简而言之,银洞子银铅多金属矿床的成矿作用经历了早期初始富集沉积成矿和后期弱的构造改造叠加两个重要的成矿过程,表现出较明显的“二元控矿”规律(王东生等,2009),即该矿床的主要控矿因素是早期热水沉积活动和后期构造作用,而且以前者为主。

7 找矿标志

在系统总结分析该矿床地质、地球化学与地球物理异常特征的基础上,结合该区工作实际,提出其勘查找矿标志为:①中泥盆统大西沟组地层为控矿地层;热水沉积岩为含矿岩相;炭质层出现代表滞流

盆地,对成矿有利。沿含矿层岩相碳酸盐岩减少,具同生断裂。②Cu、Ag、Pb、Zn、As 组合化探异常多指示出露地表的含矿地段,经过仔细观察有可能发现多金属矿化体出露。③地表见零星矿化,根据该区矿化分带特征,可由已知菱铁矿追索寻找多金属矿或由浅部铅(银)矿追索寻找铜(银)矿。④代表已知矿层电性层的 CSAMT 法异常延伸部位,显示低阻、高极化异常地段。采用地质研究、物探测深及遥感解译等方法相结合确定热卤水喷溢口,在其附近为寻找厚铜(银)矿的有利聚矿部位。⑤三级构造热水沉积成矿盆地,成矿温度由低变高的方向。

8 找矿预测

根据对区域及矿区地质、地球化学、地球物理及遥感资料的综合研究和调查分析,结合矿化类型与成矿规律,运用相似类比原理,进行了找矿预测,认为区内仍具有良好的找矿潜力。

(1)热水喷口位置的探讨。如果银洞子矿床是由海底热卤水喷流沉积而成,那么在矿区范围内应该有热水喷流口存在。研究表明在银洞子矿床北侧(ZK4121~ZK5721 钻孔以北)有热水喷流口的可能,其主要证据如下:①据近年来海底热液成矿作用考察成果,热水沉积成因的矿床矿化分带明显,且分带有一定的规律(表 6),铜的硫化物总是在喷口附近首先沉淀,而银洞子矿床铜矿段主要集中于银洞子矿床北侧。②矿床北部低标高处形成温度最高。③含矿层岩性沿倾斜向北枚岩增多、灰岩减少,且矿化也逐步由以铅为主过渡到以铜为主。这是因为北侧离喷口近,喷液中含有 CO_2 、 HCl 、 HF 、 SO_2 等,当它们进入海水中时,就要局部的减少海水的碱质储备,降低 PH 值,停止了方解石的沉淀。而远离喷口时,则溶液中上述成分受海水稀释而有所减少,PH 值相对升高,即形成少量方解石沉淀。④中南工业大学应用 CSAMT 法对大西沟—银洞子矿床北部进行探测,结果表明代表含矿层的电性层向北延伸稳定,与已知矿段矿层一致,且在已知矿体北部代表该电性层的电阻率等值线有向下部延伸的一个凹兜,此凹兜可能是喷溢口所在位置,为重要的找矿靶区。

(2)银洞子矿区外围找矿。综合研究认为,银洞子北部外围仍具备良好的成矿条件,具体依据如下:①本区进一步找矿方向应是北部推测的喷溢口位置。目前见到的均是层状矿石,是海底热卤水被正常海水稀释后的沉淀物,而更富的块状或网脉状矿

石应该存在于喷口附近,根据前述成矿条件分析有可能形成丘状、墩状、块状矿体和桶状交叉矿体。②根据 ZK1093 钻孔验证结果,13 号主矿体东部的铅矿段向东北方向延伸 600m,矿化层厚度 23.3m,铅平均品位 0.32%。矿化体埋深 450m。根据矿床成矿元素水平分带规律分析,该矿段向东、向北(喷溢口)方向仍具有很大的找矿潜力。③目前矿区内最北部的探矿工程距推测喷溢口位置 1000~1400m,依此预测,矿床北部潜在找矿面积大于 2 km²,仍有很大的找矿潜力。

(3)矿集区新区找矿。根据区域地质和区域地球化学异常特征初步提出以下成矿区带:①龙王沟—夏家店一带,Au、Ag、V 等异常规模较大、浓度较高,成矿地质条件有利,应继续开展矿床外围找矿工作,有望取得新的成果。②石坪北侧—东坪—韭菜沟—穆家庄一带,Au、Ag、Cu 异常比较发育,目前已发现银洞沟银矿、韭菜沟及皂河金矿等,下一步在开展已知矿区外围找矿的同时,应重视 Ag-Pb-Au 组合异常的找矿工作。③马家台—红岩寺南侧一带,Au、Pb 异常沿近东西向断裂成带分布,个别异常具有一定的规模,对寻找金矿比较有利。④冷水沟、牛耳川异常区,Au、Mo 异常强烈,应加强 Au、Mo 矿的研究和勘查。⑤区域北部某些金异常区是成矿有利部位,应予以重视,是今后找矿工作的重点地段。

9 结论

综上所述,银洞子银铅多金属矿床硅质白云岩稀土总量较高,富集轻稀土,重稀土分异不明显,稀土分配模式为右倾型,具正铈异常,这些正铈异常可能与热液作用有关,暗示了矿区热液作用的存在;重晶石脉的稀土总量极低,略富集轻稀土,稀土分配模式为近平缓的右倾型,呈负铈正铈异常,与海水特征相似,其正铈异常与钠长石的存在有密切关系;铅(银)矿石稀土总量变化较大,稀土分配模式总体也为右倾型,矿石均呈负铈异常,铈亏损这一特征反映了成矿过程中的海底热水溶液作用。该矿床硫同位素组成变化范围大,且以重硫为主,主矿体含矿溶液总硫值与泥盆纪海水基本一致,反映硫来自半封闭还原条件的泥盆纪海水。铅同位素分析表明矿床铅来源主要为深源,与海底火山活动存在一定关系。已有的同位素年龄数据和研究分析表明该矿床形成于中泥盆世,成矿作用与热水沉积成岩作用同时发生,相关证据也证明热水沉积作用是主要的成矿方

式。研究认为,该矿床属热卤水喷流沉积成因,银洞子银铅多金属矿床的形成可以分为海底喷气沉积成矿和改造成矿期两个成矿期,前者是本矿床最主要的成矿期,形成了热水沉积岩(重晶石岩、硅质岩等)以及细粒金属矿物,建立了成矿模式。结合区内地质勘查工作,提出了 5 条找矿标志,并通过资料研究分析,从矿区外围找矿和新区找矿两个方面进行找矿预测,指出了 8 片预测靶区。这为深化认识柞水-山阳沉积盆地内成矿机理和指导找矿指明了方向。

致谢:在本次研究与成文过程中与北京大学刘树文教授、美国地质调查局 David L Leach 博士、中国地质科学院矿产资源研究所毛景文研究员进行了有益的讨论,评审专家提出了建设性修改意见,在此一并表示衷心感谢!

注 释

- ① 王瑞廷. 2005. 秦岭造山带陕西段主要矿集区典型金属矿床成矿模式和找矿预测研究. 北京:中国地质大学博士后出站研究报告, 1~173.
- ② 朱华平. 2004. 柞-山地区铜锌多金属矿床地质-地球化学-后生成矿作用的重要性. 中国地质科学院博士学位论文, 1~117.

参 考 文 献

- 陈德兴,林兵. 1990. 南秦岭泥盆系层状层控铅-铅成矿带成矿地球化学. 张本仁,等. 秦巴区域地球化学文集. 武汉:中国地质大学出版社,168~192.
- 端木合顺. 2003. 沉积喷流型矿床热水沉积旋回及其地球化学特征. 西安科技学院学报,23(2):151~155.
- 方维萱,芦继英. 2000. 陕西银洞子-大西沟菱铁银多金属矿床热水沉积岩相特征及成因. 沉积学报,18(3):431~438.
- 方维萱. 1999. 柞水银洞子特大型银多金属矿床矿物地球化学研究. 矿物学报,19(3):349~357.
- 韩发,孙海田. 1999. SEDEX 型矿床成矿系统. 地学前缘, 6(1):139~162.
- 胡健民,崔建堂,孟庆任,赵长缨. 2004. 秦岭柞水岩体锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地质论评,50(3):323~329.
- 黄宾,姚仲友. 1991. 陕西柞水银洞子银、铅多金属矿床物质来源初探. 西北地质,12(4):24~28.
- 黄崇轲,朱裕生,等. 2002. 中国银矿床及其时空分布. 北京:地震出版社,357~361.
- 李红阳,杨秋荣,李英杰. 2006. 现代成矿理论. 北京:地震出版社, 55~136.
- 李人澍. 1996. 成矿系统分析的理论. 北京:地质出版社,184~262.
- 李延河,丁梯平,万德芳. 1994. 硅同位素动力学分馏的实验研究及地质应用. 矿床地质,13(3):282~288.
- 李延河,蒋少涌,薛春纪. 1997. 秦岭凤-太矿田与柞-山矿田成矿条件及环境的对比研究. 矿床地质,16(2):171~180.
- 汤中立,钱壮志,任秉琛,曾章仁,郭介人,薛春纪,李文渊,等. 2005. 中国古生代成矿作用. 北京:地质出版社, 159~169.
- 王东生,王瑞廷,代军治,王长安,李建华,陈荔湘. 2009. 秦岭造山带金属矿床的“二元控矿”特征. 地质学报,83(11):1719~1729.
- 王贵荣,端木合顺. 2002. 陕西银洞子矿床热水沉积环境演化特征.

- 西安科技学院学报, 22(2):158~161.
- 王平安, 陈毓川, 裴荣富, 吴淦国, 等. 1998. 秦岭造山带区域矿床成矿系列、构造-成矿旋回与演化. 北京:地质出版社, 12~36.
- 王瑞廷, 李剑斌, 任涛, 杨智慧, 毛景文, 王涛. 2008. 柞水-山阳多金属矿集区成矿条件及找矿潜力分析. 中国地质, 35(6):1291~1298.
- 王相, 唐荣扬, 李实, 李永祥, 杨铭君, 王东生, 等. 1996. 秦岭造山与金属成矿. 北京:冶金工业出版社, 170~182.
- 王焰, 白学让. 1994. 陕西柞水银铜子银铅多金属矿床成因矿物学研究. 地质找矿论丛, 9(3):83~92.
- 王宗起, 闫全人, 闫臻, 王涛, 姜春发, 高联达, 李秋根, 陈隽璐, 张英利, 刘平, 谢春林, 向忠金. 2009. 秦岭造山带主要大地构造单元的新划分. 地质学报, 83(11):1527~1546.
- 肖荣阁, 张汉城, 陈卉泉, 张宗恒. 2001. 热水沉积岩及矿物岩石标志. 地学前缘, 8(4):379~385.
- 薛春纪. 1991. 银洞子似碧玉岩的海底热液沉积特征研究. 矿物岩石, 11(2):31~40.
- 薛春纪. 1997. 秦岭泥盆纪热水沉积. 西安:西安地图出版社, 1~134.
- 炎金才. 1995. 陕西柞水银洞子银铅矿床硫同位素地质研究. 矿物岩石, 15(1):80~86.
- 张本仁, 陈德兴, 李泽九, 谷晓明, 蒋敬业, 胡以铿, 李芳林, 郭五寅, 李耀成. 1989. 陕西柞水—山阳成矿带区域地球化学. 武汉:中国地质大学出版社, 162~171.
- 张本仁, 骆庭川, 高山, 欧阳建平, 陈德兴, 马振东, 韩吟文, 谷晓明, 等. 1994. 秦巴岩石圈构造及成矿规律地球化学研究. 武汉:中国地质大学出版社, 257~311.
- 朱华平, 叶磊, 甘宝新, 汪长青. 2003. 山柞镇甸地区盆地体制与金属成矿关系. 西北地质, 36(1):52~58.
- 朱上庆, 黄华盛. 1988. 层控矿床地质学. 北京:冶金工业出版社, 213~230.
- Leach D L, Sangster D F, Kelley K D, Large R R, Garven G, Allen C R, Gutzmer J, Walters S. 2005. Sediment-hosted lead-zinc deposits: a global perspective. In: Hedenquist J W, Thompson J F H, Goldfarb R J et al. eds. Economic Geology, One hundredth anniversary volume, 561~607.
- Zartman R E, Haines S M. 1988. The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs—a case for bidirectional transport. Geochim. Cosmochim. Acta, 52, 1327~1339.

Geochemical Characteristics, Metallogenic Model and Exploration Predicting of Yindongzi Ag-Pb Polymetallic Deposit, Zhashui County, Shaanxi Province, China

WANG Ruiting¹⁾, REN Tao²⁾, LI Jianbin²⁾, DAI Junzhi¹⁾, WANG Dongsheng¹⁾,
WANG Yitian³⁾, YAN Zhen⁴⁾

1) Geological Exploration Institution of Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Xi'an, 710054; 2) 713 Party of Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Shangluo Shaanxi, 726000; 3) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geoscineces, Beijing, 100037; 4) Institute of Geology, Chinese Academy of Geoscineces, Beijing, 100037

Abstract

The REE content of rocks and ores range widely in Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit, REE distribution patterns dip to right, enrich LREE, and differentiates poorly for HREE, barite vein and ores have negative Ce anomaly, the depletion of Ce imply submarine hydrothermal process. The composition of S isotope has wide range in Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit, heavy S isotope predominates, $\delta^{34}\text{S}$ value of main orebody ore-bearing solution is similar with that of Devonian sea water, it indicate that sulfur derived from Devonian sea water in semi-enclosed reducing condition. Pb isotope analysis suggested that Pb mainly came from depth, related with volcanic activity in sea floor. It showed that the deposit formed in Middle Devonian era, and metallogenesis happened simultaneously with hydrothermal sedimentary rock-forming process by isotopic date references and geologic study. It proved that hydrothermal sedimentary process was main ore-forming means by research. It proposed that the formation of this deposit divided into two stages, included submarine exhalation sedimentary ore-forming and reformed metallogenesis stages, the former dominated and formed hydrothermal sedimentary rocks (baritic rock and silica rock, and so on) and fine metal minerals. The metallogenic model of this deposit is built, too. Combined with geological exploration work in Zha-Shan region, it summed up five prospecting criteria and took exploration prediction in surrounding ore field and new region, and delineated eight predicting targets by studying and analyzing relative references. These conclusion pointed direction for probing further mineralization mechanics and exploring in Zhashui-Shanyang sedimentary basin.

Key words: Yindongzi Ag-Pb polymetallic deposit; geochemistry; hydrothermal sedimentation; metallogenic model; exploration predicting