

床呈“半边X形”分布是受基底所控制，那么，被解体了的原生矿床残迹与次生矿又那么相似以及火成岩呈弧形分布，又该怎样解释呢？笔者认为，不均衡的交叉型断裂就是根本的控制因素。

## 玻利维亚锡矿床成因模式

玻利维亚锡矿产量约占世界的14%，其中大部分采自原生矿床。最重要的矿床产于锡矿带中部和南部，那里的矿化具有次火山特征，与中新世火山喷发作用和浅部酸性斑岩侵位有关。尽管迄今产量的大部分来自高品位脉状矿体，但是现已确认，至少有5个矿床具有斑岩矿化特征，拥有储量巨大的斑岩锡矿。它们由浸染状、细脉状和角砾状锡矿石组成，分散于大范围的蚀变岩石中。虽然其品位低，但是随着高品位脉状矿石逐渐枯竭，以及近年来锡的价值日益提高，斑岩矿化必将成为重要的、有远景的长期来源。这种矿床的可能规模已为亚亚瓜、萨尔瓦多拉岩株中的卡塔维矿床显示出来。该矿床是玻利维亚所有锡矿床中的佼佼者，至少已从其脉状矿石中生产锡金属50万吨。可是现在其富矿石即将耗尽，目前正在进行开采其斑岩锡矿的可行性研究。最近估计其矿石储量为8000万吨，锡品位为0.3%。

斑岩锡矿床与斑岩铜矿床有许多类似之处，其重要特征如下：

1. 矿化集中于小型中—酸性斑岩岩株中（其地表露头通常为1~2平方公里）；

2. 岩株以次火山岩为特征，侵位于层状火山岩的火山口中，或其下方；

3. 热液角砾岩为突出的特征之一；在某些情况下，岩株基本上是角砾岩筒。一般存在几幕斑岩侵入作用和角砾岩化；

4. 岩株及邻近的围岩受到强烈、普遍的热液蚀变。蚀变使长石分解，并以富含绢云母、电气石组合为主。通常显示明显的侧向和垂直蚀变分带性。例如乔罗尔克矿床，中心为石英—电气石化带，由此往外为绢云母化带、绿泥石化带。

5. 矿石矿物（锡石）伴生有硫化物，尤其是黄铁矿，但是也包括黝锡矿、黄铜矿、闪锌矿和

当然，本文作为成因论证，对于构造条件仅是初步探索。还要探索的是，矿体下伏基岩的大小溶洞，普遍充填或半充填有淋积型孔雀石，解体了的原生矿床的边界是否可以往东边挪动呢？

毒砂等。有时矿化亦具有分带性，贫黄铁矿、高品位的核为富黄铁矿、低品位的晕所环绕；

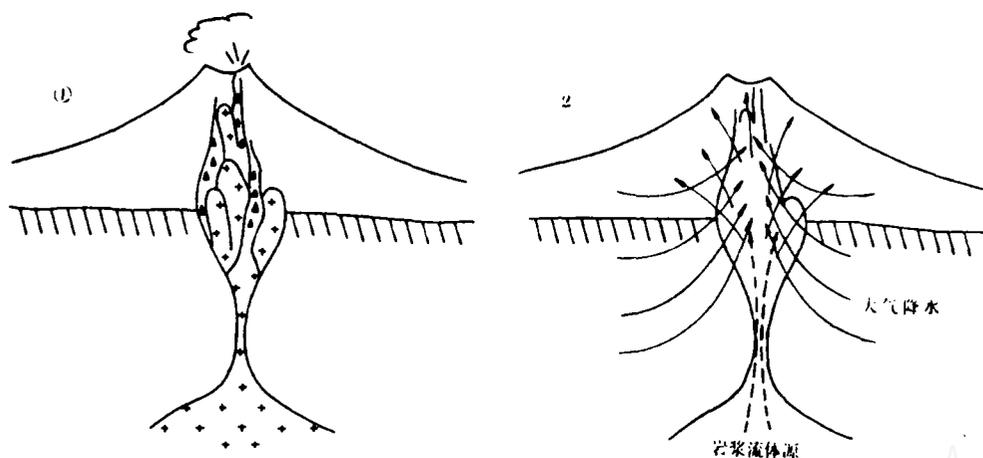
6. 普遍的蚀变和矿化的生成不受脉状矿化的限制。

J. Nigel Grant 等对玻利维亚典型的、工作程度深的乔罗尔克和亚亚瓜斑岩锡矿床进行了详细的地质、流体包裹体和稳定同位素研究，并在此基础上提出其成因模式如下：

1. 火山期 该期包括由英安质到流纹质火成碎屑岩和中心火山口喷出熔岩所构成的层状火山岩建造。喷发的物质来源于深部岩浆房。起初岩浆含水量低，并在地表猛烈爆发。在地球化学上没有明显的专属性，尽管某些矿化中心通常具有K/Rb值低、Sn和Li含量高的特点。

2. 充填火山口的斑岩和角砾岩期 见斑岩锡矿床演化示意图①。由于源岩浆房中持续的结晶作用，剩余的熔体逐渐富于水和其他挥发分，特别是硼，以及锡和其他金属。这种岩浆在火山口中脉动上升，在比早期岩浆更深的地方为蒸汽所饱和，并导致火山口中作为斑岩的岩浆流体的分出和冷凝。在许多矿床中常见热液角砾岩化。这是它们在低地静压力条件下由岩浆蒸汽造成的反映。首先由初始水力压裂形成角砾岩，接着碎块为向上的蒸汽流腐蚀和流体化，这种蒸汽流来自斑岩侵位的逐次脉动。

3. 普遍蚀变期 当火山口中斑岩侵入作用逐渐退缩到较低的高度时，上述裂隙化和角砾岩化的岩石便普遍蚀变（斑岩锡矿床演化示意图②）。强烈的石英—电气石化发育在内部、较深的部位，那里的流体包裹体，特别是乔罗尔克的证据表明，流体是二相的，其中高盐度卤水与低密度气相共存。蚀变温度至少高达500℃；流体包裹体和稳定同位素证据都说明流体为原生岩浆成因。在石英



斑岩铜矿床演化示意图

1 复合斑岩、角砾岩岩株位于酸性层状火山岩的火山口中；

2 构成岩浆—大气降水热液系，集中于高位岩株

一电气石化蚀变带中沉淀的矿化微乎其微或根本没有。

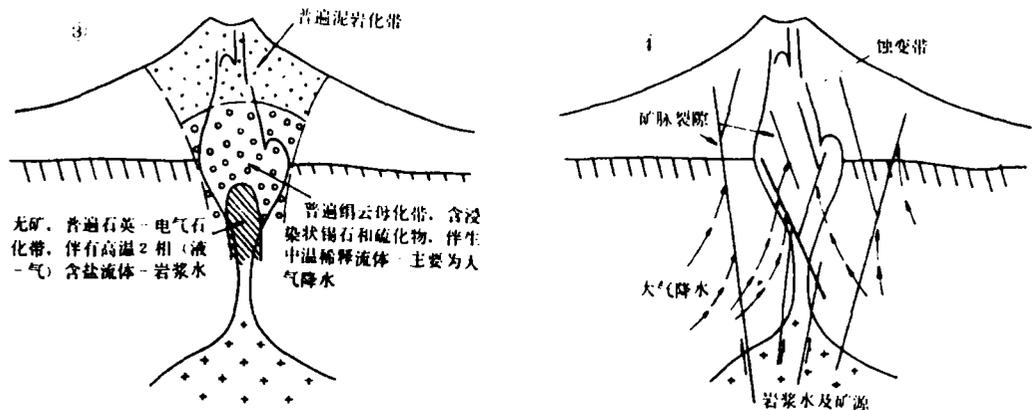
绢云母化以及斑岩型锡石和硫化物矿化直接发育在石英—电气石带的周围和上方斑岩锡矿床演化示意图(3)。流体状态显著变冷、盐度变低。因此，无矿的石英—电气石带和矿化的绢云母带之间的分带关系反映出在热液系中存在明显的向外、朝上的温度/盐度梯度。在系统最上部的普遍泥岩化是在低温、酸性“热泉”条件下发育起来的，很少或没有矿化与之伴生。

控制温度/盐度下降的机制还控制金属矿物的搬运和沉淀。观察到的许多特点可以用对流系来解释，其中石英—电气石蚀变核代表近于岩浆源的、以卤水为主的带；而周围的、上覆的绢云母化带则是在含酸性挥发分的气相从核部向外转移，凝聚为低温、低盐度酸性流体，并与冷大气降水混合的地方形成的。

假定金属来自岩浆源，那么似乎有理由推测，在以卤水为主的部位的高温和高氯化物浓度会阻止矿石在那里沉淀，即使金属优先分配到两相系统的液相中。一部分卤水会随着朝外、向上的蒸汽流搬走，从而使金属运移到蒸汽凝聚、与地下水混合带。矿石也就会随着温度和氯化物浓度的下降，由于与围岩反应（绢云母化）造成的氧逸度( $f_{O_2}$ )升高而沉淀下来。这些矿床含铁矿物类

的分带关系为所发生的物理/化学条件方面的变化提供了证据。磁黄铁矿常见于石英—电气石化带和矿脉的矿石沉淀早期，而黄铁矿则是绢云母带和主要锡石沉淀期的特征矿物；在某些情况下，在系统的最外部和沉淀的最晚期产出黄铁矿—磁铁矿—赤铁矿组合。这种分带现象和共生组合与金属呈氯化物的络合物在溶液中搬运的系统中进行的，如上概述的物理—化学趋势是一致的。锡搬运的机制尚不清楚。然而，从它一致地、密切地与诸如铁、铜和锌等其他金属伴生(对这些元素而言，氯化物的络合物似乎可能性最大)，以及某些实验数据和锡矿床含矿流体有关的流体包裹体数据看来，氯化物的络合物可能在锡的迁移中也起了重要的作用。大多数玻利维亚锡矿床中没有证据说明含矿流体具有高含量的氟。前述沉淀控制因素看来对锡石如同对金属硫化物一样有效。

存在着这样的可能性：某些金属，以及硫在高温核以外呈气相搬运。气相搬运铜和钼作为高温下富氯化物体系中的成矿机制似乎是可能的。至于锡，在无水富氯化物体系中其挥发性是被证实了的，但是在存在水的情况下其挥发性也许很低。因此，在锡的成矿过程中气相搬运的有效性仍然是个疑问。还原硫的活度与搬运方式无关，而是从核部向外随温度降低而增加，因此影响到矿化分带型式。这是因为硫在最高温度下主要呈



斑岩锡矿床演化示意图

(3) 早期普遍蚀变和斑岩矿化分带型式:

① 当较上部温度和热液活动降低时, 深部岩体构造再调整, 以及区域应力重新施加影响, 导致主断裂系形成, 并在深部岩浆源不断引出成矿流体。脉状矿体切割早期蚀变带和矿化带

SO<sub>2</sub>形式, 而随着温度降低H<sub>2</sub>S 增加的缘故。

4. 矿脉期 见斑岩锡矿床演化示意图①。继斑岩侵入终止之后, 火山口中岩浆和流体压力降低。在深成岩体的顶部带便发育一个断裂系统, 切割火山口的岩石。其几何特征可能部分地受那种与岩体冷凝有关的局部应力控制; 部分地受区域应力型的控制。断裂系统引出了源源不断的、岩体结晶时所排出的含金属流体, 导致高品位脉状矿体的形成。同位素数据表明早期矿脉流体可能属于岩浆成因。当矿脉充填继续进行(这很可能是大气降水参予矿脉流体的结果), 矿脉流体的温度和盐度便降了下来。矿脉中发生矿石沉淀的垂直间隔为流体温度和盐度梯度所控制, 并且还可能部分地受大气降水混合作用的型式所控制。沸腾作用可能在某些矿脉系中起着重要作用, 促使矿化迅速沉淀, 并使得成为这类矿床特征的迭进金属矿物组合发育。晚期高岭土是许多矿脉中最终沉淀的矿物。

上面概述的模式特别适用于那些具有充填中心火山口的斑岩和角砾岩岩株的喷发杂岩体。在玻利维亚以及世界其他一些地区, 也有着在浅部形成的锡矿床, 或者基本上产于缺乏中心岩株的火山杂岩体中(玻利维亚的科尔基查卡、乔卡亚、塔塔西; 日本的足户), 或者与埋藏的深成侵入体

有关(玻利维亚的科尔基里、瓦努尼、圣菲—莫罗科卡拉、塔斯纳等; 日本的晓野部)。在这两种情况下矿化几乎都完全在矿脉中, 很少或者没有斑岩矿化出现。

在前一种情况下, 继火山活动之后便是广泛的热液蚀变(主要是泥岩化), 不集中于轮廓分明的火山口。这种蚀变可能是向下伏岩体汇聚的大气降水循环造成的。然而这一岩体直到冷却、结晶, 并为断裂系沟通时才开始提供大量的岩浆流体和成矿组分。在后一种情况下, 深成岩体未曾喷出地表, 岩浆流体和成矿组分同样直到发育脉状裂隙系才释放出来。成矿流体的运动限于矿脉系。

斑岩矿床发育的基本特征是岩浆的脉动上升, 其中含有相当数量的水分, 以致脉动岩浆在一定的深度蒸汽达到饱和、从而使得蒸汽释放时发生强烈的裂隙化和角砾岩化, 但是没有达到地表的大规模喷发作用。是时含矿岩浆流体得以注入适当的铅垂系统, 以形成广泛分散的矿化。当岩浆停止上升到火山口时, 脉状矿化便通过连通下伏岩体的裂隙系叠加到斑岩带上, 如像其他的次火山矿床一样。

余传菁摘译自《花岗岩浆作用及有关的矿化》, 日本Mining Geology Special Issue, No. 8, 1980, pp. 151~171