

大厂锡-多金属矿床喷气沉积成因的 证据——矿床地质、地球化学特征

韩 发

R.W.哈钦森

(中国地质科学院矿床地质研究所)

(美国科罗拉多矿业学院)

内容提要: 本文通过对大厂锡-多金属矿床地质-地球化学特征的研究, 阐明了本矿床按矿化类型可分为层状矿化及脉状矿化两大类。层状矿化是同生沉积的, 严格产于喷气沉积岩层内。脉状矿化是矿床形成时及其后不同阶段变形-变质作用的产物, 故又可进一步分为补给脉、梯状脉等4种类型, 在成因上即有联系又有差别。对锡石的研究表明, 本矿床不同矿化类型中锡石的矿物学及微量元素地球化学与其产状有着相应的一致性, 进一步提供了有关矿床成因的信息。特别是作者对沙利文矿山喷气沉积型锡石进行了微量元素分析, 其结果与大厂层状矿化者十分相似, 证明了二者具有相同的形成机制。

关键词: 矿床地质 地球化学 大厂锡矿

我们已经对大厂锡-多金属矿床形成的地质背景及容矿岩石的成因进行了讨论^[1,2], 现就矿床地质地球化学特征论述如下。

一、长坡-铜坑锡矿床的矿化特征

在大厂锡-多金属矿田内, 长坡和铜坑矿床是两个主要锡矿床, 并且就矿床地质而论, 这两个矿床是一个统一体, 因此, 我们就以这两个矿床为例 (以下简称长坡-铜坑矿床) 进行研究。从宏观上来看, 长坡-铜坑矿床由不同的矿化类型或矿体构成 (图1)。

1. 似层状锌矿化: 闪锌矿呈细脉状、浸染状产于中泥盆统顶部的厚层灰岩和页岩中, 本次工作中未能直接观察到这类矿化 (图1中亦未标出), 故未予研究。

2. 层状锡矿化: 这是本矿床最重要的锡矿化, 据其所在地层层位及共生矿物组合之不同, 这类矿化构成了以下几个矿体:

(1) 92号层状锡矿体 (以下简称主矿体): 该矿体是大厂锡矿田最大的锡矿体之一, 它严格地产于上泥盆统底部 (D_3^1) 硅质岩中, 呈一规整的层状体与地层整合产出, 并发生同步褶皱 (图1,2)。这个矿体主要由含锡石的硫化物薄层, 偶而有锡石-石英薄层组成。这种含矿薄层与硅质岩互层产出, 形成非常好的条带状构造^[1] (照片1,2)。本矿体中与锡石共生的硫化物以黄铁矿为主, 闪锌矿次之, 磁黄铁矿较少, 脉石矿物主要是石英, 其次有电气石、绢云母, 少量方解石。

(2) 91号层状锡矿体 (以下简称主矿体): 该矿体也是大厂锡矿田最大的锡矿体之一, 产于上泥盆统中部 D_3^2 纹层状锡石-钾长石硫化物-碳酸盐岩-硅质岩中, 但它的产状及形态特征与92号矿体相似 (图1,2)。矿体主要由含锡石的硫化物薄层组成, 含矿薄层与硅质岩互成条带产出, 在碳酸盐岩发育部位则较差。特别要指出的是, 在这层矿体中, 锡石不只是呈浸染状分布于以硫化物为主的层状矿化中, 沿走向有时出现锡石相对富集的层位, 层状硫化物则相变为条带状的含钾长石的锡矿石。这种条带状的锡矿石与含锡石的条带状硫化物矿石在构造特征上完全一致 (照片1)。与锡石共生的硫化物以磁黄铁矿为主, 闪锌矿、黄铁矿次之, 有极少量毒砂; 脉石矿物主要是石英, 其次有钾长石、电气石、方解石。

在91号矿体的顶、底部, 有两层层状锡矿化, 分别被称之为75号、77号矿体 (图1,2)。这两层矿体厚

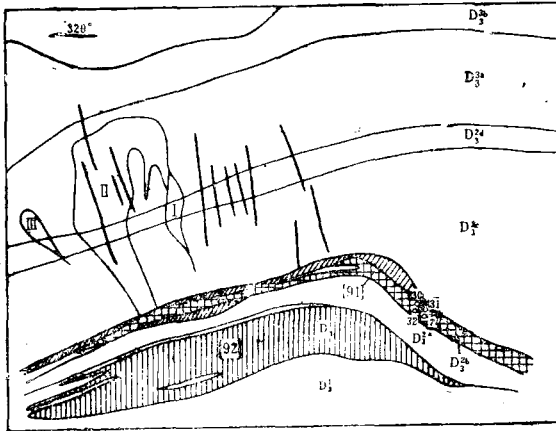


图1 广西大厂长坡矿10号勘探线剖面图

(据大厂矿务局, 1983)

D₃^a—泥灰岩; D₃^d—大扁豆灰岩; D₃^c—小扁豆灰岩; D₃^b—富钙细条带硅质岩; D₃^e—宽条带灰岩; D₃^f—硅质岩; 其它符号见图2

Fig. 1. Geological section along No. 10 exploratory line of the Changpo mine, Dachang ore field.

D₃^a—Marl; D₃^d—Large lenticular limestone; D₃^c—Small lenticular limestone; D₃^b—Ca-rich thin-banded siliceous rock; D₃^e—Broad-banded limestone; D₃^f—Siliceous rock; other symbols as for Fig. 2.

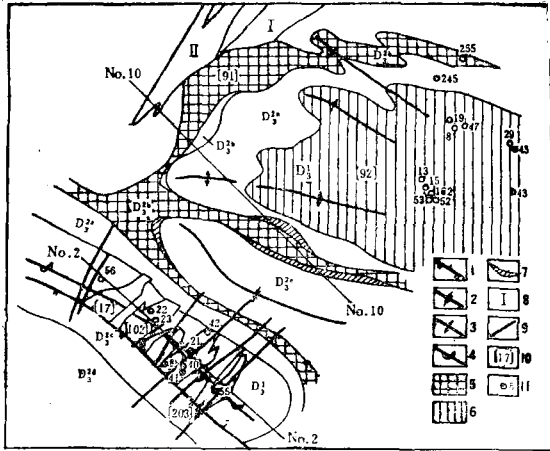


图2 广西大厂长坡矿505水平坑道地质平面图

(据大厂矿务局, 1985)

1—断层; 2—向斜轴; 3—背斜轴; 4—倒转背斜轴; 5—91号主矿体; 6—92号主矿体; 7—75号、77号层状矿体; 8—细脉带状矿体; 9—穿层大脉; 10—不整合的网脉型矿体; 11—采样位置及编号; 地层符号见图1

Fig. 2. Sketch of 505m level at Changpo mine showing relationship of strata, structures and orebodies.

1—Fault; 2—Syncline; 3—Anticline; 4—Overturned anticline; 5—No. 91 principal orebody; 6—No. 92 principal orebody; 7—No. 75 and No. 77 stratiform orebodies; 8—veinlet zoned orebody; 9—Large crosscutting vein; 10—Discordant stockwork orebody; 11—Sampling site and its serial number; Stratigraphic symbols as for Fig. 1.

度不大, 一般为0.75m左右, 最厚处为2—3m。野外研究表明, 无论是矿体的组成还是矿石的构造, 这两层矿体都显示出非常特征的成层性。如75号矿体自上而下可分为4层: 块状黄铁矿层, 厚5—20cm; 条带状电气石—硫化物—方解石—硅质岩层, 厚10—15cm; 具稀疏黄铁矿纹层的硅质岩层, 厚5—20cm; 具密集黄铁矿纹层的硅质岩层, 厚5—20cm。这种4层层状矿体在走向上延伸可达200m以上, 并且始终与地层呈整合关系。矿石本身有非常好的条带状构造及软沉积滑动变形构造, 具有同生沉积特点。另外, 就条带成分而言, 矿体上部两层方解石条带发育, 下部两层硅质条带发育, 这与矿体顶部为灰岩层位, 底部为硅质岩层位也是协调一致的。从硫化物成分来看, 75号矿体以黄铁矿为主, 77号矿体以磁黄铁矿、闪锌矿为主。

(3) 其他层状锡矿体: 除上述构成独立工业矿体的主要层状矿化而外, 在榴江组的泥灰岩(D₃^a)及小扁豆灰岩(D₃^c)的底部各有一层含锡石的硫化物矿体, 这两层矿体特征十分相似。矿体厚度不大, 一般为0.1—3m, 个别地段达7m。矿层稳定, 沿走向延伸可达300多米且与地层同步褶皱。矿石具非常发育的条带状构造(照片2、文献[1]中的照片3), 特别是韵律式条带常见(照片3), 充分说明矿石是在开放空间中以沉积方式形成的^[3]。另外, 在榴江组大扁豆灰岩(D₃^d)及车同江组泥灰岩(D₃^a)层位中各有多层含锡石的层状黄铁矿。这种黄铁矿层相对更薄, 最厚者为50cm, 薄者2—3cm, 在走向上延伸不长, 连续性不好, 一般为几米到几十米长。矿石品位低, 比其他层位中的层状块体含锡石少得多。

总之, 层状矿化不同程度地产出在榴江组硅质岩到车同江组灰岩的各个层位中。矿体由非常发育的石英-

锡石-硫化物薄层、硫化物-钾长石-锡石薄层、锡石-石英薄层组成。这种含矿薄层一般为厚0.5—3.0cm,个别达20cm,但在走向上稳定延伸可达600余米。这种层状矿化常常被后期脉状矿化所切穿,但相反关系从未见到,这说明在各类矿化中它们形成最早。就矿物成分而论,所有的层状矿体中以含锡石的硫化物层状矿化为主,其他类型次之,然而就矿石的组构而言,各类型层状矿化都具有极相似的条带状构造,因此我们认为其他不同成分的含矿薄层都是硫化物型层状矿化在地层学上局部相的等同物。

3.脉状锡矿化:在长坡-铜坑矿床脉状锡矿化可据其形态、规模及共生矿物组合的差异而分为以下3种类型:

(1) 不规则细脉状矿化:野外这种含锡石的脉状矿化主要发现于主矿体中,最常见于富含锡石角砾岩筒附近。其最大特点是,矿脉形状不规则,分支复合现象明显,脉体时宽时窄(照片4),矿化以充填-交代方式为主。矿物结晶粒度较粗大,与锡石共生的硫化物主要为磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿,偶见毒砂、脆硫锡铅矿。

(2) 主矿体中不穿过含矿层位的细脉状矿化:主要产出在以硅质岩为主的两个赋存主矿体的层位中(D_3^a 、 D_3^b),但在上述其他几个层位的层状矿体中也同样存在。矿脉呈北东走向,与层状矿体呈陡倾斜相交,夹角一般大于 75° ;脉体形状规则,几乎没有分支复合的现象(照片5);脉宽一般为0.2—5cm,个别达20cm,脉长与其所处岩层厚度一致,因此所有这些细脉状矿化均严格限于层状矿体之中。裂隙属张性的,矿化以充填方式形成。脉体中硫化物则与其所处的层位有关,在92号矿体中以黄铁矿、闪锌矿为主,磁黄铁矿及毒砂次之;在91号矿体中以磁黄铁矿、闪锌矿为主,黄铁矿及毒砂次之,并偶见脆硫锡铅矿等硫酸盐矿物;在其他具有层状矿化的层位(如榴江组大扁豆灰岩、车同江组泥灰岩)中,脉状矿化则以黄铁矿、闪锌矿为主,毒砂、脆硫锡铅矿等硫酸盐矿物亦显著增多。

(3) 稳定延伸的大脉状矿化:矿化以规模大、延伸稳定、连续切穿不同的地层为特征(图1.3)。矿脉多为NE走向,SN向者为数不多,陡倾斜,倾角一般大于 60° 。脉宽1—5m,延长可达200余米。裂隙属张性的,矿化以充填方式为主。与锡石共生的硫化物主要是黄铁矿、闪锌矿,磁黄铁矿次之,毒砂、脆硫锡铅

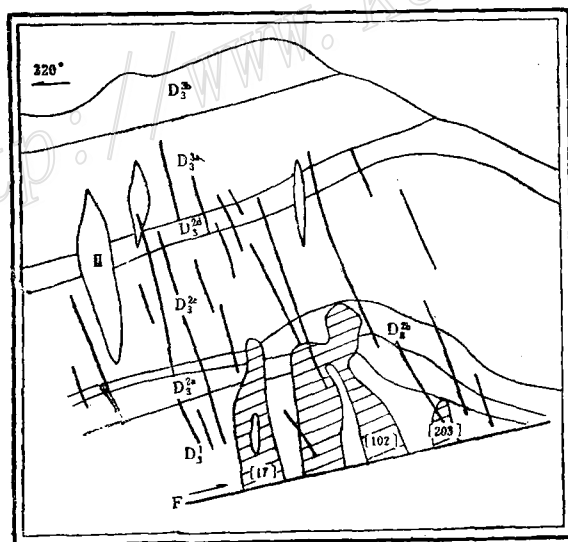


图3 广西大厂长坡矿2号勘探线剖面示意图

(据大厂矿务局,1985)

图例见图1.2

Fig. 3. Diagrammatic geological section along No. 2 exploratory line of the Changpo ore deposit.

(Symbols as for Figs. 1 and 2).

矿等硫酸盐矿物常见。

值得指出的是,野外地质观察发现,在大脉型矿化发育部位,即长坡-铜坑矿床的西南部,该类型矿化往往形成密集细脉群构成独立的工业矿体。它们以脉体中锡石结晶粒度粗大,颜色深,矿石含锡品位高,脉群切穿几个地层单元为特征而区别于其他类型的矿化(见图2、3中102号、17号、203号矿体)。相反,在大脉型矿化不发育的部位,如在长坡-铜坑矿床的中部及东北部,在主矿体中,则只有层状矿化及不穿层细脉状矿化,没有类似上述穿层的脉群出现,这种差别说明,大脉型矿化与层状矿化及不穿层的细脉状矿化不是同种矿化作用的产物。显微镜下研究,为此提供了更加令人信服的证据,如大脉型矿化切穿层状矿化时,晚期形成的自形锡石包裹呈溶蚀状的早期锡石(照片6)。前者结晶粗大,解理发育,颜色深,多色性强;后者粒度细小,无解理,颜色浅,多色性弱,二者矿物学特征迥然不同。显而易见,把各种不同的矿化类型区分开来是至关重要的,否则将会造成以下的错误导向:①人们往往以穿层的大脉或脉体群为例,以偏概全,否定主矿体是严格产出在确定地层单元中的层状矿体;②以此为理由,主矿体中的层状矿化亦被认为是顺层充填交代形成的所谓“层面脉”,曲解了观客事实;③忽略了不穿过主矿体的细脉状矿化与稳定延伸的大脉状矿化之间的差别;④上述认识上的不同,引起了地球化学及流体包体等研究数据应用上的混乱及解释上的分歧(陈毓川等,1985,丁梯平等,1988, Jian.L., 1989)

另外,在主矿体之上,于 D_3^2 、 D_3^3 三个层位中,存在一个长600m,延伸240m的锡矿化体,其中即有厚度不大,连续性差的层状矿化(如上述),也有不穿层和穿层的脉状矿化。这三种矿化类型交织在一起,形成所谓的“细脉带的矿体”(图1、2)。这种矿体最大特点是矿化强度差,各类型矿化都很贫,矿体的形态是按工业品位圈定的不反映地质成因问题,同时它也不构成另外一种矿化类型。

综上所述,长坡-铜坑矿床的锡矿化可分为两组四种类型(I—IV):第一组为层状矿化,主要由含锡石的各种不同成分的硫化物薄层组成(I);第二组为脉状矿化,其中又可分为三个类型:产于富含锡石角砾岩筒附近不规则的网脉状矿化(II);产于主矿体中不穿层的细脉状矿化(III);切穿不同地层单元的大脉型矿化(IV)。矿化类型I及III构成了长坡-铜坑矿床主要工业矿体,在92号主矿体中取大样分析表明,前者品位略高于后者,说明层状矿化在长坡-铜坑矿床中占有重要地位。至此为止,我们面临着一个必须回答的问题,即不同矿化类型间的成因关系如何?这是个直接关系到矿床成因的问题,下面我们给予具体讨论。

二、矿床形成后的变形-变质作用

对矿床形成后变形-变质作用的研究一直是层控矿床学家们极为关注的问题。正如R.W.哈钦森所指出的⁽⁶⁾,海底喷气沉积作用只是喷气沉积矿床长期的连续的成因史中的初期阶段,重要的是要认识到所有这类矿床后来都受到不同程度的变形-变质作用。这些作用造成矿体形态、矿石结构和矿物成分变化是极其复杂的,可能这是人们对其成因提出多种观点的主要原因。因此,为认识矿床最初形成的原始形式,对其形成后变形-变质作用的研究是极为重要的。

长坡-铜坑矿床形成后的变形-变质作用主要表现为如下几方面:

1. 成岩期“梯状脉” 长坡-铜坑矿床在喷气沉积作用阶段形成了非常完好的层状矿体及十分发育的条带状矿石,正如我们已描述过的,条带状矿石主要是由硅质岩和硫化物互为条带组成。经过埋藏和压实作用,在成岩阶段,这种条带状矿石形成了独特的“梯状脉”(照片3)。野外观察清楚地表明,不整合的硫化物“梯状脉”是条带状矿石内整合的硫化物薄层通过规模不大的分泌作用形成的。不言而喻,在成岩阶段,硫化物相对于硅质岩是较软的或许为凝胶状的化学沉淀物。在简单的垂向压实作用下,较硬的硅质岩层产生裂隙,而较软的硫化物层则发生侧向运移,并充填到张性裂隙中去。也正因为如此,所有的硫化物梯状脉都是从硫化物薄层向下贯入到硅质岩的裂隙中去(照片3),反向贯入则很少见到;同样,梯状脉形成过程不伴有构造位移作用,如照片3中每一个条带都保存得极好,没有任何位错现象。一般情况下,硫化物梯状脉只局限于相应的硅质岩薄层之内,在有些情况下,由于后期构造作用的复合,某些梯状脉上下连通,形成了

切穿脉,但就整个矿体的范围来看,硫化物梯状脉从不超出容矿硅质岩层位。

在条带状硅质岩中,成岩期形成的碳酸盐梯状脉比比皆是。我们把条带状矿石中的硫化物梯状脉与之加以比较,二者极为相似。这种相似性显示了它们有着相同的形成和发展的历史,也就是说,条带状矿石中硫化物梯状脉和条带状硅质岩中的碳酸盐梯状脉一样,经历了同生沉积和压实成岩的过程。

2. 同构造期“裂隙脉” 继成岩之后的沉降或隆升作用,发生了最初的同构造期的变形作用,同时形成了陡倾斜的张性裂隙系统。这种裂隙一般规模亦不大,不伴随明显的构造位移(照片5)。因此,它们也只发生于刚性岩石——硅质岩中。当然,与成岩期梯状脉相比,同构造期裂隙脉可连续切穿硅质岩和硫化物的若干个薄层,形成贯穿式的裂隙系统。与同构造期裂隙脉形成的同时,从周围的原始含锡石的硫化物-硅质岩中分泌出来的二氧化硅、硫化物和含锡的各种络合物充填到这些裂隙中,形成了切穿层状矿化的不整合脉状矿化。尽管这些脉状矿化在局部上是不整合的,但它们在空间上严格地局限于主矿体之内,在物质组成上与层状矿化密切相关,故从整体上来看仍然是层控的。

3. 后期构造变形和石香肠化作用 印支和燕山运动以及燕山期花岗岩侵入作用,使本区最初形成的层状矿体普遍发生构造变形和石香肠化。

首先,在印支运动期间,大厂矿田西带形成北西走向的大厂背斜,长坡-铜坑矿床与其容矿围岩一起形成了同步褶皱。而后,燕山运动又形成了近东西向的褶皱叠加于大厂背斜之上,致使矿体形态在局部地段变得更加复杂化(图2)。受褶皱作用影响,矿体还同时发生了另外两种变形作用:

(1) 石香肠化作用:在褶皱作用的强烈压扁阶段,互为条带的硫化物和硅质岩则分别发生塑性和脆性变形。硅质条带往往被拉伸而破裂;硫化物条带则因挤压而发生塑性流变,局部集中并充填于硅质条带断块之间(照片7)。结果硅质条带呈肠状断断续续地散布于块状硫化物中,致使矿石沉积形成的条带状原生构造发生了重大改观。然而,石香肠化作用说明了矿石确实是在褶皱变形之前形成的

(2) 横张断裂作用:在褶皱作用时,垂直北西向褶皱枢纽形成了一组早期平面X型剪切节理。当背斜上弯部分局部张应力加大时,该组节理则发展成了北东向的横张裂隙。后来在燕山期花岗岩侵入作用影响下,这组裂隙被锡石-硫化物所充填,形成了不整合的大脉型矿化。长坡-铜坑矿床中切过不同地层单元和主矿体的贯穿式大脉均属此类⁽⁴⁾。就形成时间而言,这组横张裂隙晚于成岩期梯状脉及同构造期裂隙脉;就物质组分而言,该类型矿化即与层状矿体有关,也与花岗岩侵入体有关。

4. 变质再结晶作用 海底喷气沉积矿床形成后,遭到各种类型的变质再结晶作用是鲜为人知的^(5,9)。长坡-铜坑矿床也同样,从成岩阶段开始,它遭受到动力变质作用、区域变质作用及侵入作用的一系列影响,因而各类原生矿石往往有花岗变晶结构,矿石粒度并不一定很细。特别是在条带状钾长石-锡石矿石中,长石的再结晶加大现象清晰可见(照片8),次生加大边远远大于原生核晶,但二者具有完全相同的光性方位。

如同在块状硫化物矿床中所看到的一样,在长坡-铜坑矿床的条带状硫化物矿石中,常常有团块状粗晶集合体出现,形成所谓的斑杂状矿石,或者有结晶完好的黄铁矿粗大晶体顺层分布,形成所谓的交代斑晶,呈现出交代成因的外貌。但显微镜下观察发现,嵌晶状的粗大硫化物晶体中,往往具有溶蚀状的同种矿物细粒包体存在(照片9)。经深入研究表明,这种结构是在变质流体作用下,早期形成的矿物经聚集再结晶作用形成的^(8,9),并非热液交代的结果。聚集再结晶过程中对某种矿物而言,总是相对细粒者被溶解,相对粗粒者结晶加大。但是,当被溶解的矿物尚未完全消失之前而被包裹于别的矿物之中,于是它便被保留下来,并具有特征的溶蚀结构。在条带状钾长石-锡石矿石中,钾长石内众多细小的被溶蚀的锡石包体就是这样形成的。千真万确,我们现在所看到的矿石不是生来就是这样的,而是经过发展变化成现在这样的。

综上所述,我们对矿床的研究,要从其形成、发展的全过程入手,弄清各种变形-变质作用对原始矿床的影响,查明矿石生成、演变的历史及各种矿化类型间的关系,进而恢复矿床形成的本来面貌。

三、锡石的矿物学及微量元素地球化学特征

1. 锡石的矿物学特征 在此要说明一点, 我们讨论锡石的矿物学特征, 主要着眼于不同矿化类型中锡石的形态、粒度、颜色、结晶程度、光学性质等方面的异同, 以求了解不同产状锡石之间的区别。也就是说, 我们对不同类型的锡石只进行矿床矿物学某些特征的对比, 而不是纯矿物学的研究。为叙述简便起见, 我们将有关的资料概括于表1。

表1 不同矿化类型中锡石的矿物学特征
Table 1. Mineralogical characteristics of cassiterite in different mineralization types

矿化类型	I	II	III	IV
颜色	浅色—浅米黄色	浅色—褐色	褐色	暗褐色—深棕色
粒度	细粒, 粒径变化于 0.04—0.2mm	细粒, 粒径变化于 0.1—0.2mm	细粒, 粒径变化于 0.15—0.2mm	粗粒, 粒径变化于 0.5—10mm
自形程度	他形、粒状	他形—半自形粒状或柱状	同矿化类型II	自形、柱状
解理	无	有	有	发育
结晶带状构造	无	有	有	发育
多色性	弱: No无色—浅褐色 Ne无色(或褐色)—浅 绿色	较弱: No浅褐色或浅黄色 Ne浅褐色—浅绿色或粉 红色	显著: No褐色→粉色 Ne褐色→绿色或粉红色	强: No褐色→粉色或红色 Ne褐色→深绿色或红色
包体	固体微包体多, 成分复 杂, 流体包体极少而小 (一般<2μm)	固体微包体少, 流体包体 较少, 稍大(一般为3— 8μm)	同矿化类型II	固相微包体少, 流体包体较 多, 较大(最大可达30μm)
共生硫化物	黄铁矿、磁黄铁矿、闪 锌矿, 偶见方铅砂、毒 砂	同矿化类型I	磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、 毒砂、脆硫锑铅矿, 少见方 铅矿, 偶见硫盐矿物	磁黄铁矿、黄铁矿、闪锌矿、 毒砂、脆硫锑铅矿、方铅 矿、硫盐矿物常见

表2 锡石中微量元素分析方法及其检测限 (ppm)
Table 2. Methods for analysing minor elements in cassiterite and their
detection limits (in ppm)

NA	元素	WO ₃	Sb ₂ O ₃	As ₂ O ₃	ZnO	Cr	Ag	Ta	Sc	Co	Hf	Na	In
	检测限	1	0.1	1	10	0.5	2	0.5	0.01	0.1	0.2	1	0.2
DCP	元素	Ni	Pb	Be	Li	B	P	MnO	ZnO	V ₂ O ₅	TiO ₂	As ₂ O ₃	FeO
	检测限	10	40	2	2	10	100	10	10	10	10	0.1	10
ICPMS	元素	Nb	Zr	Bi	Ba	WO ₃	Sb ₂ O ₃						
	检测限	20	20	2	20	20	20						
WET	元素	S											
	检测限	50											

从表1可以看出, 不同矿化类型间的锡石有着明显的差别, 特别是矿化类型I和IV之间的这种差别最大。矿化类型I中的锡石以颜色浅、粒度小、自形程度差、多色性较弱、共生矿物简单为其特征。矿化类型IV中的锡石则以颜色深、粒度大、自形程度好、多色性显著、共生矿物复杂而区别于前者。矿化类型II和III中锡石的各种特征都很相似, 并且介于矿化类型I和IV之间的过渡状态。

显而易见, 不同矿化类型间锡石矿物学特征的不同, 反映了它们形成地质环境、物理化学条件的不同,

表3 大厂和一些其他锡矿床某些代表性样品中锡石的化学分析结果 (ppm)

矿化类型	样号	TiO ₂	FeO	V ₂ O ₅	WO ₃	As ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	ZnO	MnO	SO ₃	Cr	Co	Nb	Ta	Zr	Hf	Sc	In	Ba
I	DC17	670	990	429	391	13	15.6	87	30	n.d	18	1.2	<20	0.9	<20	0.6	33.7	6.7	36
	DC272	730	720	59.3	250	240	51.6	162	130	449	n.d	0.9	<20	0.8	<20	<0.2	12.2	4	32
	DC461	230	810	15	210	5	28.5	17	30	125	12	0.9	<20	0.9	<20	<0.2	2.3	8	130
	DT255	670	920	90.6	69	45	9.4	26	<10	150	27	0.7	<20	1.1	<20	<0.2	15.2	7	39
	DC4322	200	790	296	517	145	18.0	137	10	n.d	15	1.2	<20	0.9	<20	<0.2	21.7	5.2	23
II	DC462	330	1100	41.2	315	9	28.7	25	<10	n.d	17	1.1	<20	1.1	<20	<0.2	2.8	8.6	140
	DC16	1700	810	906	643	7	16.8	37	<10	n.d	27	1.2	<20	0.8	<20	n.d	60.1	5.8	39
III	DC52	1200	360	527	643	11	11.9	12	50	n.d	20	1.3	<20	0.9	<20	0.6	27.1	2.7	29
	DC222	800	1400	371	303	145	15.6	37	30	n.d	21	2.5	<20	0.7	<20	<0.3	35.1	8.7	31
	DC422	600	1200	239	290	40	27.5	37	<10	n.d	19	1.3	<20	1.0	<20	<0.2	21.5	9.4	29
	DC2513	450	1800	190	126	610	36	51	<10	299	24	1.6	<20	0.8	<20	<0.2	25.8	13	30
	DC221	1100	950	222.5	3150	594	26.3	12	<10	n.d	24	5.5	<20	0.9	<20	n.d	29.1	4.2	21
IV	DC421	730	1700	239	2270	125	55.1	37	<10	n.d	15	1.3	<20	1.0	<20	n.d	30.1	8.6	29
	DC271	430	1200	214	1600	290	40.7	83	<10	n.d	19	1.1	<20	0.7	<20	<0.2	23.7	11	<20
	DT11	1100	2600	370.8	980	1980	76.8	199	40	n.d	22	4.2	<20	0.7	<20	<0.2	28.6	6	34
	K3-1	2000	3100	223	910	1	16.8	17	<10	<100	15	0.9	<20	1.2	<20	<0.2	20.7	2	25
	Sul	300	759.1	53	36	50.2	52.7	24.9	51.7	n.d	11	1.4	160	2.4	n.d	0.2	4.17	<1	n.d
Cli	18348	3988	397.1	1034	<2	8.98	24.9	387	n.d	110	2.0	3620	480	n.d	n.d	248	9	n.d	
Vci ^(a)	5344	2462	48.8	1619	160	n.d	n.d	33.2	n.d	7.1	n.d	n.d	9.2	74.7	1.8	9.9	n.d	n.d	
Por ^(a)	846	5512	79.6	5193	19.5	n.d	n.d	21.5	n.d	10.4	n.d	112 ^a 223 ^b	0.17	22.2	0.33	48.9	n.d	n.d	
Peg ^(c)	2885	3220	2.01	1594	1.7	n.d	n.d	46.8	n.d	0.00	n.d	5107 ^c 15029 ^d	769.4	324	55.5	64.2	n.d	n.d	

注: Bi, P, B, Li, Be, Ag, Na, Pb等元素也被分析,但其含量均低于检测限; a, c—资料取自周维金等1987; b—资料取自林桂清等,杨世义等,1987; d—资料取自文献[7] 采样位置及描述: DC17—薄层状含硫化物的石英-锡石-黄铁矿-锡石,长坡山550平巷92号矿体; DC272—厚层状含硫化物的石英-锡石-黄铁矿-锡石,长坡山505平巷,75号层状矿体的中部; DC461—薄层状石英-锡石-黄铁矿-锡石,长坡山505平巷91号矿体中部; DT255—薄层状含硫化物的石英-锡石-黄铁矿-锡石,铜坑山405平巷91号矿体东部; DC4322—脉状锡石-硫化物矿体,长坡山550平巷92号矿体; DC462—石英-锡石-黄铁矿-锡石,长坡山550平巷91号矿体中部; DC16—细脉状锡石-硫化物矿体,长坡山550平巷92号矿体; DC222—细脉状锡石-硫化物矿体,长坡山550平巷91号矿体中部; DC16—细脉状锡石-硫化物矿体,长坡山570平巷西部; DC422—细脉状石英-锡石-硫化物矿体,长坡山550平巷92号矿体; DC2513—细脉状锡石-硫化物矿体,铜坑山405平巷91号矿体东部; DC221—脉状石英-锡石-硫化物矿体,长坡山570平巷西部102号矿体; DC421—脉状锡石-硫化物矿体,长坡山550平巷西部102号矿体; DC271—大脉状石英-锡石-硫化物矿体,长坡山505平巷75号矿体中部; DT11—网脉状锡石-硫化物矿体,长坡山550平巷,细脉带矿体; K3-1—大脉状石英-方解石-锡石-硫化物矿体,坑乌山,下泥盆统黑色页岩中; Sul—块状硫化物矿床中伴生的锡石,加拿大沙利文矿床; Cli—斑岩型矿床中伴生的锡石,美国克拉麦科斯山; Vci—与中生代花岗岩有关的石英脉型锡石(11个样平均值); Peg—玻利维亚锡石(17个样平均值); Por—含锡斑岩型锡石(17个样平均值); Ba—巴西地盾朗多尼亚锡石(10个样平均值)

对此我们将结合锡石的微量元素地球化学最后加以讨论。

2. 锡石的微量元素地球化学 对大厂锡矿16个锡石单矿物进行了27个微量元素的分析。锡石单矿物是在实体镜下严格选纯的, 全部分析是在加拿大多伦多X-RAY实验室进行的, 所采用的分析方法及测试精度见表2, 分析结果见表3。从表3可见, 各种矿化类型中锡石的微量元素含量有着明显的规律性的变化。总的来讲, 可以把有成因指示意义的元素分成四组: A组—Ti、Fe、Sc、V、W; B组—As、Sb; C组—Zn、Mn、Ba、S; D组—Nb、Ta、Zr、Hf。我们首先看一下矿化类型I和IV中这四组元素的变化情况。第A、B组元素在矿化类型I中含量普遍低(表4), 如四个样品平均值(ppm): Sc为15.9, TiO₂ 575, V₂O₅ 148.5, FeO 860, WO₃ 230, As₂O₃ 75.8, Sb₂O₃ 26.5; 相反, A、B组元素在矿化类型IV中含量普遍高, 如五个样品平均值(ppm): Sc 26.4, TiO₂ 1072, V₂O₅ 253.9, FeO 1910, WO₃ 1782, As₂O₃ 598, S₂O₃ 43.1, 分别是矿化类型I中相应元素含量的2—7倍。第C组元素在矿化类型I中的含量则普遍偏高, 四个样品平均值(ppm) ZnO 73, MnO 48.3, Ba 59.3, SO₃ 241.3; 而在矿化类型IV中其含量普遍较低, 五个样品平均值(ppm): ZnO 69.6, MnO 10.7, Ba 23.2, SO₃ <100, 除ZnO而外(将在后面专门讨论), 其余各元素分别相当于矿化类

表4 沙利文矿床和大厂矿床不同矿化类型中锡石的化学成分

Table 4. Chemical composition of cassiterite from different types of mineralization in Dachang and Sullivan ore deposits (in ppm)

矿化类型	I		II		III		IV		Sul	
	ch(4)	pr(88)	ch(2)	pr(39)	ch(5)	pr(98)	ch(5)	pr(128)	ch(1)	pr(5)
TiO ₂	575	110	265	—	950	1050	1072	1590	300.3	120
FeO	860	810	945	680	1114	1070	1910	490*	759.1	770
V ₂ O ₅	148.5	130	168.6	30	446.6	330	253.9	290	53	—
WO ₃	230	70	416	—	401	330	1782	5080	36	—
As ₂ O ₃	75.8	11	77	—	162.6	90	598	80	50.2	60
Sb ₂ O ₃	26.3	19	23.4	—	21.6	10	43.1	40	52.7	140
ZnO	73	800	81	1070	34.8	400	69.6	4	24.9	470
MnO	48.3	30	6.7	—	18	8	10.7	10	51.7	40
SO ₃	241.3	260	n.d	220	299	310	<100	120	n.d	480
Ba	59.3	—	81.5	—	31.6	—	23.2	—	n.d	—
Sc	15.9	—	12.3	—	33.9	—	26.4	—	4.2	—

注: ch—化学分析结果; pr—电子探针分析结果; 括弧中数字为样品数或分析点数; * 由于测量中分析FeO的那道谱仪发生故障, 此组数据不可用

型I中相应含量的0.2—0.3倍。第D组元素含量普遍低(表3), 并且在这两个矿化类型中的差别也不大, 但这组元素对判别广泛的不同成因类型的锡矿床有重要意义(见后述)。

对于矿化类型II和III来讲, 上述前三组元素含量的变化介于矿化类型I和IV之间, 如表4、图4(详见后述), 第D组元素的情况同上述。这里要说明一点, 对于矿化类型III, 第A组元素中WO₃的含量低, 五个样品平均值为401ppm, 接近矿化类型I(230ppm), 远远低于矿化类型IV(1782ppm), 而其余元素的含量较高, 相似于矿化类型IV(表4)。为了证实这点, 对该两类锡石我们做了大量的电子探针分析, 其结果与化学分析结果基本一致(表4)。由于W和Ti是各种成因锡石的特征指示元素, 为此我们做了W/Ti的投影图(图5)。从图5可见, 矿化类型III的锡石W/Ti < 1, 而矿化类型IV的锡石W/Ti > 1(除一个例外), 因此, 尽管矿化类型III中锡石含Ti亦较高, 但根据WO₃的含量及W/Ti比值, 很容易把矿化类型III和IV区分开来。无疑, 矿化类型III与IV在微量元素上的这种异同, 反映了它们既有某种相似的形成条件, 又有明显不同的物质来源。

至此, 我们清楚地看出, 四种矿化类型的锡石不但在产状上、矿物特征上有明显差别, 而且在其微

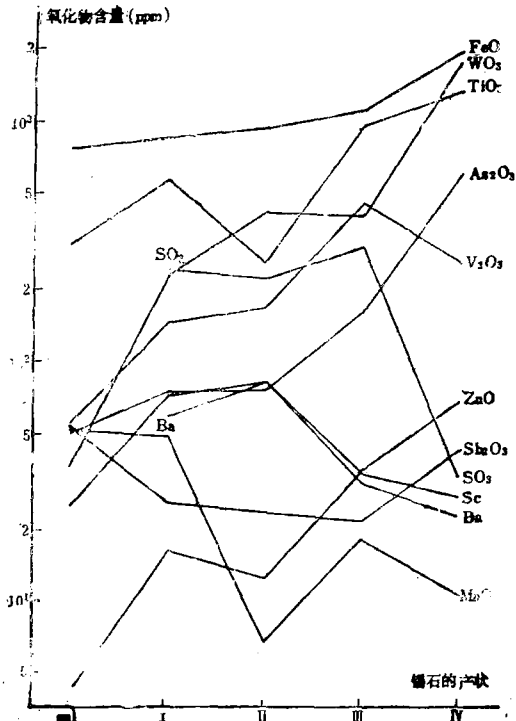


图 4 不同矿化类型锡石中某些微量元素含量变化图解
(Sul为取自沙利文矿山的锡石)

Fig.4. Variation in some minor elements in cassiterite from different types of mineralization. Sul-cassiterite from Sullivan mine.

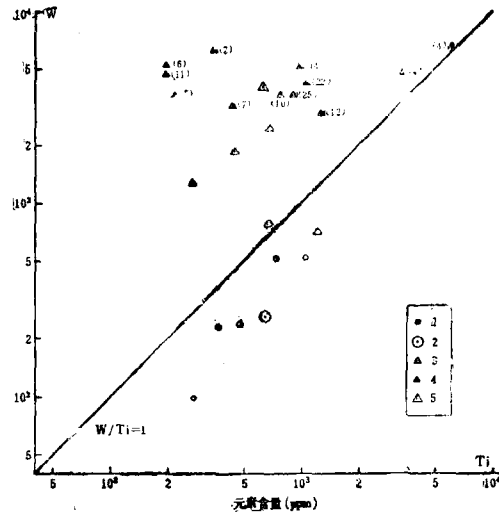


图 5 广西大厂-长坡铜坑矿床矿化类型 III、IV 中锡石 W/Ti 图解

1—III 中锡石化学分析；2—III 中 88 个锡石电子探针分析平均值；3—IV 中锡石化学分析；4—IV 中锡石电子探针分析，括弧中的数字是同一样品，不同颗粒的分析点数；5—VI 中 128 个锡石电子探针分析平均值

Fig.5. Diagram showing W/Ti ratios of cassiterite from mineralization type III, IV of the Changpo-Tongkang ore deposit. 1—Chemical analyses of cassiterite from Type III; 2—Average of electron microprobe analyses of 88 cassiterite samples from Type III; 3—Chemical analyses of cassiterite from Type IV; 4—Electron microprobe analyses of cassiterite from Type IV (figures in parentheses are spots analysed in different grains of the same sample); 5—Average of electron microprobe analyses of 128 cassiterite samples from Type IV.

微量元素地球化学方面也有着相应的差别。为了更进一步地确定这种关系的普遍性，我们在锡石单矿物化学分析的基础上，对 44 个锡矿石样品做了 353 个电子探针分析(在丹佛美国地质调查所进行的)，所用仪器为美国 ARL 公司生产的 SEMQ 型探针，工作电压为 25kv，工作电流为 64μA。每个分析点均测定了 Sn、Ti、V、Mn、Fe、W、Zn、As、Sb、S、Zr、Hf、Nb、Ta、Sc、Co 16 个元素，但因探针分析检测限偏高，故取得有意义结果者只有前 10 个元素，并按矿化类型以平均值方式列于表 4。由表 4 可见，各种矿化类型各组元素中，除 ZnO 外，其余元素探针与化学分析结果无很大差别，确实证实了上述规律普遍存在。矿化类型 I、II、III 中 ZnO 的探针分析结果明显高于化学分析，是因为所分析的锡石单晶多与闪锌矿共生所致，而化学分析所用的众多锡石颗粒 (lg) 不可能都具有这种产状。矿化类型 IV 的情况则相反(锡石与闪锌矿的关系不如前者密切)，故 ZnO 的探针分析结果远低于化学分析结果。对此，考虑到地质产状，我们认为探针分析结果更加符合实际。故 As、Sb、Zn 三个元素在锡石单矿物中含量的高低，直接取决于锡石是否与它们的硫化物共生。关于这一点以及锡石单矿物分析中微量元素分组问题将于下面讨论。

另外，我们还对差别最明显的矿化类型 I 和 IV 的 10 个元素进行了极矩阵相关系数计算(见表 5，图 6)，以求定量地探讨不同矿化类型中锡石微量元素之间的相互关系。从表 5 和图 6 可以看出，10 个元素明显分

表 5 锡石中主要微量元素的皮尔森极矩阵相关系数

Table 5. Pearson product moment correlation of minor elements in cassiterite
(values underlined refers to positive correlation) at 0.01 confidence level

	TiO ₂	FeO	V ₂ O ₅	WO ₃	As ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	ZnO	MnO	SO ₃
Sc	0.305	0.308	<u>0.905</u>	<u>0.567</u>	0.330	0.179	0.102	-0.344	—
TiO ₂		<u>0.798</u>	0.197	<u>0.600</u>	0.234	-0.010	-0.234	-0.277	-0.292
FeO			<u>0.448</u>	0.104	0.404	0.267	0.130	-0.277	—
V ₂ O ₅				<u>0.575</u>	0.295	0.217	-0.192	-0.165	-0.181
WO ₃					<u>0.668</u>	<u>0.469</u>	-0.451	-0.450	-0.356
As ₂ O ₃						<u>0.600</u>	-0.433	-0.147	-0.252
Sb ₂ O ₃							-0.256	-0.153	-0.230
ZnO								0.236	0.208
MnO									0.065

注: 1. 数值下划线者表示信度在0.01时具显著的正相关; 2. 为了确保统计分析的可靠性和代表性, 本表是根据70个锡石单晶的电子探针分析结果(每个结果为2—4个测量点的平均值)计算而来, 但因探针分析缺少Fe、Sc的资料, 故二元素相关系数是据化学分析资料求出的

成两组并具以下特点: ①A组元素与B组元素全部为负相关, 各自代表了不同的矿化类型; ②A组包括锡石微量元素分组中的第A、B组, 它们是矿化类型IV的特征元素, 其中Fe与Ti、Sc与V密切相关, As和Sb密切相关; ③W是一个较特征的元素, 它分别与第A、B组元素密切相关; ④B组实质上是锡石微量元素分组中的第C组, 它们是矿化类型I的特征元素, 该组中元素间的相关性较差, 但它们与A组中的全部元素均为负相关, 具有单独构成一组的显著特征。

总之, 微量元素之间相互关系研究表明, 锡石中的微量元素以含量之高低可分为不同的组, 这是客观事实。不同的元素组与矿化类型、锡石的产状及其共生矿物组合有着密切的关系, 这为矿床成因研究提供了重要信息。

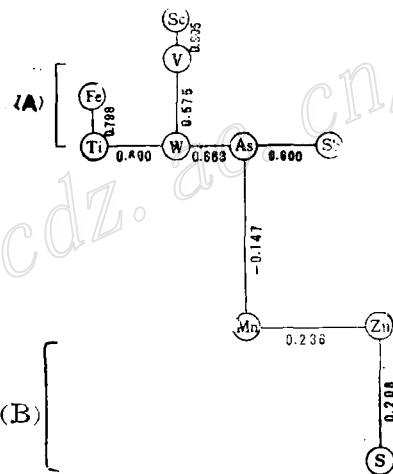


图 6 锡石中微量元素相关关系的最小支撑树图
Fig. 6. Minimum linkage spanning tree showing minor element correlation of cassiterite.

四、讨论及结论

我们对长坡-铜坑矿床的锡矿化, 根据其产状特征、矿物共生组合及矿化时序, 将它们分为四种类型。这四种矿化类型是在矿床最初形成及其变质-变形的全过程中, 不断发展、演变而成的。如前所述, 本矿床的层状矿化具有块状硫化物矿床的一切地质特征, 并以热液喷气沉积岩为容矿岩石, 无疑说明是在海底热卤水循环系统中以沉积方式形成的。富含锡石角砾岩筒附近的细脉状矿化是在卤水排泄期间, 于水体下面固结或半固结的岩石中形成的补给脉。这种脉以产于喷口附近、矿脉多呈网状并具有较多的形成期次为特征。不穿过主矿体的细脉状矿化有成岩期形成的梯状脉, 也有同构造期的裂隙脉。它们规模不大、分布范围广, 但以产于主矿体中为主, 并与层状矿化关系更为密切。大脉型矿化是成矿期后褶皱-构造变形与岩浆侵入综合作用的结果。这种矿脉规模大, 延伸稳定, 但以分布在长坡-铜坑矿床西南部为主。

显然,四种矿化类型在其形成的物理化学条件及物质来源方面既有差别又有联系,特别是锡石微量元素地球化学特征更进一步为此提供了佐证。如矿化类型I和IV中锡石微量元素含量有其规律性变化,究其原因有以下几个方面:第一,有些元素与成矿温度有关,如第A组元素Ti、Fe、Sc、V、W在矿化类型I中低而在矿化类型IV中高,则是它们形成于不同温度条件的反映,IV是在比较高温条件下形成的;第二,有些元素与共生矿物有关,如第B组元素As、Sb在矿化类型I中低,矿化类型IV中高是因为前者之中没有砷、锑等矿物,而后者则有之。但后者中有一个例外样品(K3-1)不含砷、锑矿物,其锡石中 As_2O_3 (1ppm)、 Sb_2O_3 (16.8ppm)含量确实很低;第三,有些元素与矿化形成的地质环境有关,如第C组Zn、Mn、Ba、S在矿化类型I中高、矿化类型IV中低,这是因为该组元素在海底热卤水循环系统中较为富集,也就是说富含第C组元素的矿化类型I是在海底热卤水系统中形成的。这里要说明一点,As、Sb、Zn都属亲硫元素,亦都是海底热卤水系统中的特征元素,在锡石微量元素分组中为什么把As、Sb单独划为第二组,而把Zn划在第C组呢?这主要决定于不同矿化类型的矿物共生组合,如在沙利文矿床,层状矿化中有含锑矿物存在,故锡石中 Sb_2O_3 的含量相对较高(表3)。在长坡-铜坑矿床则不同,含砷、锑矿物主要出现于脉状矿化中,而在层状矿化中几乎没有,如照片1,条带状锡矿薄层由锡石、长石、石英组成,其旁侧的矿脉以含锡石的毒砂为主。锡石单矿物化学分析表明(表3),前者(DT255)含 As_2O_3 为45ppm,后者(DT2513)含 As_2O_3 为610ppm,截然不同。因此As、Sb与第A组元素Sc、Fe、V、W等呈正相关,而与Zn呈负相关(表5)。但第A组元素都是亲石元素(除Fe而外),其元素地球化学性质与As、Sb显然不同,故把As、Sb单独划为一个组较合理,并且二者确实密切相关。还要强调一点,在锡石的微量元素地球化学研究中,我们为什么与前人不同,而对As、Sb、Zn、Mn、Ba、S等元素给予了重视呢?这是因为作者旨在研究海底热卤水循环系统中所形成的锡矿的地球化学特征。事实证明(表5,图6)这些与热卤水系统有关的特征元素对锡矿的成因确实有重要的指示意义。

为了进一步确定矿化类型I和IV的成因差别,从更广泛的角度对比不同成因锡矿床中锡石微量元素的地球化学特征是必要的。为此,我们选择以下几个矿床作为对比研究的典型代表。沙利文块状硫化物矿床中海底热液喷气形成的沉积型锡矿、克拉麦科斯斑岩矿床中的脉状锡矿、玻利维亚锡矿带与中生代花岗岩有关(富含硫化物)的石英脉型锡矿、玻利维亚新第三纪含锡斑岩型锡矿、巴西地盾前寒武纪伟晶岩型锡矿,它们的锡石单矿物化学分析结果(表3)表明,不同成因的矿床中锡石微量元素分布确有一定规律。首先,第D组元素Nb、Ta、Zr、Hf的含量在伟晶岩型矿床中显著高,在其他类型矿床中特别低,因此,可以把伟晶岩型锡矿与其他类型锡矿区别开来。如果某些热液脉型或斑岩型锡矿床与富Nb、Ta的花岗岩有关,那么这种锡石必然富含Nb、Ta,如克拉麦科斯矿床中的锡石就是如此。其次,我们再看其余矿床类型间微量元素的差别。总的看来,第A组元素Ti、Fe、W的含量在斑岩型、热液脉型锡矿床中显著高,在热液喷气沉积型矿床中十分低。这一点做为普遍性的规律,是判别层控型锡矿床与其他类型锡矿床的重要标志。Sc、V在层控锡矿床中含量低,在其它类型矿床中变化较大(表3),这很可能与成矿物质来源有关。因为Sc、V是与基性岩有关的元素,故在某些与酸性岩有关的锡矿中,它们的含量势必低。但在成矿物质来源相同情况下,Sc、V在锡石中的含量与矿化条件有关(见下述)。最后,对于第B、C组元素As、Sb、Zn、Mn、Ba等,由于所选典型矿床相应资料不齐全,以及这些元素与成矿地质环境关系极密切,不易于超越特定成矿带进行广泛对比研究。但在某具体矿床的研究中,这些元素在锡石中含量的变化具有明显的规律性。现在我们对比长坡-铜坑矿床矿化类型I、IV中锡石微量元素特征与上述规律的关系。首先,这两类矿化第D组元素Nb、Ta、Zr、Hf的含量普遍低,显然不同于伟晶岩型锡矿床。其次,矿化类型I中另外三组元素的含量与沙利文矿床十分相似,而与含锡斑岩型或热液脉型锡矿床迥然不同(表3、4)。众所周知,沙利文块状硫化物矿床中伴生的锡石是热卤水喷气沉积成因的,第A组元素Ti、Fe、Sc、V、W含量低,第B组元素Zn、Mn、S含量高正是这种环境的反映。显而易见,沙利文矿床锡石中微量元素分布和变化的规律与大厂矿区所揭示出来的规律是一致的(图4),无疑,这证明了大厂锡矿的矿化类型I也形成于海底热卤水循环系统。当然,仔细对比表明,大厂层状锡石中Sc、V的含量比沙利文矿床显著高(表4),这说明大厂锡矿的物质来

源可能与老基底的基性火山岩有关, 其实该矿床形成的地质环境已暗示了这一点。第三, 矿化类型IV第A组元素含量普遍高, 与含锡斑岩或热液脉型锡矿床非常类似, 而与沙利文矿床则大相径庭。第B组元素唯有As的资料可供对比, 其含量只与富含硫化物的石英脉型锡矿床相似(表3), 再次证明了As的含量确与共生矿物有关。第C组元素由于上面已说过的原因, 难于进行对比, 只有Mn的资料齐全, 但无规律可寻。总之, 矿化类型IV中锡石微量元素地球化学特征更类似富含硫化物的热液脉型锡矿床, 这一点与地质观察是一致的。

上述各种地质-地球化学特征的对比研究表明, 本矿床的层状矿化(矿化类型I)属同生沉积成因, 大脉型矿化(矿化类型IV)属与岩浆热液有关的后生充填-交代成因。下面从物质组成上讨论矿化类型II、III与矿化类型I、IV的异同, 以确定它们的成因关系。从锡石微量元素组成及含量来看(表3、4), 矿化类型II与I几乎完全相同, 说明二者在形成条件及物质来源方面很相近, 证明了这种脉状矿化与层状矿化是同源形成的。相反, 矿化类型III的情况较复杂, 其第A组元素(除W外)原则上与矿化类型IV相同, 第B、C组元素介于矿化类型I与IV之间(表4)。显然, 无论从地质特征上, 还是锡石微量元素地球化学上, 矿化类型III都是个难于解决的问题。为此, 我们先看W在各矿化阶段中的行为。从表4可见, 在四个矿化类型中, WO_3 的含量(ppm)分别为230、416、401、1782, 其中以层状矿化含W最低。特别是层状矿化中受后期影响最轻的一个样品(照片1中第5个条带), 其 WO_3 含量为69ppm(表3, DT255), 与沙利文矿床很相近(36ppm)。显然, 锡石中含W低是层状矿化的特点。又比如, 我们对原生层状矿化的锡石及交代包裹它, 属矿化类型IV的后生锡石(照片6)同时进行了电子探针分析, 前者含 WO_3 为260ppm, 后者为2300ppm。与这两个锡石颗粒相应的单矿物分析结果(表3), WO_3 分别为250ppm(DC272)和1600ppm(DC271), 与探针分析结果基本一致。这再次说明了该两种矿化类型中W有其完全不同的来源, 层状矿化中W的含量确实低。矿化类型II、III中 WO_3 的含量也较低, 总体来看接近矿化类型I, 而远低于矿化类型IV以及前面为了对比所列举的各类后生矿床(表3)。有意义的是, 切穿含W最低层状矿化的脉状矿石中, 含有褐色, 自形程度好的锡石(照片1中的DT2513)。这种锡石属于矿化类型III, 其 WO_3 含量为126ppm(表3), 非常低, 与被它所切穿的层状矿化(含 WO_3 69ppm)十分相似, 而与矿化类型IV有天壤之别。另外, 在W/Ti图解上(图5), 矿化类型III的W/Ti<1, 而矿化类型IV的W/Ti>1。我们再看一下在各矿化阶段中W同其他元素的关系。Zn、Mn、Ba、S是层状矿化的特征元素, 它们与W有反消长关系。由于锡石中Zn、S的含量在一定程度上受共生矿物的影响(SO_2 亦无化学分析结果), 我们用不以独立矿物存在的Mn+Ba的含量为一个变量, 制做了W/(Mn+Ba)图解(图7)。从图7可见, 在各矿化过程中, W与Mn+Ba呈显著的负相关, 说明含W高与含Mn+Ba高的锡石在成因上是完全不同的矿化作用的产物。总之, 从W在各矿化阶段的地球化学行为来看, 矿化类型II、III尽管是脉状矿化, 但不同于矿化类型IV, 它们在成矿物质上没有后生来源, 与层状矿化是同源的。在此, 我们有理由认为, 矿化类型III中Ti、Fe、Sc、V含量高, 不是与岩浆热液有关, 可能是在成岩或同构造期裂隙形成并发生脉状矿化时, 成矿的温度、压力条件较高, 或许与大脉型矿化条件相似, 因此, 形成结晶相对较粗、颜色较深的锡石, 并有较多的Ti、Te、Sc、V以类质同象或杂质元素的方式加入到锡石中。当然, 类似地质作用, 在矿化类型IV形成过程中也同样发生过。为了对比矿化类型III和IV中Ti、Fe、Sc、V加入锡石中去的强度, 我们以矿化类型I为基数, 分别计算各元素相应增加倍数如下:

	Ti	Fe	Sc	V	V平均	W	W平均
矿化类型III	0.65	0.30	1.13	2	1.02	0.74	0.73
矿化类型IV	0.86	1.22	0.66	0.71	0.86	6.75	7.84

由上可见, 对于矿化类型III, 各元素加入锡石中的强度相差不大, Sc、V略高, W处于中间状态, 是其他元素平均增加倍数的0.73倍。对于矿化类型IV, 前四个元素加入锡石中的强度相差不大, Sc、V略低, Fe略高。但是, W在该类矿化中显著增加, 是其它元素平均增加倍数的7.8倍。把矿化类型III和IV加以对比, 那么

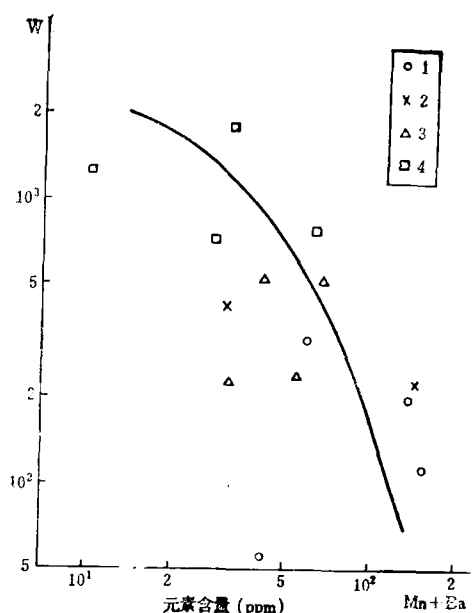


图7 不同矿化类型中锡石W和Mn+Ba含量的相关关系图

其相关系数为-0.6644, 在信度为0.01时呈显著负相关。1、2、3、4分别代表矿化类型

I、II、III、IV

Fig.7. Correlation of W and Mn+Ba in cassiterite from different mineralization types.

Correlation coefficient is -0.6644, exhibiting significant negative correlation at the confidence level of 0.01; 1,2,3 and 4 stand respectively for mineralization type I, II, III and IV.

W在后者中加入强度是前者的10.7倍, Sc、V在前者中的加入强度分别是后者的1.5倍和2.4倍。这些对比资料告诉我们, 在矿化类型III形成过程中, Sc、V再次活化。根据本矿床地质环境, Sc、V显然来自容矿母岩和层状矿化, 因为层状矿体中锡石微量元素就显示了富含Sc、V的特点。与此同时, Ti、Fe、W的增加量小于Sc、V, 故总体看来, 在此矿化过程中没有外来物质加入。在矿化类型III、IV形成过程中, Sc、V同步增加或型少, 同上述Sc与 V_2O_5 相关系数为0.905是一致的, 说明了Sc、V具同一来源。对矿化类型IV的形成, W必有外来补给, Ti、Fe也有少量补给。但这种补给溶液贫Sc、V, 也就是说这是一种与酸性岩浆有关的热液。

在矿床地质特征的讨论中, 我们曾经提到, 把不同的矿化类型区分开来, 查明矿床形成、发展的过程, 对于认识矿床成因是至关重要的。显然, 锡石的微量元素地球化学及其中W在各矿化阶段的行为对比有重要的指示意义。

对大厂超大型矿床, 特别是锡矿化的成因, 一直是中外地质学家所关注并积极探讨的问题。本文着重从矿床地质特征及锡石微量元素地球化学的角度, 研究了矿床形成及演变的历史, 认为该矿床是以沉积岩为容矿岩石的喷气沉积型矿床。后来受燕山期花岗岩的影响, 同生成矿物质再次活化迁移, 形成一些大减矿脉, 致使矿化类型及物质组成都复杂化了。因此, 我们现在所看到的矿床地质特征是不同的地质作用的产物。

本文第一作者在美国工作期间得到了 Dr. Bernhard C. Koch大力帮助, 特别是他为本项研究提供并翻译了有关德文参考文献, 在此深表感谢。

参考文献

- [1] 韩发, R. W. 哈钦森 1989 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积的证据——含矿建造及热液沉积岩 矿床地质 第8卷 第2期 第26—40页
- [2] 韩发, R. W. 哈钦森 1989 大厂锡多金属矿床热液喷气沉积的证据——容矿岩石的微量元素及稀土元素地球化学 矿床地质 第8卷 第3期 第33—42页
- [3] 韩发、葛朝华 1983 福建马坑铁矿床海相火山热液-沉积成因地质-地球化学特征 中国地质科学院矿床地质研究所所刊 总第8号(专辑2) 第67—70页 地质出版社
- [4] 徐珏 1988 广西丹池地区矿田构造 第28—24页 北京科学技术出版社
- [5] 葛朝华、韩发 1988 广东大宝山矿床喷气-沉积成因地质地球化学特征 第46—49页 北京科学技术出版社

- [6] Hutchinson, R. W., and Burlington, J. L., 1984, Some broad characteristics of greenstone belt gold lodes, *Gold*, pp. 339—371.
- [7] Haapala, I., 1977, *Bulletin 286 of the Geological Survey of Finland*, pp. 93—97.
- [8] Dulski, P., 1980, Spurenanalyse als Hilfsmittel bei der geochemischen Untersuchung der Genese Bolivianischer Sn-Lagerstätten. Verlag Dietrich Reimer in Berlin, pp. 69—79.
- [9] Коржинский, Д. С., 1955, Очерк метасоматизма. Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. Изд-во «Наука», Москва.

照片说明

1. 91号主矿体中条带状锡矿石: 暗色者为含石英、绢云母的钾长石条带, 浅色者为含钾长石的锡石条带 DT25 铜坑矿山405平巷
2. 小扁豆灰岩底部层状矿体中条带状矿石: 灰色者为磁黄铁矿, 暗色者为闪锌矿, 穿层脉为毒砂, 各种矿石中均含锡石 铜坑矿山405平巷 28线
3. 韵律式条带状硫化物矿石: 其中硫化物梯状脉清晰可见 2/3原大 T1 铜坑矿山405平巷 28线
4. 92号矿体中的补给脉: 浅灰色者为磁黄铁矿, 暗灰色者为闪锌矿, 二者均含锡石 铜坑矿山405平巷
5. 92号矿体中不穿过主矿体, 但切穿层状矿化的脉状矿化, 二者均由黄铁矿、闪锌矿、锡石组成 铜坑矿山374巷道 22线V2采场
6. 后生自形锡石 (DC271) 包裹被溶蚀的同生锡石 (DC272) $\times 50 (-)$ DC27 长坡矿山505平巷 6线
7. 91号矿体条带状矿石中的石香肠构造: 暗色者为闪锌矿, 浅色者为磁黄铁矿, 亮灰者为硅质条带 1/4原大 T884 铜坑矿山405平巷 22-1线
8. 长石的再结晶加大作用: 中部亮灰者为原始该晶, 外围灰色者为加大部分 $\times 200 (-)$ DT2556 铜坑矿山405平巷
9. 斑杂状矿石中粗大磁黄铁矿晶体包裹被溶蚀的细粒原生晶 $\times 64 (+)$ T1-1 铜坑矿山405平巷 22-1线

EVIDENCE FOR EXHALATIVE ORIGIN OF THE DACHANG TIN-POLYMETALLIC SULFIDE DEPOSITS —THEIR GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS

Han Fa

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

Richard w. Hutchinson

(Geology and Geological Engineering Dept., Colorado School of Mines, Golden, CO 80401, USA)

Abstract

Cassiterite occurs in marketedly diverse forms in the Dachang tin-polymetallic sulfide field. There are at least two different types of mineralization: concordant stratiform continuous beds and discordant veins. The former is strictly confined within the siliceous host strata, suggesting syngenetic sedimentary characteristics of the bedded mineralization, and the main orebodies themselves consist of these alternating cassiterite-rich thin layers and silici-

ous rocks; the latter includes ladder veins within single beds, fissure veins or veinlets and large main veins. The veinlets transect a number of beds, but never penetrate the host strata; the large veins, however, usually cut all stratigraphic units from D_3^1 to D_3^3 . Detailed investigation indicates that the primary stratiform main orebodies were originally sea-floor chemical precipitates from discharged hydrothermal fluids, and later underwent a complex, prolonged and continuous spectrum of deformation-metamorphism. This process commenced with diagenetic compaction and lithification, and culminated in regional metamorphism, deformation and granitic plutonism. Successive deformation-metamorphism events not only reshaped the stratiform conformable orebodies, but also formed apparently different types of veins by remobilization of ore-forming components from the primary Sn-enriched strata, and greatly changed the structure, texture and mineralogical composition of the primary ores. Such phenomena as the secondary enlargement of syngenetic K-feldspar, the aggregated recrystallization of exhalative sulfides and the boudinage in primary bedded ores might have been formed during the diagenetic compaction stage or Indosinian-orogenies.

A special study of cassiterite shows that mineralogical characteristics and trace element geochemistry of this mineral from different types of mineralization are apparently affiliated with their modes of occurrence. Ti, Fe, Sc, V and W contents of cassiterite occurring in bedded mineralization are much lower than the contents of these elements in cassiterite from the large main veins related to granite, but things are just the opposite for Zn, Mn, Ba and S contents. Geochemical behavior of W in cassiterite from the various types of mineralization, in particular, demonstrates that cassiterite with high content of W was generated from the hydrothermal fluids affiliated with granite. Therefore, W and Mn+Ba appear to be in distinctly negative correlation. This undoubtedly indicates that Mn- and Ba-high cassiterite occurring in stratiform orebodies is related to submarine hydrothermal exhalative system.

For the sake of comparison, we analysed the composition of pure separated cassiterite from the Sullivan Mine of Canada which is generally considered to be of typical exhalative origin. Cassiterite from the Sullivan Mine is strikingly similar to that from the Dachang Mine in mineralogical and trace element geochemical characteristics, suggesting that these two ore districts share the identical formation conditions. The trace element geochemical data of cassiterite from sedimentary exhalative deposit presented in this paper are of great significance to the origin of some other tin deposits in the world.

