

贵金属矿床, 有色金属矿床, 矿床类型

结 论

就国家和矿床类型而言,金、银、铜、锌和铅分布广泛,其品位,吨位和所含金属的频率分布范围广阔。然而,这些贱金属和贵金属显示出在空间和地质上聚集的强烈趋势。仅4个国家和4种矿床类型就占去了每种金属总量的45~88%。银显示出的空间和地质环境多样性最大。

将已知矿床所含金属(包括过去的产量)对品级作图,得到的图解证明,金属含量一般集中出现在较高品级中,最低品级中含少量金属。74%以上的金、银、锌和铅金属产在平均品位高于所有矿床相应中值平均品位的矿床中;44%的铜产于平均品位高于所有矿床中值平均品位的矿床中。认为较低品位矿床所含金属总量高于较高品位矿床纯属推测,并且可能反映出对矿床之内品位与各组矿床之间平均品位差别的混淆。金属含量对矿化岩石等级吨位的作图清楚地证明,金属含量集中在较高吨位等级中,低于中值吨位等级的金属含量是很少的。

含贱金属和贵金属的特大型和超大型矿床可根据其所含金属异乎寻常的吨位来确定。当按所含金属的多少排序时,矿床总数中头10%的矿床(特大型)占金属总量的70%以上,头1%的矿床(超大型)占金属总量的25%以上。鉴于矿化岩石吨位与所含金属密切相关,所以矿化岩石的吨位可以显示出较大矿床所含的金属占有相似的高的份额。

显然,真正的矿床与矿点不同,它们是极不常见的。本文的分析表明,这些规模异常大的、极其罕见的矿床可能对供应情况产生重大影响。尽管本文作出的数字归纳将为新的发现所替代,但由很少数国家和特大型、超大型矿床占有大多数金属以及对吨位产生主要影响的总体型式,可能仍会保持不变。

(张允摘译)

32-52

贵金属和有色金属矿床模型体系

A. II. 克里夫佐夫等

苗, A II

林强

618.508
p 618.408

建立矿床模型方面的研究,最近十年来在世界一些主要国家得到很大发展。成矿学和矿床地质学的这个方向,无疑有很大远景,并有很大理论和应用意义。

建立矿床模型的客观必要性是由建立预测、普查、评价和勘探矿床的综合样板以提高各个阶段的地质勘探工作效果这些任务决定的。建立模型的条件已经具备,因为目前已积累了成千上万个经过评价、勘探和正在开采的矿床的大量描述性资料。在选择各矿床标志、从中提取最有代表性的,在同一矿石建造类型或地质-工业类型的矿床中经常重复出现的标志过程中,总会总结出一些原始资料来说明它们的特点。已建立的模型的现实意义及其实用价值,已为查明了矿床的分布规律并在考虑矿床模型进行预测时划分出的远景区内发现了矿床所证明。

“矿石建造成因模型”第一次会议的举行,可以算是建立矿床模型工作的开始阶段。从80年代初开始,许多部门的科研所研制了矿床地质模型、地质-地球物理模型、物理-地质模

型,供预测、普查和评价用。

“矿石建造成因模型”第二次会议对问题的成因方面给予了很大注意。除建模方面取得很大进步外,这次会议还显示了用矿床产生假说代替矿床模型的趋势。

国外,主要是美国和加拿大,曾大力研制过带预测-普查方向性的分类-标志模型和地质-成因模型,以及用统计方法建立的“矿量-品位”型定量模型。

建立矿床模型的现状是,模型缺乏在内容和用途上通用的分类。不同研究人员研制的名称相同的模型,在建立方法、要素数目、特点和组合上往往有很大差别。这一切证明这一研究方向的新颖性和动态性。

研制矿床模型的目的,是建立矿床的综合样板,即建立用现有手段和方法可以查明的互不矛盾的特征组合。在建模中,必须遵守类似或相似、代表性和可以外推等条件。模型也应当符合重功能(有一定的指导性)和讲实效(取得实践上重要的预测)的要求。相应地,建模过程包括建立模型本身、研究模型和在具体矿床上应用模型所得到的资料。建模方法决定性地取决于模型的指定用途及其应用方法。

俄罗斯中央有色金属和贵金属勘探研究所在建立贵金属和有色金属矿床模型体系等工作中考虑了这些基本原则。这个模型体系服从于地质勘探工作不同阶段的基本任务(表1)。它具有应用、科学-方法和教学价值。

表1 矿床和矿体的模型体系

模 型	应用领域			
	成矿理论	成矿分析和预测	预测和普查	评价和勘探
矿床的:				
地质-工业定量(统计)模型	×	×××	×/	—
预测-普查(定性)模型	×	××	×××	×
参数预测-普查和普查模型	×	×××	×	—
成因和地质-成因(定性和定量)模型	×××	××	×	—
矿体的:				
形态模型	×	×	×××	×××
富集模型	××	—	××	×××
梯度-向量模型	××	—	×	×××
多因素定量(合成)模型	—	—	××	×××

注: ×号越多表示应用率越高

矿床的地质-工业定量(统计)模型(ПІКМ)建立在反映矿体规模和矿石质量的特征描述和解释的基础上。美国地质调查所研制的ПІКМ立足于矿床的代表性抽样。它以图解的形式表示,反映矿床数目(比例)和其中矿石储量、矿床比例和主要及伴生成矿元素含量之间的关系。在ПІКМ基础上确定最小、最大和概率最大的各级别矿石储量和金属含量的代表性,在评估预测资源时应用。美国地质调查所的ПІКМ未考虑俄罗斯和独联体的矿床。

中央有色金属和贵金属勘探研究所已建立了贵金属和有色金属矿床 FHKM。这些模型不同于美国地质调查所建立的,考虑了金属储量和金属含量的分布。目前已为黄铁矿族各种类型(乌拉尔型、塞浦路斯型、菲利兹恰伊型、鲁德诺阿尔泰型、小高加索型和阿塔苏型)矿床、碳酸盐岩系中的层状铅锌矿床和玄武岩类及安山岩类火山-深成岩带斑岩铜矿床建立了这种 FHKM。在 FHKM 中还分析了金属储量和矿床数目在时间上(按纪)的分布。

每个类型的矿床都有它本身的含矿指标:已聚集的金属数量、其富集程度和含量高低在各种规模级别范围的差别。例如,乌拉尔型中型、大型和特大型含铜黄铁矿矿床,就铜和锌的总储量来说,比塞浦路斯型类似矿床分别大 1、1.7 和 2.6 倍(图 1),这是因为在乌拉尔矿床中这两种金属的富集程度就各个级别的含量来说都比塞浦路斯矿床高(图 2)。

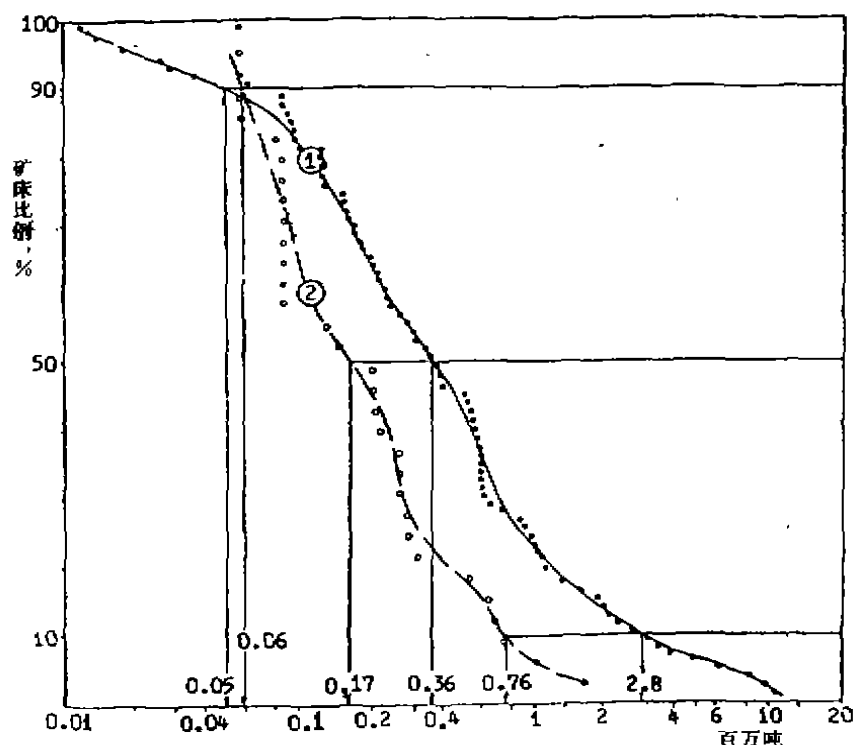


图 1 乌拉尔型(1)和塞浦路斯型(2)矿床铜和锌总储量的分布

FHKM 可用于对新发现矿床可能规模的预测资源进行专家评估。根据 FHKM 还可以确定对某些类型矿床有专属性的大的地质构造单位的成矿潜力。具有重要意义的是利用这种模型可以评价地质史上不同时期的含金属量。

反映在 FHKM 中的矿床定量特征是评估不同成因和矿石建造类型矿床相应成矿过程和系统金属量的基础。

矿田和矿床的预测-普查(定性)模型(IHKM)实际上是有目的的描述性分类-标志模型,由根据不同方法和不同特征反映的互相关联和并列从属的含矿空间要素组成。IHKM 的用途是为大比例尺预测和普查提供科学-方法保证,反映在图例以及对相应图件和地质勘探工作阶段的要求上。

中央有色金属和贵金属勘探研究所建立的标准矿床模型涉及最重要类型的贵金属和有

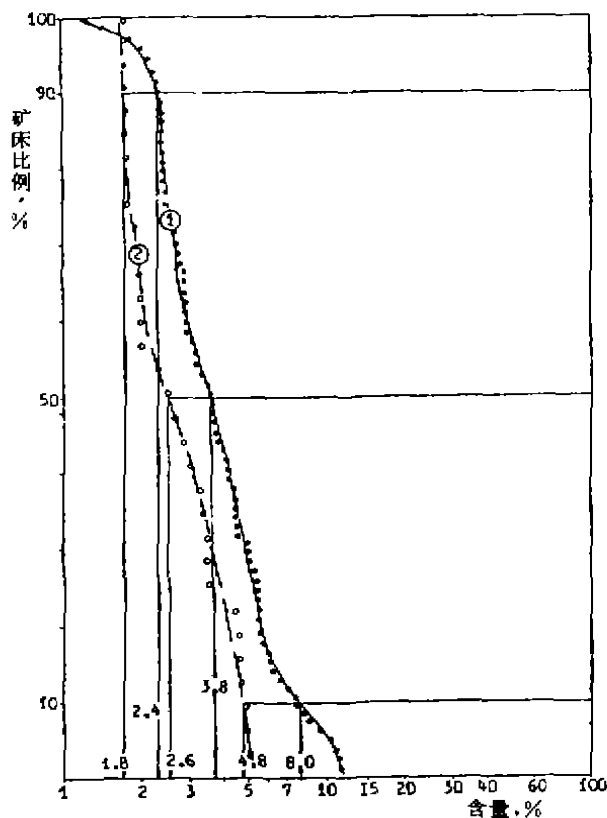


图2 乌拉尔型(1)和塞浦路斯型(2)矿床铜和锌总含量的分布

矿体存在及其深度的间接标志,这些标志是在矿物、地球化学、地球物理普查方法和详细矿物学及地球化学填图基础上查明的。矿体上部以广泛出现硅化和冰长石化、原生晕中有Hg、As和Sb聚集、地球化学垂直分带系数即 $\frac{Cu \cdot Ba \cdot As}{Pb \cdot Co \cdot Mo}$ 值高为特征。该类型矿床上部100米地段所含的矿石最富,是其主要工业价值所在。

综合不同性质的原始资料后可查明IIMM各要素之间的功能关系(用图解对比法凭经验确定的)和模型要素特征由于矿体侵蚀截面水平不同而发生的变化。

借助IIMM可建立预测和普查准则以及标志体系,并在此基础上确定一套方法,用这套方法或者可以发现具体地质-成矿环境和景观-地理环境中的一定地质-工业类型的矿床,或者可以论证没有相应矿床存在。

矿床的参数预测-普查和普查模型(IIMM)由含矿空间要素组成。这些含矿空间要素具有定量表达式或可作定量描述。在建立这种模型时要利用矿床主要地质要素的线性规模,以及标志矿体和近矿空间不同部分的地球物理和地球化学异常的规模和强度。IIMM主要为应用目的而建立,尽管用它也可以解决地质-成因问题。在局部预测和普查中,利用参数模型可

色金属矿床,建立在综合分析大量不同原始资料的基础上。

IIMM反映的是一套在给定的工作阶段(给定的比例尺)可以查明的要素标志。预测和普查对象(矿田和矿床)的模型被视为相应区域地质构造及其深部构造的一部分。在矿区范围内划分能够决定矿田在矿区构造、含矿构造建造组合及其要素中位置的要素总体。

IIMM用平面图和剖面图系统加以反映,以表现最关键要素的相互关系。IIMM要素的等级取决于所预测的单位。例如,在为卡拉姆肯矿结(图3)建模时,就分出了组成含矿建造的火山岩总体,并表示了凹陷构造的位置。大断裂集中在火山-构造凹陷边缘,控制金属矿的分布。隐伏的岩床状花岗岩类侵入体是潜在含矿火山-深成杂岩中的重要要素。这些侵入体表现为重力异常。根据在IIMM中反映出来的其他地球物理和地球化学资料查明了矿结范围内的含矿地段。

在IIMM基础上,根据数据总体可以评估矿体受侵蚀程度。金-冰长石-石英脉体的IIMM(图4)可反映有该类型

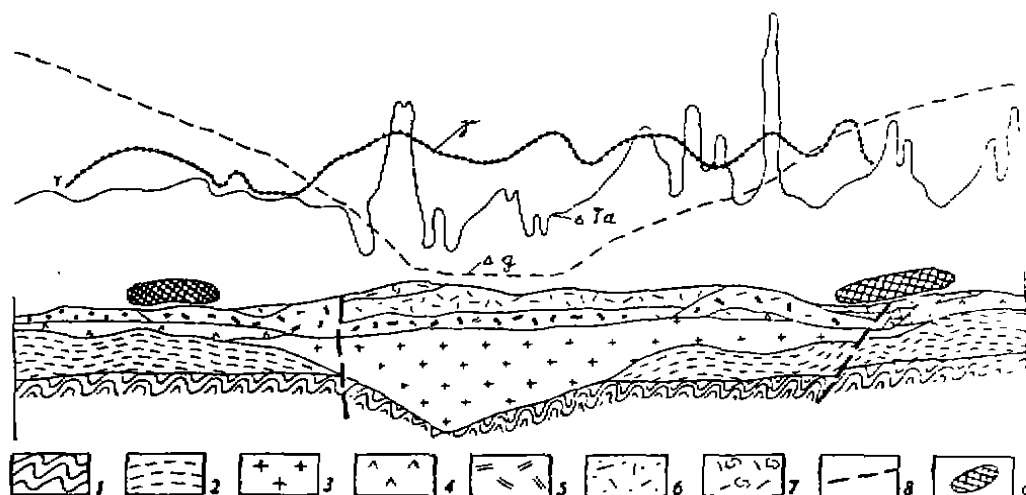


图3 卡拉姆肯矿结(含金-银矿床)模型

1—基底结晶片岩和片麻岩;2—上扬斯克杂岩中的页岩;3—花岗岩;4—安山岩被和安山玄武岩被;5—流纹英安岩被;
6—流纹凝灰岩;7—流纹熔结凝灰岩;8—断裂;9—含矿地段

以估算在近矿空间可能存在的矿体离随意观测点(或其总体)的远近,也可以优化普查网的密度。中央有色金属和贵金属勘探研究所已为黄铁矿族矿床以及斑岩铜矿床建立了 IIMM。

在建立 IIMM 时利用以下近矿空间要素:含矿空间、含矿侧部空间、矿上空间、矿上侧部空间、矿上边缘空间、矿下空间、矿下侧部空间和矿下边缘空间。这些要素用包含在矿床定性预测-普查模型中的标志体系描述。

在黄铁矿族矿床的 IIMM 中利用了以下指标:容矿剖面含矿、矿下和矿上部分的厚度以及个别岩段和岩层的厚度;不同岩性的岩石比例;含矿构造的规模;以轴的比值($L:H:M$)表示的交代带和矿体参数;容矿构造周边的倾角;硫化物在围岩总量中的含量;主要成矿组分的比例;原生和次生地球化学晕的强度和晕分带指标。模型的地球物理特征以用不同方法确定的岩石和矿石性质为基础来鉴定。

IIMM 用专门的图解形式反映,图解中包含地质、矿物-地球化学和地球物理标志、其定量特征和参数指标。IIMM 的基础是矿床的几何化预测-普查模型,但要补充主要要素的参数(表2,图5)。

表2 霍洛德宁矿床 IIMM 的主要特征

含矿和近矿空间	参 数					
	L(米)	H(米)	M(米)	L/H	L/M	H/M
含矿空间	5600	1800	550	3.11	10.18	3.27
矿 体	5000	900	150	5.55	33.33	6.0
含矿侧部空间	30000	1800	400	1.66	7.5	4.5
含矿空间+含矿侧部空间	8600	3600	475	2.39	18.10	7.58

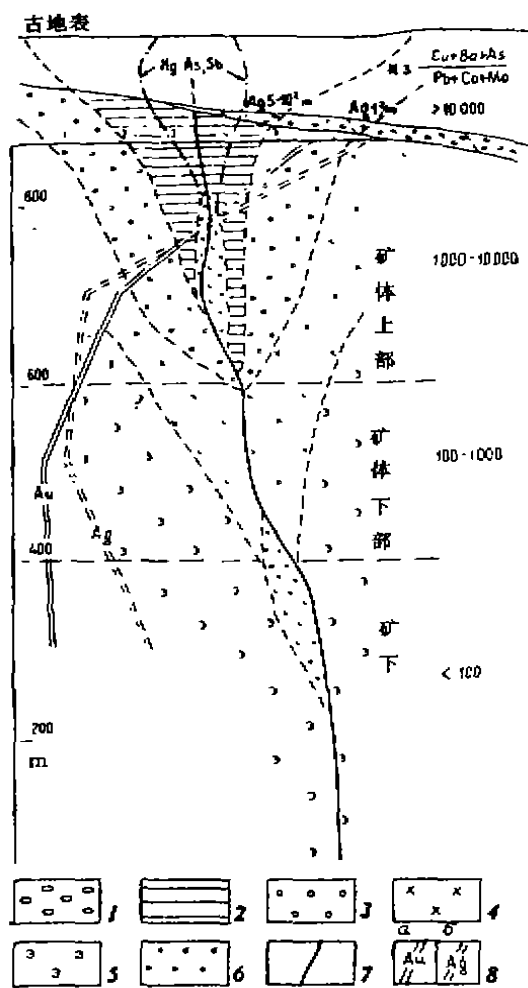


图4 金-银矿床矿体的预测-普查模型

1—松散沉积物;2—冰长石化晕;3—硅化晕;4—绿泥石化晕;5—绿帘石化晕;6—石英-水云母交代岩;7—矿体;8—金(A)和银(B)含量分布

不到相应值的0.5时)可以保证至少两次穿过要找的对象。普查面积取决于平均(而不是更高的最大)线性参数,而普查深度取决于IIMM相应轴在空间的位置和长度。

在建立矿体的形态模型(MM)时,广泛利用矿体线性参数即三个互相垂直的轴:纵轴(L)、横轴(H)和厚度轴(M)的差和比例。这些特征不论矿体的空间方位如何都可确定,这就保证了所建模型的必要可比性和再现性。MM作为重要组分之一可加入多因素模型。在MM中要利用L:H:M比例或这些特征的对,具体视矿体形状特点而定。三个轴的规模都很大的矿体,在理想情况下最接近于H:M比值变化不定的半椭球体。脉状和厚度小的扁平矿体用L:H比值反映。MM也可以用传统的等值线平面图(套叠投影图)形式表达,极便

在资料积累过程中,要把IIMM的知识库以含矿空间不同部分的可靠而结构化的地质信息形式输入矿床预测、普查和评价信息-分析系统数据库。知识库利用数据库的全部标志,同时可以通过其可能(和必要)组合的办法得到补充标志。在此基础上估计该观测点在近矿空间的位置,并确定该观测点离可能含矿空间或矿体的远近。

在理想情况下,含矿空间与含矿侧部空间一起可视为一个具L、H和M轴的旋转椭球体。矿上空间和矿下空间相应地为半椭球体。将矿床的IIMM转换为接近不规则的旋转椭球体的理想形状,矿体位于该旋转椭球体中心(图6)。

观测点(露头、钻孔、坑道或其总体)可在含矿(A)、矿上(B)和矿下(B)空间内占据任何位置。当观测对象点位于近矿空间的矿上、矿下或侧部时,可算出它至含矿部分的距离,而当观测对象位于含矿部分时,则可算出它至矿体的距离。所求的距离(尤其适用于观测对象位于矿上空间)可通过相应物体的长度轴(L_{HF})、宽度轴(H_{HF})和厚度轴(M_{HF})平均值算出。观测点的距离最大表明矿上空间的规模最大。距离最小表明观测点位于矿上和含矿空间的分界处。从三维上看,该观测点相当于两个半椭球体的中心,半椭球体的半轴决定于相应空间规模的平均值(图7)。

在估算普查网密度时,钻孔沿走向和倾向的间距可通过要找的对象(含矿空间)的规模确定。这样得到的参数(当普查网的间距不

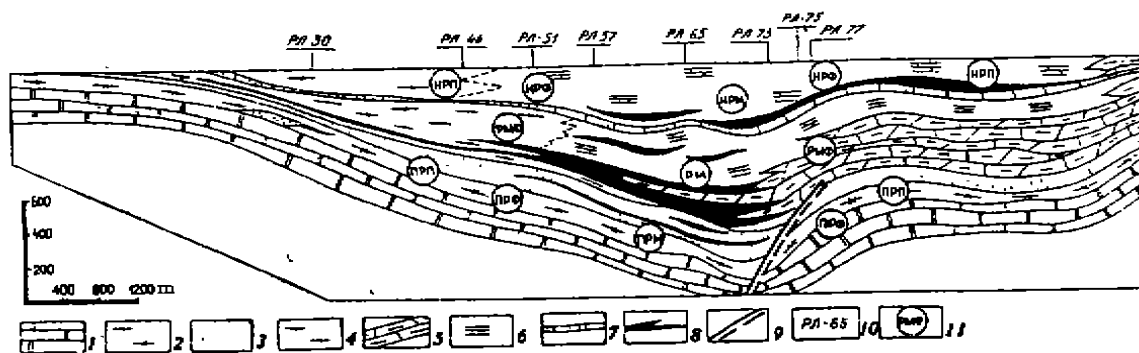


图5 布里亚特霍洛德宁矿床的参数模型

1—下伏地层(大理岩化石灰岩和白云岩);容矿地层:2—有花岗岩侵入的石墨-石英-云母片岩和石英-云母片岩;3—石墨质石英砂岩,含石墨云母石英岩和片岩;4—不含碳酸盐的和含少量碳酸盐的石墨质石英-云母片岩和云母-石英片岩;5—含碳酸盐的石墨-石英-云母片岩;6—含碳酸盐的石墨-石英-云母片岩和石墨-云母片岩;7—含石墨的石英-云母-碳酸盐砂岩;8—矿层;9—同沉积期断裂;10—勘探线;11—地质空间各部分:PM=含矿空间,PMΦ=含矿侧部空间,HPH=矿上边缘空间,HPΦ=矿上侧部空间,HPM=矿上空间,HPH=矿下边缘空间,HPΦ=矿下侧部空间,HPM=矿下空间

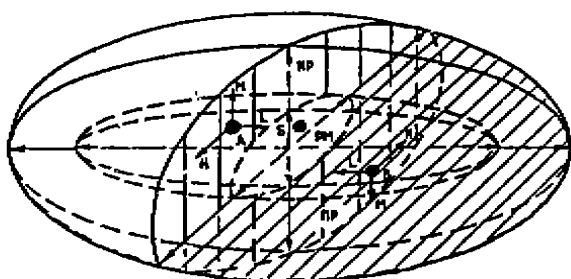


图6 观测点在近矿空间的可能位置

A、B、C—分别位于矿上、矿下或含矿空间的观测点;M、H、L—观测点A、B分别按厚度、倾斜和在横向上至含矿空间的距离

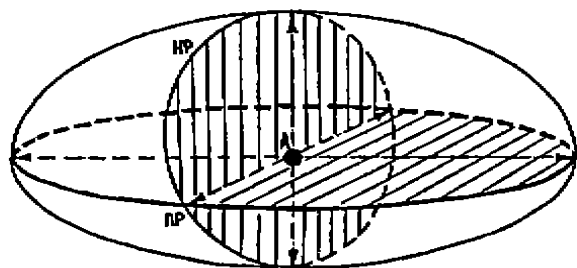


图7 观测点A至含矿空间距离的估算

图例见图6

于划分不同级别的不均质带,即大部分矿石储量集中地段。

图8表示的是根据L:H比值(其中以1~1.5级和1.5~2级为主)归并为一组的金矿床。在此基础上,根据在普查时得到的H值可以估计矿体长度,也可以使评价工作中见矿断面数减少到最低限度。

在MM基础上优化评价和勘探网的办法对黄铁矿族矿床研究得比较详细。一般的工作顺序是:根据在矿体横剖面上得到的H:M值,在标准MM基础上测出L:H比值,并估算矿体沿L轴的可能长度。相应地,随后切穿矿体的地点布置在离第一条剖面不超过模型长度一半(0.5L)的地方。根据每条新剖面的数据,重复测定矿体长度和新的见矿断面的分布情况,直到把矿体完全圈定出来。

图9表示的是上面介绍的在圈定矿体和矿体评价工作中按阶段(逐步)

优化横穿矿体的见矿断面的布置方法(以南乌拉尔波多利斯克含铜锌黄铁矿矿床为例)。将

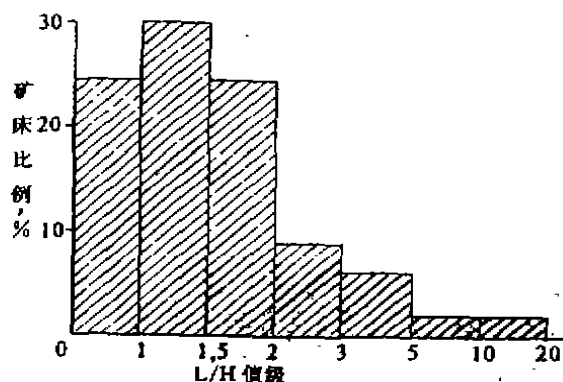


图8 金矿床(矿床数目)按矿体沿走向长度L和沿倾向长度H之比值的分布

包括17个脉型矿床(27个矿体)和13个矿化带型矿床(18个矿体)

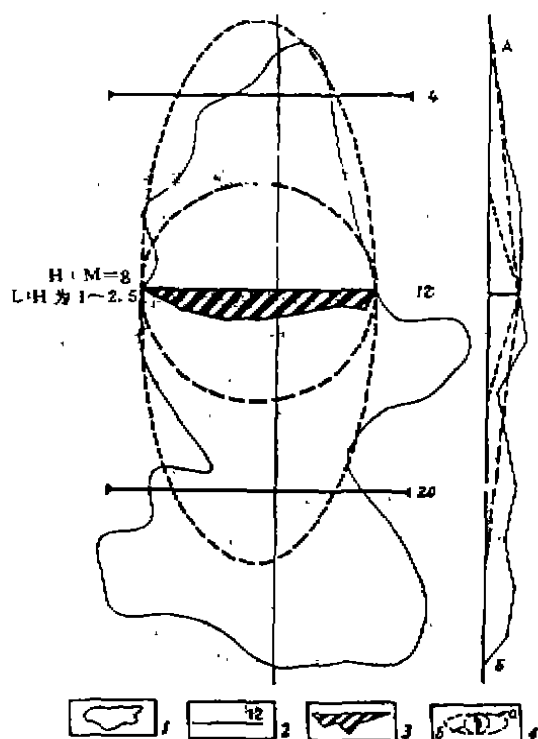


图9 逐步优化黄铁矿型矿体见矿断面的分布示意图

(解释见正文)

1—根据详细勘探资料矿体在平面图上的界线(AE—纵剖面);
2—断面及其编号;3—矿体在完整截面上的形状;4—计算矿体的范围:a—最小的,6—最大的

在MM基础上优化普查网过程中得到的数据与该矿床详细勘探结果的对比表明,二者在矿体面积、体积和数量方面相差无几(不到百分之五)。而且,利用MM使探矿断面的数量减少三分之二。

矿体的富集模型(KM)可反映金属含量分布。根据KM可以查明成矿分带性,确定其主要特征及含量增减的主要趋势。KM以矿体及其剖面的套叠投影图形式表示,在套叠投影图上标明金属等含量线。单个矿体的KM可通过查明某些类型矿床的主要特点建立。KM可用于划分不同级别的不均匀带(富集地段),可作为优化评价和勘探网的基础之一加入合成(多因素)模型。图10表示的是在含铜黄铁矿矿层KM基础上划分不同级别不均匀带的一个例子。用梯度-向量表示的KM应用得更广,将在下面介绍。

梯度-向量(形态和富集)模型(IBM)是在分析矿体厚度及矿体中主要成矿元素含量分布基础上建立的;也利用联合指标(米百分比,米克)。利用梯度-向量分析法可得到在矿体套叠投影图、矿体剖面图和三维图上不同方向的质量“流”和含量“流”的定量特征。所应用的指标,其变化方向和强度(梯度)以按矿体轴取向的综合玫瑰图形式表示。在许多情况下,考虑矿质搬运剂移动的可能方向和矿质“按流”分布情况编制标上质量“流”和(或)含量“流”综合路径-轨迹的矿体套叠投影图和剖面图的效果很好。

IBM的实用意义取决于在考虑厚度和含量主要变化方向,以及根据对估计上述参数沿矿体轴变化的要求来优化评价和勘探网密度的条件下选择这两种网方向的可能性。例如,图11表示的就是根据计算的参数梯度变化相当于给定值的矿体轴估计距离的一个例子。IBM为定量分析矿石

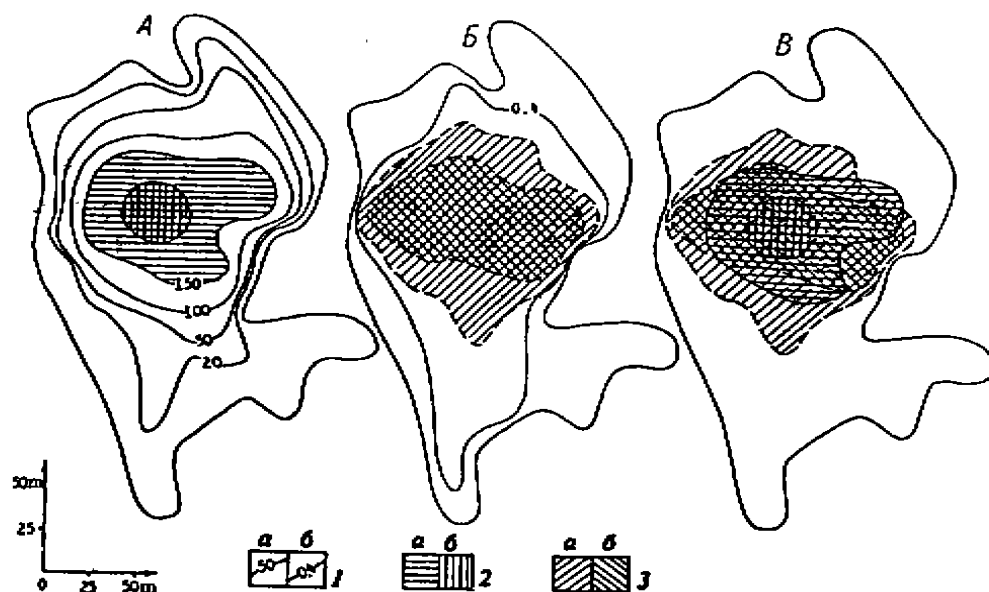


图 10 厚度(A)、铜含量(B)、厚度和铜含量(B)在南乌拉尔内奥泽尔内矿床套叠投影图上的分布
1—等厚度线,米(a)和等含量线,%(b);2—一级(a)和二级(b)厚度不均匀区;3—一级(a)和二级(b)铜含量不均匀区
成因构想提供了极大可能。这将在下面几节中阐述。

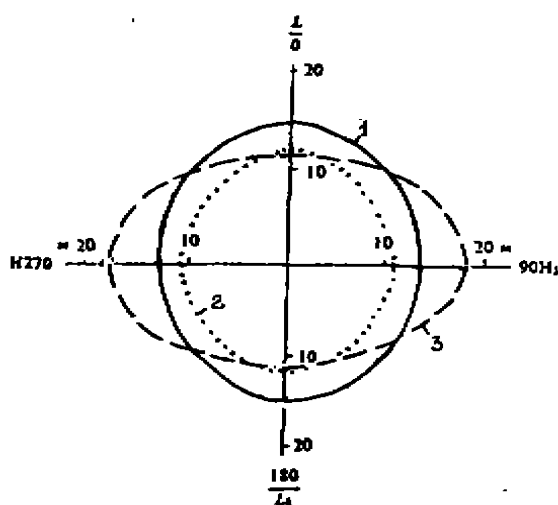


图 11 矿体轴上厚度(1)、铜含量(2)和锌含量(3)减少
梯度占每个轴上其平均值 20% 的距离分布

矿体 IBM 的结构细节取决于观测网密度。勘探剖面网稀,不能完全查明富集不均匀体或矿柱,即集中了大部分储量的矿体。另一方面,勘探剖面网过密,通常能查出所有的局部变化,但掩盖了矿体的富集模型。梯度平均值取决于勘探剖面间距。这个关系曲线接近双曲线(图 12)。观测网稀时,梯度变化小,原因是低级富集不均匀体的参数少于或大体等于勘探网格。当观测平均间距接近高级富集不均匀体大小时,梯度急剧增加,而且梯度场结构复杂化,组分含量增加的一般化方向消失,无梯度和低梯度地段的面积明显减小。因此,根据图 12 这样的图解可以得到观测网逐步加密的极限值,以某些方向上的梯度给定值论证观测网密度。

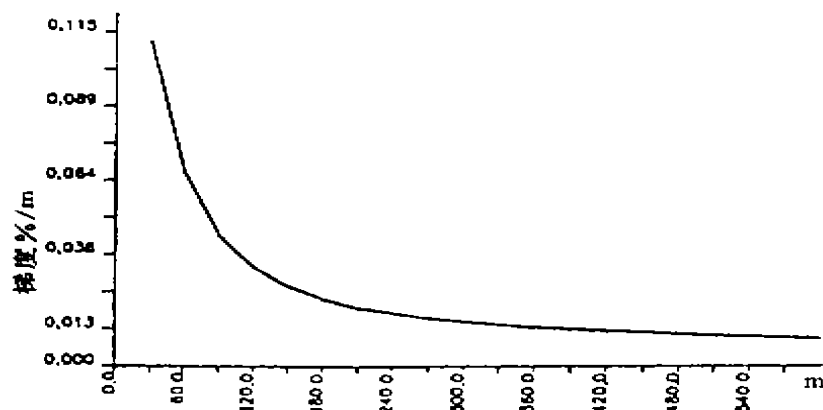


图 12 菲利兹恰伊矿床铜、铅、锌总含量(8 个方向的平均值)与观测网密度的关系曲线

含量向量方向也随观测网加密变化。观测间距变化了,向量的主要方向就会明显变化。观测间距变小,不仅梯度值有变化,所得到的向量方向也有变化。对于矿体的大多数模型来说,随着观测网加密,向量间的平均角度明显加大。向量方向急剧变化发生在双曲线转弯区。

矿体的合成评价-勘探(多因素定量)模型(KOPM)以形态、富集和梯度-向量模型一体化,以及储量计算参数的一系列统计指标为基础。该模型用于优化评价和勘探网,办法是将所研究的对象与标准模型对比,并随着资料积累“逐步”校正评价和勘探网的参数。

根据合成评价-勘探模型可以按照对矿体研究程度的要求最终选出评价和勘探网的参数,即根据这种模型可以:

1. 优化勘探工程的布置,以查明不均匀带——矿柱,即矿石和(或)金属储量最大、金属含量最高、厚度最大和金属最集中等地段,并使这种不均匀带几何化;
2. 选择评价和勘探网密度,以按给定精度确定一套计算特征和计算储量;
3. 论证评价和勘探网,以按给定精度查明厚度、含量和储量朝一定方向的变化性质。

这种模型是矿体评价和勘探全新方法的客观基础,这些方法建立在灵活的先进工艺基础上,可“按意旨”改造,并可随信息流增加进行校正。建立这种模型的原则及其应用的可能性将在下面用几个例子说明。

对于原生金矿床来说,如其开采取样密度高($4 \times 4 \sim 7 \times 7$ 米),则可得到不同形状和取向的评价和勘探网方案,将其与不同级别的矿体和矿柱形态,以及与地质统计参数(即反映沿倾斜和走向变化平均各向异性的自相关半径)相比较。在多变量放稀评价和勘探网的基础上,可得到含量、厚度和米克的“误差(相对误差)-勘探网格面积”的关系曲线。多变量解决结果可用不同形状的网格(沿倾斜和走向各边的比值)曲线图,即沿倾斜拉长的网格($1:0.3 \sim 0.5$)、正方形网格($0.85 \sim 1, 1 \sim 0.85$)和沿走向拉长的网格($1:2 \sim 3$)曲线图表示。图 13 表示的是达拉宋矿床梅德韦杰夫矿脉的曲线图,表明了计算参数的误差与评价和勘探网取向的关系。

为了论证选择砂矿勘探有效手段,首先要确定勘探系统,分析富集模型(砂矿结构),然后再按有用组分粒度参数计算组合样品体积,标准砂矿和不同勘探系统的多因素分析表明,富集模型对于将砂矿结构复杂程度分组和选择合理勘探网和勘探系统——点状工程(不同直径的钻孔,浅井)还是线性工程(探沟),具有决定性意义。对绝大多数冲积砂矿来说,为了

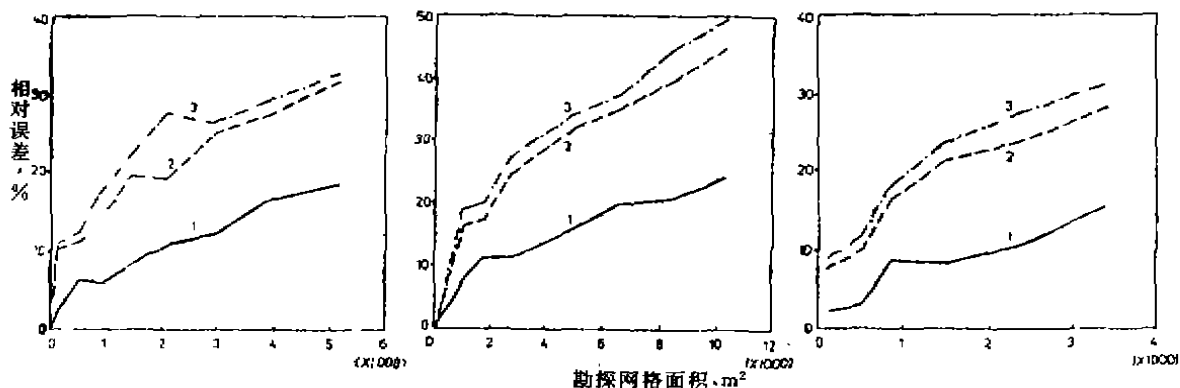


图 13 勘探网密度不同的误差曲线图(达拉宋矿床梅德韦杰夫矿脉)

1—厚度, 2—含量, 3—米克

查明内部结构特征不同的含矿层的形态特点, 可以利用勘探线间距超过工程间距 10~40 倍的勘探网。在确定勘探线上的勘探工程间距时, 要对勘探剖面进行几何统计分析, 求出垂直于砂矿的自相关函数。计算的自相关半径一般相当于“波”长的 1/40。其加倍的值大体相当于局部不均匀体的宽度, 平均为 10~60 米。勘探网的几何形态用逐步放稀的方法并根据偶然和允许误差分析结果选择。对标准方案来说, 用分析法计算主要参数误差, 在多数情况下不超过 20%, 其范围为: 对矿层厚度来说为 2.9~13%, 对平均含量来说为 8.7~20.3%, 对垂向储量来说为 9~39.4%。根据放稀方案选择勘探网主要取决于垂向储量误差相对标准方案误差来说不超过 20%。

以奥罗图坎河砂矿的多因素模型为例(图 14)表明, 按 $(200 \sim 400) \times (10 \sim 20)$ 米网度布置的钻孔, 可保证算出的垂向储量误差在 20% 以下。

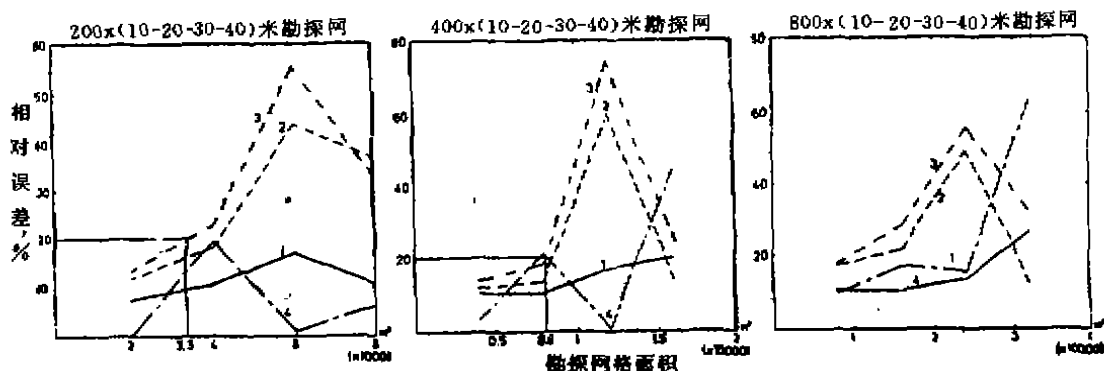


图 14 勘探网密度不同时奥罗图坎河金砂矿主要参数测定误差

1—厚度, 2—含量, 3—垂向储量, 4—轮廓面积

以布里亚特的奥泽尔内矿床为例可说明选择黄铁矿型多金属矿床勘探网参数的方法。为了根据不同方向克里金影响带的大小确定勘探网格的合理形状,建立了厚度和金属总含量分布各向异性椭圆形(图 15)。勘探网格的拉长要与自相关最小半径成比例,而自相关最小半径与矿层长 L 和宽 H 方向一致,或与陡倾矿体的水平方向和垂直方向一致。

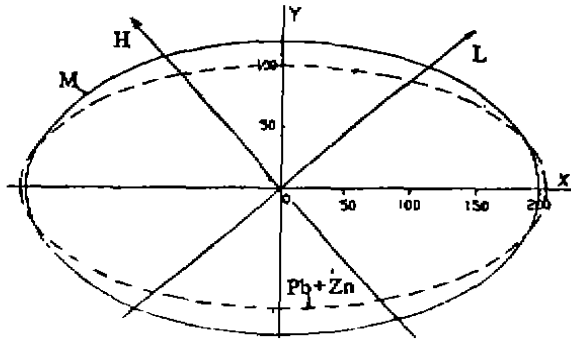


图 15 矿体厚度和铅、锌总含量分布各向异性椭圆形(布里亚特的奥泽尔内矿床 8 号矿体)

M —矿体厚度, H —矿体宽度, L —矿体长度

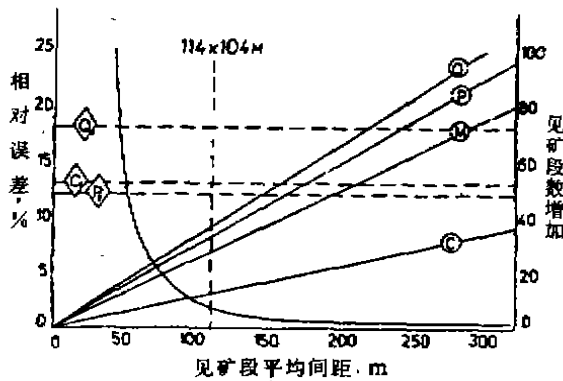


图 16 以布里亚特的奥泽尔内矿床一个矿体为例的勘探网密度优化

偶然误差: M —厚度的, C —铅、锌总含量的, P —矿石储量的, Q —铅、锌总储量的; 允许误差: C_1 —铅、锌总含量的, P_1 —矿石储量的, Q_1 —铅、锌总储量的

成因金矿床建立了 KTM。

硫化物-硅酸盐系统中的成矿 KTM 是以塔尔纳赫矿床组为例建立的。根据这个模型可以定量估计硫化物物质在向前推进的含矿熔流体中的分布情况。根据对由浸染状及与其相连的块状矿石组成的矿体的密度结构以及相应密度流结构的分析查明了动力因素在矿质分布中起重要作用(图 17)。同时确定了浸染状矿石组成的矿体和块状矿石组成的矿体有原则

计算的参数和储量可能有的偶然误差,象金矿床一样,也是用多变量放稀法测定。而且,经验平均误差可用对勘探网方案中的勘探见矿断面数加权或对与放稀倍数相反的数值加权的办法加以标准化。结果可得到误差与见矿断面平均间距的线性关系(图 16)。

估算 $Pb+Zn$ 平均总含量、矿石和金属储量的允许误差在采矿技术经济指标基础上根据技术经济论证书材料计算。勘探网密度或勘探见矿断面的平均间距则根据所采用的储量允许误差和平均偶然误差比例(在储量无亏损开采概率为 95% 条件下)选择,就是说,平均偶然误差应比允许误差小一半($r=2,0$)。

中央有色金属和贵金属勘探研究所已建立的一系列评价-勘探模型以极有代表性的统计数据为基础,在国内外尚无先例,可以保证用优化法高效地解决地质勘探工作结尾阶段有色金属和贵金属矿床研究问题。

成矿系统和矿床的定量地质-成因模型(KITM)以相应成矿系统和矿床的地质模型为基础,用成矿过程的主要要素描述。

中央有色金属和贵金属勘探研究所已为深成成矿系统、斑岩铜矿热液再循环近侵入体成矿系统、黄铁矿型海底热液再循环成矿系统,以及多源热液变质

区别,这是二者沉积和形成机制不同造成的。通过分析解决了把向前推进的硫化物-硅酸盐熔融体按密度分离的问题,可以估计出不同半径的硫化物颗粒在熔融体剩余密度、粘度和侵入的线性速度值不同的条件下的位移轨迹。为了建立和对比不同半径和剩余密度的颗粒迁移轨迹(包括由于矿滴接合而发生的变化),利用了相应数值的比值,从而可以避免由于选择熔融体主要特征值不当而出现的不确定性。

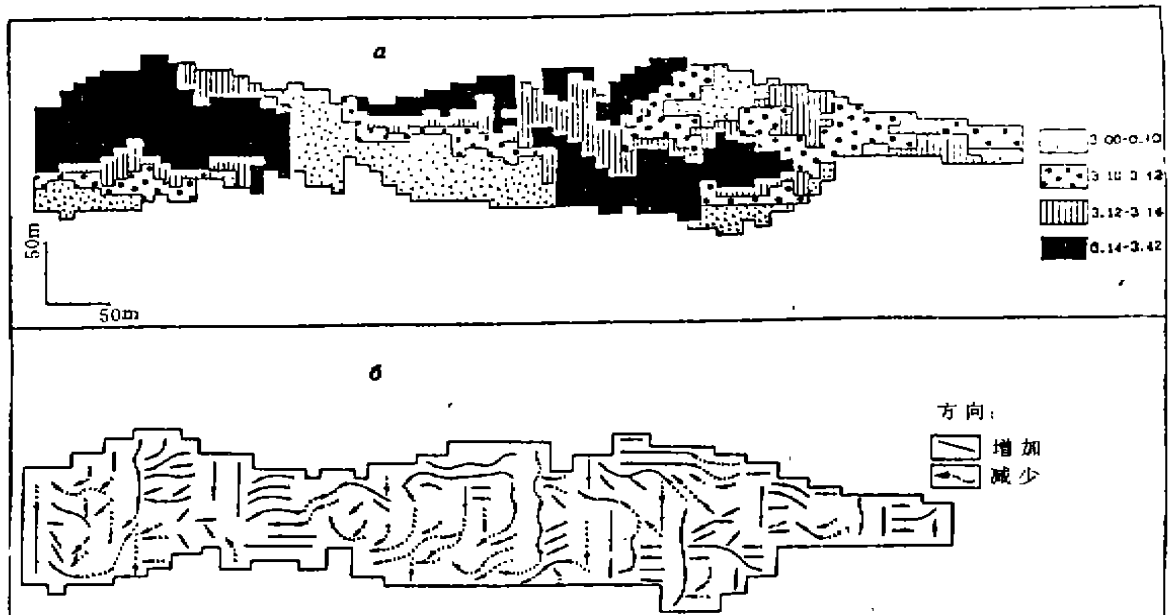


图 17 浸染状矿石在十月矿床 86 号纵剖面中的密度分布(a)和密度流结构(b)

根据这种 KFTM 可以估计硫化物矿滴迁移的距离及其向侵入体底部位移的轨迹,从而可以分出侵入体的“补给带”及其在形成浸染状硫化物物质聚集方面的潜力。根据 KFTM 可以推测含矿侵入体三种主要成分即硫化物(块状矿石)、硅酸盐-硫化物(浸染状矿石)和残余硅酸盐的不同速度的位移,因为其每一种成分都具有其固有的、与其他成分截然不同的流变性质。这些作用过程使硫化物熔融体从其集中地段,从浸染状矿石带自行位移,使不同部分的硫化物物质合并在一起,增加其堆积规模,还能使浸染状矿石脱离补给带,在侵入体底部拗陷处晶出。另一方面,当硫化物矿滴沿陡度小于熔融体上接触带的轨迹位移(角度收敛)时,一部分矿质可以聚集在侵入体上盘。

总之,根据这种 KFTM 的主要指标,考虑必要的物质平衡,可以恢复向前推进的硫化物-硅酸盐熔融体的分离过程和成矿过程,并用计算-几何方法加以表达。

斑岩铜矿对流-再循环成矿系统的 KFTM 是根据经过详细研究的矿床,即乌兹别克斯坦的卡利马基尔矿床、哈萨克斯坦的阿克托盖、艾达尔雷、博谢库尔矿床和美国的多斯勃列斯矿床建立的。这种模型以矿物-地球化学特征为基础,在建立这种模型时利用了用梯度-向量表示的矿床富集模型。

通过对铜含量在卡利马基尔矿床剖面中分布的梯度-向量分析发现了一种极有意味的现象,即富集流在成矿带中转弯,在倒转界面上改变方向(图 18)。在富集流的上升支流,矿

石中的铜含量正梯度明显增加(直到倒转界面),然后为负梯度代替。负梯度在富集流“拐”点上,即在对流环上升支流被下降支流代替的点上达到最大绝对值。根据几条富集流线路计算的矿体周围对流环的平均半径约为 750 米。

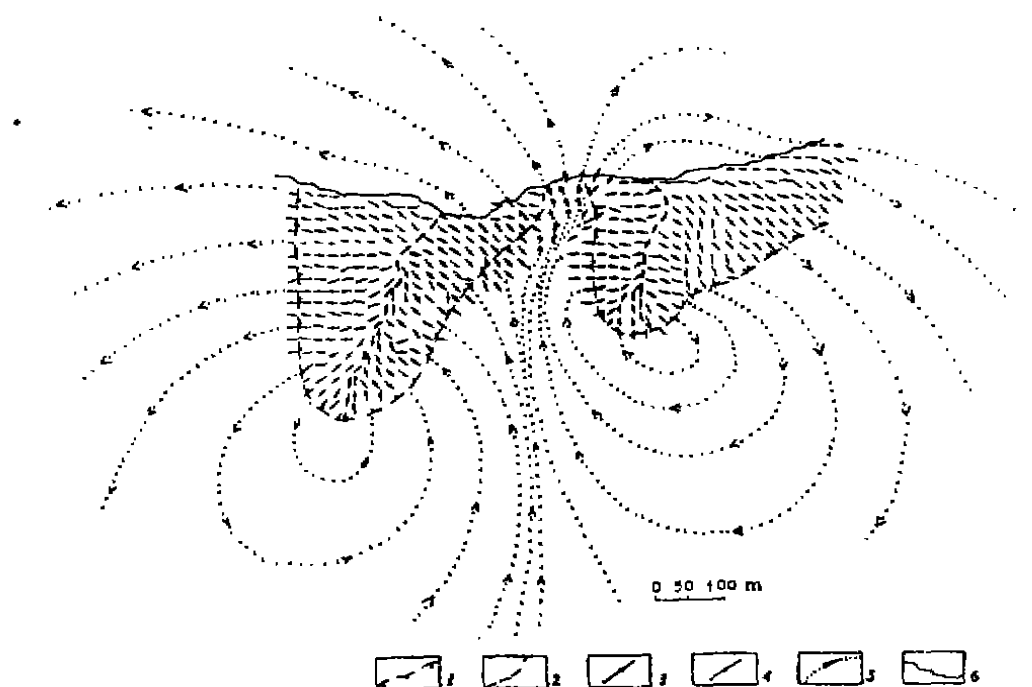


图 18 铜的富集流在乌兹别克斯坦卡利马基尔矿床剖面中的结构

1—工业矿石边界;2—铜含量梯度倒转界面;铜含量变化向量;3—增加,4—减少;5—溶液在对流环中的流动线路(复原);6—露天场梯段

根据铜含量在阿克托盖矿田分布的梯度-向量分析查明了富集流结构,确定了其主要定量特征。在矿田区内,至少可分出六个独立系统,沿半径发散并穿过表现明显的倒转界面的富集流都位于这些独立系统的中心(图 19)。在成矿系统范围内圈出了矿下、矿体和矿上排矿带,其边缘区为聚矿带即吸收带。在相联的成矿系统界面上,聚矿带表现为几条很密的近直立方向的下降流带。排矿带在该矿床成矿系统水平截面上的横向大小达 3 公里。

总的来说,阿克托盖矿田代表一个结构复杂的多中心系统,具有几个对流-再循环流的主干排矿地段。这些地段在水平断面上面积最小,这决定了成矿溶液的速度反差。

在 KTM 的垂向和水平断面上查明了富集流的结构。对流环可能具离心结构,富集流线路在聚矿带中广泛发散,在排矿带中聚集,随后按收敛—扩散原理分叉。

溶液排矿带分四个亚带(图 20):(1)矿下亚带(金属含量由背景含量增到边际含量);(2)下部矿体亚带(含量由边际含量增到最高含量);(3)上部矿体亚带(含量由最高含量降到边际含量);(4)矿上亚带(含量由边际含量降到背景含量)。下部和上部矿体亚带之间有一条含量倒转线,这条线可能就是最大成矿界面。在总结一组矿床研究资料的基础上,为上述每个带和亚带确定了岩石中铜含量相对于背景含量 K_0 (定为 1) 的增、降梯度。例如,在聚矿带

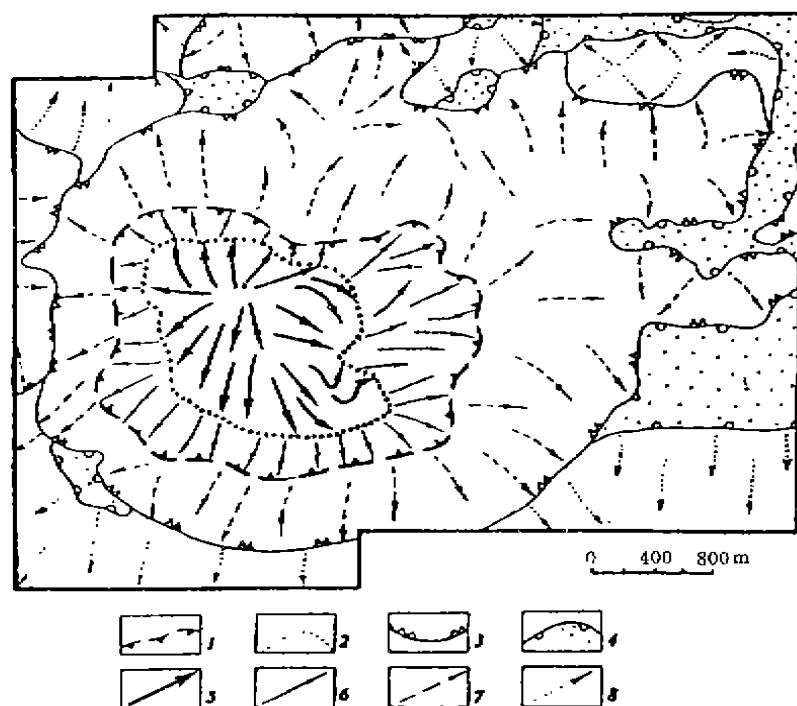


图 19 哈萨克斯坦阿克托盖矿田(片断)铜富集流结构

1—矿体边界;2—铜含量梯度倒转界面;3—溶液排矿带界线;4—停滞带界线;5—矿体中铜含量增加的富集流;
6~8—铜含量减少的富集流;6—在矿田中;7—在矿上排矿亚带中;8—在聚矿带即吸收带中(解释见正文)

内每 100 米梯度不到 $10^{-2}K_0$, 在矿下石英核中为 $0.10 \cdots 0.15K_0$, 在矿下排矿亚带内为 $-(4 \cdots 5)K_0$, 在下部矿体亚带内为 $+(20 \cdots 50)K_0$, 在上部矿体亚带内为 $-(30 \cdots 40)K_0$, 在矿上亚带内为 $-(1.0 \cdots 0.55)K_0$, 而在矿上亚带附近为 $-(0.01 \cdots 0.04)K_0$ 。

总之,根据已建立的斑岩铜矿成矿系统的 KTM 可以确定其主要参数,首先是溶液吸收带(聚矿带)和排矿带的规模比例。在矿体中确定的铜含量倒转带(线)可用来测定矿体侵蚀截面水平和估计保存下来的矿量规模。已建立的 KTM 必须用溶液流的一系列水动力学特征以及其物理-化学状态相应变化的分析结果加以补充。

海底热液-再循环系统的定量模型(CIPC)是根据黄铁矿族矿床、现代大洋硫化物形成产物的研究结果,以及数学和热力学模拟结果建立的。

为了确定 CIPC 的可能形状和几何参数,曾利用了南乌拉尔布里拜矿区的详细研究结果,该矿区的侵蚀截面揭露出 CIPC 不同部分(产在不同深度上的矿床中的溶液排矿带、吸收带)以及相当于能量来源地和上升水流地段的侵入体带和近侵入体带。考虑了该矿区岩石(主要是化学成分相对均一的玄武岩类)改造程度、新形成的矿物组合在空间上的分布情况,以及地球化学测量结果。接着又用梯度-向量分析法确定了铜含量在整个矿区内的分布特点。结果建立了铜的富集流复原图,并估计出 CIPC 不同带在水平断面上的可能规模(图 21)。

在对复原的 CIPC 结构进行数学模拟时,考虑了其线性参数(图 22);了解了温度场(以

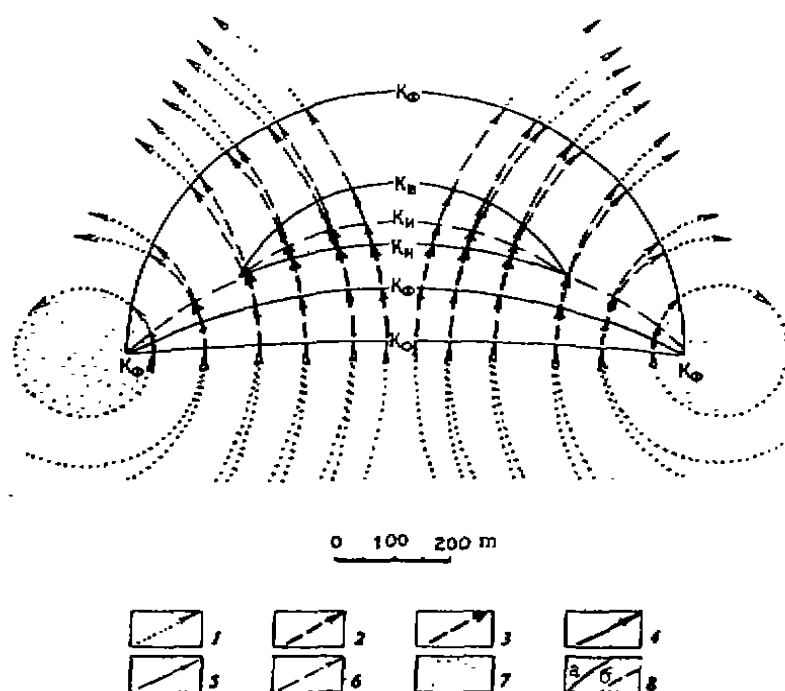


图 20 富集流在斑岩铜矿对流-再循环成矿系统内部的结构模型

含矿空间各带和亚带中的富集流:1—聚矿带(吸收带)中的;2—矿下排矿亚带中的,铜含量从 K_0 增到 K_1 (2);从 K_0 增到 K_H (3);4、5—矿体中的,铜含量从 K_H 增到 K_0 (4)和从 K_0 降到 K_B (5);6—矿上排矿亚带中的;7—停滞带;8a—带和亚带界线,8b—铜含量梯度倒转界面(解释见正文)

等温线表示)情况;画出了流体流动线路,并估算了其速度;查明了金属在 CIPC 中的分布,并划分了金属吸取带和沉淀带的界线。所求出的温度值、流体运动速度值和金属含量值是对新形成矿物组合进行热力学模拟和对 CIPC 所涉及的各个地段以及其发展动态(从产生到消失)中矿质平衡进行估算的基础。

E. E. 阿布拉莫娃等人利用 CIPC 结构资料及其物理-化学特征对溶液流上升和下降分支以及其排矿带(成矿带)进行了计算热力学模拟。经过发展的 CIPC 被认为是一个流动的分级反应器,与火山岩相互作用的相继到来的一股股海水(海水“波”)就经过这个反应器。而且每一股后来的海水不仅与未蚀变的火山岩相互作用,而且与以前产生的(新形成的)“交代”矿物相互作用。

对一股股溶液来说,在给定的不同岩-水原始比值下,可测出在不同温度下海水经过时形成的矿物组合中的矿物定量比例。在这个指标系统中就可以分析溶液富集(贫化)主要成矿元素的情况。

图 23 表示的是在第 1 个和第 76 个溶液波经过溶液系统下降分支的情况下,在岩-水初始比值等于 1×10^{-3} 时产生的矿物组合的对比。随着“波”数增加,“氯化物”组合与含钠长石、阳起石、绿帘石的组合的界线移向较高温区,即沿溶液流向下,更接近能量来源。当一个

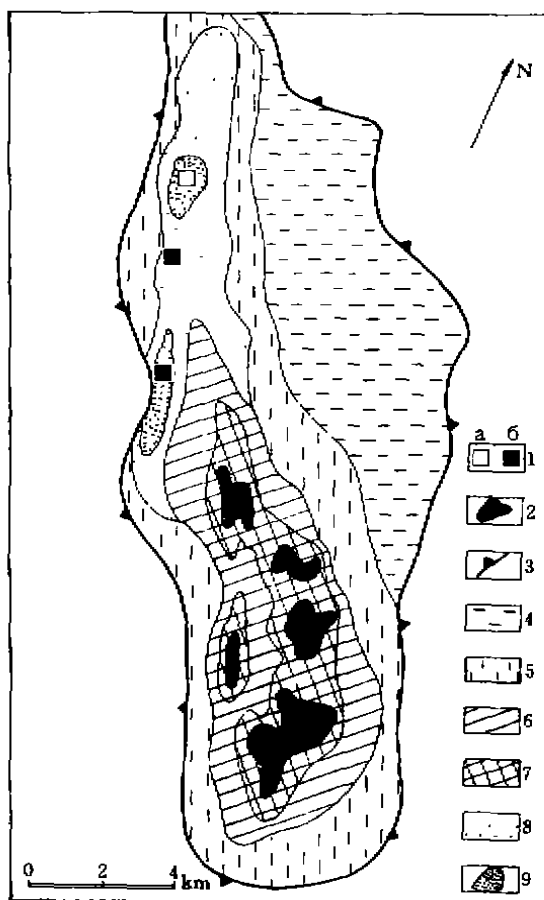


图 21 根据铜的富集流在含黄铁矿建造玄武岩类岩石中的分布确定的布里拜矿区 CIPC 结构

1—布里拜矿床(a)和矿点(b); 2—辉长辉绿岩侵入体; 3—上覆沉积界线; 金属吸取带; 4—溶液吸取带(铜含量梯度为 500 米 1~10 克/吨); 5—“过渡”带(梯度 0~40); 6—“近侵入体远方带”(梯度 1~40); 7—“近侵入体近处带”(梯度 0~10); 溶液排矿带; 8—外带(梯度 0~10); 9—内带(梯度 0~40)

的氧化物和硫化物交代(见图 24), 这种情况也见于现代海底硫化物形成带的分带矿“筒”中。

上述研究结果建立了不同层次的 CIPC 模型, 这些模型尚需考虑黄铁矿族矿床的现实结构和特征加以完善。

陆源杂岩中的金矿床地质-成因模型是以许多经过详细研究的矿床为例建立的。

产在地壳活动带火山-陆源杂岩和碳酸盐-陆源杂岩中的金矿床和金-银矿床, 属于同一个金-硫化物-石英(碳酸盐)-碳族建造组。在这个组的矿床中, 热液-沉积矿石、成岩-后成矿石和热液-深成变质成因矿石长在一起。这些矿石的不同组合决定了三种主要矿石建造类型

“波”经过时, 这个界线位于较低温区(岩-水初始比值增加)。通过热力学模拟得到的矿物组合与通过专门填图在布里拜矿田玄武岩类中划分出来的并被列入吸收带的新形成的矿物组合没有原则区别。

正如模拟结果所表明, 在溶液系统下降分支上, 岩石中的主要成矿元素铜和锌被吸收到溶液中, 二者在 CIPC 中显示出分异的性状, 这是带出速度不同和二者的硫化物沉积和再沉积条件不同造成的。

对溶液系统上升分支进行了近裂隙交代矿物组合模拟, 这相当于矿下高渗透带即导矿通道的情况。在上升分支下部发现, 近裂隙带本身的含硫化物石英-绿泥石组合在离其远处起初增添了绿帘石和绢云母, 然后增添了钠长石, 产生的矿物组合接近背景青盘岩矿物组合。在上升分支的高层位上, 近裂隙带叶蜡石广泛发育, 然后出现了碳酸盐, 而在离近裂隙带最远处绿帘石变得稳定。模拟结果与研究产在基性火山岩中的黄铁矿型矿床的矿下交代岩所得到的资料十分相似。

图 24 表示的是模拟成矿带中矿物组合的初步结果。在上升分支露出盆地底部处, 第 1 个“波”的溶液(岩-水比值等于 1×10^{-3} 时)与海水混合。这时产生的矿物组合以硬石膏为主, 这是硫酸盐海底热液产物(白“烟囱”)的特征。在较高温区, 氧化物-硫化物相发育。后来各股流体叠加在这些产物上的同时, 硬石膏被石英、成矿元素

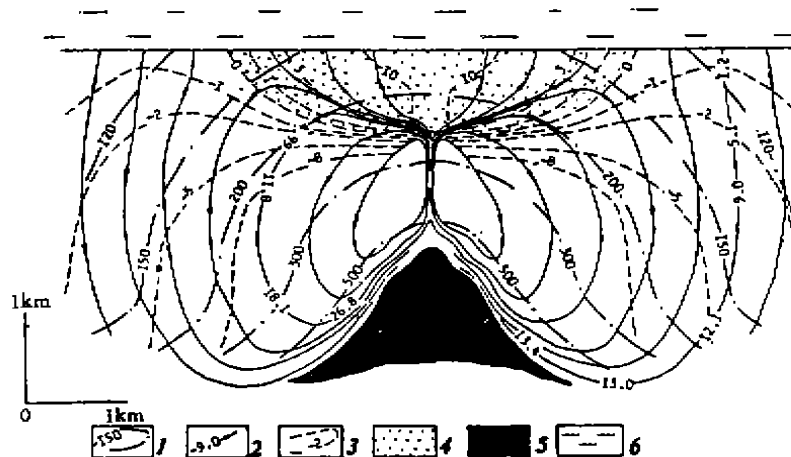


图 22 根据数学模拟结果得出的 CTFC 结构

1—等温线(℃);2—流体流动路线及其速度值;3—岩石中金属增加(+)和减少(-)等含量线;4—金属沉淀区;
5—能量来源;6—大洋盆地水

(地质-工业类型)的矿床的存在:金-硫化物浸染-细脉-脉状矿床、金-硫化物网脉状矿床和金-石英脉-细脉-网脉状矿床,包括金-银、金-锑(汞)-石英(或碳酸盐)亚型。

起含矿和容矿地质建造作用的是板岩建造、陆源-复理石类建造、碳酸盐-陆源复理石建造、滑塌沉积建造和碳酸盐-陆源-磨拉石建造,以及火山岩建造:拉斑玄武岩-玄武岩建造和次碱性橄榄石玄武岩建造。起生矿作用的是造山早期花岗闪长岩-花岗岩建造、辉长岩-花岗闪长岩-斜长花岗岩建造。起成矿作用的是各种造山期和造山期后花岗岩和成分复杂的岩墙。

根据产出条件可以分出以下几种主要类型的矿床:

1. 裂谷成因的拗陷近边缘部分(其中发生双峰拉斑玄武岩-玄武岩火山活动)的层状多成因和多时代金-硫化物-黄铁矿矿床;

2. 沉积碳酸盐-陆源-复理石陆间冒地槽带(其中发生次碱性玄武岩火山活动)离心同沉积期短背斜斜坡上的层状细脉-浸染状金-硫化物矿床;

3. 由含矿-容矿陆源-复理石类型建造组成的陆间地槽受到错动的向形构造核部的热液-变质成因细脉-浸染金-硫化物矿石的陡倾交切带;边缘上的向形构造为生矿的花岗岩类侵入体贯穿;

4. 由热液-变质成因的脉-细脉-浸染状金-硫化物-石英矿石组成的矿床,产在陆间地槽向形构造的单斜翼部,往往切穿层状受到错动的硫铁矿矿层;

5. 由热液-变质成因的网脉状金-硫化物-石英矿石和金-石英矿石组成的矿床,矿石受构造推覆体前缘带叠瓦状逆掩断层控制。

上述产在陆源岩系中的金-硫化物-石英-碳酸盐建造组的各种类型矿床的地质环境反映了原生的和叠加的再生热液-变质成因的矿石在其形成中起不同作用。对矿床产出条件的分析以及同位素地球化学资料和气-液态包裹体研究结果的引用证明,原生矿石主要以残留体形式保存下来。其中既有热液-沉积矿石,也有沉积矿石,其来源既可以是壳下流体,也可以是

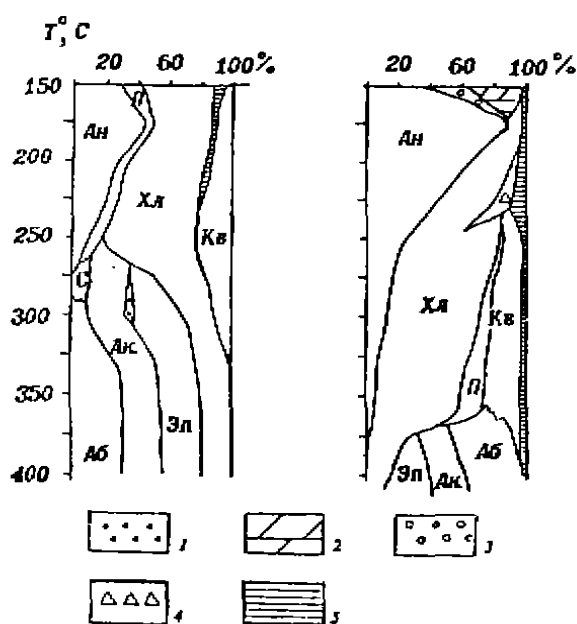


图 23 第 1 个和第 76 个流体“波”经过后在 CTPC 下降分支上新形成的矿物组合

矿物代号: 1—斜钙沸石, 2—白云石, 3—滑石, 4—硬水铝石, 5—赤铁矿, АБ—钠长石, АК—阳起石, АН—硬石膏, В—重晶石, КВ—石英, П—叶蜡石, С—绢云母, ХЛ—绿泥石, ЭЛ—绿帘石

的含矿层很远,与相距远近不同的花岗岩类岩基有关的深成热液过程本身起不同的作用。

上述各种地质-成因模型与组成统一的趋同系列的金-硫化物-碳建造组的矿床形成条件的多样性一致。这些条件反映了金属在流体“过境”途中再生规模和从地壳中萃取金属的规模不同,也反映了形成成矿省、矿区、矿结、矿田和矿床的地球动力学环境不同。这些区别首先表现在矿质来源—溶液来源+矿质沉积机制—矿质沉淀环境这个系统的发育上。

在早期阶段,沉积盆地中的地幔来源或(和)地壳-岩浆来源的“原生”流体,往往在岩层中形成无工业价值的金的集中,以及逐层浸染的黄铁矿或毒砂。金在成层的“浸染状矿石”层的硫化物中的含量变化很大,由 10~20 毫克/吨到 1.5~2 克/吨。计算表明,由于含矿岩系体积很大,如果后来发生再生作用,则这种含量足以形成大型有时是特大型富金矿床。

金在热液-沉积阶段和挤水-后成阶段的“原生”矿石中达到工业品位,需要特殊的矿质沉淀机制和环境,即需要停滞的(还原的)水交换环境和长期稳定的温度和压力参数。而且,由于含矿拉斑玄武岩或次碱性玄武岩类起的作用和所在位置不同,可形成层状含金硫化物矿层。

在后来的各个阶段,矿质主要是由第一个阶段的矿石,即大体积的(但分散的凝块-结核

地壳流体,二者都含常见于还原和碱性介质的 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)$ 和 $\text{Au}(\text{HS})$ 稳定络合物。这种介质是水交换停滞的局部盆地的典型特征。原生矿石在不同环境下后来发生转化,如溶解、再生和再沉积,这就可以分出以下几种典型地质模型:

1. 热液-沉积形成的金-硫化物-黄铁矿矿床模型,其中再生的原地矿石起次要作用;

2. 热液-沉积挤水-后成金-硫化物浸染状和细脉-浸染状矿床形成模型,其中再生的原地矿石广泛发育,但并未掩盖与围岩同生的原生矿质的标志;

3. 热液-变质成因的金-硫化物矿床、金-硫化物-石英矿床和金-石英矿床联合模型,其中保存着“原生”矿石残留体;浸染状挤水-后成矿石,其中的再生原地热液-变质成因的细脉-浸染状矿石和各种工业类型的线状细脉-脉状矿石都起重要作用;

4. 由金-硫化物-石英矿石和金-石英矿石组成的深成-变质成因矿床模型,其中以再生的矿层为主,有时保存少量残留的原生矿石;这些模型的特点是:成矿地质条件多种多样,往往离原生的、常常完全崩解

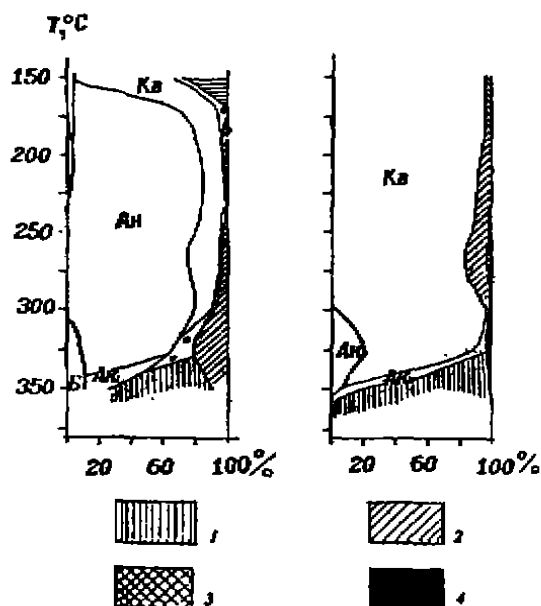


图 24 岩-水比值为 1×10^{-3} 时 CFCP 上升分支的矿物组合(排矿带)

a—第 1 个流体“波”的流体与海水混合, 6—以前产生的矿物组合在第 50 个流体“波”通过时被交代; 矿物代号: 1—磁铁矿, 2—黄铁矿, 3—闪铁矿, 4—辉铜矿、黄铜矿。其余符号见图 23。

矿(或黄铁矿)、闪锌矿-黝铜矿和银-硫酸盐组合的分散晕。

反映在矿质来源—溶液来源—矿质沉淀机制—矿质沉淀环境系统中的外部条件, 在金-硫化物-碳建造组矿床上可在分为“原生”和“次生”(再生)型矿床的两种地质成因模型中体现出来(图 25)。

上述一切表明, 中央有色金属和贵金属勘探研究所已建立了一套贵金属和有色金属矿床模型体系。这个体系将系统化的综合资料集中起来, 具有多方面用途。主要的模型如下:

矿床的地质-工业统计(“品位-矿量”)模型, 用来在成矿分析和普查工作中估计预测对象的可能规模和矿石质量;

矿床的预测-普查(定性)模型, 用一套可划分矿田和矿床一级远景区的预测和普查准则的要素描述;

矿床的参数预测-普查和普查(定量)模型, 可在地质测量和普查工作中根据近矿空间的不同要素用三维坐标确定观测点离可能存在的矿体的远近;

矿体的形态统计模型, 以矿体在三个互相垂直的轴上的延伸比例为基础, 可用来在评价工作中优化见矿断面和断面上工程的布置;

矿体的富集模型, 反映成矿元素在矿体中的分布, 在优化评价和勘探网中用来确定最高

-浸染状)矿石提供的。

再生的或“次生的”矿床是在长期发展起来的热穹隆系统起一定作用的条件形成的。根据一系列标志, 首先是根据温度稳定的成矿能源深成产物所起的作用, 可将这种矿床分为三个亚类:

1. 与热液-变质成因热流体系统有关的再生矿床, 其特点是具有同构造期石英脉系, 岩石发生黄铁细晶岩状蚀变。错动带中的再生作用主要是形成分散的线状脉、细脉状和晕-浸染状金-硫化物-石英矿石;

2. 与深成-变质成因热流体系统有关的再生矿床, 包括离花岗岩岩基不远(不到 2~4 公里)的侵入体-侵入体上方的矿床, 其特点是具有明显的碳酸盐属性, 这可以根据形成时期长以及明显的多成因性和多时代性将其列为 C 型;

3. 与远离(3 公里以上)花岗岩岩基的热流体系统有关的再生矿床, 以金-硫化物矿石或金-硫化物-石英脉-细脉状矿石为代表。成矿交代柱具有垂直分带: 下部为酸淋滤阶段的黄铁细晶岩类蚀变晕, 上部(延伸 1 公里以上)为沉淀带, 具有毒砂-黄铁

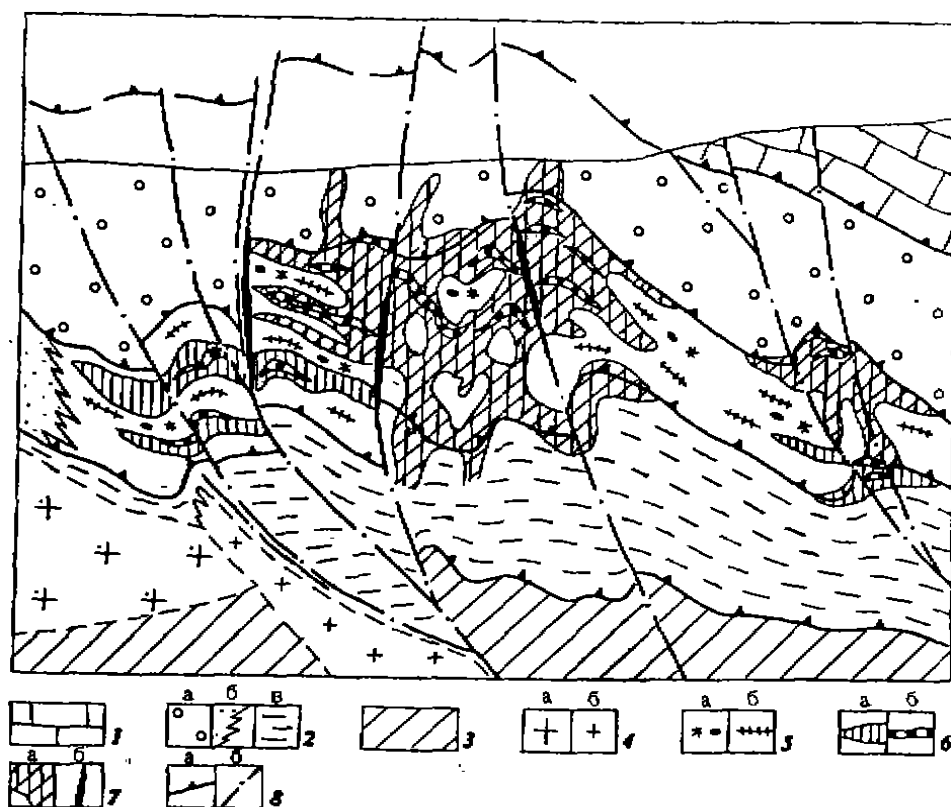


图 25 特大型多成因-多时代金-石英矿床的地质-成因模型

1—石灰岩-白云岩建造；2—陆源岩系(a—矿上以砂岩为主的建造，b—含矿-容矿含矿脉脉理石英类建造，c—矿下粉砂岩-页岩建造)；3—火山陆源岩系；4—侵入体(a—花岗岩-花岗闪长岩，b—浅色花岗岩)；5—挤水-后成阶段(a—硅质黄铁矿微结核残留体，含金的凝块和浸染体，b—同构造期略含金的石英脉)；与温度稳定的花岗岩类侵入体侵入过程有关的再生阶段；6—生矿阶段(a—亚整合继承性条带状交代含金层，b—平缓的含金石英脉和毒砂-石英脉)；7—成矿阶段(a—网脉状矿层；b—陡倾金-石英脉)；8—断裂(a—几乎顺层的遮矿逆掩断层带，b—陡倾的控矿正-平移断层)含量和最大储量带(不均匀体，“矿柱”)的位置和所占比例；

矿体的梯度-向量(形态和富集)模型，用来查明“质量和含量流”结构及其沿矿体不同轴的变化强度，这些都会影响评价和勘探网的方位及其密度；

矿体的多因素定量(合成)评价-勘探模型，其要素为一套计算参数和一系列统计指标，可以保证按给定的储量计算误差选择评价和勘探网；

成矿系统和矿床的定量地质-成因模型，考虑成矿过程的主要特征，以矿体各种模型的综合要素为基础。这种模型把“数量和尺度”引进成矿概念，可以查明成矿系统和容矿介质的所预测准则和标志。

(林 强摘译)