



## 斑岩铜矿中铜的岩浆来源

### 引言

近年来,对于岩浆期后热液矿床成因的理论有了更深刻的认识。霍兰德(1972)总结了对硅酸盐熔融体和共存的液相之间贱金属分配的数量所做的研究,结果表明,一个花岗质熔融体内,在地质上数量适宜的 $H_2O$ 和溶解的氯化铁离子可以从“正常的”花岗质熔融体内提取足够数量的金属,以形成一个相应大小规模的岩浆期后矿床。威特尼(1975)证实了伯纳姆(1967)以前提出的观点:如果深度和冷却系统都是适宜的话,一种典型的石英二长岩岩浆可以因冷却而产生水蒸汽相,因而可以生成一种有助于斑岩铜矿形成的环境。

至于斑岩铜矿,则仍然有一个难题。假若岩浆期后热液活动能够从硅酸盐熔融体中释放出足够数量的贱金属,使它们能够迁移和富集的话,那为什么同一时代和侵入深度的花岗岩深成岩体的矿化却是反复无常和毫无规律的呢?关于这一问题有各种各样的观点。其中有些资料是可资利用的:如对原生岩浆含水量(伯纳姆,1967),岩浆中卤素含量(斯托洛里等人,1971),矿体侵入的深度(威特尼,1975),现在的剥蚀深度(西利托,1973;詹姆斯,1971)及深成岩体的成矿位置(诺贝尔,1974)这样一些机理的全面论述。依作者看来,过去观点所受的束缚是,岩浆本身在第二次沸腾时期是否含有足够的贱金属以产生一个矿体。倘若人们假定岩浆是金属的来源,那么用最简单的话来说,即岩浆在热液阶段必须含有足够的铜才能形成一个斑岩铜矿。

普纳姆和伯纳姆(1963)曾以这一观点为一种找矿方法而在亚利桑那州的北西部和中部的寒武纪深成岩体内进行过试验。他

们的结论是:“与深成岩体有关的样品的铜含量非常高,反映出了已知铜矿区”,这种铜大部分为硅酸盐铁镁矿物、氧化物和硫化物相。洛夫林等人(1970)在亚利桑那州的西里塔和圣里塔山进一步验证了这一点,他们发现,成因上与斑岩铜矿有关的原生黑云母中的含铜量,相对于“无矿”侵入体的黑云母而论,至少要高一个数量级。

凯斯勒等人(1975, a)在证明黑云母的卤素含量与矿化无关时却得出相反的结果:在90%的可信程度上,不含矿的侵入体中的原生黑云母的铜含量却高于矿化侵入体中原生黑云母的铜含量。对这一矛盾现象所做的解释可能是,凯斯勒等人的采样是更具有代表性的采样程序——从不列颠哥伦比亚、蒙大拿、中美、加勒比地区及美国西南部斑岩铜矿带。普纳姆和伯纳姆和洛夫林等人确实报告了从几个地区采集的样品中,黑云母的含铜量极高。但凯斯勒等人的发现可能是更具普遍性的结论。

还有一个问题,不管原生岩浆期和岩浆期后矿化的含铜量之间是正相关还是负相关关系,关键是岩浆内怎样形成铜的富集?这是否是某些特殊的构造环境的地幔或地壳的非均质性的产物?(如:亚利托,1972;雷里格和海得里克,1972)或是某些可视为岩浆来源和化学特征相同的产物?本文将阐述后一种假说,并对附加的试验提出解释。这里提出的论题是,过渡金属特别是铜的结合性质是,组份的变化将会控制花岗质熔融系统中的晚期分异组份中铜的富集。铜富集进入硅酸盐液相(并非进入早期形成的固相),是在霍兰德(1972)的液/气分离之前,这意味着花岗质熔融体在第二次沸腾时期可能会含有数量有意义的铜。这一模式与经典的斑岩铜矿的岩浆后期热液模式是完全一致的。

## 配位场理论和硅酸盐熔融体内铜的状态

柯蒂斯 (1963)、法伊夫 (1964) 和伯恩斯 (1970) 详细论述了晶体场理论的基本点, 可以用来解释硅酸盐熔融体中铜的行为。晶体场理论是化学键的一种方式, 以一种过渡金属离子与其配位基之间的相互作用受静电力的控制这一假设为根据的, 配位原子可被认为是点负电荷。这种理论可用于地质系统, 而且已经取得了某些成功 (如: 威廉斯, 1959; 柯蒂斯, 1963)。

当描述晶体-熔融体系统内铜的行为时, 要充分注意到一个过渡金属离子的d轨道是五重衰退, 这一五重衰退因配位场的存在而变复杂。带有过渡金属离子的四面体配位或八面体配位中配位基的存在使d轨道分裂为能阶较高和能阶较低的两组轨道。例如, 一个 $\text{Cu}^{2+}$ 离子的t<sub>2g</sub>和e<sub>g</sub>轨道分裂为能阶较高或较低的位形, 被称为“晶体场分裂”, 图1示出了八面体的分裂情况。八面体和四面体中的能阶之差分别用 $\Delta_0$ 和 $\Delta_t$ 标记, 称为“晶体场稳定能”或CFSE。表1总结了八面体场中过渡熔融离子的晶体场稳定能。总稳定能等于t<sub>2g</sub>电子的稳定能减去e<sub>g</sub>电子的退稳定能。

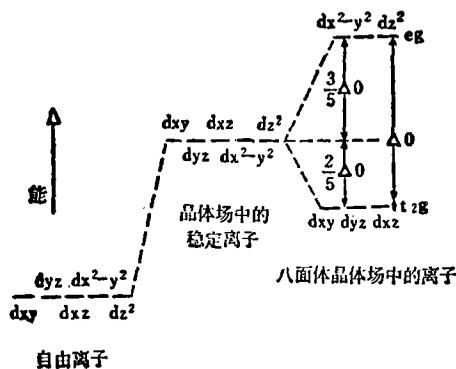


图 1

$\text{Cu}^{2+}$  离子的八面配位体中 3d 电子位形为 (t<sub>2g</sub>)<sup>6</sup>(e<sub>g</sub>)<sup>3</sup>, 因为相对 e<sub>g</sub> 来说, 八面体配位会稳定 t<sub>2g</sub> 轨道。奥吉尔 (1959) 指出, 对铜的无机络合物来说, e<sub>g</sub> 电子位形几乎总是接近  $(dx^2 - y^2)^1 (dz^2)^2$ 。在四面体配位的  $\text{Cu}^{2+}$  中, 相应 e<sub>g</sub> 来说, t<sub>2g</sub> 轨道是退稳定的, 稳定位形为 (t<sub>2g</sub>)<sup>5</sup>(e<sub>g</sub>)<sup>4</sup>。

如果比较一下一个八面体配位的  $\text{Cu}^{2+}$  离子 ( $3/5\Delta_0$ ) 与四面体配位  $\text{Cu}^{2+}$  离子 ( $2/5\Delta_t$ ) 的晶体场稳定能, 其中  $\Delta_t = -4/9\Delta_0$  (伯恩斯, 1970), 可以得出结论,  $\text{Cu}^{2+}$  趋向于在八面体中。戈德施密特的法则也预言过同一结果。

几个实验研究证实了这一有关铜分离的结论。首先, 法伊夫和伯恩斯表明 (1964), “过渡金属离子在硅酸盐熔体中占据四面体和八面体配位位置, 而在从岩浆晶出的矿物中 (橄榄石、辉石), 占据八面体配位位置。”其次, 达尼茨和奥吉尔 (1957) 提出, 第一过渡序列的二价过渡金属离子, 只有  $\text{Ni}^{2+}$  比铜更可能被分配到八面体位置, 最后, 柯蒂斯 (1963) 对谢尔加德侵入体中过渡金属离子的分离研究表明,  $\text{Cu}^{2+}$  包括在成岩矿物的有规则的晶格位置内, 虽然它可以处于与其它过渡金属的“竞争不利”状态 (可能由于杨-特勒效应引起的复杂情况所致)。

## 花岗岩系统中熔融体和晶体间铜的分离

如果人们接受这样一个条件, 即  $\text{Cu}^{2+}$  优先进入八面体位置的话, 则可以得出结论: 在一个熔融体/晶体系统中, 可以改变液体中八面体和四面体位置相对比例的熔体相的任何特性也会改变熔融体和晶体间铜的分离。这就是说, 熔融体中四面体位置的数目相对于八面体位置的数目增加, 则铜就趋于进入沉淀结晶相的可利用的八面体位置。在熔融体结晶的早期铜进入硅酸盐矿物大概会降低遗留液体的铜的富集。其结果可在所有重要的液相产生之前从岩浆中将铜夺走。

如果我们能够为斑岩铜矿的花岗质母岩的产生和结晶假设一个相对有限的压力范围, 那么伯恩斯和法伊夫 (1964) 的如下意见就会变得有意义了, 即“硅酸盐熔融体中四面体位置的比例随碱离子和二氧化硅数量的增加和氧化铝数量的减少而增加”。这是根据硅酸盐玻璃体中 Ni 的分配的研究得出的一个实验结果。伯恩斯和法伊夫用吸收光谱测定了含重量百分比为 5% NiO 的一系列硅酸盐玻璃体。4 种这样的玻璃体接近花岗岩熔体, 表明了熔融体中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和碱含量对于

d 电子数	轨道	稳定 $\Delta$	总 稳定
1	(dxy)	$+\frac{2}{5}$	$+\frac{2}{5}\Delta$
2	(dxy)(dxz)	$+\frac{2}{5}+\frac{2}{5}$	$+\frac{4}{5}\Delta$
3	(dxy)(dxz)(dyz)	$+\frac{2}{5}+\frac{2}{5}+\frac{2}{5}$	$+\frac{6}{5}\Delta$
4	(dxy)(dxz)(dyz)(dx <sup>2</sup> -y <sup>2</sup> )	$+\frac{2}{5}+\frac{2}{5}+\frac{2}{5}-\frac{3}{5}$	$+\frac{3}{5}\Delta$
5	(dxy)(dxz)(dyz)(dx <sup>2</sup> -y <sup>2</sup> )(dz <sup>2</sup> )	$+\frac{2}{5}+\frac{2}{5}+\frac{2}{5}-\frac{3}{5}-\frac{3}{5}$	0

可利用的八面体和四面体位置的分配所起的作用。实验结果见于图 2。图 2 根据伯恩和法伊夫的数据分别标绘出了对各种 Ni<sup>2+</sup> 的最大吸收量与熔岩玻璃体中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O + CaO) 的比值。可以看出，即使不把 SiO<sub>2</sub> 考虑在内，四面体配位中对 Ni<sup>2+</sup> 的吸收随 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(K<sub>2</sub>O + Na<sub>2</sub>O + CaO) 比值的增加而减少。八面体中对 Ni<sup>2+</sup> 吸收最大值则是相反的情况。由于在熔岩玻璃体中除了八面体或四面体位置之外，Ni<sup>2+</sup> 无处可去，所以，可用这些吸收值直接测量熔体相中四面体和八面体位置的相对比例。他们预料，元素优先进入八面体位置的分布系数在花岗岩岩浆中则要大于玄武岩岩浆。据此可得出结论：花岗岩岩浆中的高碱含量使 Cu<sup>2+</sup> 进入早期形成的晶体中，因此，与由于液/气分离而使铜形成岩浆期后热液运移的假说是相违背的。反之，由于高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

含量减低了硅酸盐液相中四面体位置的相对数目，就将铜保留在熔体中以便最后进入含水相。这种组份控制可表述如下：高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/碱比值使花岗质岩石浅成带成为斑岩铜矿化的有利部位，因为这样高的比值将使熔融体中八面体位置的数目增加到最大限度。本文的下述内容将要比较几个斑岩带内部和它们之间的矿化与非矿化的侵入体组份，以便验证这一结论。

#### 美国西南部斑岩带的拉拉米期侵入体

表 2 列出了本文讨论中应用的 48 个分析结果的样品产地。采用的仅是拉拉米期侵入岩的全分析结果。除了完全未蚀变的岩石之外，其它分析结果均不采用，因为在热液蚀变期间，碱类和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 会发生迁移。仅将那些被作者描述为“新鲜的”，并且通过镜下描述确信没有蚀变矿物存在的岩石，才被认为是“未蚀变的岩石”。矿化侵入岩有 25 个

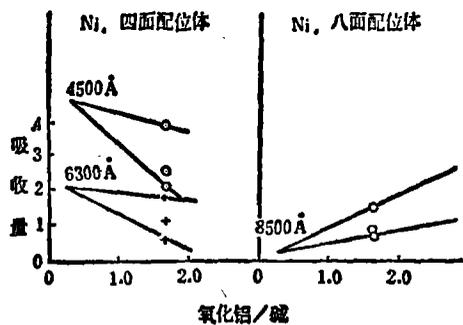


图 2 不同组份的“花岗岩”熔体中对 NiO 的相对最大吸收量

注意由于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Σ碱类 + CaO 的增加而使四面体位置中 Ni 的减少和八面体位置中 Ni 的增加。图中的线表明不同方式的变化范围。据伯恩和法伊夫，1964

本文所采用的岩石样品全分析结果在美国西南部斑岩带的产出地区 表 2

地 区	矿 化	未矿化
新墨西哥州圣利塔	8	6
亚利桑那州比斯比	1	
“ ” “ ” 科奇斯县		6
“ ” “ ” 拉伊	1	3
“ ” “ ” 格洛布	5	1
亚利桑那州克利夫顿—莫雷西	1	
“ ” “ ” 圣马纽埃尔	1	
“ ” “ ” 班格达德	1	
亚利桑那州阿霍	8	
犹他州宾厄姆	4	7

分析结果，在与文献描述的差别之外的一些含糊不清是不可避免的。

根据以上所提出的模式，将分析结果标绘在图上，以 $\text{SiO}_2$ 含量为一座标轴，以 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{碱类} + \text{CaO}$ 为另一座标轴，如图3所示。图3中，除一些散布之外有一条粗略的分界线将矿化与未矿化的拉拉米期侵入体分开，总的来看，未矿化的侵入体都投在高 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、低碱+CaO一侧。矿化的深成岩体都位于高 $\text{SiO}_2$ 一侧，表明不同的机理很好地抵销了因 $\text{SiO}_2$ 而增加了溶液中四面体位置的数量的趋势，如伯恩和法伊夫(1964)所提出的。

图3中的散布现象是令人头疼的，我们没有标绘出从亚利桑那南部至犹他州的岩石分析结果，在这一地区，时代、侵入深度、岩浆生成的深度和构造位置的有意义的区部变化都相似。图4将分析结果分为两个地区，矿化与非矿化的多元分析结果都是可以利用的。图中清楚地表明，在一个给定地区内，矿化与非矿化侵入体之间的区别是很明显的。仅相对 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比值来说，样品可在99%的置信限度内，以两种情况示出，得到两个分离的组群。

$\text{SiO}_2$ 含量基本相似的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比值与矿化和未矿化侵入体的标准刚玉含量的比较用图来表示。图5A为上述矿化与不含矿岩石的标准刚玉值的直方图。表3给出样品群的平均值和标准偏差。一个简单的双尾t-检验表明，这两组在99%以上的可信程度上代表了不同的群。因此，对美国西南部斑岩带的拉拉米期侵入体来说，矿化侵入体的平均标准刚玉含量比非矿化的深成岩体高2.5%(重量百分比)，这表明，标准刚玉值在这一地区可能是矿化的指示剂。

图5B为单个地区内标准刚玉值的直方图。除了亚利桑那州的科奇斯县之外，没有一个无矿侵入体的标准刚玉平均值落在矿化侵入体的平均值以上。实际上，科奇斯县的平均值仅落在阿霍矿区的一组样品分析结果的平均值之上。吉鲁利报告的科奇斯县分析结果，没有有工业价值的斑岩铜矿化(就该作者所知)。科奇斯县的分析结果来自两种

岩石类型：山姆大叔斑岩和谢夫林花岗闪长岩。山姆大叔斑岩是一种带有丰富的各种大小的棱角状捕虏体的玻斑状斑岩，伴有角砾岩筒。吉鲁利提出，山姆大叔斑岩的结构和构造环境是由一种共结岩浆的超冷却而产生的。因此，可能从未达到过岩浆/气体平衡，所以，铜不可能出现，但由于超冷却的动力作用，由于分离而进入热液蒸气相，铜就可能存在于角砾岩筒内。

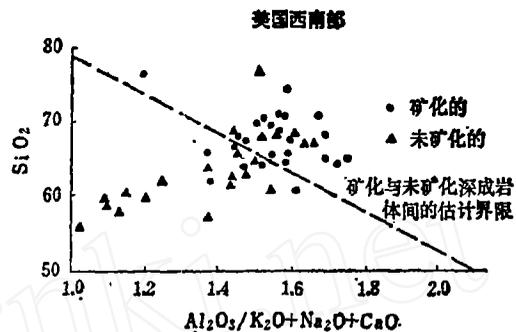


图3 美国西南部斑岩带内拉拉米期侵入体的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 比值与 $\text{SiO}_2$ 关系图  
(资料来源见表2)

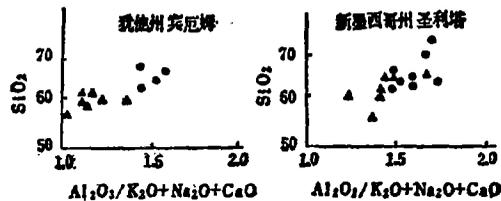


图4 美国西南部两个斑岩铜矿地区的 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 与 $\text{SiO}_2$ 关系图

美国西南部斑岩带矿化与未矿化的拉拉米期侵入体的标准刚玉含量组群的平均值和标准偏差

表3

	平均值	标准偏差	分析数量
矿化的	1.81	1.37	25
未矿化的	-0.94	2.59	23

谢夫林花岗闪长岩的标准刚玉组份平均值为0.72，使它具有斑岩型矿化的边际可能性(山姆大叔斑岩的深部带可能亦是如此)。

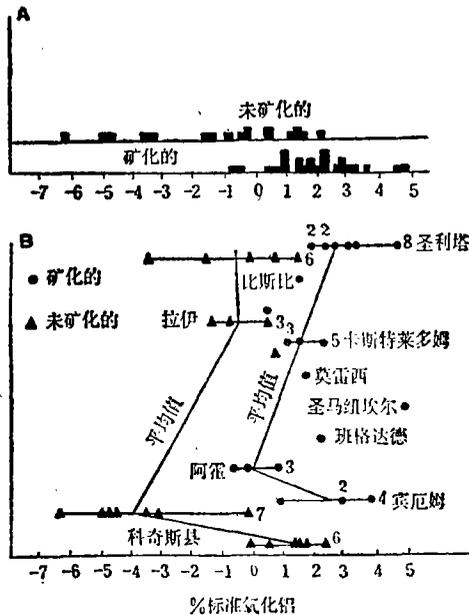


图5 美国西南部矿化与未矿化侵入体的标准刚玉值直方图(A)及矿化和未矿化侵入体内标准刚玉的百分比(B)

B图中点上所标的数字为标准矿物百分比相同的多重分析结果,在大多数富含标准刚玉的点旁标的数字表示矿化与未矿化的样品总数。标上“平均值”字样的线连接了同一地区多重分析结果的标准刚玉的平均百分数

### 加勒比斑岩带

凯斯勒等人(1975)曾评述过加勒比北部地区斑岩铜矿床的矿化围岩的岩石和岩石化学。他们强调指出美国西南部斑岩带和加勒比地区间围岩的差别。最有意义的是:

- (1) 加勒比地区的石英闪长岩母岩更为丰富;
- (2) 加勒比矿化侵入体比美国西南部同类岩石的  $K_2O$  含量系统地低;
- (3) 加勒比侵入体的  $Sr^{87}/Sr^{86}$  比值较低;
- (4) 加勒比地区侵入岩的Pb和Rb含量普遍低,而Cu和Zn背景值较高。

他们提出,与岛弧形斑岩铜矿有关的侵入体比美国西南部的矿床更原始,他们认为与克拉通有关的。因此,人们就不能期望在矿化和无矿侵入体之间应用同一条“分界线”,但应该认为总的相同的系是这样。

图6为凯斯勒等人(1975)、勃万(1966)和陈(1967)报告的分析结果的标绘图。这些分析结果的选择采用了上一节所述的同一标准。仅有波多黎各和伊斯帕诺拉

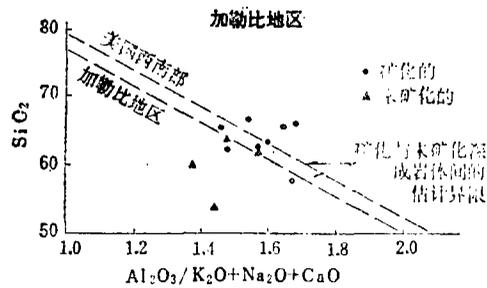


图6 波多黎各和伊斯帕诺拉侵入体的  $Al_2O_3/(K_2O+Na_2O+CaO)$  与  $SiO_2$  关系图

资料据凯斯勒等人,1975,b;勃万,1966;陈,1967

岛的分析结果可供应用,因为其它地区的数据不能马上采用。如同前面情况一样,可以画出一条矿化与无矿侵入体之间的大致分界线。这条线平行于美国西南部斑岩带的那条分界线,只是  $SiO_2$  含量较低。为了确定所标绘的样品是否代表在统计方法上有意义的组群,划一条与分界线垂直的线,然后将分析结果投影在上面。这条线可以任一比例尺缩放,进行双尾t-检验。这有些类似求出两个变化的判别函数和该函数的检验。根据  $SiO_2$  和  $Al_2O_3/(K_2O+Na_2O+CaO)$  的组合函数,在99%的置信水平上,矿化侵入体与无矿侵入体的组份是不同的。

由于加勒比侵入体的  $K_2O$  含量低,刚玉标准的标绘就没有什么用处。这决不是这种方法的应用性的反映,而只不过是岩石化学的不同所造成的原因罢了。

### 结 论

本文的讨论证实了一种模式,这种模式提出,铜在硅酸盐熔体和早期形成的结晶相之间的分配,如配位基场理论预测的那样,在岩浆期后液相的晚期阶段可以控制有价值的铜。而且,岩浆的体积化学将会影响铜分配的程度,可以作为一种可能的勘探手段。特别是在同一地区内,对于预测若干表面上看来是同源岩浆和同时代的侵入体中哪一个是斑岩铜矿化的最好的母岩,似乎是一种有价值的方法。这绝不等于排斥存在确定矿化所需的其它条件的必要性,如侵位的深度,蚀变的存在或剥蚀程度等。

此外,倘若这种模式 (下转第62页)

发送机供电，两台接收机同时在相邻两条测线上观测。接收机不用长导线与发送机连接，而用短导线与测量电极（不极化电极）连接，不极化电极随接收机一起移动。供电时读取  $M_s$  和  $\Delta V_1$  两个参数。AB=500~700米，MN=10~20米，点距10米，线距40米。观测范围300~500米。

通过几个已知金矿区岩矿石标本的测定，取得了电性参数数据（表6）。从表6可以看出，含矿蚀变岩石与不含矿未蚀变岩石之间有一定的电性差异。这是本区激发极化法寻找蚀变岩型金矿的基础和前提条件。

从本区已知矿体激电所发现的异常来看，充电率（ $M_s$ ）异常基本反映了黄铁绢

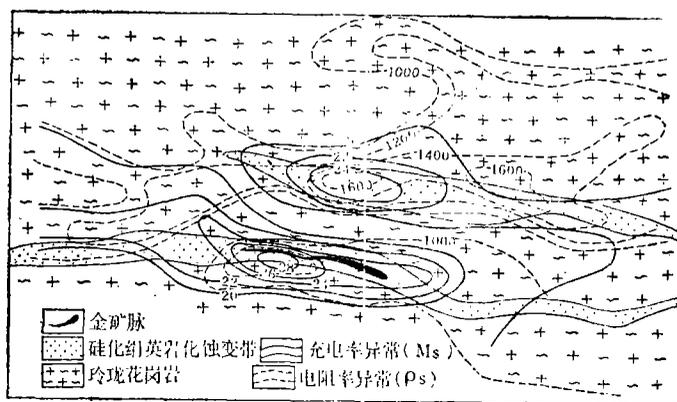


图7 乙试验区电阻率充电率地质综合平面图

英岩化、硅化蚀变带范围。充电率异常特征是：异常形状为沿蚀变带走向的拉长形。异常幅度与蚀变带宽度有关。围岩背景比较稳定。异常范围内的高值异常部分，多数反映了矿化富集地段。电阻率（ $\rho_s$ ）异常，表现为中阻到高阻特征。电阻率的高低与硅化蚀变强度有关。电阻率异常与充电率异常基本吻合。电阻率、充电率异常特征见图7。

6. 壤中气汞气异常的基本特征：本区几个已知矿体（床）上，基本都发现了汞的异常。汞异常浓度值在0.2~1.5ng范围内。汞异常多发育在矿体上盘一侧。从矿体上不同覆盖厚度（1~10米）来看，它对汞气异常的发育影响不大。看来汞气测量方法比化探次生异常的反应深度要大。同时采用汞气测量法，可不同程度弥补次生晕方法的弱点。

表6

岩矿石 标本名称	最小值		最大值		平均值	
	$M_s$	$\eta_s$	$M_c$	$\eta_s$	$M_s$	$\eta_s$
含矿石英脉	15.5	1.00	75.0	3.90	45.2	2.45
绢英岩化 硅化花岗岩	22.0	3.34	26.0	3.26	24.0	3.30
黄铁绢英 岩化花岗岩	18.0	1.41	26.0	3.08	22.0	2.24
不含矿石英脉	18.0	1.52	21.5	2.18	19.7	1.85
混合岩化 花岗岩	6.0	0.84	21.5	2.60	13.7	1.72
不含矿其它 岩脉	10.5	1.80	12.0	2.06	1.2	1.93

（上接第93页）确实是可用的，矿化侵入体的原生矿物在实际上含有的铜要少于无矿侵入体。如果斑岩型矿化的必要条件是铜包含在硅酸盐熔体内，那么早期形成的矿物相就不应该隐匿过渡金属，这些矿物中的高铜含量就是矿化的一个否定的标志。这与凯斯勒等人的观察是相一致的：西半球斑岩铜矿床的黑云母的含铜量的统计都低于无矿侵入体的黑云母含铜量。

本文所得出的结论提出几个有利的途径，以便作进一步研究：

（1）详细研究原生镁铁质矿物中特别是花岗岩的黑云母中铜结合的性质。需要证实这一假设，即在那些早期形成的结晶相中，铜确实进入八面体位置。

（2）岩浆期后热液活动从这些早期形成的矿物中夺取铜的程度。本文假设铜进入这些矿物中是固定的。如果不是的话，那么在岩浆期后液相的生成时期铜的实际位置如何，就不重要了。这样，就几乎可确信铜的迁移是发生在围岩蚀变时，但是必须要更巨大体积的岩石，从中提取铜，以便产生一个相应的斑岩铜矿床。

（3）系统地采集和分析一个地区内和地区之间无矿和矿化侵入体的样品，这样会在更大程度上清楚地检验这一模式的可用性，而不仅仅是应用已发表的可利用的资料。

叶之译自《Economic Geology》，  
Vol.73, No.3, 1978.5, pp397~404

作者：P.G.菲斯