

我国主要类型铜矿的硫同位素分布特征

冶金部地质研究所同位素地质室

建国以来,我国铜矿地质普查和研究工作取得了很大成绩。十多年来,我们对我国各种类型铜矿的一百一十多个矿区和矿化点做了硫同位素组分测定,积累了二千多个硫同位素组成数据。现将这些数据综合整理,并讨论若干类型铜矿床的硫同位素分布特征。同位素组成采用 $\text{CH}_4/58\text{—IV}$ 型质谱计用双进样比较法测定;在真空系统中以 CuO 为氧化剂,用直接氧化法制备 SO_2 。重复实验结果表明,整个流程的测试精度为 $\pm 0.02\%$ 。全部数据以 Canyon Diablo 陨石陨硫铁为标准进行计算。

本项工作得到冶金部地质研究所矿床室及冶金地质系统、国家地质总局系统有关地质人员的大力支持。本文的完成,是与他们的辛勤劳动分不开的。

一 几种主要类型铜矿的硫同位素组成

按照铜矿体与岩石的共生关系及其赋存特点,可以把我国铜矿床划分为以下几种主要类型:与基性—超基性岩有关的硫化铜镍矿床;与中酸性火山—内侵杂岩有关的斑岩铜矿;与中酸性侵入岩有关的夕卡岩铜矿;与海底火山作用有关的火山岩型铜矿;砂、砾(页)岩中的砂岩型铜矿,以及产于各种变质岩中的变质岩型铜矿。这些矿床分别在大地构造不同发展阶段的不同构造—岩浆活动环境中形成,成矿时的温度、压力、氧化—还原电位、酸碱度等条件各异,矿体形成机理亦不相同,反映在硫同位素组成上也各有特色,现分述如下。

(一) 与基性—超基性岩体有关的铜镍硫化物矿床

这类矿床形成于地槽发育的中、晚期阶段或地台阶段,明显受深大断裂控制。多数产在地槽边缘深断裂带的近隆起(地台)的一侧,或沿侧旁断裂延入隆起(或地台)内部。含矿母岩常为铁质系列,一般分异较好,除个别盆状岩体呈垂直分异外,多数作侧向陡倾分异。我们积累了我国十几个矿床(矿点)的硫同位素组成数据,而以红旗岭一号岩体的工作做得较为详细。采自该岩体及其围岩各种类型岩石、矿石的68块标本,获得了73个硫同位素组成数据,其特点是(图1):

1. 硫同位素组成的相对变化范围很窄。岩体内70个数据的 δS^{34} 数值为 $-1.0\sim +0.6\%$, 只有1.6‰的离差;这些数值密集在一个最大平均值附近,在硫同位素组成分布图上具塔式分布特征。

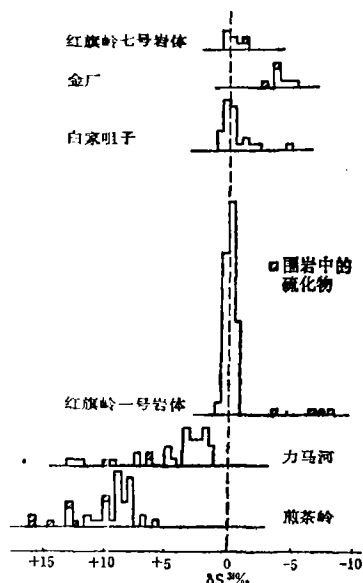


图1 铜镍硫化物矿床硫同位素组成分布图

2. 硫同位素组成与陨硫硫相近。岩体内的70个数据 δS^{34} 的最低数值为 -1.0% ，平均 -0.2% ，与陨硫硫（ $\delta S^{34} \rightarrow 0$ ）相差仅 1% 。

3. 不同类型的矿石硫同位素组成的差别很小。底部矿体中海绵晶铁状一斑杂状矿石的 δS^{34} 数值为 $-0.7 \sim +0.6\%$ ；上悬矿体中浸染状矿石为 $-0.7 \sim -0.2\%$ 。侵入母岩同生混染的七条矿化角闪斜长岩、蚀变辉岩及蚀变橄榄岩脉中的硫化矿物，其 δS^{34} 变化区间为 $-0.5 \sim +0.3\%$ ；七块较晚的纯硫化矿物脉的标本为 $-0.6 \sim +0.5\%$ ；两个晚期黄铁矿晶簇分别为 -0.4 和 $+0.2\%$ 。这些形成时间不一、地质产状各异的各种类型矿石标本，在硫同位素组成上的相似性，说明它们具有同质的单一的硫源。在漫长的成矿过程中，硫同位素组成的变化如此微弱，证明整个成矿作用都是在高温条件下进行的；地温计测量结果肯定了这一推测。

4. 围岩与岩体在硫同位素组成上的差别极为明显。采自一号岩体的围岩及外接触带中混染岩的三块标本，其 δS^{34} 值分别为 -8.4 、 -7.0 和 -3.9% ，与岩体内的标本截然不同。

硫同位素组成的变异特征，反映了该岩体的硫化铜镍矿床的成矿作用是以岩浆深部熔离作用为主，并有浅部熔离和残余岩浆作用发生。

一号岩体硫同位素组成的上述特点，可以认为是大部分铜镍硫化物矿床的共同规律。从图1可以看出，白家咀子、红旗岭七号岩体等同类矿床大多具有变化范围窄（ 3% 左右）、接近陨硫硫（数据分布靠近零线）和塔式分布等特点。国外许多同类矿床具有同样特点。分布在不同地质单元的大量矿床的硫同位素组成彼此一致，且都与陨硫硫接近，表明硫来源于上地幔。

但并非所有的铜镍硫化物矿床都如此。如苏联的诺里尔斯克矿区、加拿大阿列克赛矿床以及我国煎茶岭、力马河等矿床， δS^{34} 值就异常高，而阿扎尼亚的茵西茨瓦、苏联的罗夫诺和我国的金厂等矿床则相反，富集 S^{32} 同位素， δS^{34} 值为负值。硫同位素组成的这种巨大差异反映了成矿过程的不同特

点；深入研究其原因，可以了解成矿作用提供重要资料和信息。下面简要说明煎茶岭矿床的情况。

和红旗岭、白家咀子等矿区相比，煎茶岭矿区的地质情况有很明显的特殊性：

1. 岩体遭受了强烈的蚀变，原生造岩矿物几乎蚀变无余，原始岩石已面目全非。岩体主要由蛇纹岩、滑石菱镁岩、石英菱镁岩及透闪岩等蚀变岩石组成。各种岩石普遍含铜、镍，透闪岩富含矿较多，石英菱镁岩含矿品位较低。

2. 岩体中断裂构造极为发育。

3. 岩体南侧及中部有后期花岗斑岩岩株和钠长岩岩脉穿插。矿体群与钠长斑岩产状一致，含矿较富的透闪岩多分布在钠长岩脉附近。靠近花岗斑岩有矿体出现，矿体发育地段与花岗斑岩及隐伏的钠长斑岩产出的轮廓一致。

4. 矿体以硫化矿为主，但硅酸镍矿分布普遍，个别地段富集成矿。矿石矿物除磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铁矿、黄铜矿外，以热液交代为重要成因的紫硫镍铁矿、针镍矿、硫钴矿、辉镍矿等矿物广泛分布，为其他岩浆熔离型铜镍硫化物矿床所罕见。矿石结构以细粒浸染状为主，硫化物交代硅酸盐矿物的现象较普遍。

上述地质现象用传统的岩浆成因理论难以解释，硫同位素组成的特点也与硫源来自地幔的说法相矛盾。煎茶岭矿区各种类型矿石31个样品的 δS^{34} 值为 $+6.0 \sim +11.9\%$ ，同陨硫硫相比大大富集 S^{34} ，与地幔硫截然不同，这显然不是超基性岩浆所固有的。采自后期酸性岩浆岩中四块硫化物标本的 δS^{34} 值为 $+9.6 \sim +13.0\%$ ，采自围岩中的七块硫化物标本，为 $+8.9 \sim +16.4\%$ 。矿体中的硫化物与后期酸性岩浆及围岩中的硫化物在同位素组成上的相近性，说明这些富含黄铁矿的围岩很可能就是煎茶岭镍矿的硫源层。晚期酸性岩浆活动一方面导致超基性岩石的蚀变交代作用，同时也提供了热力，使围岩中的硫分异出来，并沿着构造裂隙进入超基性岩体，与硅酸镍反应形成硫化镍。这种在高温高压条件下挥发组分硫交代橄榄石、辉石等矿物，经自(他)变质作用从这些矿物的结

晶格架中析出镍、铁等金属而形成硫化矿物的过程，称之为“硫化作用”。硫化作用可能与残余岩浆阶段的成矿作用相当，与晚期岩浆熔离作用近似，代表一个成矿阶段，造成成矿作用的叠加现象。

从文献来看，世界上有不少铜镍硫化物矿床具有类似煎茶岭矿区的地质特征，硫化作用很可能是形成该类矿床的重要因素之一。

(二) 与中酸性火山—内侵杂岩有关的斑岩型铜(钼)矿

这类矿床可产在地槽发育的晚期或后期阶段的火山盆地或断裂带，部分产于不同时代褶皱基底上年青的拗陷或断裂带中，常见于火山盆地边缘或内部。含矿母岩常为正常钙碱性系列的中酸性小型浅成—超浅成侵入体，个别情况下矿化产于火山岩内。蚀变矿化分带现象普遍发育。

我们积累了我国主要的几个斑岩铜矿的硫同位素组成数据，其中德兴铜厂矿区的工作做得较为系统(图2)。

成矿母岩为浅成侵入的花岗闪长斑岩岩株。矿床蚀变发育并表现为基本对称的环带状分布：从岩体中部的伊利石—钠长石化带，向外逐次出现钾长石化带、石英—绢云母化带、水白云母—伊利石化带和绿泥石化带。硫同位素组成特征为：

1. δS^{34} 变化范围窄、绝对值小。在矿田采集的众多样品虽分布在不同部位，具有不同的地质产状，但硫同位素组成变化区间较窄，硫化矿物的 δS^{34} 值变化范围为 $+3.0 \sim -2.7\%$ ，其绝对值也较小，算术平均值为 $+0.4\%$ 。富家坞的5块硫酸盐样品， δS^{34} 数值集中在 $+7.5 \sim +6.0\%$ 较小区间内。在其他斑岩铜矿床中也可见到类似情况，例如多宝山的70多块标本， δS^{34} 的变化范围为 $-2.8 \sim +2.5\%$ ；小西南岔的21个样品为 $+2.1 \sim +4.2\%$ ；城门山46块标本为 $+0.6 \sim +5.7\%$ 。斑岩铜矿硫同位素组成的均一性，标志着硫源自地壳下部深处。

2. 硫同位素组成在水平和垂直方向上的变异都显示出一定的规律性。从矿体中部到边部，黄铁矿的 δS^{34} 数值递增。钻孔岩心标

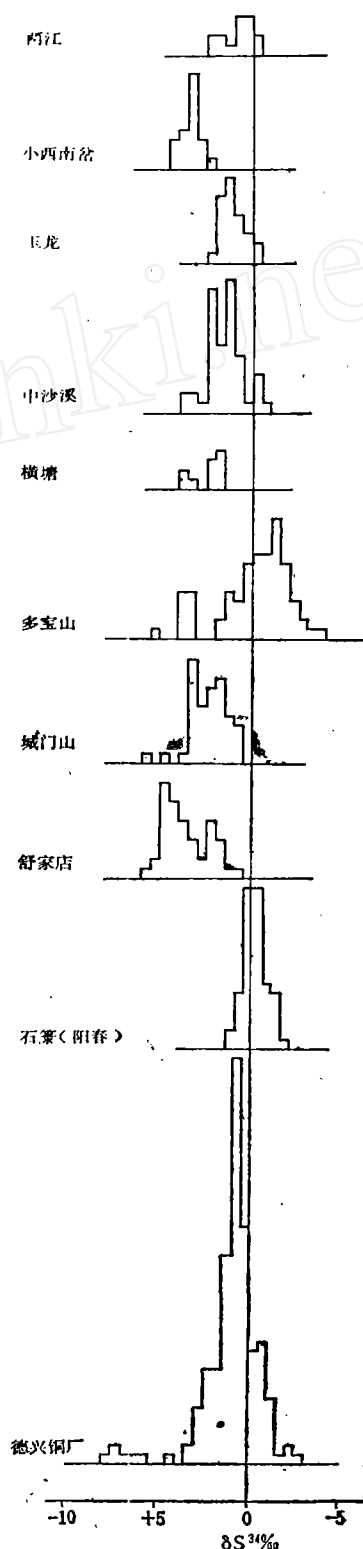


图2 斑岩型铜矿床硫同位素组成分布图

本的测定结果表明, δS^{34} 数值由下向上亦有增长的趋势。在各个矿物蚀变带内, 硫同位素组成也有明显的变异: 富家坞矿区, 从斑岩体内的钾长石化带 ($-2.7 \sim 0.0\%$) 到矿体外部的绿泥石带 ($+1.1 \sim +2.7\%$), S^{34} 同位素逐渐富集。

我们把硫同位素组成以部分岩体和围岩为中心呈环带状变异的现象, 称之为“硫同位素组成变异晕”, 其分布特点与蚀变矿化分带、金属矿化分带以及地球化学元素分带等有一定联系。上述硫同位素组成在水平、垂直方向上及各蚀变带中的变化, 实际上是矿床硫同位素组成变异晕的若干侧面。

硫同位素组成变异晕的形成, 是由于含矿溶液及成矿介质的温度, 酸碱度, 氧化—还原电位, 氧、硫逸度等地球化学因素在运移过程中发生变化促使硫同位素分异的结果。和蚀变矿物晕、金属矿物晕类似, 硫同位素组成变异晕也可作为斑岩铜矿的找矿标志之一。

3. 德兴矿田内三个主要工业矿区和一个找矿评价区的硫同位素组成有一定差异。 δS^{34} 的算术平均值, 铜厂为 -0.10 ; 富家坞为 $+0.78$; 朱砂红为 $+0.81$; 先告山找矿评价区为 $+0.82\%$ 。这种情况是各矿区地球化学演化史上的差别造成的。但从硫同位素组成变异晕的角度考虑, 也可以解释是由于各矿区处于晕圈的不同部位, 分别代表了不同水准面的硫同位素组成。据此可应用硫同位素组成上的差别判断矿田内各矿区的相对剥蚀深度。富家坞金属硫化物较铜厂相对富集 S^{34} 同位素, 可以推测铜厂的剥蚀深度略大于富家坞。据已有勘探资料, 富家坞主矿体最大延伸比铜厂矿区大 150 多米, 与上述推断相符。鉴于判断矿区剥蚀深度在矿山地质生产中具有重要的实际意义, 所以对矿床剥蚀深度与硫同位素变异的关系值得进一步探讨。

(三) 与中酸性内侵岩有关的夕卡岩型铜矿

这种类型在我国分布很广, 是一个非常重要的铜矿类型。它与斑岩铜矿的成矿地质环境比较接近, 因而二者常共生于一矿带

乃至同一矿床。不过适于形成夕卡岩型矿床的条件可能更广泛一些, 它不仅与浅成中小型岩体伴生, 而且也见于中深成甚至深成大侵入体接触带。我们积累了我国 30 多个夕卡岩铜 (铁、锡) 矿床中的硫同位素数据, 其特点归纳如下 (图 3):

1. 和前两种类型矿床相比, 夕卡岩型铜矿床硫同位素组成的变化区间要大一些, 各矿床之间的差异也明显一些。但就每个矿床而言, 硫同位素组成的变化范围并不超过 1

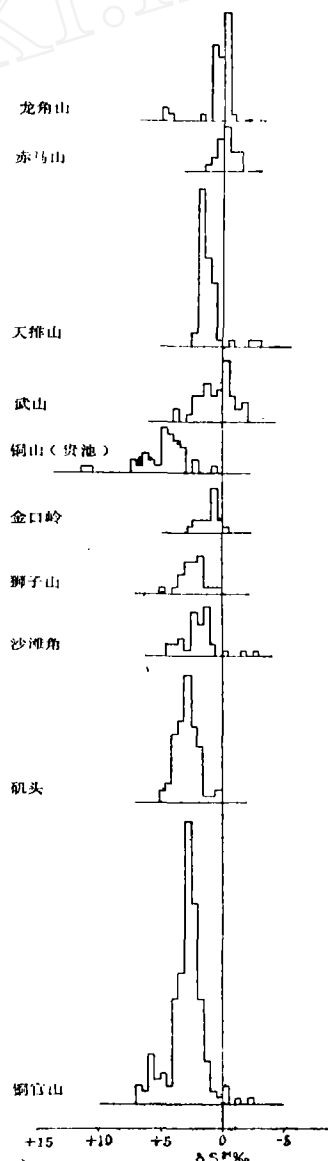


图 3 夕卡岩型铜矿床硫同位素组成分布图

%, 一般为0.5%左右,表明含矿溶液中的硫具有相当均一的性质。大部分矿区硫化矿物的 δS^{34} 数值为正值,与地壳岩石圈硫同位素组成的总趋势一致,可能反映了与围岩同化、交代作用的特点。

2.硫化矿物的硫同位素组成与其生成阶段有一定关系。按照矿物形成的先后顺序,夕卡岩矿床的形成过程可以划分为:①无水夕卡岩矿物(如辉石、石榴石等)阶段;②含水夕卡岩矿物(如透闪石、阳起石、绿帘石等)阶段,此时有磁铁矿、赤铁矿、锡石、白钨矿等矿化;③晚期碱性长石、金云母、黑云母阶段;④绿泥石—绢云母阶段;⑤碳酸盐阶段。在①、②阶段内并不发生任何硫化物沉淀,只是在后三个阶段中相应生成早、中、晚三期硫化物。硫同位素组成测定结果表明,早期硫化物富集 S^{32} 同位素,晚期硫化物富集 S^{34} 同位素。长江中下游地区的24个夕卡岩铜(铁)矿床,早期硫化物的 δS^{34} 数值的变化范围为 $-15.8 \sim +0.9$;中期为 $+2.0 \sim +6.5$;晚期为 $+6.7 \sim +17.0$ ‰。

在一个具体矿床内,各阶段所形成的矿物常呈带状分布。由于上述硫化矿物与脉石矿物间的紧密关系,各期矿物的分带现象必然会使硫同位素组成也呈现出规律性的变化。例如安庆月山岩体的西马鞍山矿床,接触带两侧硫化物的 δS^{34} 值就有明显的变化:内接触带的硫化矿物为长石—黑云母期的产物,接触带外侧夕卡岩中的硫化物主要为绿泥石期产物,与此相应 δS^{34} 由 -15.8 变化到 $+5.3$ ‰。矾头矿床接触带两侧的硫化矿物均属绿泥石—绢云母期的产物,其 δS^{34} 值分别为 $+3.8$ 和 $+5.3$ ‰。这种硫同位素组成在空间上的变化规律对解释成矿机制、指导普查找矿具有一定意义。

3.成矿溶液中硫、氧逸度比(f_{S_2}/f_{O_2})与硫同位素组成之间的联系。在一个矿床的特定部位,常是以某一成矿阶段的矿化物为主要组份,其它时期的硫化物只占次要地位而呈局部的团块式脉体存在。由于夕卡岩型铜矿早、中、晚三期硫化物各有其独特的 δS^{34} 数值,因此在矿床中一定部位分布的硫化矿物,其数值应是稳定的。但在对

比不同矿床相同部位(例如都在正接触带外夕卡岩)的硫化物后发现,其硫同位素组成并不一致,它们的 δS^{34} 数值与该矿床内含铁矿物的形态有一定关系。而含铁矿物的形态与成矿溶液中硫、氧逸度相对比例有密切关系。当该比例由高变低时,含铁矿物将由黄铁矿逐渐换为磁黄铁矿,最后形成磁铁矿。由此推测成矿溶液中 f_{S_2}/f_{O_2} 比例在一定程度上影响该溶液所形成硫化物的 δS^{34} 数值。反过来又可以把 δS^{34} 数值作为判断该矿床成矿溶液中 f_{S_2}/f_{O_2} 比例的定量标尺。

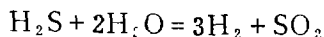
一定矿床的形成需要一定的硫、氧逸度条件,对于夕卡岩铜矿而言,需要的是由强烈的高硫低氧到过渡的环境。通过硫同位素组成研究确定矿床形成的 f_{S_2}/f_{O_2} 条件,可能对寻找和评价夕卡岩铜矿以及其他金属矿床有一定意义。

(四)与海相火山作用有关的火山岩型铜矿

该类矿床赋存于由基性至酸性的海相火山岩中,从熔岩到碎屑岩均可形成工业矿床。我国一些火山岩型铜矿床的硫同位素组成数据列于图4,它们的特点可归纳为:

1.硫同位素组成仍具有变化范围不大(约为1%)、接近陨石硫成分的特点。但与前述三类矿床相比,它的变化却要显著得多。它们也具有塔式分布规律,但塔峰不似前三类矿床那样突出,塔基也比较阔展,可能反映了矿床形成时成矿溶液中酸碱度、氧逸度等物理—化学条件的变化要比前述厂种类型矿床强烈。

2.火山岩型铜矿的硫普遍富集 S^{34} 同位素,数值多为正值,在 δS^{34} 数据分布图上,其投影比前三类矿床距零线更远一些。造成火山岩铜矿硫化物富集 S^{34} 的原因,可以用现代火山地热区的研究结果来解释。火山作用对同位素交换反应主要是在气态含硫原子团—— H_2S 和 SO_2 之间进行。 H_2S 与 H_2O 作用也可生成 SO_2 :



温度高于 $500^\circ C$ 时平衡反应式向右进行。 SO_2 的生成对温度极敏感,随着温度的升高

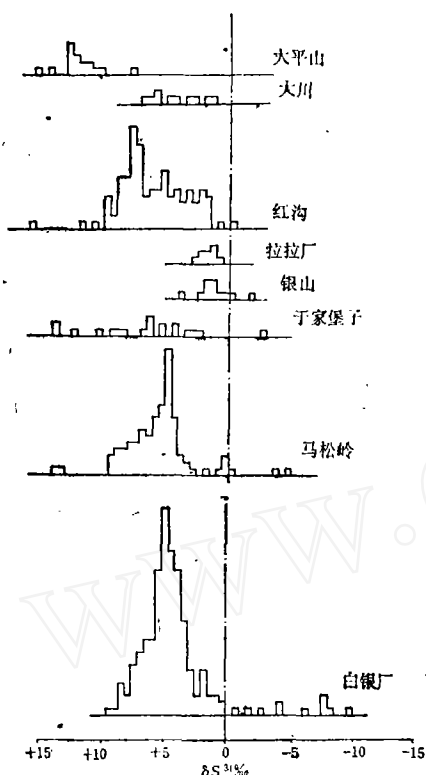


图4 火山岩型铜矿床硫同位素组成分布图

和降低 SO_2 的生成量可大幅度变化。 H_2S 和 SO_2 之间同位素交换反应很强烈并很快达到平衡，如 1000°C 时平衡常数1.002， 500°C 时骤增至1.008，造成 SO_2 富集 S^{34} 同位素， H_2S 富集 S^{32} 同位素。随温度继续降低， H_2S 与 SO_2 可反应生成水及自然硫，剩余的 SO_2 中再度富集 S^{34} 同位素。由于 SO_2 比 H_2S 更容易溶解于水，使溶液中含硫原子团比气态的含硫原子团要富集 S^{34} 同位素。在火山地

区复杂的氧化—还原反应中， H_2S 、 SO_2 、 S 、 SO_4^{2-} 之间的互相转化交换，最终导致气态含硫原子团（以 H_2S 为主）大大富集 S^{32} 同位素，而由 SO_2 溶解转化生成的硫酸盐中就相对富集了 S^{34} 同位素。在硫酸盐被还原形成了硫化矿物时，其同位素成分就继承了硫酸盐重硫的特点。

(五) 砂岩型铜矿

主要分布于一些古陆或褶皱带附近的山前断陷或山间盆地。我国的砂岩铜矿多赋存于从上三迭统到第三系的红色沉积建造中，含矿岩石以砂岩为主，也有砾岩及页岩。这类矿床多认为是同生沉积或沉积岩中同生分散的铜经过后期聚集生成的。我们做了四个矿区的少数样品（图5）。和前几类矿床比较，砂岩型铜矿的硫同位素组成特征有极明显的区别：

1. 和陨硫相比，大大富集 S^{32} 同位素，其数值多为负值。

2. 硫同位素组成变化范围宽，数据分布弥散。在金鸡岭矿床采集了七块标本，其中五块的 δS^{34} 数值（‰）为 $-8.5 \sim -11.8$ ，另两块竟达 -38.2 及 -45.6 ；郝家河矿床测了七块标本，其中六块为 $-2.0 \sim 8.0$ ，另一块为 -29.8 ；六直矿床的12块标本的采集部位相当集中，彼此距离不过几十米，但数值由 -14.7 到 -30.9 ，相差 16.2% ，且都富集多量 S^{32} 同位素；大铜厂含铜砾岩19块标本的变化范围为 $+0.2 \sim -15.5$ 。以上四个矿床都明显富集 S^{32} ，在分布图上落于零点

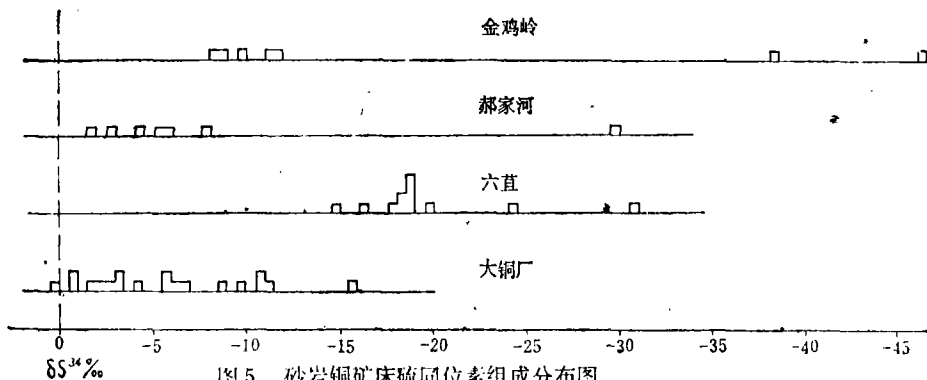


图5 砂岩铜矿床硫同位素组成分布图

标准线右侧,距标准线较远的区间内;在数据分布图形上亦与前述塔式分布图形截然不同,呈现一种连绵起伏的脉冲式分布形态。

造成轻同位素 S^{32} 大量富集、变化大、数据分布弥散的原因,应归结为生物细菌作用,反映出了外生成矿条件及环境。

(六)变质岩型铜矿

系指矿体呈层状、似层状产于沉积—变质岩或火山—沉积—变质岩中的一种矿床类型。矿床形成受沉积作用控制,并不同程度地受到区域变质作用的改造。它和火山岩型铜矿的主要差别是产于火山—沉积建造或沉积建造中,含矿围岩为含有不同数量乃至不含火山物质的沉积变质岩,沉积机制成矿作用显著。它与沉积岩型铜矿的主要差别在于这类矿床产于地槽性质的火山—沉积建造,矿床中常有火山质岩类存在,围岩经受不同程度的区域变质作用;而沉积岩型铜矿主要见于地台性质的沉积建造,矿床中没有火山质岩类,围岩未经受变质作用。对比这三大类型铜矿的成矿地质特征,可以认为变质岩型铜矿是介于火山岩铜矿和砂岩型铜矿之间的一种独立的矿床类型;这种关系从硫同位素组成特征上也可以反映出来,变质岩型铜矿的硫同位素组成特征既不同于火山岩铜矿,又不完全与砂岩铜矿相似,而是兼具两者硫同位素的某些特征。

关于这种层状—似层状矿床的成因,长期以来就有争议,目前认识仍未完全一致。五十年代时,注意到这些矿床受构造控制,矿体与火成岩空间关系密切,矿体多产于适宜铜矿充填交代的岩石中,矿体顶、底盘常有被认为对矿液起阻挡层作用的泥质岩层存在,以及围岩蚀变现象等特点,认为这些矿床是由岩浆期后热液作用造成,应属“中温热液充填交代矿床”。六十年代以后,随着找矿勘探工作的深入和地质资料的积累以及矿床“共生说”、“变质成矿说”等成矿理论的传播,提出了“沉积—变质”成因的新认识。近几年相继出现了不少综合性或侧重某种作用的成因认识,如“沉积—热液”说、“沉积—热液—变质”说,而对红透山等变质较深的矿床则提出“变质热液论”、

“混合岩化热液论”。尽管名目繁多,仍然分属成矿物质来自深部的“岩浆热液”和表生为主的“沉积—变质”两大观点。为了解决这类矿床的成因,我们对我国一些矿区进行了硫同位素地质研究,所测结果列于图6,由图可见这些矿区的硫同位素组成特点不尽一致。

东川、易门、中条山、观音坪几个矿区大体都具有硫同位素组成变化范围较大及脉冲式分布规律,说明沉积作用在成矿过程中起了主导作用。这些矿床的 δS^{34} 数值大都在 $+22\sim-5\%$ 范围内变化,这种富集 S^{34} 同位素的情况是富含 S^{34} 的硫酸盐经还原作用生成相应的硫化矿物造成的。狼山霍各气、东升庙亦具上述特点,但炭窖口的硫同位素变化范围则与霍各气、东升庙等有别,可能是成矿条件演变的反映。它具有较狭窄的重硫型硫同位素成分,在含矿地层中又发现有大量重晶石沉积,这些重硫型硫化物生成定与这些硫酸盐有紧密关系。

红透山、陈家庙、李伍的硫同位素组成和上述这些矿区不同,都有较窄的变化范围并呈现塔式分布规律。在这种情况下,仅根据硫同位素特征来判断矿床的成因是很困难的;它可以被解释为内生成因,也可能是由于深度变质作用使硫同位素组成均一化的结果,必须结合其他地质证据才能做出正确判断。

二 讨论和小结

(一)不同类型铜矿在硫同位素组成上的差别

对比以上六种类型铜矿床硫同位素组成特征可以看出,它们在变化范围、分布图形及距零点标准线的相对位置等方面存在着明显的差别。

铜镍硫化物矿床以变化范围狭窄、高耸的塔形分布图案为其显著特征,塔形图多分布在零线附近。斑岩型铜矿与之近似,但 δS^{34} 值变化范围明显加大,塔形也有变低的趋势,图形沿零线向左发展。这种变化在夕卡岩型铜矿和火山岩型铜矿上表现更显著。这几种类型矿床在硫同位素组成上的相

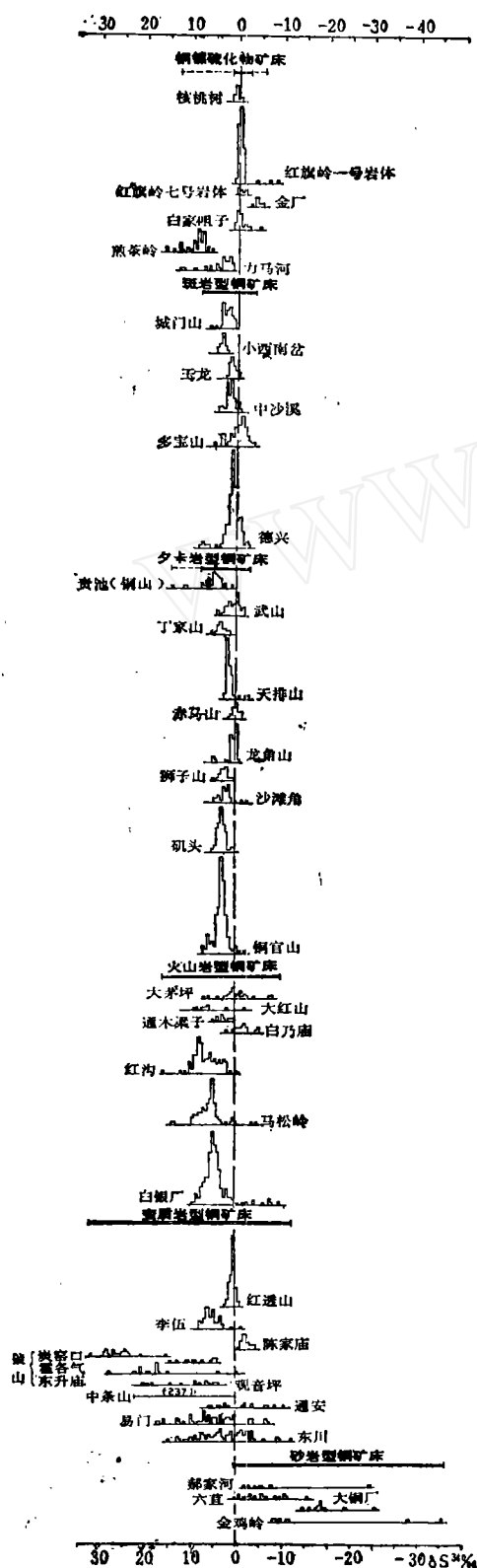


图7 六种类型铜矿床硫同位素组成分布对比

冲式又有塔形,体现了这种矿床的过渡性质。

(二)关于硫同位素组成的意义

不同类型矿床中的硫可以来自不同的硫源,它们的同位素组成在很大程度上能够回答这个问题,例如地幔硫的 δS^{34} 数值具有绝对值极小(一般在0.5%以下)、变化范围狭窄(不超过0.3%)、接近陨石硫的特征;海水硫具有富集 S^{34} 同位素的特点(δS^{34} 值在+20%左右);而生物硫则恰恰相反:富集 S^{32} 同位素且变化区间很大等。这些都可以在矿床的 δS^{34} 绝对数值和变化区别上表明出来。

除此以外,还应重视硫同位素组成的分布状况。不同成因矿床的 δS^{34} 数值是互相重叠的,难以区分,但是它们的同位素组成分布状况却各有特色,矿床的形成过程和成矿机制往往可以在同位素组成的分布状况上有所反映。例如几乎所有内生矿床的硫同位素组成都具有塔式分布规律,而外生矿床则表现为脉冲式分布。若把图形中每个组成部分紧密结合该样品的地质特征进行分析,常可获得诸如成矿溶液的温度,酸碱度,氧化还原电位,氧、硫逸度等地球化学变量的演化,古地理条件,变质作用机制等一系列重要资料或信息。

(三)关于在夕卡岩铜矿发育地区寻找斑岩型铜矿的意见

徐克勤教授根据国外一些矿床实例曾经提出过这个问题。这个意见值得重视。对长江中下游地区20多个夕卡岩铜(铁)矿床及斑岩铜矿床分别进行了硫同位素组成测定和钾—氩、铷—锶法同位素地质年龄测定。所获资料表明德兴斑岩铜(钼)矿田与这一地区夕卡岩铜(铁)矿床具有相同的硫同位素组成特点:变化范围较窄,均在5%左右;接近陨石硫成分;相似的塔式分布图形(图2、3)。说明两者硫源的性质相似,成矿时的物理—化学条件基本相同。年龄资料表明这些成矿岩体的侵入时间大体同时(表1)。考虑到德兴矿田与这些夕卡岩铜(铁)矿床同处于一个大地构造单元,应该认为它们是来自同一来源,属同一构造—岩浆旋回,只是

由于成矿时某些方面的差异（如围岩的物理化学性质、岩浆侵入的深度等），形成了两种不同类型的矿床。在城门山、封山洞等夕卡岩铜矿床中陆续发现了斑岩铜矿体，加深了这一认识。因此在长江中下游这一地质单元内，夕卡岩铜矿分布地区的地层—岩性交替变化部位，可能是斑岩铜矿赋存的有利地段，应作为斑岩铜矿的重点找矿地区。

鉴于斑岩铜矿和夕卡岩铜矿在成因上的密切联系，我国其他夕卡岩铜矿发育地区也应作为斑岩铜矿的找矿远景地区。同样，在一些已知的斑岩铜矿地区也要注意寻找夕卡岩型铜矿。

（四）变质作用对硫同位素组成的影响

比较几个变质岩型铜矿床的硫同位素组成特征，可以发现硫同位素组成特征与矿床

德兴、城门山斑岩铜矿与附近夕卡岩

铜矿的同位素地质数据对比 表 1

矿 区	硫分析样品数	δS^{34} 变化范围(‰)	同位素地质年龄(10^6 年)
德 兴	155	-2.6~+5.5	166, 161, 150, 145
城门山	46	+0.6~+5.7	147, 142, 136
武 山	48	-1.9~+3.6	158, 142
丁家山	18	+1.3~+5.2	147
天排山	61	-3.0~+2.3	161, 135
铜官山	175	-2.2~+6.8	151, 144, 142
狮子山	24	+1.8~+3.8	153, 145, 140
沙滩角	33	-2.6~+4.4	148
龙角山	46	-0.9~+4.6	150, 147
赤马山	22	-1.2~+1.2	

变质岩型铜矿床的硫同位素组成变化情况 表 2

矿 区	变质程度	样品数	δS^{34} 变化范围(‰)	离差程度(‰)
东 川	埋藏变质相	95	-12.1~+14.5	26.6
易 门	"	83	-7.3~+21.3	28.6
通 安	"	16	-10.5~+5.8	16.3
中条山	绿片岩相 (绢云母亚相)	236	+1.3~+21.9	20.6
霍各气	绿片岩相 (白云母亚相)	28	+4.1~+22.2	18.1
东升庙	绿片岩相 (黑云母亚相)	62	-1.1~+7.8	8.9
李 伍	角闪岩相 (蓝晶石亚相)	28	-4.4~-0.9	3.4
陈家庙	角闪岩相 (硅线石亚相)	72	-0.6~+2.4	3.0

经受的变质程度有关。

我国变质岩铜矿按其变质程度可以分为三类：

1. 浅变质岩石中的铜矿床，如东川、易门、通安等矿床。矿带严格受一定地层控制，沿层发育。含矿岩石从砂质白云岩、白云岩、白云质砂岩以及少数结晶灰岩、炭质板岩。

2. 中变质岩石中的铜矿床，如霍各气、中条山、李伍等矿床。含矿岩石为石英岩、石英片岩、云母片岩、白云石大理岩及硅化大理岩、千枚岩等。

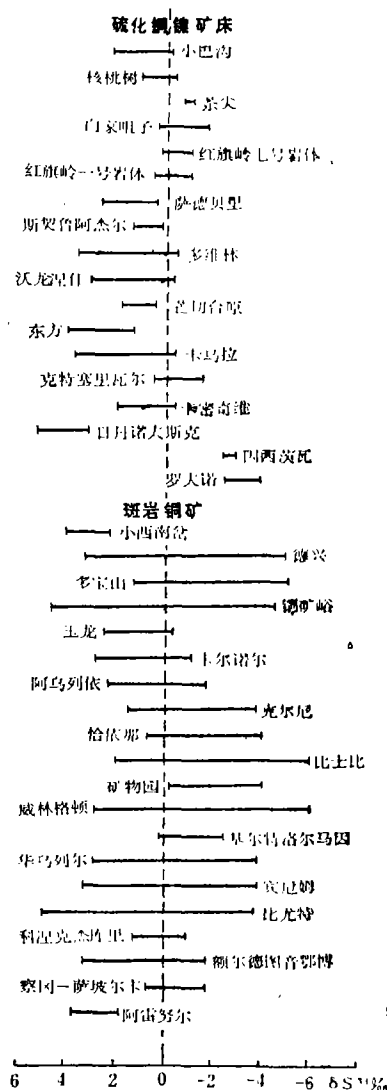


图 8 硫化物铜矿、斑岩铜矿硫同位素组成对比

3. 深变质岩石中的铜矿床, 如陈家庙、红透山等。含矿岩石多为副片岩、副片麻岩组合。

表2列举了上述诸矿床的硫同位素组成变化范围及离差程度, 可以发现随着变质程度增加, 硫同位素组成变化范围及离差程度越趋变小, 脉冲式分布现象逐渐减弱, 而塔式分布规律则逐渐增加。

(五) 关于各种类型铜矿的硫源

无论从地质认识还是从硫同位素组成特征角度, 都认为铜镍硫化物矿床的硫, 主要来自上地幔。一些矿床由于同化混染、硫化作用等, 有部分硫攫自地壳岩石圈。

砂岩铜矿的硫主要来自地壳岩石圈, 少量来自海水; 变质岩型铜矿的硫主要来自海水, 部分来自地壳岩石圈及地壳下部。二者硫源相似但形成方式有别: 前者以剥蚀、搬运、机械作用为主; 后者以溶解、渗流等化学作用为主。

关于斑岩铜矿、夕卡岩铜矿以及大部分火山岩铜矿的硫源问题值得讨论。几乎所有的研究者根据这几类矿床尤其是斑岩铜矿的硫同位素具有变化范围狭窄、接近陨硫、与地理分布位置无关等特点, 认为它们的硫来自上地幔。我们对此有些异议。这些矿床的硫同位素组成虽然具有 δS^{34} 绝对值小、接近陨硫流、变化区间较窄的特点, 但是 δS^{34} 数值尚有接近1%的明显变异。这既有别于同

位素成分容易改变的地壳岩石圈的硫, 又显然不同于来自地幔的与基性—超基性岩关系密切的铜镍硫化物矿床。图8列出世界各地主要斑岩型铜矿和铜镍矿床的硫同位素组成变化范围, 两类矿床的区别是很明显的, 斑岩铜矿的硫同位素组成变化范围, 要大一些, 距零线的位置要远一些。夕卡岩铜矿和火山岩铜矿的这种差别更明显。几类矿床的氧、锶等同位素资料也存在类似的差别(表3)

其次, 如果同意这种意见, 就无异于同意在地幔深处除基性—超基性岩浆外还存在有中、基一中、酸性岩浆以及花岗岩岩浆, 如个旧、大厂等夕卡岩矿床的母岩为花岗岩。而十多年大量研究资料, 其中包括许多同位素地质资料证明, 由玄武岩岩浆分异形成的花岗岩类岩浆是不存在的, 鲍文的岩浆分异假说已被否定。

因此, 我们认为这些矿床的硫主要不是来源于同位素组分更趋均一的上地幔, 而是来源于地壳下部。在那里进行的花岗岩化、混合岩化作用, 或如板块构造说所建议的那样发生大陆地壳重熔作用, 总之地壳下部的高温条件所引起的“均匀化作用”, 足以使同位素组成完全不同的原始含硫原子团最终成为同位素组分均一的岩浆组成部分。参加“均匀化作用”的物质范围越广、原始含硫原子团数量越多, 其最终均一物质的硫同位素组成就越接近地球原始硫成分, 接近陨硫硫成分, 达到在斑岩铜矿、夕卡岩铜矿、火

我国六类铜矿床按硫源划分的成因分类

表3

成因类型	矿床类别	硫源				δS^{34} 变化范围(‰)	主要地质作用	$\frac{S^{87}}{S^{86}}$	δO^{18} 变化范围(‰)
		地幔	地壳下部	海水	地壳岩石圈				
同生沉积型矿床	砂岩铜矿					-38.2~+0.2	剥蚀搬运作用, 沉积作用, 生物作用, 成岩作用, 地下水作用	0.707~0.729	+14~-19
岩源型矿床	变质岩铜矿					(-10.5) -7.4~+32.4	混合岩浆喷溢作用, 汽积作用, 地下渗流水作用, 变质作用		+2.5~+12
混合岩浆型矿床	火山岩铜矿					(-15.9) -8.1~+15.4	混合岩化作用, 花岗岩化作用, 深熔重熔作用, 混合岩浆侵入—喷溢作用, 同化交代作用	0.700~0.719 (0.737)	+7~+14
	夕卡岩铜矿					-8.0~+7.0			
	斑岩铜矿					-3.8~+5.7			
原生岩浆型矿床	铜镍硫化物矿床					(-5.5) -3.0~+1.0 (+16.4)	原生岩浆熔离作用, 分异作用, 侵入作用, 结晶作用, 同化作用, 硫化作用	0.703~0.712	+5~+8

● S^{87}/S^{86} , δO^{18} 系文献资料

山岩铜矿中所观察到的那样均匀化程度。

综合所述,我国六种类型铜矿床的硫源可以概括如下(表3):

1.铜镍硫化物矿床:以地幔为主要硫源地,少部分由于硫化作用等来自地壳岩石圈。不排除地壳下部的可能性。

2.斑岩铜矿:以地壳下部为主要硫源地,不排除上地幔的可能性。由于同化混染作用、硫化作用等部分硫来自地壳岩石圈。

3.夕卡岩铜矿:以地壳下部为主要硫源地,由于交代作用部分来自地壳岩石圈。

4.火山岩铜矿:以地壳下部为主要硫源地,部分来自海水。

5.变质岩铜矿:以海水为主要硫源地,部分来自地壳下部及地壳岩石圈。

6.砂岩铜矿:以地壳岩石圈为其主要硫源地,部分来自海水。

(六)根据硫源特点进行矿床分类的试探

林格伦、尼格里等提出的内生矿床成因分类在地质界长期流传,影响很大。这个分类主要是根据成矿温度、压力、深度等因素,无疑这些因素对矿床的形成会起很大影响。但它们只是影响矿床形成的外部条件,决定矿床成因的主要因素应该在于成矿物质本身的性质、特点,在于成矿物质的直接来源。不少研究者提出了根据成矿物质来源划分矿床类型的建议,我们根据硫源特点对我国主要类型铜矿床提出如表3所列的成因分类方案。

(陈民扬执笔)

主要参考资料

- [1] 科学院地球化学研究所、桂林冶金地质研究所同位素地质联合实验室,红旗一号岩体铜镍矿床的硫同位素组成,1975年10月
- [2] 吉林省冶金地质勘探公司607队等,吉林401矿区硫化铜镍矿床基本特征研究,《铬镍钴铂地质矿产专辑第二集》,1974年
- [3] 冶金铬镍矿服务组,陕西省略阳县煎茶岭镍矿床地质特征及今后找矿评价意见,1974年8月
- [4] 郭文魁、常印佛、黄崇柯,我国主要类型铜矿成矿和分布的某些问题,《地质学报》,1978年第3期
- [5] 冶金部北京地质研究所等,红旗岭镍矿成矿规律、找矿方向及岩体评价研究,科学技术委员会,科学技术研究报告1496号,1966年4月
- [6] 江西冶金勘察队会战指挥部地质科等,德兴斑岩铜矿田同位素地质特征及其找矿意义,1975年8月
- [7] 桂林冶金地质研究所夕卡岩铜矿专题组等,硫同位素分析方法在夕卡岩铜矿找矿工作中的意义,《地质与勘探》,1974,第1期
- [8] 地质矿产研究所七室同位素地质组,金属硫化物矿床的硫同位素研究,1975年5月
- [9] 地质科学院情报所一室,国外与火山作用有关的黄铁矿型矿床的某些情况,《国外地质科技》,1974,11期
- [10] 云南有色局勘探公司地质研究室等,云南大姚铜矿区六苴矿田六苴下段的沉积岩相和成矿条件的初步研究
- [11] 郭文魁,中国含铜砂页岩的成矿规律和找矿方向问题,《地质学报》,1963,第2期
- [12] 李希勤等,试论云南砂(页)岩型铜矿,《地质学报》,1964,第1期
- [13] 桂林冶金地质研究所变质岩铜矿专题组,我国主要变质岩铜矿的地质特征和成矿控制条件,1975
- [14] 桂林冶金地质研究所矿床室铜矿专题组,我国富铜矿床主要类型及其特点,《地质与勘探》,1972,第2期
- [15] 某些含铜砂岩矿床硫化物硫同位素成分及其成因,《国外铜矿床》,1973,桂林冶金地质研究所情报室
- [16] 徐克勤,花岗岩类与成矿关系,兼论内生矿床的成矿物质来源问题,南京大学地质系,1973年9月
- [17] 张理刚,硫同位素在地质科学上的应用,《中南地质科技情报》1974,第2期(增刊)
- [18] 周剑雄、丁梯平,世界上某些大型层状铜矿床稳定同位素的研究,《稳定同位素地质译文集》,1974
- [19] Гриненко В.А., и др. Геохимия изотопов серы изд. "Наука", 1974
- [20] Изотопы серы и вопросы рудообразования, изд. "Наука" 1976
- [21] 詹森M.L.硫同位素与矿物成因,《硫同位素地质译文集》,1975
- [22] 格里年科等,与矿床成因问题有关的硫同位素组成,《硫同位素地质译文集》,1975
- [23] 维诺格拉多夫B.N.,金属矿床矿物的硫同位素分布状况,《硫同位素地质译文集》,1957
- [24] 丘赫洛夫Ф.Р.,渗流溶液的成矿作用,《硫同位素地质译文集》1975
- [25] 切尼E.S.,经济地质研究中应用硫同位素的几个实例,《硫同位素地质译文集》,1975
- [26] 兰格I.M.,蒙大拿州比优特矿山硫同位素的初步研究,《硫同位素地质译文集》,1975
- [27] 梶原、伊达,日本科罗科型和基斯拉吉型层状硫化矿床的硫同位素研究,《稳定同位素地质译文集》,1975
- [28] 平克尼D.M.,拉弗特F.A.,密西西比河上游铅锌矿区成矿过程中硫同位素的分馏作用,《稳定同位素地质译文集》,1975
- [29] 大本,热液矿床中硫和碳的同位素系统,《稳定同位素地质译文集》,1975
- [30] 丘赫洛夫,火山岩系中矿床成因的某些问题,《地质与勘探》,1974,第7期