

论内蒙古别鲁乌图铜硫多金属矿床 的火山热液成因

聂凤军 张洪涛 孙浩 樊建廷

(中国地质科学院矿床地质研究所) (内蒙古地矿局103地质队)

内容提要 本文从矿床成矿地质环境角度,着重讨论了内蒙古别鲁乌图铜硫多金属矿床地质地球化学特征及其与火山岩的成因联系,确定了该矿床成矿作用时、空演化和成矿元素富集特点。研究表明:火山热液沉积是矿床形成的主导控制因素,区域变质是成矿后热液叠加的重要地质营力,矿床属海相火山岩型块状硫化物矿床,另外,矿区范围内首次发现的电气石岩不仅是典型的火山热液沉积岩,而且是一有效的近矿找矿标志。

主题词 火山热液 成矿作用 矿化分带 电气石岩 内蒙古别鲁乌图

别鲁乌图矿床是内蒙古中南部地区规模较大的铜、硫、铅、锌、银矿床。自70年代中期发现和勘探以来,长期被认为是同海西期岩浆侵入活动有关的中-低温热液充填型矿床。本文通过对该矿床产出地质环境、矿体产状、原生矿石类型和结构构造研究并且结合条带状电气石岩的发现,认为别鲁乌图铜硫多金属矿床为海相火山岩成因。

一、矿床产出的地质环境

矿床大地构造位置属天山—阴山内蒙古海西晚期地槽褶皱带内温都尔庙复背斜南侧,早古生代大陆边缘深大断裂(又称42°大断裂)北部。区域地层出露广泛,矿区西侧分布有中元古宙白音都西群深变质岩系和白乃庙群绿片岩系,北部为温都尔庙群含铁绿片岩,东侧有大面积侏罗系陆相火山岩出露。成矿区内仅见有上石炭统阿木山组火山—沉积岩系和下二叠统三面井组复理石建造,二者为角度不整合接触关系(图1)。花岗岩类主要分布在距矿区较远的东部和南部地区,迄今尚未观察到其与矿床成因联系的证据。此外,成矿区范围内地层褶皱、断裂构造极为发育,其中以北东向断裂构造与金属矿化关系最密切。

笔者通过对矿区及外围岩石地层对比并且结合有关岩石化学、微量元素和稀土元素地球化学数据,将别鲁乌图地区与成矿作用有关的岩层从下至上划分为五个岩性段:①含凝灰质细砂岩段:主要岩石类型有含凝灰质组分较多的细砂岩和粉砂岩,含硅质结核的粉砂质板岩,局部地段见有灰岩透镜体;②热液沉积岩段:绿泥石—钾长石—石英岩、绿泥石—钠长石—石英岩、条带状电气石岩和少许钠质流纹岩。地表常见有原生硫化物矿体风化淋滤后形成的条带状铁帽;③酸性火山岩段:层状流纹质钠长玢岩、钠质流纹英安岩、英安岩以及凝灰质细砂岩和粉砂岩,酸性火山岩与上覆的铜硫多金属矿体和下伏的热液沉积岩均呈过渡接触关系;④铜硫多金属矿体:主要由不同组合方式的黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、

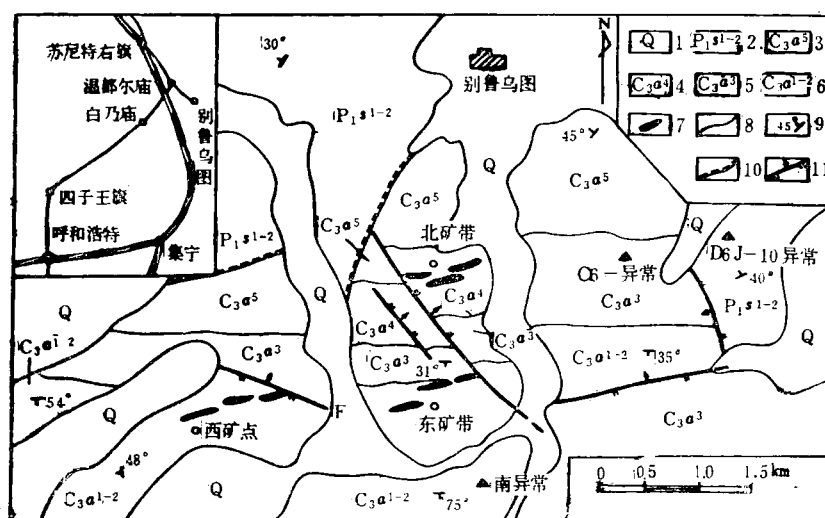


图 1 别鲁乌图铜硫多金属矿床地质略图

1—第四系；2—下二叠统三面井组灰岩、碳质板岩和含砾砂岩；3—6—上石炭统阿木山组：3—凝灰质细砂岩；4—含矿凝灰质细砂岩；5—火成碎屑岩；6—电气石岩、含硅质结核的凝灰质细砂岩和热液沉积岩；7—铜硫多金属矿体；8—地质界限；9—地层产状；10—角度不整合面；11—断层

Fig. 1. Diagrammatic geological map of the Bieluwutu copper-sulfur polymetallic deposit, Inner Mongolia.

1—Quaternary; 2—Lower Permian limestone, carbonaceous slate and gravel-bearing sandstone; 3—6—Upper Carboniferous Amushan Formation; 3—Tuffaceous fine-grained sandstone; 4—Ore-bearing tuffaceous fine-grained sandstone; 5—Pyroclastic rock; 6—Tourmalinite, siliceous nodule-bearing tuffaceous fine-grained sandstone and hydrothermal sedimentary rock; 7—Copper-sulfur polymetallic orebody; 8—Geological boundary; 9—Attitude of strata; 10—Angular unconformity; 11—Fault.

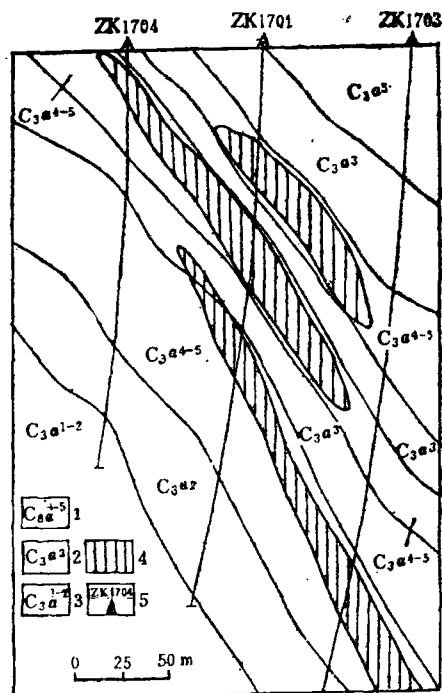
层间凝灰质细砂岩和火成碎屑岩组成，局部分布有电气石岩透镜体和热液角砾岩；⑤凝灰质细砂岩段：主要为凝灰质细砂岩、粉砂岩和硬砂岩，局部地段产出有含砾砂岩和灰岩透镜体。

二、矿体地质特征

别鲁乌图铜硫多金属成矿区由东矿带、西矿点、南异常和北矿带组成，面积约 25.7km² 其中以北矿带矿体规模最大、品位最高，因此，本文主要对北矿带进行重点解剖。图 2 是北矿带第 17 号勘探线剖面示意图，由图可见矿体多呈层状、似层状、条带状透镜体和豆荚状分布，厚度变化 0.05—15.74m，长度 100—315m，主要在凝灰质细砂岩和流纹质英安岩的过渡带上产出，矿体产状与围岩地层基本一致，具明显的层控特征。

依据围岩岩性和矿石结构构造，主要矿石类型有：①细脉浸染状黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿矿石，此类矿石大都在矿体顶、底板的流纹质英安岩或凝灰质细砂岩内产出；②块状、条带状磁黄铁矿-黄铁矿-黄铜矿-方铅矿-闪锌矿矿石，局部可见胶黄铁矿、块状毒砂-黄铁矿、黄铜矿-黄铁矿矿石矿物组合，此类矿石主要分布在流纹质英安岩与凝灰质细砂岩或粉砂岩过渡带上，构成矿床的主体。此外，从矿体的底部到顶部，黄铜矿含量（体积）10—0.5%，

明显减少,而黄铁矿、方铅矿和闪锌矿含量比例略有增高;③热液沉积岩(绿泥石-钾长石-石英岩或绿泥石-钠长石-石英岩)中产出有块状或斑杂状黄铁矿或石英-蠕绿泥石-黄铁矿矿石,



磁黄铁矿被黄铁矿交代和包裹进而构成港湾状和其它不规则状结构构造;④热液角砾岩中的块状黄铁矿-磁黄铁矿-黄铜矿矿石,矿石矿物多呈浑圆斑状或浸染状集合体,粒径可达2 cm。矿石构造为块状、条带状、胶状、角砾状、细脉浸染状和斑杂状。结构为晶粒状、似海绵陨铁状、交代熔蚀、包含嵌晶和反应边结构。金属矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿,次为方铅矿、闪锌矿、磁铁矿、毒砂、胶黄铁矿、自然铋、雄黄和雌黄等。脉石矿物有黑云母、绿泥石、石英、次为方解石、斜绿泥石、电气石、斜长石、绢云母、锆石、磷灰石和榍石等。

图2 别鲁乌图矿床第17号勘探线剖面示意图
1—3同图1; 4—铜硫多金属矿体; 5—钻孔编号

Fig. 2. Diagrammatic geological section along No. 17 exploratory line of the Bieluwutu ore deposit.

Symbols for 1—3 the same as for Fig. 1; 4—Copper-sulfur polymetallic orebody; 5—Drill hole.

三、赋矿层位中的条带状电气石岩

1. 条带状电气石岩岩相学特征:成矿区内电气石岩的产出方式有三种:①在矿体顶、底板火山-沉积岩系中呈稳定层状分布,厚度3—20m,东西延伸达700m,其上、下盘均与凝灰质细砂岩或酸性火山岩呈过渡接触关系,走向上可过渡为磁铁石英岩或富电气石的硅质岩。②在矿体内部沿一定层位呈不规则状透镜体或团块断续分布,其规模大小变化范围0.5×2(m)—2×5(m),电气石具明显变晶结构,斑晶最大可达0.3×0.6(cm)。③电气石单晶或集合体可在成矿围岩中呈浸染状和条带状产出,从而构成不同类型的富电气石火山岩或沉积岩。需要提及的是:在上述不同产状的电气石岩中,电气石的矿物学特征极为相似,暗示了它们在成因上的一致性。

电气石岩外貌与该区出露的磁铁石英岩类似,为黑-黑灰色,层纹或条纹状结构构造明显。电气石岩深、浅条纹(1—3mm)相间排列,交替出现,呈现出韵律性变化特点。深色条纹(或条带)主要由电气石(30—50%体积)和石英(40—60%)及少许绿泥石、黑云母和黄铁矿组成。浅色条纹(或条带)含石英(60—85%),少量绢云母、钠长石、绿泥石、磁黄铁矿、黄铁矿和磁铁矿等。深、浅条纹之间并无截然不同的界限,只是电气石含量存在较大差异。镜下观察结果表明:电气石多呈半自形柱状或粒状分布,Ne—浅黄,Ng—淡褐,

表 1 别鲁乌图矿床电气石岩和电气石成分分析结果(%)

Table 1. Analyses of tourmaline and tourmalinite from the Bieluwutu deposits (in percentage)

组 分	电 气 石 单 矿 物					电气石岩	
	B 8801 ^①	B 8720	B 8724	B 87241	B 87201 ^①	B 8801 ^①	B 8724 ^①
SiO ₂	38.00	36.24	35.70	35.48	43.51	74.25	77.45
TiO ₂	0.80	0.51	1.64	0.57	0.86	0.34	0.36
Al ₂ O ₃	24.43	31.47	30.43	28.04	21.40	12.85	11.28
TFcO	11.17	6.69	8.47	9.72	13.53	3.04	2.89
MnO	0.06	0.11	0.03	0.00	0.01	0.01	0.02
MgO	9.25	7.77	7.10	7.67	6.75	3.72	3.12
CaO	1.28	0.38	0.54	1.50	1.64	0.40	0.41
Na ₂ O	1.75	2.92	2.83	2.37	1.47	0.68	0.71
K ₂ O	0.53	0.00	0.03	0.00	0.27	0.06	0.05
B ₂ O ₃	9.63	—	—	—	8.66	1.70	1.50
F	0.05	—	—	—	0.03	—	—
Cl	0.014	—	—	—	0.01	—	—
H ₂ O	2.50	—	—	—	1.89	1.35	2.40
总 量	99.46	86.09	86.77	85.35	100.03	98.40	100.19

① 为化学分析结果, 由中国地质科学院岩矿测试所完成; 其余为电子探针分析结果, 由中国地质科学院矿床地质研究所王文瑛完成

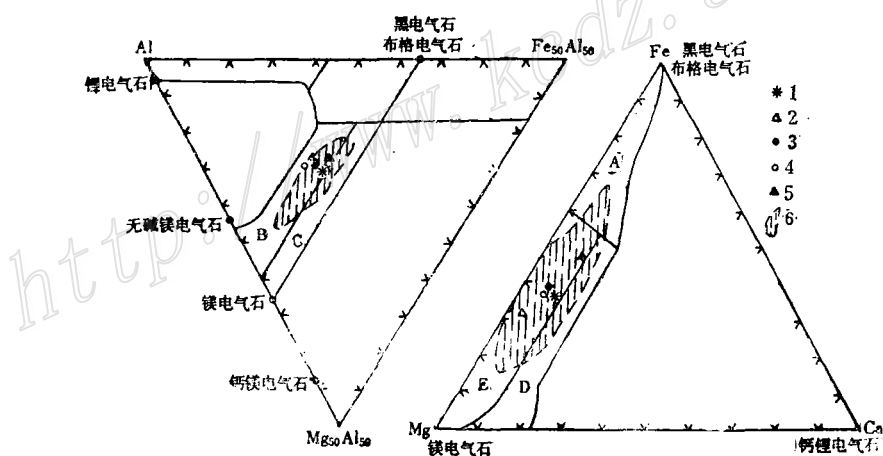


图 3 别鲁乌图矿床电气石成分图解 (据I. P. Plimer, 1986图修改)

A—贫锂花岗岩、伟晶岩和细晶岩; B—富铝变砂屑岩和泥质岩; C—变泥质岩和复砂屑岩; D—富钙变泥质岩; E—贫钙变泥质岩、变砂屑岩和石英-电气石岩; 1—B8801; 2—B8720; 3—B8724; 4—B87241; 5—B87201; 6—澳大利亚北部划登代克-多木喷气沉积铅锌矿床电气石分布范围

Fig. 3. Triangular diagram showing composition of tourmaline from the Bieluwutu ore deposit. A—Li-deficient granite, pegmatite and aplite; B—Al-rich metaarenite and mudstone; C—Meta-mudstone, and meta-arenite; D—Ca-rich meta-mudstone; E—Ca-deficient meta-mudstone meta-arenite and quartz-tourmalinite; 1—B8801; 2—B8720; 3—B8724; 4—B87241; 5—B87201; 6—Area for tourmaline from Golden Dyke Dome exhalative-sedimentary lead-zinc deposit, North Australia.

弧边三角形或等边形切面常可见及, 粒径变化0.4—0.8mm, 局部可达3mm。电气石岩透视镜体中的电气石颗粒比较粗大, 变斑结构明显, 电气石变斑晶长达0.6cm。此外, 电气石的筛状和穿孔结构也很发育, 反映了电气石岩遭受到一定的热液交代作用。石英一般呈它形粒状结构, 粒径略大于与其共生的电气石并且与电气石构成镶嵌结构。

2. 电气石岩地球化学特征: 2件电气石岩全岩化学分析结果见表1。全岩化学成分主要受电气石种属和含量控制, 以富硅、镁、铁、铝和硼为特征, 与世界范围内许多火山岩型块状硫化物成矿区内找到的电气石岩类似^[5], 为一典型的富硼热液沉积岩。

电气石单矿物化学和电子探针分析结果(表1)表明: 别鲁乌图铜硫多金属成矿区电气石岩中的电气石均为镁电气石-黑电气石矿物固溶体系列中的富镁电气石。电气石的 $TFeO/(TFeO + MgO) = 0.46—0.66$ (平均值为0.55), 均低于花岗岩类岩石中电气石同类比值(0.86—0.91)^[1]。在 $Al-Fe_{50}Al_{50}-Mg_{50}Al_{50}$ 和 $Fe-Mg-Ca$ 三角图解中(图3), 电气石投绘点全部落在一般火山喷气成因电气石岩电气石成分区, 反映了电气石的形成同火山活动具有密切成因联系。

电气石微量元素分析结果显示: Sr 142—143ppm, Ni 15—45ppm, Co 40—55ppm, Cu 10—328ppm, Mo 6—19ppm, Zn 25—420ppm, 其中Cu、Zn含量变化范围最大。电气石的F/Cl比值为3.0—3.5, 略低于世界范围内火山成因块状硫化物矿床中电气石同类比值, 暗示了电气石岩形成过程的复杂性。

四、矿床地球化学特征

1. 硫同位素特征: 成矿区范围内28件单矿物样品硫同位素分析结果见表2。各类硫化物 $\delta^{34}S$ 值变化范围较小且均为正值, 其组成特征完全可与甘肃白银厂火山岩型铜矿和广东大宝山火山喷气-沉积型铁、铜多金属矿床相对比, 显示了它们在硫来源方面的一致性。对比发现, 尽管磁黄铁矿、黄铜矿和方铅矿产出部位不尽相同, 但其 $\delta^{34}S$ 值并无明显变化, 这可能与上述矿物硫同位素分馏系数较小有关。相比之下, 黄铁矿的 $\delta^{34}S$ 值变化范围较大, 并且

表2 别鲁乌图矿床各类硫化物的 $\delta^{34}S$ 组成(‰)

Table 2. Sulfur isotopic composition ($\delta^{34}S$ ‰) of various sulfide minerals from the Bieluwutu ore deposit

矿石类型	黄 铁 矿			磁黄铁矿			黄 铜 矿			方 铅 矿		
	样数	范 围	平均	样数	范 围	平均	样数	范 围	平均	样数	范 围	平均
细脉浸染状	4	+0.2—+2.7	+1.53	3	+0.5—+1.0	+0.9	2	+0.5—+1.4	+0.95	1	+0.7	+0.7
块 状	3	+3.5—+5.4	+4.2	3	+0.13—+0.4	+0.3	1	+1.0	+1.0	2	+0.4—+0.6	+0.5
围 岩	3	+5.8—+8.6	+7.5	3	+2.0—+2.5	+2.2	2	+1.0—+1.5	+1.3	1	+0.5	+0.5
全 矿 区	10	+0.2—+8.6	+4.4	9	+0.13—+2.5	+1.13	5	+0.5—+1.5	+1.08	4	+0.4—+0.7	+0.56
大 宝 山 ^[2]	28	-0.4—+15.07	+3.13	9	-0.3—+2.3	+0.64	4	-0.5—0	-0.25	11	-1.1—+0.1	-0.47
白 银 厂 ^①	68	+0.2—+5.8	+4.08	4	+2.6—+4.1	+3.36	15	+2.8—+4.6	+3.43	7	+2.4—+4.5	+3.65

① 据高象新等, 1985, 西北地质, 第四期; 同位素测定主要由中国地质科学院矿床地质研究所七室完成, 部分为原桂林冶金地质研究所资料

同其产出部位有关,从矿体底板细脉浸染状矿石经主矿体块状硫化物矿石到顶板沉积岩围岩,黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值分别为+1.53‰、+4.2‰和+7.5‰,它不仅反映了成矿物理化学条件改变对黄铁矿硫同位素分馏富集的影响,而且为矿床的海底火山热液成矿环境的预测,提供了理论依据。综合其它地质证据,认为别鲁乌图铜硫多金属矿床的硫主要来源于上地幔或下地壳。

2. 铅同位素特征:笔者对别鲁乌图铜硫多金属成矿区内4件黄铁矿和2件方铅矿的铅同位素比值进行了测定,所测数据以及计算得到的模式年龄值和源区特征比值列于表3。据表3可见,尽管黄铁矿和方铅矿的产出部位各不相同,但是大多数样品铅同位素比值相对稳定,变化较小,其特点与我国许多火山沉积型金属矿床相类似,属单阶段正常铅^①。本文采用最新参数,利用单阶段铅演化模式计算得到的年龄值变化范围为279—481Ma,除B8755样

表3 别鲁乌图矿床铅同位素组成、模式年龄和源区特征值

Table 3. Lead isotopic composition and model age of the Bieluwutu ore deposit as well as characteristic values of the provenance

样号	产状	矿物	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}}$	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	μ	年龄 (Ma)
B8756	块状、条带状硫化物矿石	方铅矿	18.421	15.833	38.730	4.17	4.0	9.92	430.8
B8756		黄铁矿	18.2889	15.6576	38.406	4.06	3.9	9.59	321.10
B8755		黄铁矿	18.246	15.598	38.478	4.11	3.94	9.48	279.
B8758	细脉浸染状	方铅矿	18.086	15.598	38.242	4.09	3.93	9.52	407.5
B87103	围岩	黄铁矿	17.961	15.526	38.012	4.04	3.88	9.37	399
B87104	围岩	黄铁矿	18.004	15.623	38.173	4.12	3.95	9.56	481.6

模式年龄和源区特征值均按Doc(1974)⁽⁶⁾参数计算,由中国地质科学院地质研究所同位素室测试

品中黄铁矿铅“模式”年龄略小于成矿围岩外,其余样品铅“模式年龄”均老于成矿围岩或与围岩成岩时代一致。由此可知,该矿床中的铅主要来自石炭纪海相火山喷发沉积岩或石炭纪之前的岩层。

为了进一步追索矿床中铅的来源和源区同位素特征,计算了硫化物铅同位素的 μ 值, Th/U 和 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 。从表3可见,别鲁乌图矿床铅源区的 $\mu=9.37-9.92$,与一般正常铅演化曲线的 μ 值变化范围吻合。由图4可见,除B3756样品中方铅矿铅同位素数据投绘点落在上地壳铅平均演化线附近外,其余样品数据投绘点均位于地幔铅平均演化线与造山带铅平均演化线之间,并且分别落在克拉通化地壳铅区和大洋火山岩区。上述数据表明:矿床中的铅是壳源铅与幔源铅不均匀混合的结果,另外,矿床铅同位素源区的 $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 和 Th/U 值变化范围分别为4.04—4.17(平均值4.09)和3.88—4.0(平均值3.93),同样反映了铅同位素的混源特征。

3. 氧、氢和碳同位素特征:从表4可看出,别鲁乌图矿床不同产状石英的 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化于+6.94—+14.45‰,平均值为+10.85‰,其中块状和条带状矿石中石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值与安山岩氧同位素值变化范围(5.4—7.5‰)一致,而角砾状、细脉浸染状矿石和围岩中石英的 $\delta^{18}\text{O}$

① 陈好寿, 1981, 中中层控矿床专辑, 第132页

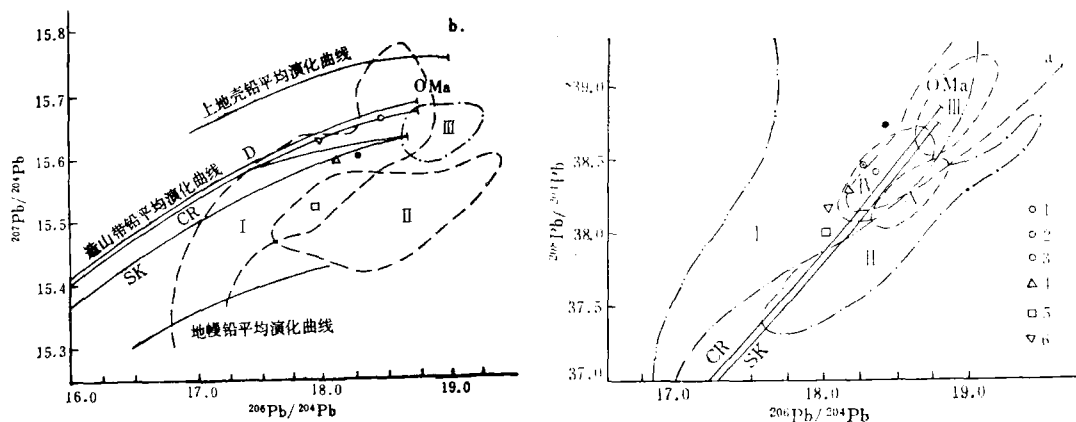


图4 别鲁乌图矿床各类硫化物的 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (左图)和 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ - $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (右图)座标图

1—B8756样品中方铅矿；2—B8756样品中黄铁矿；3—B8755样品中黄铁矿；4—B8758中方铅矿；5—B87103中黄铁矿；6—B87104中黄铁矿；I—克拉通化地壳铅；II—大洋火山岩铅；III—深海沉积物铅；IV—成熟岛弧铅；V—原始岛弧铅；SK—两阶段演化曲线；D—多伊单阶段演化曲线

Fig. 4. $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (left) and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ versus $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (right) diagram of various sulfide minerals from the Bieluwu deposit.

1—Galena from Sample No. B8756; 2—Pyrite from Sample No. B8756; 3—Pyrite from Sample No. B8755; 4—Galena from Sample No. B8758; 5—Pyrite from Sample No. B87103; 6—Pyrite from Sample No. B87104; I—Lead of Craton crust; II—Lead in oceanic volcanic rocks; III—Lead in pelagic sediments; IV—Lead in mature island arc; V—Lead in primitive island arc; SK—Two-stage lead curve; D—Doe's single-stage lead curve.

值均有不同程度增高, 显示出成矿过程后期大气降水的混入。根据石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值和气液包裹体均一温度, 利用石英-水分馏方程式计算出与石英呈平衡的矿液的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值, 其变化范围为 -1.99‰ — $+4.68\text{‰}$, 平均值为 $+1.63\text{‰}$, 明显低于岩浆水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化范围($+5.5\text{‰}$ — $+10\text{‰}$)。石英气液包裹体水的 δD 值为 -54‰ — -98‰ , 平均值 -73‰ , 略高于岩浆水 δD 值变化范围(-50‰ — -85‰)。上述数据表明: 在别鲁乌图矿区, 参与成矿过程的热液是一种以岩浆水为主并且混入有少量大气降水的混合热液, 当然笔者也并不排除热液与围岩相互作用对 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 和 δD 值变化的影响, 但是并非十分重要。

两件方解石的 $\delta^{13}\text{C} = -4.5\text{‰}$ — -6.5‰ , 平均值为 -5.5‰ ; $\delta^{18}\text{O} = +11.75\text{‰}$ — $+14.6\text{‰}$, 平均值 $+13.18\text{‰}$, 与方解石呈平衡的热液的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} = +4.314\text{‰}$ — $+4.755\text{‰}$, 平均值 $+4.53\text{‰}$; 其中 $\delta^{13}\text{C}$ 值同碳酸岩 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围($\delta^{13}\text{C} = -5\text{‰}$ — -8‰)^[8]基本相当, 而 $\delta^{18}\text{O}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 值分别低于碳酸岩($+6.0\text{‰}$ — $+8.5\text{‰}$)和岩浆水同类值。方解石的氧、碳同位素组成特征表明: 氧的来源与前述石英相同, 而碳主要来自火山岩。

4. 矿体底板围岩蚀变特征: 别鲁乌图矿床的底板围岩多为蚀变流纹英安岩和含凝灰质细砂岩或沉凝灰岩, 受工作条件所限, 笔者无法确定底板围岩热液蚀变的水平分带, 仅对垂向蚀变分带进行讨论。在底板围岩垂向上, 底部为绿泥石化和碳酸盐化, 中部为绢云母化和硅化, 上部出现钾长石化, 其中绢云母化、硅化和绿泥石化最发育并且同金属矿化密切相关。随着热液蚀变程度的增强, 原生黑云母、角闪石、斜长石和含铁氧化物分别为绿泥石、方解石、绢云母和石英所取代, 与矿区范围内同类新鲜岩石样品相比, 蚀变岩中 SiO_2 、

表 4 别鲁乌图矿床矿物的氧、氢和碳同位素组成

Table 4 Oxygen, hydrogen and carbon isotopic composition of some minerals from the Bieluwutu deposit

样品号	测试矿物	形成温度 (°C)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$ ①	$\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}(\text{‰})$
B 87180	块状矿石内方解石	232	+14.60	+4.755		-6.5
B 87160	矿体内方解石脉	236	+11.75	+4.314		-4.5
B 87150	条带状矿石中石英	235	+7.84	-1.99		
B 87190	块状矿石中石英	260	+6.94	-1.73		
B 87201	角砾状矿石中石英	275	+13.58	+4.18	-54	
B 87191	浸染状矿石中石英	317	+11.43	+4.68	-67	
B 87203	矿体围岩中石英	205	+14.45	+2.99	-98	

测试单位：中国地质科学院矿床地质研究所七室；①分别采用 $1000\ln\alpha_{\text{方解石-H}_2\text{O}} = 2.78 \times 10^6 T^{-2} - 3.39$ (奥尼尔等, 1969)^[3] 和 $1000\ln\alpha_{\text{石英-H}_2\text{O}} = 3.05 \times 10^6 T^{-2} - 2.09$ (Matthews, 1979)^[7] 公式计算

K_2O 、 Al_2O_3 和 MgO 分别增高2—5%、1.5—3%、0.6—1.0%和0.4—1.2%，与之相反， TFeO 、 CaO 和 Na_2O 分别减少1—3%、1.5—3.5%和1.5—3.5%。伴随上述元素含量变化，相当一部分成矿元素被带入成矿流体并且参予矿床的形成作用，蚀变岩中含铜黄铁矿网脉的存在即是极好的例证。

5. 矿体的金属分带：同典型岩浆期后热液金属矿床，以岩体为中心的金属分带不同，别鲁乌图矿床的金属元素组合和矿石类型主要受一定地层层位控制。一般来讲，以铜为主的矿石矿物组合多在中酸性火山岩与沉积岩过渡带上产出，而其上部的凝灰质细砂岩、粉砂岩和沉凝灰岩除了赋存有层状或透镜状铜矿体外，铅、锌和银矿石亦十分发育。从矿体底板围岩经主矿体到顶板围岩， $\text{Cu}/(\text{Cu} + \text{Pb} + \text{Zn})$ 比值分别为0.42、0.92和0.16，同样反映出矿体具明显金属元素分带特征。研究表明：矿体的这种金属分带现象除受矿物溶解度、沉淀温度和结晶顺序等因素控制外，成矿过程中上覆的海水深度亦可能对金属元素分布位置产生重要影响。

对该矿床主矿体自下而上采集到的6件黄铁矿样品进行了微量元素测定，样品 Co/Ni 比值变化范围1.06—6.56，平均值4.35， S/Se 为 4×10^4 — 7×10^4 ，平均值 5.4×10^4 。尽管黄铁矿产状不尽相同，但其 Co/Ni 和 S/Se 比值变化范围相对稳定，与火山成因含铜黄铁矿矿床硫化物相类似^[9,10]，暗示了黄铁矿海相火山热液成因特点。

6. 成矿围岩和矿石稀土元素(REE)地球化学特征：本文主要对构成该矿床成矿围岩的流纹英安岩、热液沉积岩和凝灰质细砂岩以及三种不同类型硫化物矿石进行了REE分析，分析结果见表5。由表5可见，流纹英安岩 $\Sigma\text{REE}=214.82\text{ppm}$ ， $\text{LREE}/\text{HREE}=11.11$ ， $\delta\text{Eu}=0.62$ ，REE组成型式为一右倾斜并且略具铕负异常的曲线(图5a)，其组成特征与一般同熔型花岗岩相似，反映了深源岩浆特点。热液沉积岩和凝灰质细砂岩或粉砂岩的REE含量和特征比值基本接近， $\Sigma\text{REE}=86.59$ — 133.62ppm ，平均值 104.84ppm ； $\text{LREE}/\text{HREE}=7.23$ — 9.67 ，平均值8.40和 $\delta\text{Eu}=0.27$ — 0.45 ，REE组成型式均为Eu明显亏损的轻稀土元素富集型，并且可与西澳大利亚卡姆巴尔达地区一组火山喷气成因化学沉积岩相对比，暗示了其在成因方面的相似性。据上述数据，不难看到，从流纹英安岩经化学沉积岩到凝灰

质细砂岩或粉砂岩, REE含量连续贫化和Eu亏损程度增高的变异特征不仅反映了火山喷发沉积过程中REE地球化学的演化, 而且为火山喷发沉积成矿提供了佐证。

三件不同产状的矿石样品的REE含量和组成型式差别较大, 矿体底板细脉浸染状铜矿石的 $\Sigma\text{REE}=40.86\text{ppm}$, $\text{LREE}/\text{HREE}=2.55$ 和 $\delta\text{Eu}=0.57$, REE组成型式为一Eu亏损不明显的平坦曲线(图5b)。主矿体内部块状和条带状硫化物矿石的 $\Sigma\text{REE}=13.03\text{ppm}$,

表5 别鲁乌图矿床成矿围岩和矿石稀土元素含量(ppm)

Table 5. REE contents of wall rocks and ores from the Bieluwutu deposit (in ppm)

元素	样号	B 8745	B 8734	B 8733	B 8735	B 8739	B 8736	B 8756	7643	8323
La		46.95	28.71	20.39	17.12	23.73	4.33	3.54	20.27	18.29
Ce		92.03	54.69	39.38	35.46	46.87	12.12	4.90	40.71	36.15
Pr		10.61	6.14	4.60	4.16	5.13	1.79	0.66	4.57	4.6
Nd		38.67	24.52	17.15	15.79	19.85	8.36	2.17	19.55	19.21
Sm		7.52	4.85	3.51	3.22	4.15	2.34	0.60	4.05	3.49
Eu		1.30	0.38	0.44	0.32	0.61	0.42	0.08	1.26	0.95
Gd		6.19	4.25	2.76	2.88	4.38	2.55	0.37	3.91	3.47
Tb		0.85	0.63	0.42	0.45	0.64	0.47	0.05	0.61	0.65
Dy		4.42	3.74	2.33	2.81	3.64	3.06	0.27	3.65	4.0
Ho		0.94	0.86	0.49	0.64	0.89	0.71	0.06	0.83	0.81
Er		2.13	1.98	1.11	1.46	1.96	1.83	0.13	2.37	2.46
Tm		0.31	0.28	0.18	0.24	0.31	0.30	0.02	0.34	0.39
Yb		2.47	2.26	1.32	1.76	2.39	2.23	0.15	2.37	2.66
Lu		0.43	0.33	0.23	0.28	0.40	0.35	0.03	0.37	0.41
ΣREE		214.82	133.62	94.31	86.59	114.95	40.86	13.03	104.86	97.54
$\frac{\text{LREE}}{\text{HREE}}$		11.11	8.32	9.67	7.23	6.87	2.55	11.06	6.17	5.51
δEu		0.62	0.27	0.45	0.34	0.47	0.57	0.05	1.0	0.85

测试单位: 中国地质科学院岩矿测试研究所; 表中B 8745—流纹英安岩; B 8734—绿泥石-钠长石-磁黄铁矿-石英岩; B 8733—凝灰质细砂岩; B 8735—含凝灰质粉砂岩; B 8739—矿体顶板细脉浸染状硫化物矿石; B 8736—矿体底板浸染状铜矿石; B 8756—主矿体内部块状和条带状硫化物矿石; 7643和8323分别为西澳大利亚化学沉积岩(钠长石-石英-磁黄铁矿-透闪石-钾长石)数据(引自O. A. 鲍文顿, 1980) 据地矿部矿床地质研究所, 1981, 国外地质参考资料(20), 第182—195页)

$\text{LREE}/\text{HREE}=11.06$ 和 $\delta\text{Eu}=0.05$, REE组成型式为Eu亏损极明显的轻稀土元素富集型曲线。与底板细脉浸染状矿石相比, 块状和条带状矿石中LREE和HREE含量均有不同程度降低, 其中以HREE贫化幅度最大。与前述二类矿石相比, 矿体顶板细脉浸染状铜、硫、铅、锌矿石中LREE和HREE均有较大程度富集 $\Sigma\text{REE}=114.95\text{ppm}$, $\text{LREE}/\text{HREE}=6.67$ 和 $\delta\text{Eu}=0.47$, REE组成型式同热液沉积岩和凝灰质细砂岩或粉砂岩相似, 显示出他们之间成因上的联系。

综合对比结果表明: 矿体底板细脉浸染状铜矿石和主矿体内部块状和条带状硫化物矿石REE丰度大大低于围岩REE丰度, 它们可能同下面二个因素有关: ①成矿过程中没有外来碎屑物混入; ②矿石本身很少含有富集REE的铝硅酸盐矿物。现代REE地球化学理论认为^[11], 矿石REE含量和Eu异常的强度主要受成矿溶液REE含量和沉淀介质物理化学条件制约。别

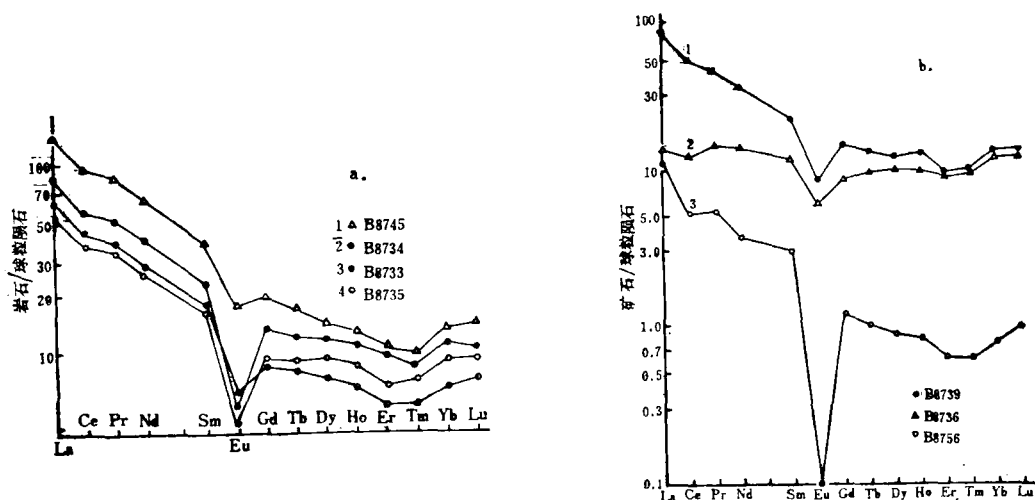


图 5 别鲁乌图铜矿床成矿围岩和矿石稀土元素组成型式

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of ore-forming wall rocks and ores from the Bie-luwutu deposit.

鲁乌图矿床的成矿初期可能是一种温度、压力较高,成矿溶液略偏碱性的环境,这样的物理化学条件可使Eu呈 Eu^{3+} 状态存在并且不易同其它三价REE发生分离,要么一同沉淀,要么共同保留在溶液中,矿石中较小的轻、重REE分馏系数和较高的Eu含量(表5)即是很好的证明。随着成矿作用演化,成矿溶液中REE丰度进一步降低,溶液性质也由偏碱性演化为偏酸性,在这样的环境中,Eu大都呈 Eu^{2+} 存在,由于 Eu^{2+} 具有较大的离子半径和较低的离子电位,易与其余三价REE离子发生分离并且与 F^- 或 HCO_3^- 等形成络合物残留在溶液中,从而形成主矿体中REE和Eu亏损极明显的块状、条带状硫化物矿石。矿体顶板细脉浸染状硫化物矿石的REE含量分别为块状、条带状硫化物矿石的8倍和底板细脉浸染状铜矿石的2.8倍,这种在成矿晚期阶段形成的富REE硫化物矿石只能用外来碎屑物或围岩中被淋滤出的REE参予成矿溶液来解释,否则就很难理解为什么同一种成矿溶液的早期沉淀物贫REE,而晚期沉淀物却大幅度富集REE。上述推测亦可为前述的氧、氢和铅同位素数据来证实。

五、讨论与结论

内蒙古中南部古陆边缘经历了前寒武纪、晚加里东和早、中、晚海西期构造旋回,与之相对应的是古蒙古洋板块与中朝古陆的长期和多阶段俯冲、碰撞,从而引起广泛的岩浆侵入-喷发活动和形成极为复杂的构造形迹。中期海西造山运动致使本区遭受到东西挤压和南北向拉张构造影响,从而在古大陆边缘地带形成规模大小不等的裂陷盆地和隆起。在乌兰宝力格到别鲁乌图一带的裂陷槽内,海底火山喷发和沉积作用不仅形成了上石炭统阿木山组中酸性火山岩、凝灰质细砂岩(或粉砂岩)和热液沉积岩以及上覆的上二叠统三面井组复理石建造,而且形成一系列铜硫多金属矿床(点)。研究结果表明:成矿作用是整个火山活动过程的继续和发展,随着海底火山活动的进行,一方面,部分铅、铜、锌、硫和碳以及REE可随火山碎屑、火山灰和喷气进入海水或直接沉淀下来,造成金属元素的初步富集,另一方面,火

山活动亦可造成区域地热梯度不断增高和热泉喷发加剧(如矿区范围内硅质泉华结核的存在),从而构成海水与围岩的对流循环体系。热水可通过上述循环体系不断从围岩中萃取铜、铅、锌、银、硼、氧和氢等成岩成矿元素形成含矿热液。由于受上覆海水承压作用影响,成矿溶液可沿有利通道在火山岩—沉积岩过渡地段或沉积岩层内部形成层状、透镜体状铜硫多金属矿体以及伴生的电气石岩。各金属元素在溶解度、沉淀温度和部位等方面的差异是造成矿体底部富铜,上部富铅、锌、硫的主导控制因素。矿床形成后,部分矿体长期裸露地表,接受风化淋滤,黄铁矿和其它硫化物的分解可形成规模大小不等的铁帽,提供了有利的找矿标志。晚期海西造山运动,矿床遭受到一定程度的区域变质作用,沿地层层理分布的细粒或条纹状硫化物颗粒增大,条纹加宽,局部矿体发生小规模活动,从而形成细脉浸染状矿石类型并且呈现出热液充填型矿床特点。

别鲁乌图铜硫多金属矿床的地质地球化学特征可与国内外众多火山岩型块状硫化物矿床相对比,结合矿床产出的地质环境,可以推测;矿床是晚石炭世海相火山喷发沉积的产物,成因类型属古陆边缘裂陷槽内形成的火山岩型块状硫化物矿床。该矿床成因类型的确定对于在内蒙古中南部石炭纪火山岩地层中寻找同类矿床和重新认识古生代大陆边缘构造演化历史均具重要理论和现实意义。

本研究是国家“七五”重点科技攻关项目《白乃庙—镶黄旗绿片岩—斑岩铜、钼、金矿成矿机制及隐伏矿床预测》子课题研究成果的一部分,研究工作得到地矿部矿床地质研究所裴荣富研究员,长春地院陈琦教授和孟良义研究员以及内蒙古一〇三地质队赵贵麟高级工程师的指导和帮助,野外工作承蒙陈立真、于秀云工程师和周和平同志大力协助,笔者在此谨表衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] 吴振寰 1987 电气石及其在找矿勘探中的意义 找矿矿物学与矿物学填图 第316—325页 福建科学技术出版社
- [2] 葛朝华、韩发 1987 广东大宝山矿床喷气—沉积成因地质地球化学特征 第81—83页 北京科学技术出版社
- [3] 丁梯平 1980 氢氧同位素地球化学 第49—70页 地质出版社
- [4] Plimer, I. R., 1986, Tourmalinites from the Golden Dyke Dome, Northern Australia. *Mineral Deposita* 21, pp. 263—270.
- [5] Taylor, B. E. and Slack, J. F., 1984, Tourmalines from Appalachian-Caledonian massive sulfide deposits: Textural, chemical and isotopic relationship. *Econ. Geol.* Vol. 79, pp. 1703—1726.
- [6] Doe, B. R. and Stacey, J. S., 1974, The application of lead in isotopes to the problems of ore genesis and ore prospect evaluation: a review. *Econ. Geol.* Vol. 69, pp. 757—776.
- [7] Matthews, A., 1979, Oxygen isotope equilibration systematics between quartz and water. *The American Mineralogist*. Vol. 64, No. 1 and 2, pp. 232—241.
- [8] Taylor, H. P. Jr., Frechen, J. and Degen, E. T., 1967, Oxygen and Carbon isotope studies of Carbonatites from the Laacher See district, Sweden. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 31, No. 3, pp. 407—428.
- [9] Loftus—Hills, G. and Solomon, M., 1967, Cobalt, Nickel and Selenium in sulfides as indicators of ore genesis. *Mineral Deposita* Vol. 2, pp. 228—242.
- [10] Lambert, J. B. and Sato, T., 1974, The Kuroko and associated ore deposits of Japan: a review of their features and metallogensis. *Econ. Geol.* Vol. 69, pp. 1215—1236.

- [11] Fryer, B. J., 1977, Rare earth evidence in iron-formations for changing Precambrian oxidation states. *Geochemica et Cosmochimica Acta* Vol. 41. No. 3, pp. 361—367.

ON THE VOLCANO-HYDROTHERMAL ORIGIN OF THE BIELUWUTU COPPER-SULFUR POLYMETALLIC DEPOSIT, INNER MONGOLIA

Nie Fengjun and Zhang Hongtao

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)

Sun Hao and Fan Jianting

*(No.103 Geological Party, Bureau of Geology and Mineral Resources of Inner Mongolia, Sunidyouqi,
Inner Mongolia)*

Abstract

Located on the southern flank of the Late Hercynian Wanduermiao anticlinorium, the Beiluwutu ore deposit is one of the most important copper-sulfur-lead-zinc-silver sulfide deposits in the northern marginal polymetallogenic belt of the North China platform. The ore deposit occurs mainly within Upper Carboniferous volcano-sedimentary sequence of Amushan Group, in which massive, disseminated, banded and stockwork pyrite, pyrrhotite and chalcopyrite ores constitute an inseparable part of the strata. The upper Carboniferous volcano-sedimentary rocks of Amushan Group in the ore district can be divided into five lithological associations: ① tuffaceous siltstone, siliceous nodule-bearing siltstone and limestone lenticules; ② hydrothermal sediments (chlorite-K-feldspar-quartz and chlorite-albite-quartz), banded tourmalinite and laminated gossans; ③ stratified rhyodacite and tuffaceous siltstone; ④ copper-sulfur polymetallic orebody; and ⑤ tuffaceous siltstone, greywacke and conglomeratic sandstone.

Both chemical and electron microprobe analyses show that tourmaline from the banded tourmalinite is dravite which shows no difference from other tourmaline associated with submarine exhalative ores.

Lead isotopic composition of the ore deposit varies to a certain extent: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=17.961-18.421$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=15.526-15.833$ and $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=38.012-38.730$. Four of the calculated model ages are older than 360Ma, ranging from 399 to 481Ma, whereas two are consistent with or close to ages of the wall rocks (279—321 Ma). The $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$, Th/U and μ values of lead provenance are 4.40—4.17, 3.88—4.0 and 9.37—9.92 respectively. It is considered

that lead of the Bielowutu deposit is derived from heterogeneous mixture of the lower crust and the upper mantle.

$\delta^{34}\text{S}$ values of various sulfides are relatively stable ($+0.2$ — $+5.8\%$). $\delta^{18}\text{O}$ values of quartz are $+6.94$ — $+14.5\%$ for massive sulfide ores and wall rocks. $\delta\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$ values of fluid inclusions in quartz are -54 — -67% for sulfide ores and -98% for wall rocks. In addition, $\delta^{13}\text{C}$ values of calcite range from -4.5 to -6.5% . The variation range of stable isotopic data together with the behavior of minor elements in sulfide minerals implies that sulfur, oxygen, hydrogen, carbon and minor metallic elements are largely derived from volcano-hydrothermal eruption.

REE content is 40.86 ppm for disseminated copper ores underlying the main orebody, 13.03 ppm for massive or banded sulfide ores from the main orebody and 114.95 ppm for disseminated copper-lead-zinc ores from the upper part of the deposit. Studies reveal that REE patterns are principally controlled by REE composition of ore-forming fluids and physicochemical conditions for ore deposition.

Based on our data combined with geological setting of the ore deposit, it is thought that the Bielowutu ore deposit is a product of Late Carboniferous submarine volcano-sedimentation, belonging hence to volcanogenic massive sulfide type formed in ancient epicontinental rift.

矿床地质专业委员会公告

中国地质学会第34届理事会第5次常务委员会理事扩大会议认为:在下属的专业委员会、研究会和工作委员会中应发挥中青年专家的作用。为此,中国地质学会在1990年8号通知中要求,下属各学术工作机构应增聘40岁以下的青年委员。矿床地质专业委员会经与有关方面协商,决定增聘吴澄宇、刘国平为矿床地质专业委员会委员并报请中国地质学会理事会审批。中国地质学会(1990)017号通知下达我专业委员会,同意报请的增聘人员。二人简历如下:

姓 名	性 别	年 龄	党 派	学 位	职 称	现工作单位
吴澄宇	男	33	中共党员	博 士	助理研究员	地质矿产部矿床地质研究所
刘国平	男	33	中共党员	硕 士	工程师	中国有色金属工业总公司北京 矿产地质研究所