

## 辽宁红透山铜锌矿床地质特征及成因浅析

张森<sup>1</sup>,赵东方<sup>1</sup>,吕广俊<sup>2</sup>,沙德铭<sup>1</sup>,权恒<sup>1</sup>,田昌烈<sup>1</sup>,杨铁军<sup>3</sup>

(1.沈阳地质矿产研究所,辽宁沈阳110032;2.辽宁省第八地质大队,辽宁本溪117000;

3.辽宁有色地勘院抚顺分院,辽宁抚顺113015)

**摘要:**红透山铜锌矿床赋存于辽北太古宙绿岩红透山岩组,为极具工业意义的大型矿床。通过对矿石H、O、S、Pb同位素特征的分析,结合矿床矿体形态、矿石结构、构造及围岩蚀变等宏观特征,认为红透山铜锌矿床成矿物质来源于太古宙晚期火山-沉积岩系,成矿流体来源于变质水和大气降水,成矿热力来源于变质作用,从而认为红透山铜锌矿床属“火山-沉积变质热液叠加”型层控矿床。

**关键词:**红透山;铜锌矿床;地质特征;火山-沉积变质热液叠加型层控矿床;辽宁省

红透山铜锌矿床地处辽宁省抚顺市清原县内,其大地构造位置位于华北地台北缘龙岗地块内,是辽东太古宙矿化集中规模较大的铜锌矿床,其赋存与太古宙绿岩红透山岩组,受褶皱构造和层间韧性断裂控制,其与附近的树基沟铜矿、红旗山铜矿、稗子沟铜矿等同属于与太古宙绿岩有关的岛弧海相火山沉积-变质热液型层控铜锌矿床,即红透山式矿床。

### 1 矿区地质概况

红透山地区绿岩带由不完整的“三位一体”岩系组成,其下部为基性岩(夹科马提岩),中部为中酸性火山岩,上部为火山-沉积碎屑岩。红透山岩组绿岩带赋存在大面积底辟侵入的花岗岩(TTG)中,规模较大的有红透山-树基沟绿岩带、大荒沟-稗子沟绿岩带、孤家子-红旗山绿岩带,此外尚有若干个小规模的绿岩带(体)<sup>①</sup>。红透山铜矿即赋存于红透山-树基沟绿岩上部岩段底部的薄层互层岩系中,岩石类型主要为黑云斜长变粒岩,以黑云斜长变粒岩、黑云斜长片麻岩与角闪斜长片麻岩互层为特点,并夹有黑云夕线变粒岩、含石榴黑云斜长石英浅粒岩、直闪斜长变粒岩等。该薄层互层岩系是红透山铜锌矿床的主赋矿围岩,与铜锌金矿(化)关系十分密切。

矿区内出露的岩浆岩主要为太古宙片麻状英云闪长岩、花岗闪长岩和黑云斜长花岗岩、黑云角闪斜长花岗岩、透辉斜长花岗岩、二长花岗岩及少量钾质

花岗岩。

矿区主体组成——太古宙红透山岩组经历了早前寒武纪变质变形改造和中生代构造岩浆活动叠加,矿区构造组成形式上体现出“既老又新”的特点,即早前寒武纪韧性变形形迹组合和中生代脆性构造叠加的特点。

矿区主体构造形式为一北西西向展布的倒转向斜构造(图1)<sup>②</sup>。褶皱为一陡倾、轴面近南倾的倒转向斜构造,显示是对先期褶皱构造叠加的结果,变形特征上体现出紧闭式的顶厚翼薄特点,并有层内、层间韧性断层相伴产出。褶皱轴面波状起伏,显示后续横跨式褶皱作用的叠加改造。后期构造叠加主体上以脆性断裂构造为主,大致划分为2期:早期以北北东向断裂构造形成并充填有辉绿岩脉,系吕梁期构造岩浆活动叠加的结果;晚期以北东向、北西向共扼断裂系的出现和闪长玢岩充填为特征,该期断裂构造不仅切割先期褶皱构造,而且切错辉绿岩脉等。

### 2 红透山矿床地质特征

#### 2.1 矿体特征

由图2可见,在空间上红透山铜锌矿床被卷入区域褶皱变形当中的“薄层互层带”所控制,围限在红透山倒转向斜转折端及其附近的核部及两翼;平面上呈略向东北方向开口的横卧的“音叉”状形态,即受向斜两翼控制的矿体在向斜核部交汇为一体,然后继续西

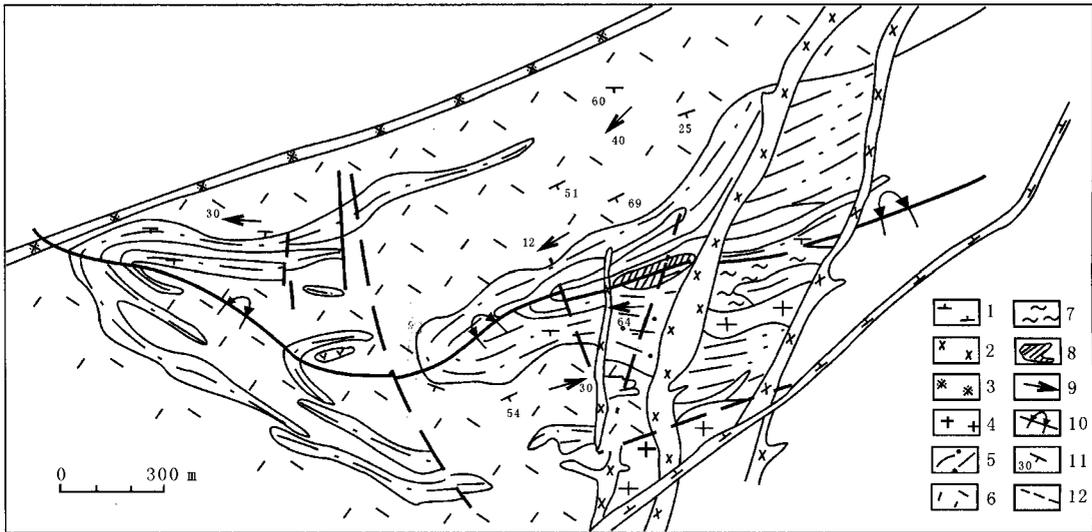


图1 红透山地区构造纲要图

(据杨振升,1986,改编)

Fig. 1 Tectonic schematic map of Hongtoushan region

(modified from YANG Zhen-sheng, 1986)

1—闪长玢岩(diorite-porphyrite);2—辉绿岩(diabase);3—橄榄辉绿岩(olivine diabase);4—花岗岩片麻岩(granite-gneiss);5—黑云斜长片麻岩(biotite plagiogneiss);6—角闪斜长片麻岩(hornblende plagiogneiss);7—石榴阳起黑云斜长片麻岩(garnet stralite biotite plagiogneiss);8—铜矿体(copper ore body);9—线理产状(lineation occurrence);10—倒转向斜(overturned syncline);11—片麻理产状(schistosity occurrence);12—断裂构造(fracture zone)

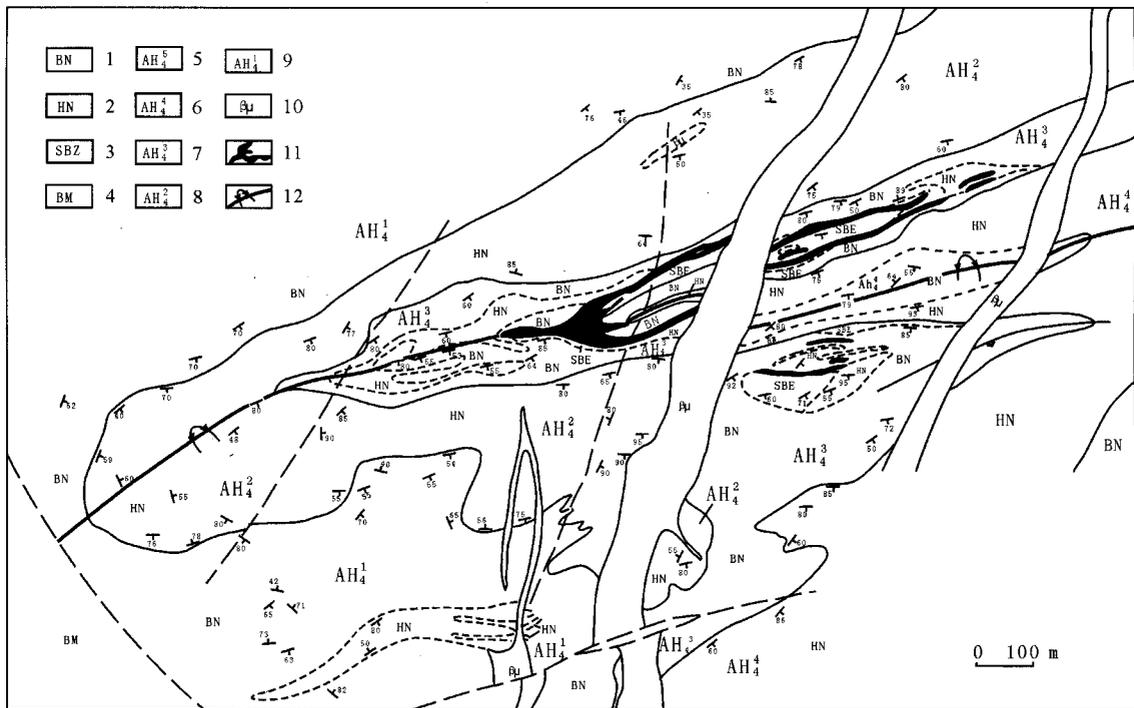


图2 红透山矿床地质图

Fig. 2 Geologic map of Hongtoushan deposit

1—黑云片麻岩(biotite-gneiss);2—角闪片麻岩(hornblende-gneiss);3—夕线片麻岩(sillimanite-gneiss);4—片麻状花岗岩(gneissic granite);5—直闪黑云片麻岩层(anthophyllite biotite-gneiss layer);6—上角闪片麻岩层(upper rock formation of hornblende-gneiss);7—薄层互层带(flag interbedding zone);8—下角闪片麻岩岩层(underlie orck formation of hornblende-gneiss);9—黑云片麻岩层(biotite-gneiss layer);10—辉绿岩(diabase);11—矿体(ore body);12—倒转向斜(overturned syncline)

延。矿体的交汇部位即向斜的核部,该处矿体厚大且延展稳定,前人称之为“矿柱”,为红透山铜锌矿床的主矿体。矿体走向为 NE50~70° 至 E-W 向,倾向 SE,倾角 75~85°。矿体规模较大,长度可达 100~1500 m,宽 1~20 m,延深最长可达 2000 m,属大中型矿床<sup>①</sup>。

矿体一方面受层位控制,与地层产状基本一致;另一方面,由于受多期变质变形作用的影响,部分矿体形态较为复杂,呈层状、似层状或脉状等产出。

## 2.2 矿石特征

红透山铜锌矿床矿石中的金属矿物种类比较简单,主要有黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿,其次有磁铁矿、斑铜矿、方铅矿、赤铁矿及自然金等。脉石矿物主要有石英、斜长石、黑云母、白云母,次有角闪石、直闪石、石榴石、夕线石以及绢云母、绿帘石、斜黝帘石、绿泥石、方解石、玉髓等。

### 2.2.1 主要矿物特征

黄铁矿:为红透山矿床主要矿石矿物,分布广,含量多,在矿石中占硫化物含量的 20%~90%,大体可分为 4 种。①以自形-半自形晶散布于脉石矿物之中,属变晶黄铁矿,为变质成因,呈浸染状产出,主要呈立方体,其次为五角十二面体;②以不规则他形粒状散布于浸染状矿石中,可交代自形黄铁矿,其成因与热液活动有关;③在致密块状矿石中的半自形粗晶黄铁矿,其结晶普遍早于其他硫化物,常具溶蚀-交代结构,碎裂构造发育,属于大规模变质热液成矿作用的早期产物;④细粒-脉状黄铁矿,交代其他硫化物,为成矿作用晚期铁、硫浓度大大降低环境下晶出的产物。

磁黄铁矿:约占硫化物含量的 20%~30%,各矿区普遍发育,与其他硫化物密切共生。磁黄铁矿主要呈致密块状和不规则粒状产出,个别呈脉状产出。从总体看,磁黄铁矿大部分晶出较早,以块体大、交代黄铁矿为特点。但磁黄铁矿的晶出时间较长,使部分磁黄铁矿的晶出时间与黄铜矿、闪锌矿相同,出现不混溶现象。

黄铜矿:占硫化物含量的 10%左右,多呈不规则粒状体或不规则脉状体产出,但在“矿柱”(脉状矿体)中黄铜矿的含量较多,约占 30%,且出现致密块状体。黄铜矿常与磁黄铁矿、闪锌矿共生,除了看到其交代早期晶出的磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿外,还可看到其与磁黄铁矿、闪锌矿构成固溶体分解结构或呈单脉状贯入围岩裂隙等,表明黄铜矿晶出时间也较长。

闪锌矿:约占硫化物含量的 5%~10%,呈深褐色,常与黄铜矿伴生,并与其一起交代黄铁矿、磁铁矿及磁黄铁矿,此外还经常可见其与黄铜矿的固溶分解现象和同磁黄铁矿的不混溶现象,说明闪锌矿的晶出时间也比较长,但总体略晚于黄铜矿。区内尚见有浅褐色闪锌矿,可与方铅矿和晚期黄铁矿伴生,认为其晶出时间晚于深褐色闪锌矿。

### 2.2.2 矿石结构

矿石的结构较复杂,以溶蚀-交代结构和碎裂结构最为普遍,此外还常见变晶结构、充填-交代结构、固溶体分解结构等。

溶蚀-交代结构主要指金属矿物溶蚀-交代脉石矿物和晚期金属矿物溶蚀-交代早期金属矿物,如磁黄铁矿、黄铜矿等溶蚀-交代早期粗晶黄铁矿等。这种结构中常能见到被溶蚀-交代的早期矿物残留体。碎裂结构虽然较普遍,但只出现在局部的黄铁矿颗粒中。变晶结构主要由微细粒(<0.02 mm)黄铁矿、黄铜矿等构成。充填(贯入)-交代结构与溶蚀-交代结构十分相似,区别在于贯入,而非溶蚀,常选择矿物节理、岩石片(麻)理充填(贯入)-交代。溶体分解结构是两种以上的金属矿物在结晶过程中,因固溶分离或不混溶作用造成。最常见的是黄铜矿与闪锌矿之间,二者均可成为主晶或客晶,常呈乳滴状分布,称固溶体分解结构,这种结构在磁黄铁矿与黄铜矿、闪锌矿之间都能见到。

### 2.2.3 矿石构造

矿石构造主要以块状及浸染状为主,在硫化物与脉石间常可见条带状构造矿石,少见角砾状构造矿石及流动构造矿石。

块状构造的矿石金属硫化物含量大于 60%,主要由黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等组成,见于似层状、不规则状、透镜状、囊状矿体及“铜条”中,由较强的成矿溶液交代作用和硫化物的塑变-重结晶作用形成。浸染状构造可分为稠密浸染状构造和稀疏浸染状构造,主要见于致密块状矿体两侧和某些小矿体的稠密-稀疏浸染状矿石中。条带状构造指金属硫化物与脉石间呈条带状分布,一般平行片麻理,主要是成矿溶液沿围岩片麻理充填-交代引起,在围岩发生构造形变时,发生同步变形。流动构造的矿石主要见于红旗山及红透山局部地段,是在黄铜矿与闪锌矿、黄铜矿与磁黄铁矿之间表现出了流动构造现象,认为该构造的形成,与硫化物晶出过程中的流动状态有

① 辽宁冶金地质勘查局 101 队. 红透山式铜锌矿床探矿因素及找矿方向研究. 1981.

关,也就是说硫化物的塑变-熔融状态,使硫化物的不混溶作用在流动状态下进行.这种构造与热液充填构造完全不同.

### 2.3 围岩蚀变

对红透山矿区近矿围岩蚀变的研究发现,致密块状矿体向外过渡为浸染状矿体,然后过渡为硅化带、黑云母化带、碳酸盐化带蚀变岩,随后渐变为绿泥石化化的各类岩石,再向外则为无蚀变的含石榴黑云斜长变粒岩.可见,从致密块状矿体向浸染状过渡,再向蚀变岩直至含石榴黑云斜长变粒岩,均为过渡渐变关系,表现出了典型的含矿溶液矿化-蚀变特征.此外,还常见矿体向外依次为硅化带-黑云母化带→绿帘石化带-绢云母化带→绿泥石化带-碳酸盐化带的分带现象,较清晰地反映出了向蚀变矿物的温度递减方向展布的特点.

从上述的近矿围岩蚀变特征可以看出,成矿与热液活动之间关系十分密切.

总之,红透山式矿床矿化围岩蚀变的分带性比较清楚,蚀变种类虽不多,但分布较普遍,强度中等,范围有限,仅分布在矿体上下盘,上盘较下盘发育,一般

蚀变宽为 1~10 m. 从矿体向围岩两侧,蚀变由强变弱,并出现分带现象,主要蚀变矿物有石英、黑云母、白云母、透辉石、阳起石、绿帘石、绢云母、绿泥石、方解石、玉髓等.

### 2.4 流体包裹体特征

流体包裹体的研究,为成矿作用物化条件提供了重要信息.对本区红透山式铜矿的 10 件样品进行测试,获得 188 个石英包裹体均一温度数据(表 1),成矿温度介于 120~390℃之间,其频幅特征见图 3.从图中不难看出,区内矿化热事件总体由两部分组成,一是 240~390℃范围,64%的均一温度集中在 380~390℃;二是 120~240℃范围,多集中在 170~240℃之间.在流体温度和盐度关系图(图 4)上,流体包裹体的温度与盐度之间,存在着 A、B、C 三条趋势线.其中 A 线范围为 220~390℃,盐度范围为 32%~46%(NaCl 质量分数),线性关系明显,相关系数为 86.90%.这一组合代表了硅溶阶段气液包裹体特点,其主要特征是温度与盐度均高,随着温度下降,盐度下降得很快,这个阶段可能有利于金属硫化物的沉淀. B 线温度范围为 120~220℃,盐度为 13%~22%,

表 1 石英包裹体均一温度测试结果统计表

Table 1 Testing result of homogeneous temperature of inclusion in quartz

样品号	采样位置	岩、矿石名称	包裹体类型	$T_h$ /统计个数	S/统计个数
				352.0/8	7.29/4
KH02-3	587-15 线 1602 穿	矿石(靠近辉绿岩接触带)	气液两相包裹体	269.7/4	7.22/2
				181.7/5	6.25/2
KH02-4	587-15 线 1602 穿	矿石	含子矿物三相包裹体	383.6/5	45.71/5
KH02-4	587-15 线 1602 穿	矿石	气液两相包裹体	205.7/10	16.15/7
KH07-5	707-21 线	矿石	含子矿物三相包裹体	382.2/3	45.56/3
KH07-5	705-21 线	矿石	气液两相包裹体	211.2-16	17.18/12
KH07-11	707-21 线	矿石	含子矿物三相包裹体	382.4/4	45.57/4
KH07-11	707-21 线	矿石	气液两相包裹体	232.1/12	33.61/12
KH07-11	707-21 线	矿石	含子矿物三相包裹体	382.6/2	45.61/2
KH07-13	707-21 线	矿石	含子矿物三相包裹体	278.5/3	36.61/3
KH07-13	707-21 线	矿石	含子矿物三相包裹体	185.4/6	21.64/2
KH07-13	707-21 线	矿石	气液两相包裹体	158.4/4	21.51/3
KH10-3	767-27 线 14 采	伟晶岩	含子矿物三相包裹体	219.8/15	32.93/15
KH10-5	767-24 线 14 采	矿化围岩捕虏体	气液两相包裹体	361.2/2	
KH10-5	767-27 线 14 采	矿化围岩捕虏体	气液两相包裹体	219.5/13	21.75/10
KH10-5	767-27 线 14 采	矿化围岩捕虏体	气液两相包裹体	168.7/2	20.70/2
KH12-1	767-25 线 12 采	石英脉	气液两相包裹体	192.5/16	16.77/12
KH03-2	827-2 号钻窝	矿石	气液两相包裹体	171.1/16	18.78/10
KH15	稗子沟矿区	矿石	含子矿物三相包裹体	282.9/2	36.89/2
KH15	稗子沟矿区	矿石	气液两相包裹体	138.6/17	14.61/15

资料来源:沈阳地质矿产研究所; $T_h$  单位为℃,S 为盐度/(NaCl 质量分数)

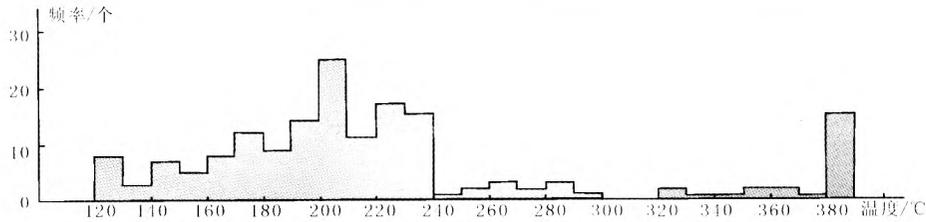


图 3 流体包裹体均一温度频幅图

Fig. 3 Histogram of homogeneous temperature of fluid inclusion

表 2 红透山铜矿及外围铜锌矿石中石英气液包裹体成分

Table 2 Composition of gas and liquid inclusion in quartz from Cu-Zn ore in and around Hongtoushan deposit

样品号	采样位置	液相成分 /10 <sup>-6</sup>							
		Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
KH10-3	767-27 线 14 采	21.989	3.430	0.169	9.376	0.032	53.483	0.100	5.356
KH10-3-1	767-27 线 14 采	10.505	3.649	0	61.857	0.300	35.798	0.230	4.384
KH10-5	767-27 线 14 采	10.671	9.385	0	10.290	0.046	48.097	0.225	2.438
KH10-5-1	767-27 线 14 采	5.895	6.735	0	39.423	0.147	14.809	0.218	13.316
KH12-1	767-25 线 12 采	33.167	7.865	0	29.745	0.045	33.008	0.642	9.647
KH12-2	767-25 线 12 采	19.690	4.026	0.925	15.481	0.058	41.095	1.035	5.908
LH15	稗子沟铜矿区	24.757	4.345	0	44.379	0.112	41.634	0.272	5.136
红透山铜矿平均		18.094	5.634	0.156	30.079	0.106	40.560	0.388	6.598

样品号	采样位置	气相成分 /%(摩尔分数)								
		CH <sub>4</sub> <sup>*</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> <sup>*</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> <sup>*</sup>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup> /(Ca <sup>2+</sup> +Mg <sup>2+</sup> )
KH10-3	767-27 线 14 采	585.391	32.83	2.318	2.787	92.329	0.173	4.649	6.38	0.53
KH10-3-1	767-27 线 14 采	308.372	8.272	1.079	1.540	96.180	0.120	2.128	2.88	0.06
KH10-5	767-27 线 14 采	1611.980	44.120	8.943	1.673	96.206	0.098	1.856	1.14	0.91
KH10-5-1	767-27 线 14 采	1642.968	24.256	9.916	1.334	97.000	0.042	1.461	0.87	0.17
KH12-1	767-25 线 12 采	882.118	6.112	2.886	0.797	97.219	1.160	1.735	4.22	0.26
KH12-2	767-25 线 12 采	1042.736	24.308	7.507	3.683	92.203	0.125	2.385	4.89	1.18
LH15	稗子沟铜矿区	76.434	23.350	2.799	1.573	96.544	0.092	1.781	5.69	0.09
红透山铜矿平均		878.571	23.321	5.064	1.912	95.525	0.258	2.285	3.21	0.33

测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所;测试仪器:日本岛津公司 Shimadzu HIC-SP Super 离子色谱仪、日本岛津公司 GC2010 气相色谱仪和澳大利亚 SGE 公司热爆裂炉;\* 含量单位为 10<sup>-4</sup>。

温度与盐度间的线性关系较差,相关系数为 14.23%,基本不相关,这可能反映了较复杂的成矿溶液的包裹体特征。C 线温度为 181 ~ 352 °C, 盐度为 5% ~ 10%, 此由脉岩的侵入热事件对矿体的影响所引起,线性关系好,相关系数为 90.30%。其主要特点是包裹体少,溶液性质简单,盐度低,虽然温度下降快,但盐度变化不大。需要指出的是,本次包裹体测定未包括金属硫化物矿物中的气液包裹体,因此未能直接取得金属硫化物矿物的晶出温度。由此我们认为,A 趋势线可能代表了金属硫化物矿物晶出时的温度与盐度;B 趋势线主要代表了红透山式铜锌矿热液中石英与部分硫化物的晶出温度与盐度。如果按瑞奇(1970)划分,B 趋势线代表着亚中温床(leptothermal),此时的压力为

24.31 ~ 81.04 MPa<sup>[2]</sup>。

将红透山及其外围铜矿石中石英流体包裹体成分列入表 2,从中可见,红透山式铜矿石中石英水萃取

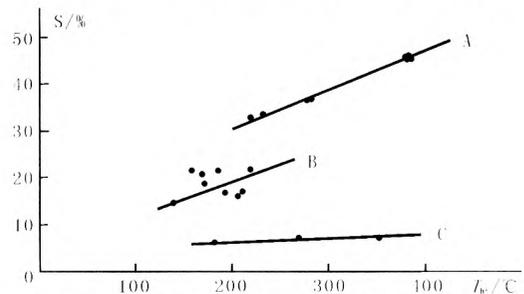


图 4 流体包裹体均一温度、盐度变异图

Fig. 4 Diagram of homogeneous temperature and salinity of fluid inclusion

液的阴、阳离子含量及气相中的气体含量变化都很大,如  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{F}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$  等,其含量变化均在 5 倍以上,表现出了热液性质复杂并多期叠加的特征。根据上述特征,在论述红透山铜锌矿床成矿热液性质时,采用了成分含量的平均值。

由表 2 可知,阳离子主要为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  很少,表现出了  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$  体系,其平均值依次为  $30.079 \times 10^{-6}$ 、 $18.094 \times 10^{-6}$ 、 $5.634 \times 10^{-6}$ 、 $0.156 \times 10^{-6}$ ;阴离子为  $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{F}^-$  型,平均含量依次为  $40.560 \times 10^{-6}$ 、 $6.598 \times 10^{-6}$ 、 $0.388 \times 10^{-6}$ 、 $0.106 \times 10^{-6}$ 。气相成分主要为  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{N}_2$ 、 $\text{CO}_2$ , 构成  $\text{H}_2\text{O} > \text{N}_2 > \text{CO}_2 > \text{O}_2$  体系。 $\text{K}^+/\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  的值分别为 0.31、6.15 和 0.45,表明红透山式铜矿成矿溶液以  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$  多, $\text{K}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  少为特征。气相成分主要为  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$ , 说明成矿溶液主要受  $\text{NaCl}$  浓度和  $\text{CO}_2$  分压控制,因此成矿溶液中的酸碱度可按  $\text{pH} = \text{PK}_1 + \log(\Sigma \text{M}/\text{Pco}_2)$  计算, $\text{PK}_1$  查表得 7.01,  $\Sigma \text{M}_A = \Sigma \text{M}^+ - \Sigma \text{M}^- = \Sigma \text{MHCO}_3^-$  ( $\text{Pco}_2$  值通过压力与  $\text{CO}_2$  摩尔分数求得),按平均值计算结果红透山式铜矿成矿溶液 pH 值为 6.56。

Rodder(1972)及很多热力学研究者认为, $\text{Na}^+/\text{K}^+ < 2$ 、 $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) > 4$  属于典型岩浆热水;而  $\text{Na}^+/\text{K}^+ > 10$ 、 $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) < 1.5$  属典型的热卤水;介于二者之间为沉积和层控性热水。经计算认为,红透山式铜矿成矿热液,既不属于典型岩浆热液,也不属于典型热卤水,因为  $\text{Na}^+/\text{K}^+$  为 3.21,表现出了沉积和层控性质,而  $\text{Na}^+ / (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$  为 0.33,则带有热卤水性质。因此我们认为区内成矿溶液主要来自沉积-层控热水,且含有热(海)卤水的特点。

总之,本区成矿热(水)事件,大约从成矿温度  $390^\circ\text{C}$ 、盐度 45% ( $\text{NaCl}$  质量分数)的硅溶阶段开始,逐渐步入温度  $220^\circ\text{C} \sim 120^\circ\text{C}$ 、盐度 20% 左右至 15% 以下的成矿热液蚀变阶段,最后还受到了脉岩侵入热(水)事件的影响。成矿热液主要来自变质热水。

## 2.5 同位素地球化学特征

### 2.5.1 硫同位素

对红透山铜锌矿床中不同期次的黄铁矿(12 件)进行了  $\delta^{34}\text{S}$  测定(表 3、图 5),同时又收集了黄铜矿、闪锌矿及磁黄铁矿的硫同位素资料 136 件<sup>①</sup>,列入表 4。

总硫计算  $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}} = 0.87\%$ ,与作者测定的(表 3、图 5)峰值相吻合,并且除了黄铜矿之外,基本也符合巴

表 3 红透山铜锌矿床黄铁矿硫同位素统计

Table 3 Sulfur isotopic statistics of pyrite in Hongtoushan Cu-Zn deposit

样品号	采样位置	$\delta^{34}\text{S}_{\text{pyr}}/\%$	矿石类型及赋矿位置
LH010-1	废石堆	1.5	脉状矿石
LH010-2	废石堆	0.6	浸染状矿石
KH08-8	467-13 线	-0.2	矿体
KH06-1	707-1602 穿	-0.3	“铜条”
KH07-5	707-21 线	0.9	致密块状矿体
KH10-1	767-27 线 14 采	1.2	条带状黄铁矿化黑云变粒岩
KH10-3	767-27 线 14 采	-2.5	黄铁矿化伟晶岩
KH10-4	767-27 线 14 采	-0.2	致密块状矿体
KH10-5	767-27 线 14 采	0.1	黄铁矿化黑云变粒岩捕虏体
KH12-2	767-25 线 15 采	0.5	致密块状矿体
KH11-2	767-24 线	0.0	矿体与正长斑岩接触带
KH04-5	827-35 线 3502 穿	0.5	致密块状矿体

测试单位:中国地质科学院矿产资源研究所;分析方法:硫化物矿样以  $\text{Cu}_2\text{O}$  作氧化剂制样;质谱计型号:MAT251E;分析精度: $\pm 0.2\%$ 。

表 4 红透山铜锌矿硫化物硫同位素总硫计算

Table 4 Total sulfur isotope of sulfides in Hongtoushan Cu-Zn deposit

硫化物矿物	统计个数	所占比例/%	$\delta^{34}\text{S}/\%$	计算 $\delta^{34}\text{S}_{\Sigma\text{S}}$ 值/ $\%$
黄铁矿	86	62	1.05	$(1.05 \times 62 + 0.46 \times 17 + 0.41 \times 11 + 0.80 \times 9 + 0.50 \times 0.7) / 100 = 0.87$
闪锌矿	23	17	0.46	
磁黄铁矿	15	11	0.41	
黄铜矿	13	9	0.80	
方铅矿	1	0.7	0.50	

欣斯基(1969)重硫富集的规律( $\text{Py} > \text{Sph} > \text{Pyr}$ )。因此,从硫同位素重硫的分馏角度不难看出,红透山铜矿的硫同位素分馏,是在 S 元素较丰富、较稳定的环境下进行的,分馏基本达到平衡,又比较彻底,具备了成矿的条件<sup>[3]</sup>。从表 4 可见,黄铜矿  $\delta^{34}\text{S}$  值大于闪锌矿和磁黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值,这不符合 S 同位素在同一矿床中的分馏平衡条件,从而说明大部分黄铜矿的晶出,与其他硫化物之间为非共生关系。

黄铁矿与闪锌矿之间基本处于分馏平衡状态,按照  $1000 \ln \alpha = A/T^2 + B$  ( $A = 2.3 \times 10^5$ , 根据扎曼斯基、拉伊,1972)计算,结果为  $351^\circ\text{C}$ ,认为是硫化物的晶出温度,比成矿热液阶段包裹体均一温度高出约  $120^\circ\text{C}$ ,相当于硅溶阶段包裹体均一温度<sup>[4]</sup>。因此,按热液矿床的温度进行分类(瑞奇,1970),红透山式铜矿应属  $200 \sim 350^\circ\text{C}$  温度范围的中温矿床,其压力约  $40.52 \sim 162.08 \text{ MPa}$ ,相当于硅溶阶段 A 趋势线(见图 5)。

① 辽宁冶金地质勘探局 101 队,辽宁有色金属研究所. 红透山式铜锌矿床控矿因素及找矿方向研究, 1981。

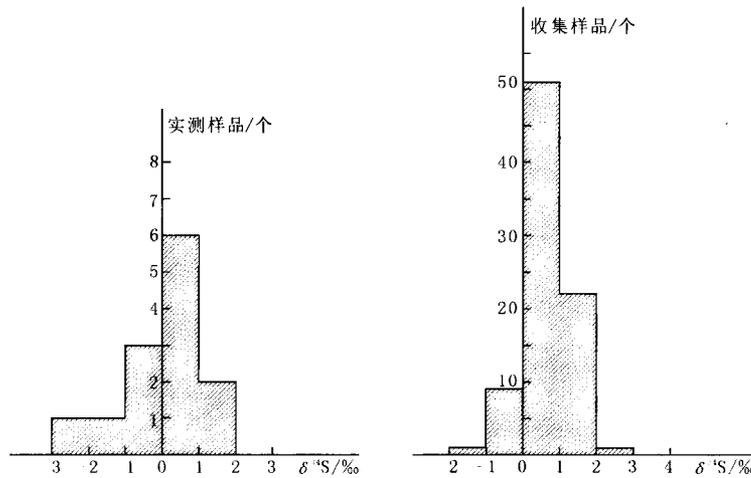


图5 同位素丰度

Fig.5 Sulfur isotopic abundance

尽管本区 S 同位素在复杂的物化条件下, <sup>32</sup>S 与 <sup>34</sup>S 之间亦进行了复杂的分馏过程, 矿柱与矿体西段及矿体上部则富集 <sup>32</sup>S, 矿柱边部与矿体东段及矿体下部则富集 <sup>34</sup>S<sup>①</sup>, 但从图 5 清晰可见, S 同位素众值在 -1‰ ~ +2‰ 范围, 峰值落在 0 ~ 1‰ 之间, 表明成矿物质主要来自幔源。

2.5.2 H、O 同位素

为了取得成矿热液性质方面的信息, 对 H、O 同位素进行了分析, 其中 δD 从矿物包裹体水直接测得, δ<sup>18</sup>O<sub>H<sub>2</sub>O</sub> 是通过 δ<sup>18</sup>O<sub>Q</sub> 换算而得。换算公式采用 δ<sup>18</sup>O<sub>Q</sub> - δ<sup>18</sup>O<sub>H<sub>2</sub>O</sub> = 3.38 × 10<sup>6</sup> / T<sup>2</sup> - 3.4 (克莱顿, 1972) (表 5)。

把 H、O 同位素投于图 6, 从图中清晰可见, 红透山矿床的 δD、δ<sup>18</sup>O 组成表现出变质水与大气降水的混合特征, 热水中的 δD 为 -44‰ ~ -72‰, δ<sup>18</sup>O 约 1‰ ~ -5‰。

2.5.3 铅同位素

对区内红透山式铜矿黄铁矿等共 17 件矿石进行了 Pb 同位素测定, 列于表 6。为了讨论 Pb 同位素组成与成矿地质年代的关系问题, 根据贾菲等 (1971)、Leroux 等 (1963) 和帕特森等 (1956) 资料, 采用如下参数: λ<sub>238</sub> = 0.155125 × 10<sup>-9</sup> a<sup>-1</sup> a<sub>0</sub> = 9.307 T = 4.55 × 10<sup>-9</sup> a

$$\lambda_{235} = 0.98485 \times 10^{-9} a^{-1} \quad b_0 = 9.307 \quad {}^{238}\text{U}/{}^{235}\text{U} = 137.8$$

$$\lambda_{232} = 0.049475 \times 10^{-9} a^{-1} \quad c_0 = 29.476 \quad \mu = 9.26$$

按霍尔姆斯-侯特曼斯模式图解<sup>[41]</sup>, 以 X(<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)-Y (<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb) 作坐标, 绘出单阶段正常铅增长演化曲线 (图 7)。由图 7 看出, 区内 17 件 Pb 同位素组成均落在地球年龄线与 μ 值线的月牙形区内, 表现出了连续演化的异常铅模式特征<sup>②</sup>。

因此, 我们可通过直线 A 与单阶段演化曲线 μ 值线的两个交点 A<sub>1</sub> 和 A<sub>2</sub>, 取得两个点的 x、y 坐标值,

表 5 红透山矿床包裹体水 H、O 同位素

Table 5 H-O isotope of inclusion fluid in Hongtoushan deposit

序号	样品号	采样位置	δD(SMOW)	δ <sup>18</sup> O <sub>Q</sub> (SMOW)	δ <sup>18</sup> O <sub>H<sub>2</sub>O</sub> (SMOW)	均一温度/℃
1	KH10-3	767-27 线 14 采	-71	11.1	0.58	219.8
2	KH10-3-1	767-27 线 14 采	-61	5.7	-4.82	219.8
3	KH10-5	767-27 线 14 采	-72	8.6	-1.93	219.5
4	KH10-5-1	767-27 线 14 采	-50	8.4	-2.13	219.5
5	KH12-1	767-25 线 15 采	-58	10.1	-2.20	192.5
6	KH12-2	767-25 线 15 采	-56	9.7	-2.50	192.5
7	KH15	767-26 线 15 采	-44	9.5	0.96	282.9

测试单位: 中国地质科学院矿产资源研究所; 测定矿物为石英; 分析方法: δD 为爆裂取水法, 锌法制氢法, δ<sup>18</sup>O 为 BrF<sub>5</sub>; 质谱计型号: MAT251EM; 分析精度: ±0.2‰; 含量单位: ‰。

① 辽宁冶金地质勘探局 101 队, 辽宁有色金属研究所. 红透山式铜锌矿床控矿因素及找矿方向研究. 1981.

② 沙德铭, 赵东方, 张森, 等. 辽东地区铜铅锌矿成矿规律研究. 2006.

表 6 红透山及外围铜、金矿床矿石 Pb 同位素组成

Table 6 Lead isotopic composition of Cu-Zn ore in and around Hongtoushan area

序号	样品号	采样位置	测定矿物	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	φ
1	KH04-5	827-3502 穿	黄铁矿	13.6483	14.5343	33.4722	0.9767
2	KH06-1	707-1602 穿	黄铁矿	13.7654	14.5616	33.6261	0.9573
3	KH07-5	707-21 穿	黄铁矿	13.5946	14.5153	33.3996	0.9845
4	KH08-8	467-13 采	黄铁矿	13.8858	14.5909	33.7290	0.9384
5	KH10-1	767-14 采	黄铁矿	16.3326	15.2908	36.5497	0.7112
6	KH10-3	767-14 采	黄铁矿	13.7589	14.5612	33.5908	0.9585
7	KH10-4	767-14 采	黄铁矿	13.6740	14.5377	33.4924	0.9717
8	KH10-5	767-14 采	黄铁矿	17.1920	15.5454	37.5662	0.6659
9	KH11-2	767-10 采	黄铁矿	14.7547	14.8629	34.7161	0.8386
10	KH12-2	767-12 采	黄铁矿	13.5616	14.5066	33.3650	0.9901
11	LH10-1	Y-H 剖面	黄铁矿	16.8915	15.4547	37.1834	0.6804
12	LH10-2	Y-H 剖面	黄铁矿	14.1429	14.6808	34.0792	0.9071
13	LH15-6	稗子沟	黄铁矿	15.5133	15.1173	35.5356	0.7772
14	LH35-1	线金厂	黄铁矿	17.4041	15.6397	37.8213	0.6602
15	LH37-1	景家沟	方铁矿	17.5331	15.6402	37.9218	0.6501
16	LH54-1	红旗山	黄铁矿	13.8682	14.5845	33.7543	0.9406
17	KH55-2	下达堡	黄铁矿	15.956.	15.2221	36.3203	0.7411

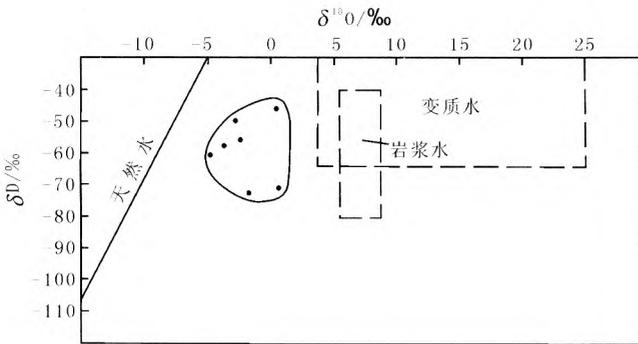


图 6 区内含矿热液水 δ<sup>18</sup>O-δD 体系图

(据 H.P. Taylor, 1974)

Fig. 6 δ<sup>18</sup>O - δD system of ore-bearing hydrothermal solution in the studied area

(after H.P. Taylor, 1974)

即 A<sub>1</sub> 点 x<sub>1</sub>=12.59、y<sub>1</sub>=14.21 和 A<sub>2</sub> 点 x<sub>2</sub>=17.63、y<sub>2</sub>=15.73。我们把它们分别代入下式：

$$(y-b_0)/(x-a_0)=1/137.8 \times \{ (e^{\lambda_{235} \times T} - e^{\lambda_{235} \times t}) / (e^{\lambda_{238} \times T} - e^{\lambda_{238} \times t}) \}$$

经计算结果，A<sub>1</sub> 下交点 (y<sub>1</sub>-b<sub>0</sub>)/(x<sub>1</sub>-a<sub>0</sub>)=164.36，年龄 t<sub>1</sub>=3.0955 × 10<sup>-9</sup>a；A<sub>2</sub> 上交点 (y<sub>2</sub>-b<sub>0</sub>)/(x<sub>2</sub>-a<sub>0</sub>)=90.00，年龄 t<sub>2</sub>=0.3769 × 10<sup>-9</sup>a。也就是说，我们通过区内异常铅同位素组成方程线，取得了 2 个年龄值，一是与源区(成岩)有关的约 30 亿年年龄值，二是与 Pb 同位素

组成衰变热事件结束有关的约 4 亿年的年龄值<sup>[5]</sup>。另从表 6 可见，φ 值主要集中在 0.9071 ~ 0.9901 之间，平均为 0.9583，它们在 <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb-<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb 坐标图上集中分布在方程线 A 线下段位置，既反映出了 Pb 同位素组成演化早期阶段特征，又可能反映了较大热事件。经查表，最大 φ 值年龄为 2661 Ma，φ 平均年龄为 2545 Ma。原辽宁省地质勘查局第十地质大队(1994)又认为，在 25 ~ 26 亿年之间，区域内又出现了强烈而广泛的变质作用<sup>①</sup>。这个年龄值与我们通过 φ 值的年龄来探讨普通铅从地球熔融体中分离出来之后所经历的第一次大规模热事件年龄值是十分吻合的。因此，作者认为可把上述 φ 值年龄 2545 ~ 2261 Ma 视为容矿岩的变质年龄<sup>[6]</sup>。

### 3 矿床成因讨论

#### 3.1 成矿物质分析

##### 3.1.1 成矿物质来源

从宏观角度来看，红透山铜锌矿床矿体赋存在薄层互层带岩系中，矿体主要呈层状或似层状展布；在矿区出露的块状硫化物矿石中可见磁黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿等构成流动构造，我们认为，这种流动构造是(也只能是)火山喷流作用形成的原生矿体在后续变形作用过程中，于半熔融状态下的塑性流变造成

① 辽宁地质矿产局第 10 地质大队，抚顺地区金、铜矿第二轮成矿远景区划报告，1994。

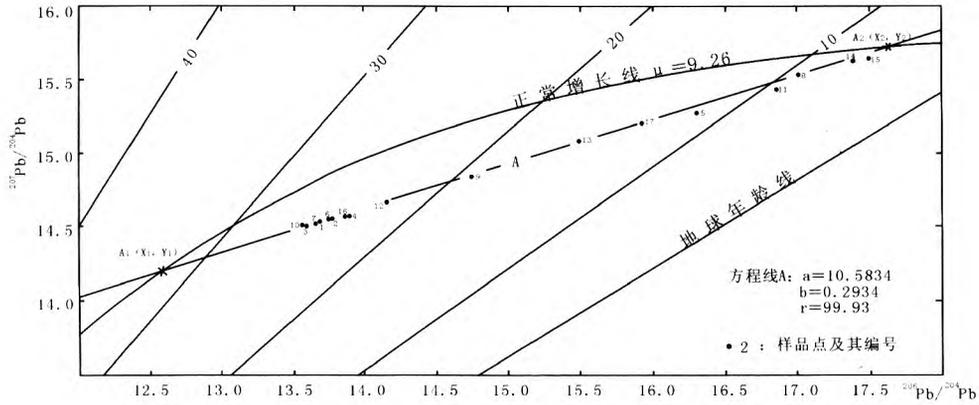


图 7 红透山地区 Pb 同位素及异常铅拟合方程线  
(据 H-H 模式图解)

Fig. 7 Lead isotope and fitting equation of anomalous lead in the Hongtoushan area  
(from H-H model illustration)

的.红透山铜锌矿床的形成,虽然经历了复杂的热液叠加成矿作用过程,但其主要矿(化)体基本上没有离开原始含矿(化)层,它们(矿体)不可能通过变质热液从远处、深处搬运并整齐、稳定地呈层状、似层状摆布在薄层互层带岩系中.因此,作者认为成矿物质至少来源于薄层互层带相关的原始矿源层,尽管由于热液成矿作用的叠加,使矿质的搬运(热液成矿)现象明显.

从同位素的角度看,矿区 138 件 S 同位素测定的总硫结果  $\delta^{34}S_{\Sigma}$  为 0.87‰,在频幅图中清晰可见,S 同位素众值在 -1‰ ~ +2‰ 范围,峰值落在 0 ~ 1‰ 之间,表现出了 S 主要来自幔源特征.因此,作者认为成矿物质主要来源于火山-沉积岩系,与火山喷流-喷气作用关系密切.

对所测得的 17 件 Pb 同位素数据(异常铅)拟合直线方程,经过计算获得与源区有关的下交点年龄约 30.96 Ma,显然这个年龄接近于红透山岩组变质岩原岩的年龄,同时我们又通过  $\varphi$  值计算,获得正常铅演化的初始近似年龄 2661 Ma 与 2545 Ma,即近似的变质年龄.

由此可见,无论从矿体表现出的宏观特征,还是从源区角度观察的 S 同位素特征和从反映原始时代的 Pb 同位素特征,均表现出成矿物质来源于火山-沉积岩系.

### 3.1.2 成矿流体来源

如前述,红透山矿床包裹体水 H、O 同位素显示,热水中的  $\delta D$  为 -44‰ ~ -72‰,  $\delta^{18}O$  约 +1‰ ~ -5‰,由此可见,红透山铜矿成矿热液水主要是由来自沉积层控性质的变质热液水与天然大气降水混合而成,与

典型的变质水和岩浆水有明显差异.另据包裹体成分计算,并与 Rodder(1972)经验公式对照,红透山式铜矿成矿热液水  $Na^+/K^+$  比值为 3.21,  $Na^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$  为 0.33,这显然不属于典型岩浆热液水,与典型热卤水特征相比,  $Na^+/K^+$  参数不符,但  $Na^+/(Ca^{2+}+Mg^{2+})$  参数特征与典型热卤水相当,因此作者认为区内成矿溶液主要来自变质水和大气降水,且含有热(海)卤水的特点.

从上述 H、O 同位素和包裹体成分特征不难看出,红透山铜锌矿床成矿主要与变质热液作用有关.

### 3.1.3 成矿热力来源

近 200 个气-液包裹体的均一温度测定结果显示,其温度范围介于 120 ~ 390℃ 之间,其中 64% 的均一温度集中在 380 ~ 390℃ 范围.作者曾指出,120 ~ 390℃ 为本区成矿热事件的温度范围,包括伟晶岩硅溶阶段、成矿热液蚀变阶段及脉岩侵入热事件等.同时,又通过黄铁矿与闪锌矿的 S 同位素平衡温度,计算获得了硫化物的晶出温度为 351℃.前人认为,本区出露的容矿的红透山岩组变质岩属石榴角闪岩相,其形成温度为 520 ~ 670℃,压力为 600 ~ 850 MPa(冶金部 101 队研究所,1982).

根据上述温度资料,当变质温度(600 ~ 650℃)降到约 390℃ 时,开始进入了成矿热事件阶段,直至低温热蚀变结束.由此作者认为,本区红透山铜锌矿床成矿热力来源为变质作用.

### 3.2 成矿模式浅析

红透山铜锌矿床含矿建造与太古宙晚期大规模的构造-岩浆-热事件关系十分密切,矿(化)体由该期活动的岛弧型钙碱性火山喷溢、喷气作用(末期)

形成;大约 25~26 亿年,本区发生了第二次强烈的构造-岩浆-热事件,表现为强烈的构造变形及花岗岩的侵入作用,并发生了温度为 520~670℃、压力 600~850 MPa 的角闪岩相变质作用,不仅使含矿建造发生形变,而且使部分初始矿(化)体发生了塑性流变。随着温压条件降低,进入温度 120~390℃、压力 40~160 MPa 的条件时,已转为成矿热液蚀变作用为主的矿化过程。成矿蚀变作用的热液水来自“天水”与变质水的混合水,其不仅使含矿建造及初始矿(化)体发生围岩蚀变,同时大量硫化物选择有利空间发生充填-交代作用,从而形成矿体。

综上,作者认为红透山铜锌矿床应属“火山-沉积变质热液叠加”型层控矿床<sup>[7]</sup>。

#### 参考文献:

- [1]张秋生,等.辽东半岛早期地壳与矿床[M].北京:地质出版社,1988.
- [2]江培漠.地质热力学基础[M].北京:科学出版社,1989.
- [3]魏菊英,王关玉.同位素地球化学[M].北京:地质出版社,1987.
- [4]韩吟文,马振东.地球化学[M].北京:地质出版社,2003.
- [5]李俊华,夏德兴.同位素年龄计算手册[M].北京:原子能出版社,1978.
- [6]孙荣圭.辽东清原地区太古代岩石 Rb-Sr 年代[J].地球化学,1989,(1).
- [7]袁见齐,宋上庆,翟裕生.矿床学[M].北京:地质出版社,1984.

## GEOLOGY AND GENESIS OF THE HONGTOUSHAN COPPER-ZINC DEPOSIT IN LIAONING PROVINCE

ZHANG Sen<sup>1</sup>, ZHAO Dong-fang<sup>1</sup>, LV Guang-jun<sup>2</sup>, SHA De-ming<sup>1</sup>, QUAN Heng<sup>1</sup>, TIAN Chang-lie<sup>1</sup>, YANG Tie-jun<sup>3</sup>

(1. *Shenyang Institute of Geology and Mineral Resource, Shenyang 110032, China*; 2. *Liaoning No. 8 Geologic Party, Benxi 117000, Liaoning Province, China*; 3. *Fushun Branch, Liaoning Institute of Nonferrous Geological Exploration, Fushun 113015, Liaoning Province, China*)

**Abstract:** The Hongtoushan Cu-Zn deposit, located in the Hongtoushan rock formation of Archean greenstone in North Liaoning Province, is a large-scale ore deposit with great industrial significance. According to the analysis of H, O, S and Pb isotope characteristics, accompanying with the macroscopic natures, such as the orebody shape, ore texture, structure and wall-rock alteration, it is considered that the matter source of the Hongtoushan Cu-Zn deposit is the Neoproterozoic volcanic-sedimentary rock series. The ore-forming fluid is originated from atmospheric water and metamorphic water. The heat for ore-forming is from metamorphism. Thus the Hongtoushan Cu-Zn deposit belongs to stratabound type with volcanic-sedimentary and metamorphic hydrothermal overprinting.

**Key words:** Hongtoushan; Cu-Zn deposit; geologic characteristics; stratabound type with volcanic-sedimentary and metamorphic hydrothermal overprinting; Liaoning Province

**作者简介:**张森(1983—),男,黑龙江省泰来县人,2005年毕业于中国地质大学(武汉),现从事矿床成矿规律研究工作,通信地址沈阳市北陵大街25号,邮政编码110033.