SY19107

目　录

00315081

（一）前言

（二）寻找金矿的综合物探方法……（1）

（三）地球物理和地质学在芬兰镍—铜矿床勘探工作中的应用……（19）

（四）印度的金刚石勘查……（42）

（五）塔斯马尼亚西部火山岩型硫化物矿床勘探……（52）

（六）法国海外物探找矿实例……（66）

（七）澳大利亚新南威尔士洲伍德劳矿体的地球物理研究实例……（88）

（八）地球物理调查在北奥涅加地区铝土矿矿床予测和普查中的作用……（127）

（九）物探方法普查与勘探铝土矿矿床……（132）

（十）法莱梅铁矿区的物探研究……（136）

（十一）利用物探资料予测石棉矿床的特点……（157）

200404570

寻找金矿的综合物探方法

在寻找金矿的工作中，很早就开始使用一些地球物理和地球化学的方法。但是，由于在寻找金矿时存在一些特殊困难，使得以往物化探方法的找矿效果不甚稳定，只是在最近十几年才逐渐扩大了综合方法的应用范围，明确了综合方法应用的一些基本问题。在寻找金矿时决定方法使用特点的因素是：

1. 由于金在矿石中的含量极少，因此，金的存在不能呈现出明显的物理特征，应用现有的地球物理方法直接找金是比较困难的。这样，在寻找金矿时主要是采用各种不同的物探方法间接找矿，解决与金矿成矿有关的岩石、构造等多方面的地质问题，同时，在区域调查直到详查勘探的各个阶段还应充分采用有效的综合方法。

2. 金矿可形成于所有的地质时期和各种地质环境与类型的岩石中。金矿的矿石成分、构造和地质位置是各式各样的；矿床规模、矿体形态、围岩条件更是千差万别。这种明显的差异使综合方法不可能研究出一种典型的标准工作方法，实际上，要求针对不同的物探工作阶段，对某一类具体的金矿区研究出相应的综合方法方案。应用效果的好坏，主要决定于正确的地质前提，以及地质地球物理和地球化学方法的充分使用与正确配合。

目前国外使用的主要物探方法有：直流和交流电法、磁法、重力与地震法、压电法（包括地面及地下方案）、无线电波透视法、核物探方法及综合测井等，还经常与地球化学方法相配合。使用这样多的方法，必须严格遵循工作的阶段性和综合性。研究工作应该从小比例尺到大比例尺，按不同矿床类型和地质需要有计划、有步骤地合理选用综合物化探方法。只有这样，才能可靠地解决各阶段的任务，取得较好的地质效果。

一、寻找金矿的综合方法与工作程序

遵循物探工作的阶段性和综合性是在所有金属矿区提高普查工作效果的必要条件。普查金矿时地球物理工作包括以下四个主要阶段：

（一）区域矿产予测阶段

区域矿产予测阶段地球物理测量的比例尺为1:250万—1:50万，或1:100万—1:20万。事实上，这个阶段的工作不可能单纯的为了寻找金矿，它是区域地质调查的一个组成部分。

小比例尺（1:250万—1:50万）的地球物理资料可用于大区域深部构造填图，在这样广大地区，能够反映出地壳纵向和横向上的不均匀性，而这种不均匀性能影响含金带的分布。为此目的，应该研究地壳和上地幔之间的界面（莫霍面），玄武岩和花岗片麻岩之间的界面

（康氏面），以及埋藏不深的与花岗片麻岩层及基底顶面有关的界面的形态特征。在进行这些工作时，还应研究切割地壳岩层的深断裂。所得到的资料用于研究成矿区和各种类型的内生成矿带，其中包括金的分布规律性。所查明的规律性能够指出新的含金矿带，在此范围内必须进行中比例尺的区域地球物理工作，查明新的金矿地区。

在进行小比例尺的区域地球物理工作时，可利用深地震测深、重力勘探和航空磁测的资料。使用这些资料的效果，主要取决于利用深地震测深方法对具体地区地壳构造的研究程度。

一些经验表明，1:100 万比例尺的区域地球物理资料，能够有效地用于成矿予测和构造图的编制。为此，还应将地球物理资料（重力和航空磁测）与古构造图结合起来进行分析。其目的在于根据地壳断块的构造和发育的类型，对褶皱地区的深部构造进行划分。根据这些研究结果所绘制成的图件，将成为更准确地确定已知金矿区边界和予测新区的科学依据。

在苏联某地根据地壳断块构造和发育类型的深部地质构造划分出金矿区，其地球物理资料的解释与古构造图的共同分析表明，这个地区被分成具有不同深部构造和地质构造形态的许多断块，这些断块又形成不均匀的褶皱区，其中的每一个断块都由一定类型的沉积岩、岩浆岩和变质岩建造组成，并具有自己的地球物理特性和成矿专属性。在所研究的地区内，根据发育类型和深部结构，划分出三个主要类型的地壳断块：内地向斜型、内地背斜型及过渡型断块。

地壳内地背斜断块的特点是大面积的重力正异常。地壳厚度变小（莫霍面隆起），中生代的沉积岩和花岗片麻岩层的相对厚度不大，金矿就位于这种断块的边缘部位，很少位于其中。

地壳内地向斜断块的地质发育史和深部构造特征截然不同。这种断块的特征是厚度较大，因此出现低的重力场和磁场。

此外、根根综合地质地球物理资料，划分出花岗岩和闪长岩侵入建造。花岗岩侵入建造是以局部负重力异常划分出来的。闪长岩侵入建造是以地磁场的增高勾绘出来的，绝大部分金矿区分布在形成地背斜外带地壳断块范围内。根据磁法勘探资料圈定出金矿区的地质界限。

（二）构造和地质填图阶段

这个阶段的工作是比例尺为 1:20万—1:5 万，甚至 1:2.5 万的地球物理测量和地球化学测量，应该在前一阶段工作的基础上进行，其主要任务是查明控制矿床分布的一些构造特征，例如，查明断裂带、热液蚀变带、次山火岩带，划分火山岩和侵入杂岩及圈定成矿远景区。

主要的物探方法是 1:20万—1:5 万的地面重力测量，1:5 万—1:2.5 万比例尺的航空伽玛能谱测量和航空磁测。应用伽玛能谱测量有重要作用，它可查明一些与金矿体有关的热液交代蚀变带。例如乌兹别克的大多数金矿田和金-硫化物-石英建造、金-石英建造的成矿现象都出现铀钾含量的异常。利用航空伽玛能谱测量划分出一些大面积的金矿远景区，甚至划分出寒武纪陆源沉积层中的层状金矿。含矿带放射性元素含量的增高与岩石中放射性强度增高在放射性元素比例方面有明显不同。但是，当地表风化带内铀、钾发生强烈淋滤时，用伽玛能谱法就很难发现上述矿床了。此外，配合航空电法还可进行地面甚低频电磁测量（如在鄂霍茨

克-楚克奇火山岩地区进行了超长波电台方位对比法），并在部分剖面上进行地震勘探。

地球化学方法是普查金矿中经常使用的手段，由于化探方法适用于不同环境和各种类型的金矿，找金的同时还可以寻找其它多金属矿床，所以它是比较有效的方法。

另外，用X萤光法找金亦有较好效果，与金矿伴生的元素中砷分布最广，含量也较高，可以成为普查和评价金矿的指示元素。

在乌兹别克某金矿上，用X萤光法记录9.5-11.5千电子伏能量范围内砷的特征，辐射激发源是用两个镉-109同位素源(每个强度5—10毫居里)，探头用正比氩计数管，其能量分辨率为16—17%。用同样方法也可测亲铜元素总量（砷、铜、钨、铅总重），但测量范围较宽，为8—12.5千电子伏，在这个能量范围内本来还有原子序数为31—36、70—90的元素，但这些元素在所研究的矿床中含量很低，影响不大。

在该矿区内作了1:1万的面积性测量，在残坡积物（砂质粘土）中挖0.3米深的小坑进行现场X萤光分析，测砷的精度在照射时间60秒时不低于0.01%含量。定量测量的生产效率为每个台班分析150个样品。用这种方法在野外圈出了分散晕、矿体和矿带，成功地指导了进一步的地质勘探工作。例如，在同一面积上作了X萤光法亲铜元素总量测量和光谱分析，两者圈出的远景区几乎重合，但是用X萤光测井，从提供的实例来看，在毒砂-黄铁矿型金矿上，和在含硅少的石英-毒砂-黄铁矿型金矿上X萤光测井（测砷）的结果与岩心分析的金含量十分吻合，但是目前X萤光测井，只能在清水孔或干孔中进行，因而有较大的局限性。

（三）矿田和矿床构造的研究

这个阶段的工作比例尺为1:5万—1:2.5万，甚至1:1万。

根据一些地区的经验表明，地球物理工作在此阶段的主要任务是进一步查明控矿构造；确定对金矿体有影响的岩石-岩性因素（炭质石墨岩层和火山沉积杂岩中显示金矿化的其它岩层），以及近矿蚀变-矽化、滑石菱镁片岩化、黄铁细晶岩化、高岭土化带等；寻找矿床、矿体。

据一些工作经验表明，在这个阶段需要考虑各种金矿类型的特征，不同的研究者对金矿床有各种不同的分类法。

根据矿床成因、形成深度、矿体形态构造、地球化学成分、矿物共生组合、近矿围岩蚀变、岩浆作用，以及矿石建造等划分出的类型很多，主要类型有太古代绿岩带金矿（以含金石英脉为主），元古代含铁硅质建造中的金矿(霍姆斯塔克型)，中新生代与火山岩、次火山岩有关的金矿，含金-铀砾岩型金矿，碳酸盐建造中微细浸染型金矿、砂金矿、伴生金矿等。

有人主张在矿床普查中应该扩大“普查准则”这一概念，这是选定普查勘探方向和方法的理论基础，它包括地质前提和地质标志两个内容。А.Я.Колемков等人阐述了列别金型和库腊纳赫型金矿床的普查准则，作为地质前提，包括区域性的和局部性的岩性、地层、岩浆、构造、外生特性等因素，这些因素又具体反映在地球化学和地球物理特征上。所谓普查标志是指矿物-地球化学、地球物理、岩石的近矿蚀变和表生变化、地形等。对上述两种金矿类型的直接和间接的普查标志可列于下表（表1）。

普查准则一览表（部分）　　表 1

普查标志	矿床类型	
	金—赤铁矿—硫化物型	金—黄铁矿型
矿物标志	矿物组成以中温硫化物为主的矿物组合；金属矿物富含金；矿化的指示矿物为硫化物、赤铁矿、石英、铁白云石	矿物组成简单，矿化的指示矿物为含金黄铁矿、石英、冰长石；大量表生矿物，如褐铁矿、高岭石、石英等。矿石中存在以下一些不形成矿物的元素：Au、Ag、Cu、Mo、Ni、Co 等。
标型特征	原生矿石的硫化物中金很分散。粒度为 0.005—0.01毫米。氧化矿石中金的粒度为0.01—3毫米。典型混合物有Cu、Pb、Bi Mn	原生矿石中金含量不高，粒度为 0.01—0.25毫米；氧化矿石中金呈“易碎的”海绵状；混合元素有：Cu、Pb、Mn等
原生和次生分散晕	Au（$>n\times10^{-6}\%$）、Pb、Cu、Mo、Ag、Bi、Sn、Zn 的原生晕及累加晕可圈定矿体，次生晕可圈定远景区	局部存在Au、Ag、As、Cu、Mo、Pb、Zn的原生晕和累加晕；次生晕（包括 As 和Te）比原生晕分布广
近矿围岩蚀变	靠近矿脉带有硅化、铁白云石化及硫化物化	含金的硫化物—石英交代岩及石英—钾长石交代岩
地球物理标志	综合磁异常和重力异常产在含有岩浆岩体和矿体构造复杂的地段，矿体可根据视电阻率测量时的导电率异常来圈定	含金的硫化物—石英交代岩及石英—钾长石交代岩控矿构造、岩墙和岩溶产物在磁场和重力场中均有反映；含金岩溶产物具有负重力异常，线性重力异常反映了断裂的存在，面积性重力异常反映了隐伏侵入体的存在

考虑综合方法应用的条件，还可根据矿物中石英组合和硫化物组合的含量作分类，现简述如下：

1．石英脉和低硫化物建造的金矿床

作为此类矿床矿体的特征是石英物质的电阻率高，弹性大，并能产生压电效应。含金石英脉的特征为厚度小，延伸规模不等，产状要素多变，以及近矿蚀变非常发育。通常，近矿蚀变沿石英脉形成带，且其电性和其它物理性质变化很大。带的厚度--般大大超过脉本身的厚度。显然，地球物理方法研究的对象是普查和追踪石英脉。

在普查和追踪石英脉时，广泛采用不同方案的直流和交流电法。例如，在中阿尔丹1:2.5万—1:1万比例尺的综合地球物理工作中，使用的方法包括自然电位法、直流偶极剖面法、偶

极电磁剖面法、激发极化法等，同时使用伽玛能谱测量等方法，但是多年的研究表明，在直流电阻率法工作中，既可根据视电阻率极小值或导电率异常，也可根据视电阻率极大值或电阻异常来确定石英脉。在一些矿床上所得到的视电阻率曲线（电剖面法）和电位梯度的比值，都具有极大和极小相互交替的复杂形态。因此，往往有这样的情况，即在多数异常中很难确定哪些是由石英脉引起的异常。正象工作经验所指出的，划分《有意义》的极小或极大值并查明它们的地质性质，要求进行专门的地质调查。

在不同地区的许多含金矿床上普查石英脉时，使用电法的经验表明，使用这些方法的可能性是有限的。这主要与含金石英脉的厚度不大有关，大多数石英脉的厚度比其埋藏深度小得多。因此，往往由于围岩是复杂的介质，所以地质和电性上的非均匀性造成各种异常效应比石英脉本身的异常效应还要明显。这样，利用一般电法直接查明石英脉的问题，实际上还没能彻底解决。但是，由于压电效应方法的研制成功，并应用到实际工作中，因此，在解决这个问题上已向前迈出相当大的一步。目前，这个方法已经研究出用于地表和坑道条件下寻找石英脉的方案，并成功地进行了实验。

总的来看，地球物理方法与地球化学方法相结合可以成功地研究矿体的分布和远景区，进行金储量的定量评价，以及研究构造因素的作用。地球物理和地球化学的研究，可以从1：2.5万比例尺的地质普查工作阶段开始进行，为此可采用电剖面法、磁法勘探及光谱金属量测量。利用电剖面法可圈定出高阻灰岩，与充填着低阻破碎岩石的喀斯特生成物分布的范围，以及断裂构造造成的岩石裂隙和低阻线状延伸带。为了圈出火山岩墙可使用磁法勘探，在金矿区进行研究时，应将所得到地质和地球物理资料与矿床分布的资料结合进行分析研究，这样就有可能确定金矿富集地段，分析结果，能提供出控制矿体分布的构造标志的依据。在一些具体地区内使用的方法不可能完全相同，更不是愈多愈好，为了保证方法有最佳的地质和经济效果，需要详细研究该区影响各种方法效果的因素，并综合地进行分析并加以确定。为了较好地选择适当的方法，有关统计分析的方法将是有用的，这一点在后面将予以详细讨论。

2. 中等和高硫化物建造的金矿床

在这类矿床的矿体中，硫化物的含量一般偏高，因此，矿体的导电率也相当高，并通常是天然电场源，这成为利用不同变种的电法发现它们的有利前提。但是，对该类型的矿床，地球物理方法的效果，不仅决定于矿石的物理性质，而且也决定于许多综合的地质因素：矿体的大小、埋藏深度、产状要素、氧化带厚度、围岩性质，以及矿区的构造状态等等。这些因素综合起来，也许不利于地球物理方法直接查明矿体。为了查明控制硫化物矿体的地质构造因素，在进行矿田和矿床大比例尺地质构造填图时，采用地球物理方法是有益的。这类建造矿床的矿体为含金硫化物矿脉和矿层，以及细脉浸染矿带。

在研究这种类型的金矿床时，可广泛采用直流和交流电剖面法、自然电场法、磁法、直流充电电法和磁充电法所组成的综合地球物理方法。例如，矿体分布于寒武纪岩石中，并赋存于被断裂破碎带褶皱构造复杂化的部位。金—硫化物矿体为陡倾的脉和交代的水平矿层。脉具有相当大的延伸，几乎切断全部岩层，并在空间伸展到岩脉接触面和断层裂隙。由于矿层形态复杂，其延伸及形态由地质构造破碎的形态和大小来决定。地球物理的特征为沉积岩的电阻率从几十变化到上万欧姆·米，这主要是由于不同程度的裂隙和含水性所引起的。原生矿石的电阻率为零点几到1欧姆·米，氧化矿的电阻率从几十到上百欧姆·米。侵入体与围岩

的区别在于它有较高的磁化率值。因此，在进行详细地质填图时，为了查明和追索构造破碎带和侵入体，可采用电剖面法和磁法勘探。

在普查金矿的工作，甚至1:5万比例尺的区域调查工作阶段中综合方法应包括自然电场法，以便划分出有利于金矿富集的地段。这类地段位于自然电位异常的边缘部位。根据钻探资料评价远景地段时，在进行钻孔综合测量的工作中，也应包括自然电场法。鉴于矿石位于偶极子由正到负的过渡地段，稍高于零等值线，所以利用自然电场法进行井中观测的资料，能够修正钻孔的深度并找出有利于金矿的富集地段。

在一些炭质陆源岩层中，以细脉浸染硫化物矿化带为代表的金矿床，按工业价值，它们属于最有远景的，所以对这类矿床的研究应给以足够的重视。这类矿床一般赋存在较大的区域性断裂带内有利的岩石地层中岩石强片理化和石墨化的地段。因此，利用物探方法进行地质构造填图是很重要的。例如，矿体周围的火山沉积岩往往是无磁性或弱磁性的。只有中基性成分的侵入杂岩磁性增高。岩石的电性分异弱。根据急剧降低的电阻率可划分出断裂带，构造裂隙和炭质片岩。硫化物的浸染对围岩的电阻影响很小。岩石的极化性能主要取决于炭质—石墨形成物的含量和硫化物的浸染程度。

一般认为在进行调查的初始阶段，电剖面法、磁法勘探、重力勘探可提供出有关断裂破碎的大量信息。在进行详查时，在控矿构造区域内，为寻找矿带，激发极化法与光谱金属量测量一起进行测量最为有效，然而单纯用激发极化法普查含金硫化物和石英—硫化物型矿床的效果甚差。其原因是金矿点的位置产在石墨化为含炭沉积岩中，后者具有较高的极化率值。研究不含石墨的硫化矿化金矿带和石墨化岩石的极化率特性说明，这种性质在石墨化岩石的背景上，实际上无法将矿带分出来的。

（四）详查和勘探阶段

这个阶段的主要任务是从地面详细研究矿床（点），依据钻孔研究剖面，划分出矿段，查明钻孔间、坑道间的矿体，追索由各种方式所揭露出的矿体，为此，主要应用各种电法勘探方法。其中包括地面、井中及坑道的压电法、激发极化法、充电法、无线电波透视法，以及多种交流电法与综合电测井等，同时，往往配合光谱金属量测量。

根据使用井中无线电波透视法所得到的工作经验表明，该矿床在石灰岩中的硫化物交代型矿层，主要埋藏在角岩化岩石和闪长岩中的石英硫化物地质体和分散的硫化物浸染状矿体，矿体上层氧化，井由含金褐页岩组成。矿体呈透镜状、筒状和巢状。矿体的厚度不定。大部分矿石是以块状结构和磁黄铁矿成分为主。其电阻率的变化范围从零点几到1欧姆·米，沿构造破碎发育的石墨化作用是对无线电波透视法不利的因素。石墨化带的电阻率为几个欧姆·米。

通过在矿山坑道内进行频率为4.8和8.6千赫的无线电波透视法表明，在进行解释时，主要不是利用屏蔽系数的绝对值，而是沿观测剖面的相对值(因为岩石屏蔽系数值变化范围很宽)。经查明，花岗岩中贫浸染硫化物不能形成异常。用4.8千赫频率的无线电波透视距离达150米，而用8.6千赫为120米。在解释无线电波透视法的资料时，必须考虑有可能测到由石墨化带所引起的异常。利用无线电波透视法，可以有效地追索和圈定由矿坑和钻井漏掉的致密硫化物矿体。

在一些矿体为低硫化物石英脉的金矿床上，无线电波透视法的效果不佳。

然而，近些年来，在这样一些类型的矿床上，已将压电效应方法应用到详细和开采勘探的实际工作中。利用这种方法成功地进行了寻找矿井之间空间的石英脉，追踪脉错动的地段等。已有的工作经验表明，地下压电方法的探测距离为70米。

为追踪和圈定由矿山坑道揭露的矿体，可采用直流充电法。矿山坑道掘进过程中所查明的矿层的形态与实测的异常性质对比表明，矿体的走向决定于电位梯度零值轴的方向。根据等位线的轮廓可以判断矿体的大小。但是，由于许多矿区被碎石复盖，不可能实现良好的电极接地，因此，直流充电法只能在有限的地段上使用。低频交流充电法可以对那些不能使用电极接地的地方进行观测，这正是该方法较直流充电法优越之处。一些工作经验表明，钻探与交流充电法结合，将有可能使钻探工作量大为降低。同时，根据所得到的地球物理调查结果得出这样的结论：在详细普查和勘探中—高硫化物含量的金矿床时，交流充电法是一种主要方法。

在详查和勘探阶段，化探同样也能起很好的作用，特别是寻找浸染型金矿。化探乃是主要的手段。例如，美国内华达州北部的一个老金矿区，原有金矿床除砂金外，尚有交代型、浸染型及含金石英脉型金矿，后来结合成矿规律调查，利用金光谱分析早于60年代就在该区北部发现了两个浸染状矿床（卡林金矿和科特磁金矿）。另外，霍姆斯塔克金矿床，在采勘过程中，利用钻孔岩芯和坑道岩样确定出近矿原生晕，并进行激发极化测量找到了被工程遗漏的矿体。

（五）普查和勘探冲积砂矿的地球物理探测

这种类型的金矿约占世界金矿储量的12%，由于生成条件特殊，所以使用的方法也与上述提到的不同。

普查和予测冲积砂矿的主要方法是地质—地貌填图。这些成果图反映了现代地形特征并再现了古代历史，以及能确定出冲积砂矿形成的性质和它们在现代及古河谷中可能的位置，因此，利用各种方法，其中包括地球物理方法，对工作地区疏松层的厚度及其分布情况做出初步评价有着重大意义。

根据冲积砂矿的构造，可分出物理性质不同的两个水平层。上层为疏松沉积物，下层是基岩。由此，地球物理工作的主要任务是，通过确定疏松沉积物的厚度来研究基岩表面起伏的特征，并将疏松沉积物分为不同成分的层。

在大多数砂矿上，利用地球物理方法成功地确定了疏松沉积物的厚度，而进一步分层则不甚有效，这说明包括疏松沉积物在内的岩层，按其物理性质并非总是可以区分开的。

在砂矿的普查和初步勘探阶段，用1:2.5万和更大的比例尺进行地质地貌填图时，采用地球物理方法具有非常重要的意义。特别是在普查和勘探产状条件复杂的砂矿，例如，被10—15米厚的疏松沉积物复盖的砂矿，最适宜采用一些地球物理方法。

目前，普查和勘探砂矿时，可利用电法勘探（电剖面法、垂向电测深法）、重力勘探和地震勘探。某含金地区的工作经验表明，根据垂向电测深的资料，编绘出隐伏的基岩地形图，并指出古河谷的谷道和谷缘的位置。这些资料对地质地貌填图和普查勘探工作方向的选择，都能给以很大帮助。但是，与此同时，也出现与钻探验证结果不吻合的情况。这主要是由疏松层的电参数变化很大等因素所造成。

重力勘探使用的可能性，决定于基岩和疏松沉积层之间的剩余密度。一些地区的剩余密度变化范围为0.2—0.7克/厘米^3。例如，在某金矿床上进行的综合重力测量和地貌工作表明，在许多地段都能评价出疏松沉积层的厚度，划分出隐伏的，不同水平的阶地，指出钻探工作方向，以后的钻探工作表明，有关第四纪地层厚度的地球物理和勘探资料的重合是令人满意的。

含金砂矿的疏松沉积层（上层）和基层（下层）的弹性参数有较明显的差异，这是使用地震勘探方法的物理前提。在某些地区利用地震资料能够编绘出基岩地形图。进行地震观测能以足够的精度估算疏松层的厚度，并查明隐伏的水系方向。总的看来，金矿物探工作的一些经验证明，高精度重力测量对研究矿田构造具有特殊的意义，是一种比较有效的方法。控矿构造填图、确定结晶基底埋深和追索断裂带，均可利用地震方法加以解决。在寻找与硫化物有关的金矿时，利用激发极化法较为有效。而在找含金石英脉时，压电法（地面和地下）是有效的。为了检查钻孔之间是否有矿，无线电波透视法具有实际意义。毫无疑问，为了确定含矿地段的界限和确定金属矿的位品，井中核物探方法起主要作用。

二、方法与实例

如前所述，在寻找金矿时既需要有合理的综合方法，又需要依据具体的地质条件正确和充分的发挥各种方法的作用。我们不能希求一种通用的综合方法程序和一种最有效的方法手段，不少实例可以说明，一些重要矿床的发现未曾使用过特殊的技术手段，仅仅依靠现有的方法，巧妙地达到了找矿和填图的目的。当前我国物探工作中的一个主要缺点是未重视遵循一定的阶段性，忽略区域物探工作，同时，又不能依据具体的地质条件，针对不同类型矿床的特征恰当地使用综合方法。为了提高寻找金矿的水平，必须克服上述不足之处。下面介绍的方法与实例，对于改进这方面的工作也许是会有启发的。

（一）压电勘探方法

七十年代以来，在普查和勘探石英脉型和伟晶岩型金矿时，压电效应方法有了很大发展。目前作为一种专门的找矿方法，已从试验阶段转入野外生产，并取得了较好的实际效果。

压电勘探方法是利用岩石和矿物的压电性差异来测量压电矿物的压电效应，从而探测金属矿床的一种物探方法。在进行野外工作时，利用地震震源产生的弹性波激发压电性岩石，测量所激发的电场，同时记录地震资料作共同解释，所以，又称地震电法。通过测量被激发的电场，可用于查明若干与压电矿物有关的矿床，使用压电方法的前提是矿体与围岩的压电性相差2—5倍以上，因此在开展野外工作之前，一般先在室内测定岩石样品的压电性。

目前，这个方法在普查、勘探和开采阶段寻找与石英脉有关的金矿床取得了较好的效果。

压电方法分地面观测和地下测量。该方法主要解决以下几个问题：

1. 普查、圈定和追索位于钻孔附近空间或巷道附近空间以及接近地表的压电体；

2. 评价其它物化探方法发现的异常；

3. 利用岩石压电性的差异进行填图。

压电方法的资料解释是利用压电信号和地震信号的运动学与动力学特征。运动学特征是指初至和续至波到达的时间；动力学特征是指两种信号的幅度、波形、频率和持续时间。

在解释地面测量的压电法资料时，主要利用动力学特征，即利用从压电图上计算出的压电信号与地震信号的振幅比作为纵座标，沿爆破点与电极之间距离为横座标而绘制成图。根据几条剖面上的曲线可以确定出压电体的大致位置。

在解释井中和地下测量的资料时，主要利用一种较直观的方法，即以炮点为中心，弹性波速度与压电信号到达时间的乘积为半径画圆弧，通过这些弧所交汇的范围，可大致圈定出矿体的位置。

压电方法对寻找含金石英脉具有比较明显的效果，能探测距炮点50米，甚至100米的脉，地面测量的探测深度为30米，地下为70米。

在托库尔金矿床上应用压电方法表明是有效的。该矿床的含金石英脉有二种类型的压电结构。石英脉标本的压电模数值平均为8.0×10^{-10}CGS单位。它比周围沉积变质岩石压电性高7—8倍。石英在岩脉中占95—97%，按其电阻率、密度、磁化率、声响强度与围岩都相差无几。利用压电法在坑道和钻孔内进行工作，结果取得了明显的异常，根据压电法资料提供了211条建议，检查结果表明，失误不超过整个建议数的5%，同时，确定出到岩脉距离的误差主要是由于岩脉在水平面上不规则的投影所引起的。

作为地面压电测量的结果如图1所示。该区覆盖厚度为18米，使用2公斤硝铵炸药爆破，炮点距为5米，剖面间隔20米，石英伟晶岩体水平投影范围为30×16米，观测是按中间梯度装置，用电极接收信号，极距15米。观测结果绘成振幅曲线和运动时距曲线。从图上可看出，在石英伟晶岩体上振幅增大到300—400微伏，在运动时距曲线上也有明显的突起，说明压电法寻找石英脉型矿床具有良好的效果。

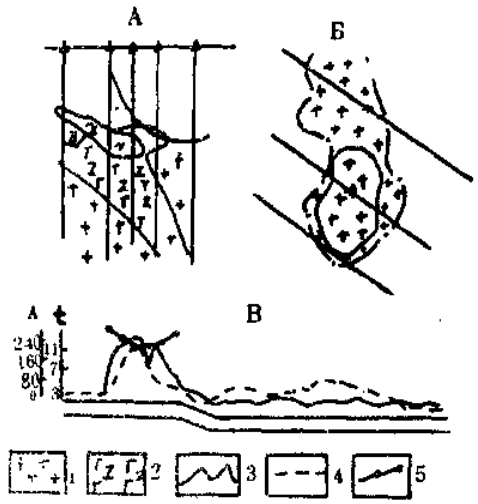


图1 某矿区压电法地面观测结果
А—地质剖面；Б—地质体平面位置，В—振幅曲线
1—花岗岩，2—石英伟晶岩体，3—振幅曲线；
4—平均振幅曲线；5—运动视距曲线

此外，在金矿上通过研究石英的压电性对于查明石英脉的生成世代很有帮助，这是一个新的重要发展方向。通常，石英的压电模数与其生成的物理化学和热动力条件关系密切。许多矿床的石英具有几个矿物世代和不同的压电模数，这就为矿产予测提供了依据。

图2是某硫化物石英脉型金矿床的实例。为了确定不同世代石英的压电模数，沿矿体走向和倾向每隔50—100米采集定向标本，然后作成边长为3厘米的小立方体。沿小立方体的三个相互垂直的面测定石英脉样品的压电模数。计算其数值为6.6×10^{-13}库仑/牛顿。再由三个测量值确定出压电模数的平均值。在该矿床上压电模数的变化范围为1×10^{-13}—7.2×10^{-13}库仑/牛顿，其低值出现在矿床的中心部位，

高值位于侧翼和深层，从而指出了内生矿床的分带性。在含矿矿物组合发育带中，建立起石英压电模数和矿体中金含量之间的反关系，这个关系不论对个别矿体（图2），还是对整个矿床均适合（图3）。

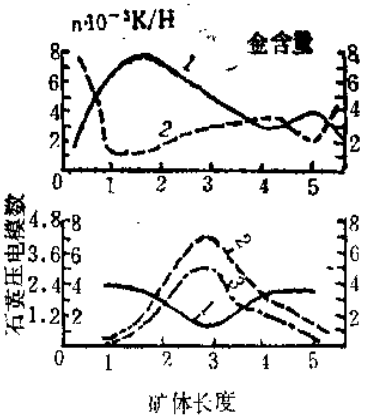


图2　在岩墙（Ⅰ）和岩脉（Ⅱ）型矿床上沿矿体走向的指数变化
1—矿石中金的含量；3—压电模数；3—厚度

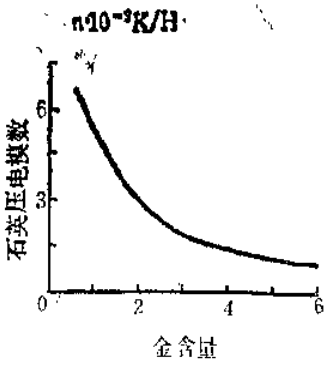


图3　岩墙型矿床上石英压电模数与矿石中金含量的相关性

所阐述的石英压电模数与矿体含金程度之间的相关关系，有助于岩脉型金矿床的予测评价，并可以帮助确定钻孔穿过的石英脉是否含矿。

（二）自然电场法和其它电法

在寻找与硫化物有关的金矿床时，应用古老的自然电场法仍然是有效的，它作为综合方法之一在有些情况下甚至可以起重要作用，或与其它一些电法起相同的作用。在金矿区自然电场法还可以在坑道中进行观测。

应用自然电场法的经验表明，在脉状、网脉状石英型金矿、锡矿、钨矿上常常出现自然电位的正异常（产生正异常的原因有待查明），而赋存于热液蚀变的石英-电气石-绿泥石化岩石中的锡、金矿上则出现自然电位的负异常。查明自然电位的这类特征，对进一步找矿是非常重要的。

图4为某硫化物型金矿的实例。矿床赋存于下古代辉长闪长岩岩体的两端，周围为花岗岩。矿区内广泛发育着不同成分的岩墙。矿床内的矿化包括赤铁矿-磁铁矿-黄铜矿-黄铁矿，以及多金属矿等。其矿带长1公里，厚几十厘米至几米。含量增高的金赋存于岩体厚度增大地段，呈矿柱状产出。

为了查明和圈定矿带范围内矿柱的局部地段，并予测评价和勘探这些地段，进行了地面和地下综合地球物理调查。进行的主要电法方法均有一定效果，随后进行的地下自然电场法观测结果表明，可根据强度从－275到－400毫伏的局部自电异常确定出矿柱的位置（细粒黄铁矿、白铁矿和黄铜矿的含量达25%以上的地段）。在矿柱之间（石英-电气石-黄铁矿矿化组合）的自电强度为－45到－150毫伏。仅在个别情况下（在不含矿的粗粒黄铁矿地段）自电异常强度达到-350毫伏。

矿床坑道和矿井中矿柱顶部出现强的自电异常，这证明硫化物的纵向分布范围较大。

根据反映矿柱的自电异常曲线图所确定的参数 $n=2\Delta/(2m+2\Delta)$（图 5）。证明它们有一定的水平厚度：$n=0.125$ 和 0.27，大于薄层的 n 值（<0.1）。

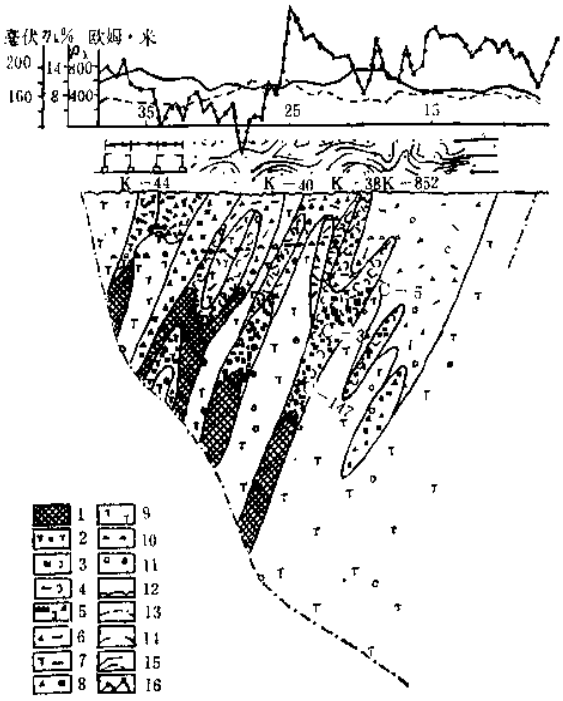


图 4　矿物组合在矿带平面内的分布，并附有地球物理观测结果

1—石英-电气石、细粒黄铁矿；2—电气石、细粒黄铁矿；3—细粒黄铁矿、白铁矿；4—黄铜矿、白铁矿；5—黄铜矿、白铁矿、磁铁矿；6—磁铁矿、黄铜矿；7—电气石、黄铜矿；8—磁铁矿、中粒黄铁矿；9—电气石；10—地下巷道；11—矿井外（○）和矿井内（·）；12—探槽；13—断裂破碎；14—激发极化法偶极测深的 η_K 等值线；15—激发极化法对称剖面测量的 η_K 曲线(a)和 ρ_K 曲线；16—无线电波法的 Ex 曲线（f=21.5千赫）

借助于对数量板可确定出柱状矿体的延伸，计算的曲线接近于量板曲线的 $2\tau=\infty$（图 5）。计算表明。矿体沿倾向分布相当大，根据量板H线可确定出矿体堆藏深度的近似值

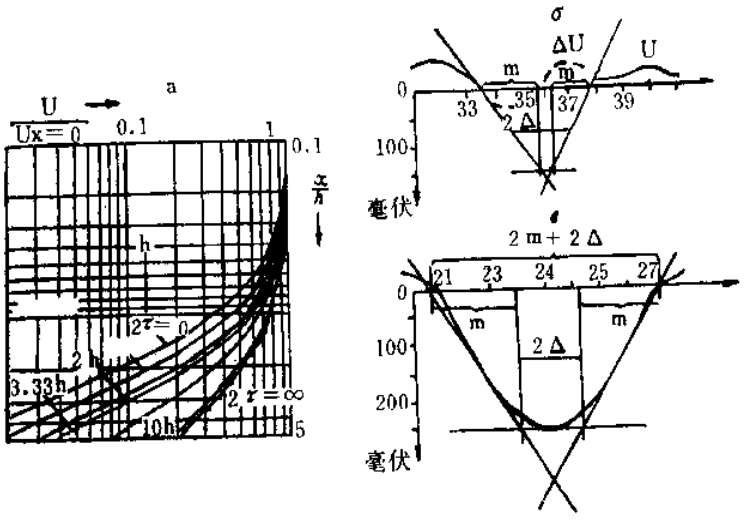


图 5　在坑道№1的矿体上根据自然电场法地下观测数据确定的矿柱分布的形态和深度

a—沿平巷№2利用电位对数量板（根据谢苗诺夫）确定柱状矿体向深部的延伸；б、в 为确定矿柱参数计算的曲线（б—当n=0.125和в—当n=0.27）。

为7.5米。按直立圆柱体公式所求出的矿体上缘埋深等于4—5米。如果认为负异场宽度一般为向深部延伸矿带的1/3—1/5，那么根据在平巷№2、5和6的矿柱上所测到的自然电位异常估计，矿体延伸深度>300—500米，并证明了在钻井中，矿柱同样对应着自电负异常。

应该指出的是，位于矿体东部的矿柱长度沿倾向达500—700米，而在个别岩脉内则为1000—1200米，在同样情况下沿走向为30—35米。根据电位曲线计算的△U曲线，按着公式 $tg\alpha = 2\sqrt{x_+ \cdot x_-}/|x_+ + x_-|$，相当可靠地计算了矿柱的倾角，如图5，№2平巷$\alpha$=45°。

（三）重磁方法

重力和磁测方法在寻找金矿工作中的作用，从区域矿产予测直到详查阶段，都能较好地发挥出它们应有的作用。关键在于首先查明应用重磁方法的具体条件，在鄂霍茨克—楚科奇火山岩带中，含矿地段为次火山岩相流纹岩细脉交代石英化和冰长石化带，与周围安山岩在磁性和密度上均有差异，这就为使用重磁方法查明含矿段提供了依据。

在卡利雅区，根据重磁资料查出了两个北西向共轭的控矿构造和许多矿点，断裂在重力场上显示出明显的重力梯度带，而在地磁场中则呈现出线状延伸的正异常。

在上印迪吉尔卡区应用航磁资料，在岩浆岩体外接触带上圈出了一些接触变质高温热液生成物。已确定，与低温生成物有成因关系的金矿产于磁异常衰减区。

这些经验无疑是很有意义的。下面是北哈萨克斯坦的实例。这是根据经验方法由重磁资料进行含矿予测的结果。所利用的原始资料是取自1:20万比例尺的重力和磁测平面等值线图。首先分析了若干已知金矿在重力场和磁场中的分布规律，根据17个参数确定出金矿的一些模式。这17个标志（Z_1、Z_2、$Z_3 \cdots Z_{17}$）的具体内容是Z_1—$\triangle g_{max}$—$\triangle g_{min}$，规定地质体位于梯度带东侧为正。Z_2—L_1/L_2，其中L_1和L_2分别为矿体到$\triangle g_{max}$和$\triangle g_{min}$的距离。

选择Z_1，Z_2这两个标志是因为金矿体通常位于△g的高水平梯度带上。

Z_3、Z_5、Z_7、Z_9——一定类型异常等值线密集带到矿体的垂直距离。这是一相对值，地质体位于异常外为正，否则为负。

Z_4，Z_6，Z_8，Z_{10}—异常走向的方位角。

Z_3，Z_4是强度为－50毫伽的等轴状负异常（Ⅰ级异常），它们决定于志留纪、志留-泥盆纪、及较年轻的侵入岩体。

Z_5和Z_6是强度低（－20毫伽），且形状不规则的Ⅱ级负异常，与巨大的上奥陶纪的深成岩体有关。

Z_7和Z_8为任意形状，且往往是椭圆形的，范围较大的，强度为10—40毫伽的正异常（Ⅰ级），它与古老的（太古代—元古代—寒武纪）的基底隆起有关，被中基性喷出岩复杂化。

Z_9和Z_{10}是4—10毫伽的Ⅱ级异常，其形状和大小极为多样化，也是最为典型的。存在着不大的局部极大和极小值，它与中下奥陶纪沉积的喷出物以及次火山侵入体有关。

由于地质体处于重力梯度带内，它在较大范围内并非都能反映出强度的差异，所以，还

得引入一些标志：

Z_{11}——在半径为2公里的弧形中心上的梯度极大值，$Wxz = \triangle g_{max}/\triangle x$；

Z_{12}——最大梯度方向的方位角。

其余的五个标志是磁场结构与金矿体在磁场中的位置。

Z_{13}——矿体周围介质的磁场强度；

Z_{14}——周围介质磁场等值线走向的方位角；

Z_{15}——周围介质异常的长宽比值，$Z_{15} = b/d$；

Z_{16}，Z_{17}——与重力场中Z_3、$Z_4 \cdots Z_{10}$类似的两个标志。

地球物理标志系统$U = (Z_1, Z_2 \cdots, Z_{17})$直接表征了金矿体的状况，可以作为金矿标准目标的典型化模式的基础，这对于矿床模式的予测是必须的。具体建立模式的实例如图6所示。其中$\mu(i_1 j)max$，$\mu(i, j)min$表示第i，j目标（包括标准体）之间相关重迭的最大和最小范围，根据$\mu = 0.88$可识别出大多数的矿床。图6、A的弧形半径$R<3$公里，矿体位于弧内，Б说明二个和三个以上的μmin范围，大大缩小了远景区。

根据上述标志按统计判别的数学方法和专门的程序，可找出不同类型的标准目标，并具体进行分类，从而查明远景区。

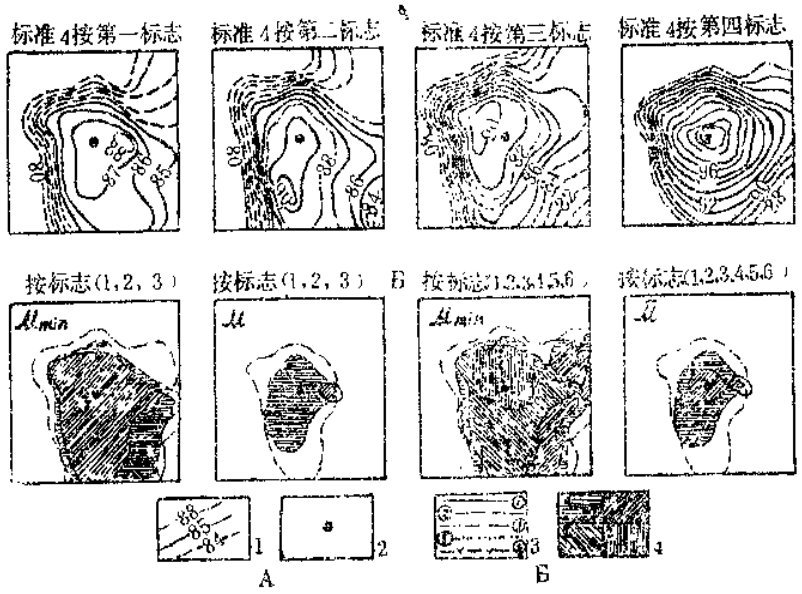


图6 金矿模型实例

А—由$U = (Z_1, \cdots Z_{17})$表征的模型；Б—根据标志μmin和μ圈定远景区的原则，相对于А的条件值：1—$\mu(i, j) < \mu min$范围的等值线（а），$\mu(j, j) \geq \mu min$的等值线（б），$\mu(i, j) = \mu$（в）；2—潜在的《点》（特别是矿床）；相对于Б的条件值：3—根据标准（圈内的数字）$\mu min = 0.88$或$\mu = 0.88$值的范围；4—μmin或μ的一般范围，两个标准（а）、三个（в）、四个（в）、五个（г）标准。

图7为北哈萨克斯坦1200平方公里面积（按3×2公里测网2560个测点）的计算结果。根据以前的地质资料，远景区位于图面上矿体5—4—2一线上，根据物探结果又查明了中部和东南部新的金矿远景区，然而这里曾被认为是无矿地区。

（四）资料的统计整理与解释

在详查中综合方法的应用效果取决于多种因素，应寻求最合理的方法组合，并非方法愈多愈好。由于各种方法所提供的信息的作用不同，因此还需要考虑地质与经济效果，研究各种参数的信息度，然后作出合理的解释。

在列依斯克金矿利用专门编制的《信息度估算与识别》的程序，定量地估算了各种标志的信息度和方法的效能，并用图象识别方法进行了综合解释。作为一种定量的参数，采用所得到的信息量与完整地解决问题所必须的信息量的比值，称为效能系数 $K_{э\phi}$。

$$K_{э\phi}=\frac{I_{x\to y}}{I_x}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}P(Xi\,Yj)\log\frac{P(Xi\,Yj)}{P(Xi)\cdot P(Yj)}}{\sum_{i=1}^{n}P(Xi)\log P(Xi)}$$

式中，$I_{x\to y}$—在 y 系统中含 x 系统的信息；I_x—x 系统的全部信息；$P(X_i)$—X 系统 i 状态的概率；$P(y_j)$—y系统 j 状态的概率；$P(x_iy_j)$—x系统 i 状态和 y 系统 j 状态同时存在的概率；n—x 系统状态的数量；m—y 系统状态的数量。

指数 $K_{э\phi}$（效能系数）的数值从零到 1 变化。当物理场的标志能够正确无误地把所有参加目标选择的样品都划分成有意义的地质类时，则等于 1，当标志不具有这些地质类别的任何信息时，则等于零。

考虑到矿化属于粉砂岩和页岩的碳质硫化物组合，X系统的状态（地质目标）的数值应为2（n=2），即选取在给定的深度范围内对炭质硫化物岩石成矿有利的地区和缺失这些岩石的地区。作为y系统应是给定的一些方法：过渡场法、自然电场法、激发极化法、偶极剖面法或中间梯度法。y系统的状态数等于4（m=4，如下表2）。

表 2

标　志	m_1	m_2	m_3	m_4
视电阻率（偶极剖面法）（欧姆·米）	0—500	500—1000	1000—2000	>2000
视电阻率（中间梯度法）（欧姆·米）	0—100	100—500	500—2000	>2000
自然电位（自然电场法）（毫伏）		-(150—300)	-(300—500)	>500
视极化率（激发极化法）（%）	0—10	10—20	20—30	>30
过渡过程（过渡过程法）				
（微伏/安）τ=1.5毫秒	0—300	300—1000	1000—3000	>3000
τ=3毫秒	0—50	50—100	100—150	>150

向计算机输入的原始数据是取自基准地质剖面和与其相应的物理场的曲线（图 8）。对曲线上按50米间隔分布的所有点，根据地质剖面来确定其所属的地质类型，而按物理场的曲线确定所有标志的等级。

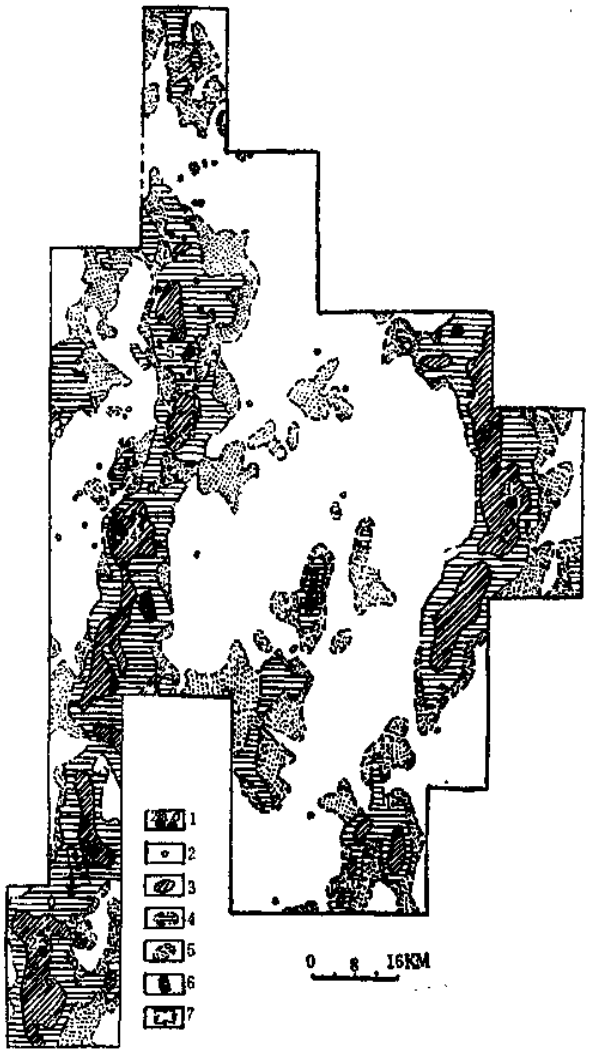


图 7　根据地球物理资料在北哈萨克斯坦某金矿区的远景略图
1—标准体：a—大的，б—中等的；2—已知的金矿体；3—圈定金矿体密集度 Pσ=0.06—0.17 的范围（Ⅰ级）；4—Pσ=0.01-0.02 的范围（Ⅱ级）；5—Pσ＜0.01的范围（Ⅲ级）；6—确定详查的远景区；7—详细普查评价研究的地区

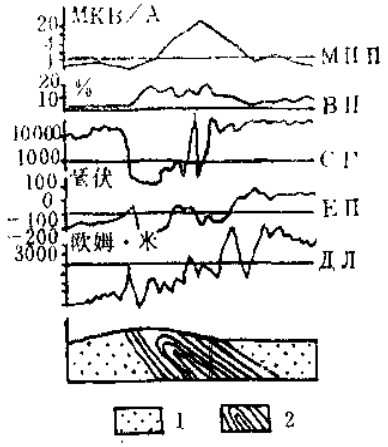


图 8　与物理场曲线相吻合的地质剖面略图
1—钙质砂岩和灰岩；2—近矿炭质粉砂岩和页岩

计算深度达100米的各种方法及方法组合的效能系数列于表 3。计算表明，经济效益最大且最有效的是三种方法的组合。进一步继续增加综合方法的数目并没有明显地增加方法组合的效能（效能系数仅增加3.4—6%），却使费用大大增加。

电法的效能和价格的对比特征　　表 3

综合方法数	ОГ	МПП	ЕП	ВП	ДП	系数	每1平方公里测量的价格（卢布）
1	+					0.745	394
1		+				0.466	223
1			+			0.343	270
1				+		0.575	1426
1					+	0.249	394
2	+	+				0.830	617
2	+					0.797	654
2	+		+			0.787	1820
2	+			+	+	0.796	782
3	+	+	+			0.868	887
3	+	+		+		0.894	2043
3	+	+			+	0.944	1011
4	+	+	+	+		0.934	2313
4	+	+	+		+	0.954	1281
5	+	+	+	+	+	0.958	2707

对查明深度达100米的矿化体的普查来说，最有效的是采用中间梯度法、过渡过程法和自然电场法的方法组合（$K_{эф}=0.92$；每平方公里花费887卢布）。当研究深度达200米时，系数降到0.7。最有效的（$K_{эф}=0.79$），但花费最昂贵的（每平方公里2043卢布）是激发极化法、中间梯度法和过渡过程法的方法组合。

识别（予测）的问题可由下述方法来确定：在已知矿床上根据地球物理方法的资料和钻探结果的对比来解释地球物理资料，并确定含金硫化矿化与埋深达100米的炭质岩石的界限。

矿层在形态上近似于产状平缓的层状细脉浸染状石英硫化物矿体，厚度为几十米。延伸数百米。硫化物在岩石中的平均含量一般不超过10%，此外，有明显的炭化、绢云母化、磁铁矿化等，其视极化率（约60%）、电化学性增高，视电阻率降低，一般为几到几十欧姆·米，而围岩是几千欧姆·米。

利用上述标志对某矿区西部的五条剖面，204个测点的资料作了训练，在东部的六条剖面204个点上作识别。其结果（图9）表明，所划分出的位置与钻井中所见到的矿层位置接近，识别的误差为4%。

实际上这种方法对其它类型的矿床和其它参数的资料都是有意义的。

（五）建立金矿的地质地球物理模式

在深入研究矿床地质和地球物理特征的基础上建立金矿地质地球物理模式，对于探讨金

矿的成因与构造，确定综合找矿方法的方案都是十分重要的。随着综合方法的地质与经济效果的提高，这种模式将不断完善，它应当包含由不同手段取得的有关矿床成因、矿体位置、围岩条件、矿物组分、地表出露状况、物理性质等多方面的资料，它能够提供出矿床的概括全貌，这是综合地球物理研究的重要发展内容。

例如：外贝加尔的内生金矿床大致可以分成三类，即Ⅰ—产于侵入岩和沉积岩内浅部建造的矿床；Ⅱ—产于侵入岩内中等深度建造的矿床；Ⅲ—产于沉积变质岩内的中深度建造的矿床。图10给出了类型Ⅲ的矿床模式。它是以卡赞诺夫，佩姆科夫等矿床作为原型的，其矿脉90—97%是由粗粒结晶和块状的石英组成。硫化物含量为1%—10%，其中主要是毒砂和黄铁矿，其次是Cu、Pb、Zn硫化物，有时还有Ag、Sb的硫盐等。这些矿物的特点是矿体的形态有规律地随围岩成分、构造、物理机械性质而变化。并在物理场中有特殊的反映。类型Ⅲ的特征是矿体具有垂直分带性。首先是围岩的构造和成分随深度变化的分带性。矿化的分带性也反映在金属矿物的物理性质上，例如，毒砂热电性向下层方向由电子导电变成离子导电性。同时，根据矿柱确定出毒砂的电子和离子导电性的一定百分比，据此可确定出石英脉内气液包裹体的形成温度。包裹体温度出现连续地、有规律地增长主要决定于石英脉形成的深度。

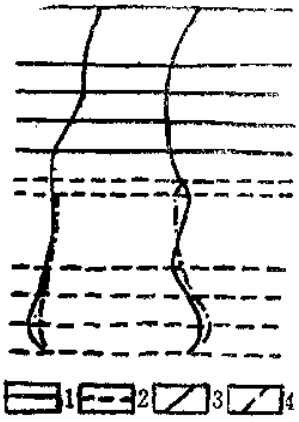


图9　区内平面略图
1—用作计算机学习时的标准剖面；2—进行图象识别法资料解释的剖面；3—按钻孔资料确定的近矿砂岩的范围；4—根据地球物理资料用图象识别法资料确定的近矿砂岩的范围。

成矿元素的垂向地球化学分带性（一些定量的参数是按Л.Н.Овчинников和С.В.

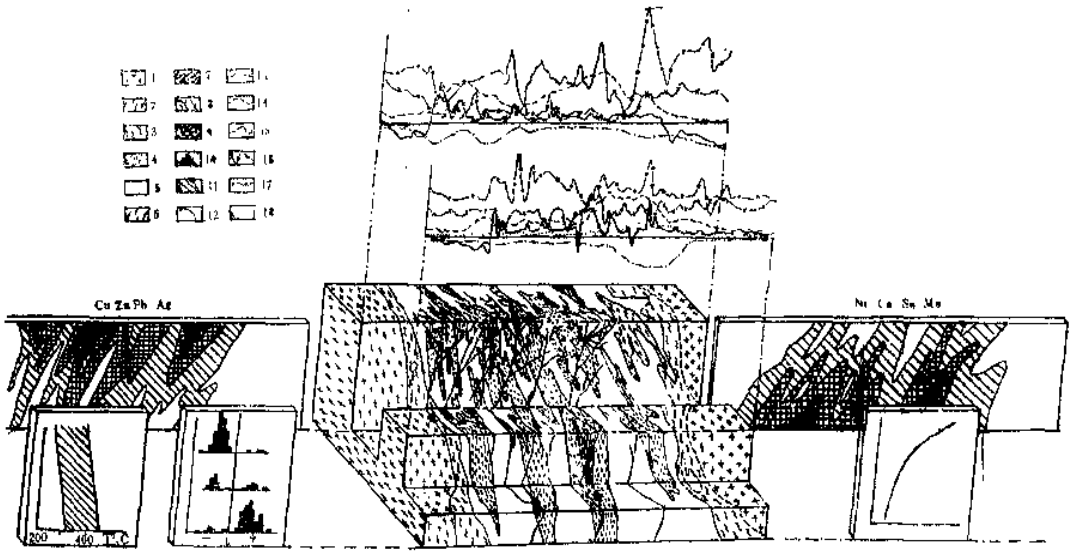


图10　Ⅰ型金矿床地质地球物理模式
1—花岗岩和花岗闪长岩；2—花岗片麻岩；3—角闪片麻岩；4—黑云母片岩；5—黑云母角闪石片岩和片麻岩；6—角闪岩和角闪片岩；7—大理石化灰岩；8—含金石英脉；9—多重晕；10—毒砂热电性频数图；11—石英脉中的气液包裹体温度变化区；12—取自钻孔岩芯的石英脉下部断面密度变化曲线；13—自电曲线；14—激发极化曲线；15—磁测ΔZ曲线；16—视电阻率曲线；17—硫化物含量曲线；18—原生晕曲线

Григорян方法计算的），表现出的趋势是随着深度的增加，铜、锌、铅、银的含量减少，而镍、锡、钼、铝的含量增加。因此，有前一组元素的巨厚层和较强的晕是发现含矿矿化的良好标志；后一组的强晕是不利的。在普查时这些元素的晕相互吻合很重要。

由于多数矿田的地形急剧切割，有可能研究其表部即相当于矿脉的岩柱顶部和中部物理场的特征。与断面侵蚀程度无关的自然电场的强异常地段是炭化和石墨化页岩地段，往往原生晕值增高。金属矿经常赋存于这些异常地段的边缘。强烈变化的磁场是上层的特征（深处变化最小）。同时，已知矿田的磁场非常平缓。单个异常反映了一些具有磁铁矿和磁黄铁矿包裹体的矿体。这说明矿田上部可视为矿体上部的交代岩带，并出现一组相连结的脉-细脉体，其中磁性矿物分布较分散，但发育普遍。它们在深部赋存于单个的脉及其外接触带的近脉地段。近脉的硫化物数量占优势是这些矿床的特点，有时厚度达2米多。因此，η_K异常反映的多半不是含金硫化物的石英脉本身，而是一些热液变质岩石。这样，沿表部就出现宽大的η_K异常（矿体上部交代岩带是集中的硫化物矿化作用的富集带）。在多数情况下，它们在深层强度不大。重要的是在硫化物聚集的地段出现ρ_K异常。在多数的脉-细脉和部分石英-长石脉的上层（当不存在氧化带时），通常为高电阻。在有相当大的侵蚀断裂情况下，个别ρ_K异常对应于厚的石英脉。表生作用广泛发育的地区，利用电剖面法效果较好，其特征是视电阻率较低（<200欧姆·米）。

最后应该指出，尽管在寻找金矿时存在许多困难，需要强调使用综合方法来提高找矿效果，但是，在多数情况下，根据具体条件选用一、二种简便有效的方法找矿仍然是非常吸引人的。众所周知，找金矿工作不仅需要系统的地质工作，而且历来就具有传统的群众性，近代的“找金热”中，使用了不同类型的交流电磁法仪器，取得了有效的结果。例如，近些年来，澳大利亚昆士兰州居民在曾经发现过块金的地区使用轻便的电子金属探测器，发现过重达150—200克的块金（一般发现的块金为15克以下）。

经验表明，这种金属探测器适于寻找良导体，专门用于找块金、铜和银等。其探测深度、分辨能力可以根据需要作一定的调节。

姜枚　王秀琨　编译

主要参考文献

[1] 压电法
《国外地质勘探技术》1981年　10期　姜枚

[2] 压电法——一种寻找石英脉型和伟晶岩型矿床的有效手段
《地质科技动态》1981年　12期　崔林沛

[3] 苏联用X荧光法找金
《地质科技动态》1981年　7期　崔林沛

[4] 澳大利亚昆士兰州利用金属探测器找金
《地质科技动态》1980年　10期　徐年生

[5] 列别金型的库腊纳赫型金矿床的普查准则
《地质科技动态》1980年　10期　刘瑞珊

[6] В.Е.Никитский и В.В.Бродовой

Комплексирование геофизических методов при решении геологических задач. М.《Недра》, 1976

[7] А.Г.Тархов等
Комплексирование геофизических методов. М.《Недра》, 1982

[8] В.Т.Врублевский
Эмпирический способ регионального прогнозирования золота по геофизическим признакам с использованием ЭВМ.《Геология и геофизика》, 1974,№6

[9] К.М.Радченко等
Применение аппарата распознавания образцов для прогнозирования золоторудных залежей,《Геология и геофизика》, 1977, №4

[10] И.Т.Самарцев等
Пьезоэлектрические свойства кварца на золоторудных месторождениях.《Разведка и охрана недр》, 1978,№11

[11] А.А.Воротынцев, В.Е.Ланда
Геолого-геофизическая оценка рудных столбов на золото-сульфидном месторождении.《Геология и геофизика》,1978, №1

[12] Р.С.Сейфуллин, Ю.З.Сидтиков等
Геолого-геофизические модели золоторудных месторождений Забайкалья.《Геология и геофизика》, 1978, №9

地球物理和地质学在芬兰镍-铜矿床勘探工作中的应用

芬兰最重要的镍-铜矿床位于该国的中部和南部，这些矿床围绕中芬兰花岗岩区形成一个明显的环形构造。具有工业开采价值的硫化矿可以分为与基性和超基性岩有关的铜镍矿和结晶片岩中含铜、锌、钴、镍、铅的硫化矿。硫化矿带分为三个主要的成矿单元：科塔拉蒂（Kotalahti）Ni—Cu矿带，维汉蒂（Vihanti）Zn-Pb-Cu矿带和奥托空普（Outokumpu）Cu-Co-Zn矿带。矿床的位置见图1。维汉蒂矿带包括维汉蒂、皮哈萨尔密和萨维亚锌-铜矿床，在奥托空普矿区主要矿床为奥托空普和伏欧诺斯铜-钴矿床，赋存于黑色片岩、蛇绿岩、矽卡岩和石英岩组成的岩系中，致密铜-钴矿主要产于石英岩中。目前大部分已知的主要镍-铜矿床产在10到40公里宽的科塔拉蒂镍-铜矿带内，包括希杜拉（在图1上的编号为7）、马科拉（8）、科塔拉蒂（10）、劳昆堪加斯（12）和帕里卡拉矿床（13）。科塔拉蒂带的矿化受四种因素的控制：1. 基性超基性岩；2. 横推断层；3. 穹窿和短轴背斜；4.

基性岩浆与围岩的相互作用，其中最重要的是硫化。

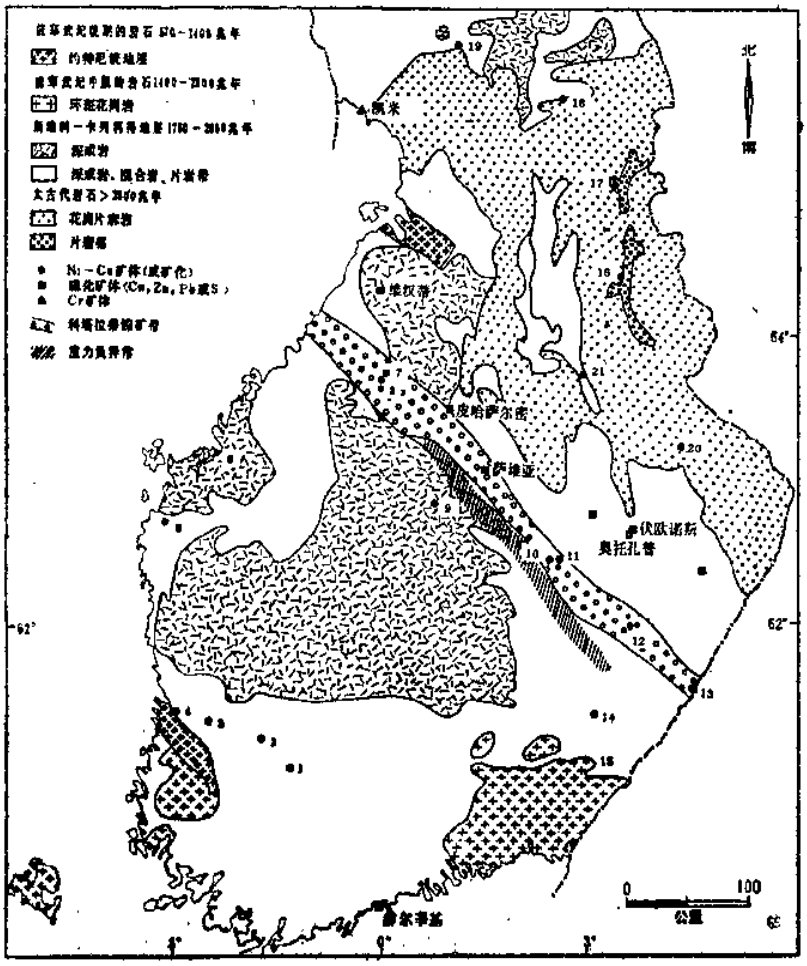


图 1 芬兰中南部镍-铜矿床位置图（矿床的编号见表1）

从岩性来讲，科塔拉蒂镍-铜带所赋存的岩石分为：1. 超基性分异较差的侵入岩；2. 以超基性侵入岩为主，但有从橄榄岩到闪长岩的分异；3. 基性分异侵入岩，以辉长岩为主要组分；4. 小型富铁侵入体，组分为角闪岩、辉闪长和辉长岩，看来在成因上与大的石英闪长岩体有关。目前所发现的具有工业价值的矿石大部分属于第一类和第二类。第三类产地有的有工业价值，有的没有，第三类中最富的矿化与超基性分异物质有关。

硫化矿中的Ni含量与围岩种类有关，在超基性岩中Ni含量变化范围是0.5—20%，平均5%；辉长岩的变化范围是0.1—10%，平均0.8%；然而工业矿床镍的变化范围一般为4—12%。芬兰主要镍铜矿的含量和储量见表1。

围绕中芬兰花岗岩区镍铜矿床呈环形分布，在环形区的西南部分有两个赋存于超基性岩中的具有工业价值的镍矿。小的一个，基尔玛科斯基矿床（1）早在70年代初就开完了。大的一个，斯多密矿床（2）位于基尔玛科斯基西北约40公里。芬兰南部的这一镍铜矿带包括一系列镍矿点。在中芬兰花岗岩体的西部是彼多拉蒂（5）和奥拉外南（6）镍铜矿。

芬兰的主要镍铜矿床　　表 1

矿床名称	含量（%）		储量（百万吨）			发现年份	开采时期	
	Ni	Cu	<1	1—10	>10		起	止
1. 基尔玛科斯基	0.36	0.27	×			1962	1971	1974
2. 斯多密	0.83	0.46		×	?	1961	1978	
科外罗贾	0.44	0.32	×			1961	1975	1978
3. 萨克斯贾维	0.24	0.33		×		1969		
4. 希外拉	0.50	0.25	×			1955		
5. 彼多拉蒂	0.47	0.38	×			1957	1972	1973
6. 奥拉外南	0.93	0.16		×		1973		
7. 希杜拉	0.70	0.20		×	?	1961	1970	
8. 马科拉	0.87	0.43	×			1937	1942	1954
9. 伊尔莫拉蒂	0.37	0.28	×			1963		
10. 科塔拉蒂	0.75	0.30			×	1954	1959	
11. 萨卡拉蒂	0.87	0.29	×			1974		
12. 劳昆堪加斯	0.33	0.10*		×	?	1969		
13. 瑞努	0.32	0.28		×		1937		
列沃马基	0.29	0.31	×	?		1964		
14. 基杜拉	1.00	0.28	×			1951	1970	1970
15. 泰尔卡拉	1.07	0.30	×			1961	1969	1970
16. 阿罗拉	0.50	?	×			1963		
17. 希塔哈朱	0.86	0.43	×			1963		
皮乌拉霍	0.52	0.21	×			1963		
18. 波蒂瓦拉	0.11	0.20			×	1962		
19. 苏汉科	0.27	0.31	×			1965		
瓦拉兰彼	0.31	0.20			×	1976		
尼蒂兰彼	0.60	0.52	×			1977		
20. 泰尼奥瓦拉	0.50	0.03	×			1975		
21. 塔尔维瓦拉	0.26	0.14			×	1977		

* 指1980年发现新矿之前，新矿Ni含量为1—2%，Cu为0.4%。

含镍铜矿的基性和超基性侵入体常常与深断裂带有关，典型的例子是科塔拉蒂带。侵入体的延深比横向分布范围大，例如希杜拉以及科塔拉蒂在某种程度上都像是筒状结构。

在科塔拉蒂镍矿带以南的镍矿体常常很浅。在某些矿体中（如基尔玛科斯基和泰尔卡拉）花岗岩破坏了部分超基性岩体，结果只剩下较小的无代表性的部分。

某些超基性岩体显示了组分上的分层，例如在劳昆堪加斯和斯多密矿床上，组分不同的层相互迭加，其厚度由20米左右到100米。硫化物总是同基性最强的层有关。1980年发现的

劳昆堪加斯镍铜矿是通过岩石地球化学和磁异常找到的，它与橄榄辉长岩和橄榄岩有关。

库莫-索穆萨密片岩带是一条古生代绿岩带，有一些较小的镍铜矿床，其中最重要的矿床与该带的超基性岩有关，如阿罗拉、希塔哈朱和皮乌拉霍。

索穆萨密地区的镍铜矿赋存于经过强烈构造运动的岩系中(包括科马提岩组分的基性-超基性火山岩)，与大的蛇纹岩体有关。硫化物以浸染形式赋存于蛇纹岩中或者在经受构造破坏的方解石碳酸盐岩和角闪绿泥石片岩中形成角砾状矿体。构造特征明显地控制角砾状和致密状矿石的位置。

泰尼奥瓦拉镍铜矿床位于150米长、西倾70°的蛇纹岩层中，被太古代花岗闪长岩和石英闪长岩包围。最高品位的钙块云母镍黄铁矿矿化产在蛇纹岩体的南端，岩体的核心部分也含有细粒浸染硫化物。

特别富含镍、铜、钴、锌的黑色片岩见于塔尔维瓦拉地区。除上述元素外，矿化中的镁含量也很高。

Cr、Fe-Ti-V和Ni-Cu矿化见于从凯米到芬兰和苏联边界的东西向层状侵入岩带内。这一带包括苏汉科、瓦拉兰彼、尼蒂兰彼和波蒂瓦拉的缓倾矿化。层状侵入体渗入卡列累亚片岩与基底片麻岩的接触面，形成层状的岩系，后来由于构造运动又被分割成若干块段。

在芬兰北部有数百个超基性岩体，但没有硫化镍矿的直接显示。

普查铜镍矿所用的方法

如上所述，有工业价值的镍矿位于科塔拉蒂镍铜矿带内以及环绕中芬兰花岗岩体，特别是在其西南边缘，镍矿的勘探工作集中在这一地区已有几十年的历史。使用过的主要勘查方法是追踪漂石、地质填图、航空和地面物探、化探取样以及在基性超基性侵入岩上作岩石地球化学测量，区分矿与非矿。对镍铜矿化有远景的容矿岩石的特征是在铁镁质硅酸盐（如橄榄石、辉石和闪石）中镍的含量升高，这一特征加上硫化物与硅酸盐的比例已用于区分有远景的容矿岩石与无远景的围岩。

在普查镍铜矿的过程中，作了大面积的地面物化探工作。近年来化探，主要是冰碛物和腐植土取样，愈来愈多地用于检查物探异常。取样和钻探设备的改进使得从浮土覆盖下的基岩中取样更加容易。从基岩表面提取岩屑不仅能用于化探，还能为地质填图服务，根据样品可以识别岩石类型。

勘查工作一般先从发现含镍铜转石或露头（天然的和人工的）开始，假如先发现转石，进一步去找更多的转石并通过转石追踪露头。一般来说，在追踪转石的同时开展地质填图。在芬兰的情况下，常常未能通过追踪转石和地质填图找到转石的来源，这样下一步就是作物化探测量了。初步地质填图通过山地工程验证，在山地工程中还可进行物化探工作。

转石受冰川搬运的距离各地不同，从几米到几十公里。根据转石找矿的困难在于同一地区冰川的流动方向不同，冰碛层的年代不同以及含硫化物的转石风化很快，转石的分布还受到地形和岩层类型变化的影响。

在芬兰镍铜矿床普查工作中物探方法的作用是显著的，这是因为当地有理想的地球物理前提。浮土厚度一般小于30米，除沿海和湖底之外，浮土的电阻率较高，从50到30,000欧

姆·米，含矿的黑色片岩常可用电法探测。另外，由于黑色片岩常常含较多的磁黄铁矿，因此又可通过磁法探测。在勘查工作中物探用于三个方面：1. 直接根据异常圈定矿体；2. 先圈出容矿岩石；3. 提供辅助性地质资料。圈定含矿铁镁质岩石的可能性不仅取决于它的大小和产状，还取决于它的蛇纹岩化程度。

在区域工作阶段航磁和航电起到重要作用。芬兰地质调查所已作过全国的航磁测量，线距400米，航高150米，航电也基本上覆盖了全境。自七十年代初以来开始进行线距125—200米、航高40米的航空物探工作，利用这些资料编制了详细物探图件，提供了间接找矿的地质信息。

在几十平方公里的范围内系统进行了地面磁测、水平线圈电磁测量（频率一般小于5000赫）和重力测量，点距20米，线距50—100米。此外还作过高频水平线圈法（频率高于10,000赫）、激发极化法、土拉姆法和瞬变电磁法。在井孔中采用的物探方法有电阻率法，充电法和磁法。探测镍铜矿体所采用的主要地面物探方法见表2。

表2

矿床名称	磁法	水平线圈法		重力	激电	土拉姆	瞬变电磁法	
		f<5000 Hz	f>10,000Hz				PEM	MPP
科塔拉蒂	×	×		×				
泰尔卡拉	×	×		×	×			
基杜拉	×	×			×			
苏汉科	×	×	×	○				
尼蒂兰彼	×	×			×			
希塔哈朱	×	×		×				
希杜拉	×	×		×				
斯多密	×	○	×	×	×			
科外罗贾	×	○	×	×	×			
基尔玛科斯基	×	○		×	×			
彼多拉蒂	×	×	×	×	○			
伊尔莫拉蒂	×	○	×	×		×		
萨卡拉蒂	×	○					×	
奥拉外南	×							×
希外拉	×	○		○				

注：×成功的方法；○不成功的方法

几乎在所有矿床上都采用了磁法和水平线圈法，如果矿石的导电性差就用高频水平线圈法和激发极化法重测。重力测量用于圈定含矿的铁镁质侵入体或者当矿体直立时直接探测矿体（科塔拉蒂、泰尔卡拉）。当矿体为水或粘土覆盖时，瞬变电磁法可发挥很大作用。

表3列举了芬兰主要镍铜矿发现过程中最初的线索，选择孔位的依据以及为发现矿床提供补充信息的方法。大多数勘查工作都是由发现转石开始的，而确定孔位则主要根据磁异常

和水平线圈法异常，重力和激发极化法对矿床的发现也提供了重要资料。

表 3

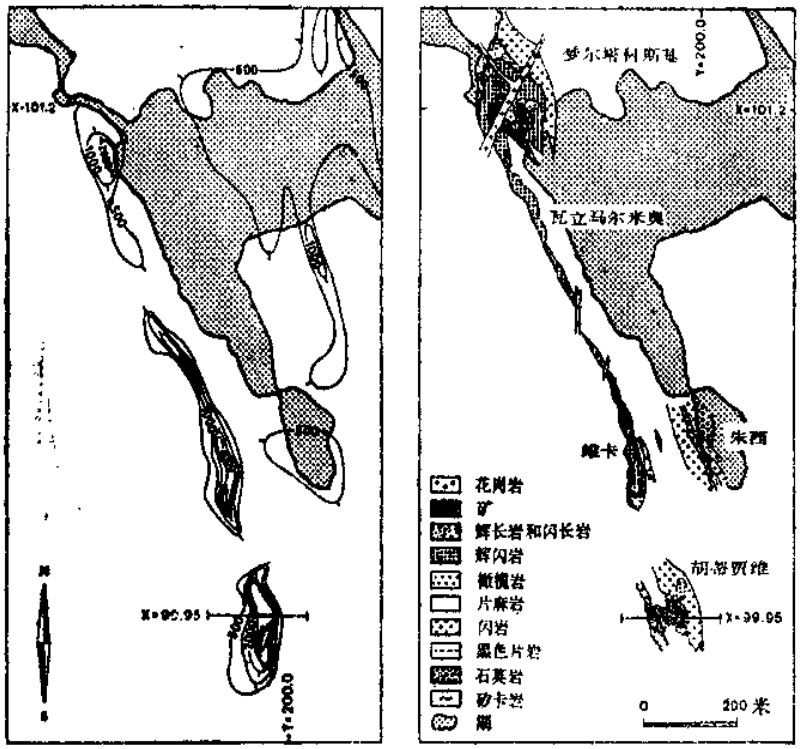
矿床名称	最初的线索	报矿者送样	首次定孔位的依据	提供补充信息的方法
1. 基尔玛科斯基	转石	×	磁异常	剩余重力正异常、激电异常
2. 斯多密	转石	×	磁和化探次生晕异常	重力正异常、激电异常
科外罗贾	露头		磁和水平线圈异常	重力负异常、激电异常
4. 希外拉	转石	×	磁和水平线圈异常	重力正异常
5. 彼多拉蒂	转石	×	磁和水平线圈异常	重力正异常
6. 奥拉外南	转石	×	磁异常	瞬变电磁(MPP)异常
7. 希杜拉	转石和大规模磁异常	×	巨大蛇纹岩层的接触带引起磁异常	水平线圈异常和重力负异常
9. 伊尔莫拉蒂	在地质填图时发现露头	×	磁和土拉姆异常	重力正异常，高频水平线圈异常
10. 科塔拉蒂	根据含硫化物黑色片岩样品对该区进行地质调查，在公路挖掘面上发现露头	×	磁和水平线圈异常	重力正异常
11. 萨卡拉蒂	转石		磁异常	瞬变电磁(PEM)异常
14. 基杜拉	从公路挖掘面上取含镍标本	×	磁异常	水平线圈和激电异常
15. 泰尔卡拉	从挖掘面上取的含镍标本	×	磁和水平线圈异常	重力正异常
17. 希塔哈朱	转石	×	磁和水平线圈异常	重力正异常
19. 苏汉科	转石	×	磁和水平线圈异常	自电异常
瓦拉兰彼	航磁和电磁异常		磁和水平线圈异常	自电和声频大地电磁异常
尼蒂兰彼	航磁和电磁异常		磁和水平线圈异常	激电和自电异常

镍铜矿床的地质和地球物理概况

按照上述的镍铜成矿区，分别举出一些实例，说明芬兰主要镍铜矿床的地质和地球物理概况。

（一）科塔拉蒂矿床

科塔拉蒂矿床位于萨沃（Savo）片岩带内，在科塔拉蒂地区该片岩带，包括混合岩化的和脉状云母片麻岩，总的走向北西，倾角近于垂直。图2和图3表示科塔拉蒂矿山的地质图、胡蒂贾维（Huuhtijärvi）地质断面和物探结果图。在铁镁质杂岩中赋存有维卡、瓦立马尔米奥—麦尔塔科斯基和胡蒂贾维矿体。科塔拉蒂杂岩的总长度为1.3公里。维卡·瓦立马尔米奥·麦尔塔科斯基富矿体是近乎直立的薄板状矿体，在瓦立马尔米奥和麦尔塔科斯基加厚到150—200米。侵入岩的这一部分延深到700米的深度。胡蒂贾维是一个近乎垂直的筒状体，长100—150米，宽20—60米，向下延深到800米以下。



磁力图
等值线：500，1000，2000伽玛，等

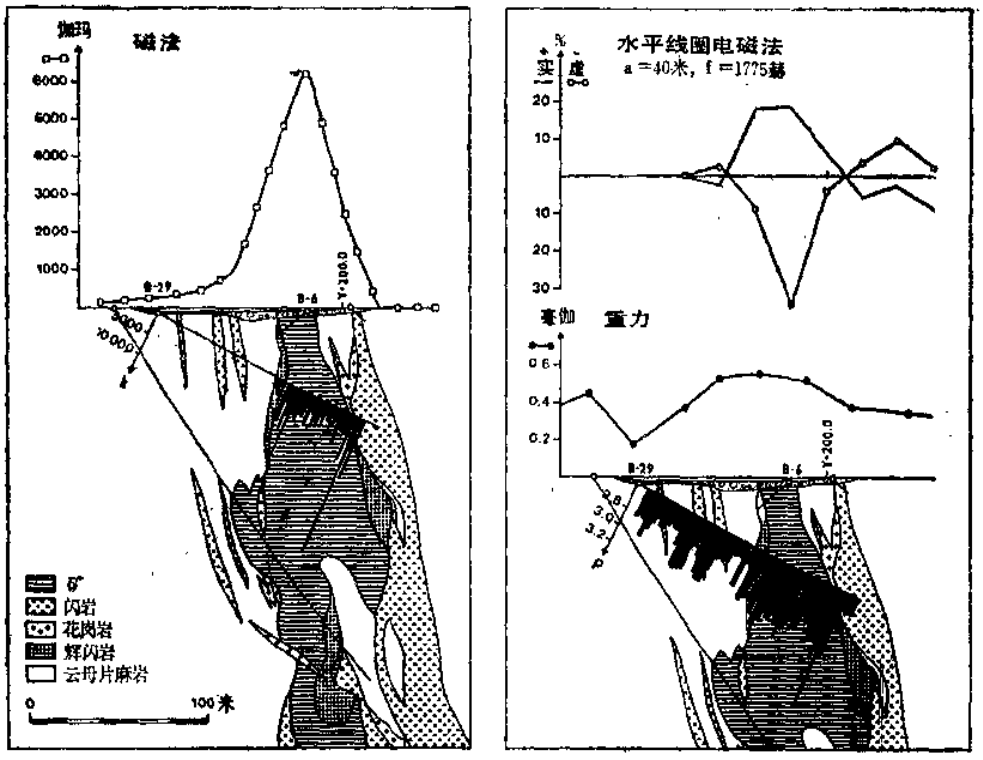
矿山150米水平上的地质图

图2 科塔拉蒂矿床的磁场等值线图和地质图

薄带状的朱西矿体只有80—90米长，但延深至少有800米，它位于科塔拉蒂上侵入体东侧150米。朱西矿体的位置受石英的卡岩—黑色片岩带内一个断裂的控制。

有分异现象的科塔拉蒂杂岩所包括的岩石由橄榄岩开始，经过辉岩—辉闪岩类和辉长石，直到闪长岩，主要的岩石类型是辉闪岩类。橄榄岩主要在杂岩的北部，在麦尔塔科斯基和瓦立马尔米奥迁到，它经常显示出不同程度的蛇纹岩化。在胡蒂贾维橄榄岩透镜体很少见，而且很小。辉长岩和闪长岩主要出现在杂岩的边缘。侵入岩系列中硅质成分最多的是闪长岩和石英闪长岩，其最大岩体出现在瓦立马尔米奥—麦尔塔科斯基地区杂岩体最深的边缘。

在分异系列的各种岩石中都含硫化物，在瓦立马尔米奥—麦尔塔科斯基地区的400米深度以下硫化物的含量很低，辉长岩，尤其是闪长岩只是偶而含有痕量的硫化物。同样，胡蒂贾维的深部也比近地表部分的硫化物含量低。在矿体中含有浸染状和致密的硫化物，它们一般彼此靠近。在辉长岩和辉闪岩类中浸染状硫化物以圆形包裹体的形式局部出现。致密硫化物一般生在角砾岩和细脉中；常常位于接触带上和侵入体内部，也常充填于闪岩和花岗岩墙的裂隙中。



磁法和磁化率断面　　水平线圈电磁、重力和密度断面

图 3　科塔拉蒂地区X=99.95剖面的物探和岩石物性数据

科塔拉蒂矿床的镍平均含量为6—7%，朱西矿体最富，可达11%。同样，朱西矿体的铜含量也较高。主要矿石矿物是磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿，在氧化物中主要是钛铁矿，磁铁矿只是在橄榄岩中的浸染矿里以付矿物的形式出现。在朱西矿体的某些地方相当数量的

磁铁矿与硫化物共生。

图2的磁场等值线图明显地显示出1.3公里长的科塔拉蒂杂岩，形成由胡蒂贾维到麦尔塔科斯基的一串异常。在矿化铁镁质侵入岩靠近地表的地方出现强磁异常。在朱西矿体上只有一个弱磁异常。图3中的磁测和磁化率剖面表明，含硫化物的铁镁质岩体磁化率与围岩有很大差别，形成强磁异常。科塔拉蒂杂岩上的磁异常曾用来作为选择钻探井位的依据。只是在朱西矿体地区含磁黄铁矿的黑色片岩出现在铁镁质侵入岩附近。然而在整个科塔拉蒂地区广泛分布含磁黄铁矿的黑色片岩，使得难于用磁测来圈定铁镁质岩体。在研究区域地质构造时由黑色片岩引起的磁和电磁异常是有用的。

从图3可明显看出，科塔拉蒂矿石的电导率很高，足以引起明显的水平线圈电磁异常。但有一条输电线妨碍了在矿床上进行电磁测量。通过B-29孔的岩心密度测定求出矿石密度为3.1，比围岩——云母片麻岩的密度（2.75）高得多。在剖面的矿体上可以见到重力异常。异常的宽度和幅度受到矿体周围闪岩带的影响，闪岩的密度比片麻岩高。胡蒂贾维矿体的重力异常幅度只有0.5毫伽，如果考虑到该矿体延深很大，那么这个异常是相当小的。重力异常低可能是由于矿体沿走向长度较小（也就是筒状的），也可能是由于在矿体上浮土比在围岩上厚。

（二）希杜拉矿床

1937年在群众报矿和磁电异常的基础上发现了马科拉矿床，在勘探和开发马科拉矿床的过程中发现一些含镍超基性岩漂石不可能来源于马科拉矿床本身。在马科拉以北3.5公里发现了一个磁异常，叫作希杜拉异常，钻孔打到了一个超基性岩体，局部赋存含镍磁黄铁矿。虽然这一结果并非令人鼓舞，地质调查所还是于1961年又在该靶区重新上马，钻探集中在希杜拉侵入体的北端，发现那里镍的含量比过去打到的要高。

图4上的希杜拉杂岩由两个蛇纹岩体组成，它们侵入到较老的云母片麻岩层中。超基性杂岩的总长度约1.5公里，宽度约350米。上面覆盖一层厚15—45米的粘土、冰碛物和冰川成因的砂砾。几个小镍矿体位于超基性杂岩和围岩—片麻岩的接触带上，在超基性杂岩内有一大型低品位浸染状矿床，主要矿体集中在北部筒状体的边缘。超基性杂岩本身形成一个多裂隙破碎的蛇纹岩筒状体，杂岩的核心部分主要结晶成纯橄榄岩，而在接触带上由于硅质围岩的作用形成橄榄岩。后来的水合作用把纯橄榄岩蚀变成蛇纹岩，而橄榄岩变成闪岩。

看来在主要岩体中有几次超基性岩侵入，每一次都带来一定数量的镍和铜。根据地点和条件的不同，或者形成较粗粒的接触带矿石，或者形成细粒的浸染矿。所开采的矿石是粗粒磁黄铁矿—镍黄铁矿—黄铜矿浸染，它可能是首先从侵入的超基性岩浆中分离出来的硫化物。细粒尘状浸染中的镍可能来自于蛇纹岩化分解出来的原有的橄榄石。已控制该矿床的深度到达250米，少数勘探钻孔在600米左右的深度上也打到了镍矿。

希杜拉处于覆盖地区，从一开始普查工作就全靠物探测量。图4、5、6中示出由含磁铁矿蛇纹岩体引起的正磁异常和负重力异常。根据穿过整个纹蛇岩体的B—135号孔的岩心作了岩石物性测定，结果表明不含矿片麻岩的磁化率变化范围为$50\text{-}100\times10^{-6}$CGSM，即使在硫化物包体中也很少达到$1000\times10^{-6}$CGSM，另一方面蛇纹岩的磁化率平均为$10,000\times10^{-6}$CGSM。

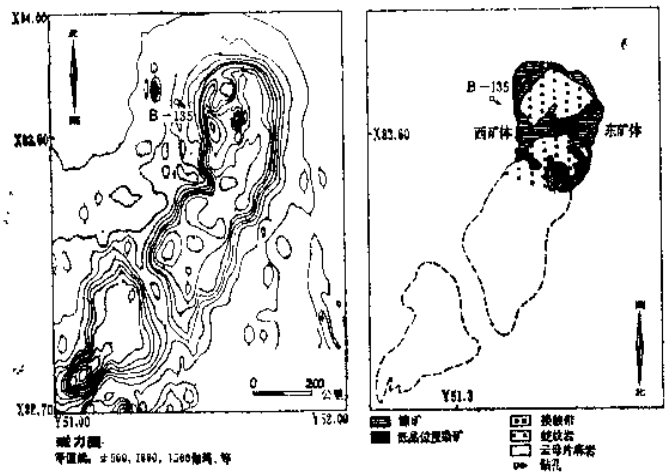


图 4　希杜拉矿床磁力图和地质图

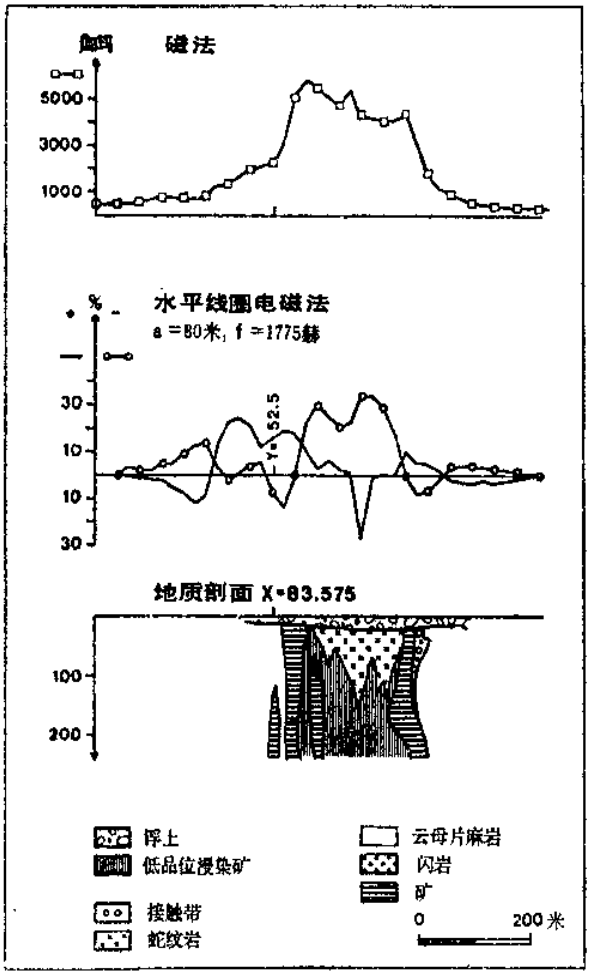


图 5　希杜拉地区X＝83.6剖面的物探和地质资料

西部的矿石磁化率与蛇纹岩一样，都是1000×10^{-6}CGSM，而东部矿石磁化率在80—10,000 $\times10^{-6}$CGSM 之间浮动，总的来说东部的矿石磁性比周围的蛇纹岩低，凯托拉（Ketola）等人对希杜拉的磁异常进行了三维解释，考虑了剩余磁化。从北部蛇纹岩体取了定向标本测定剩余磁化，Q 的平均值为 1.0，倾角 65°，偏角 60°。

图5示出X = 83.6 剖面的磁法和水平线圈电磁法的结果。水平线圈电磁法的虚分量正异常是由蛇纹岩体引起的，钻孔中的电阻率测量表明蛇纹岩体是导电的。浮土太厚对电磁法是个障碍，此外浮土中的粘土层在该地也能引起较宽的正异常。在北部蛇纹岩体接触带上的电磁异常可能主要是由裂隙引起的。然而，X = 83.6 剖面上蛇纹岩体西侧接触带的异常至少部分由矿引起。蛇纹岩侵入体主要部分的密度约为 2.5；片麻岩的 密度大于 0.20—0.25 克/立方厘米。蛇纹岩侵入体相对于围岩来说引起负的重力异常（图 6），但异常比侵入体窄，这是由于在侵入体的边缘部分含矿、闪岩成分也增加，所以边部的密度最高，达到片麻岩的数值，在矿的品位最高的部分甚至超过片麻岩的密度。

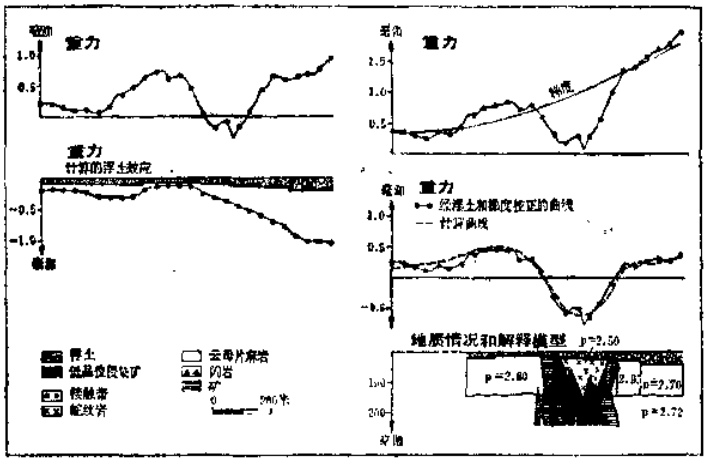


图 6 希杜拉蛇纹岩体引起的重力异常的二维解释

凯托拉等人对希杜拉蛇纹岩侵入体的重力负异常作了三维解释，在解释当中浮土厚度变化对异常的影响是通过柱状体组合来加以考虑的。图 6 示出对蛇纹岩侵入体负异常的二维解释，图 6 右下角的模型被用来进行解释并且考虑了浮土和梯度校正。解释表明蛇纹岩体的密度为2.5，这与根据岩心资料计算的平均密度非常吻合。

（三）斯多密矿床

斯多密超基性岩体呈一个梨状，其地面地质图见图7，岩体东面窄，150米厚，180米宽，较宽的西部直径500—600米，深度达300米左右。侵入体总长度约1.5公里，位于石榴石、堇青石和硅线石片麻岩中，片麻岩具有石墨片麻岩夹层、富钙矽卡岩结核、脉型和一般的硫化物。

侵入岩至少由三层组成，每层厚100至150米，最下面和最上面是超基性岩，而中间一层的组分是角闪石岩。下部超基性岩层集中了整个矿床的所有矿石，主要由橄榄岩、蛇纹岩组成，在该层最厚的部分橄榄石含量高到使岩石成为纯橄榄岩的程度。中间一层以角闪石岩为

注：图 6 的图例中低品位侵染矿的“侵”字应为浸。

主，除角闪石外还含有透辉石、方解石、金云母、偶而含橄榄石，在后一种情况下岩石组分就成了角闪橄榄岩。最上面一层是橄榄岩，主要矿物橄榄石和辉石已蚀变成蛇纹石和闪石，以至于某些地方岩石已变成蛇纹岩，上层的原生硫化物已全部氧化成磁铁矿。

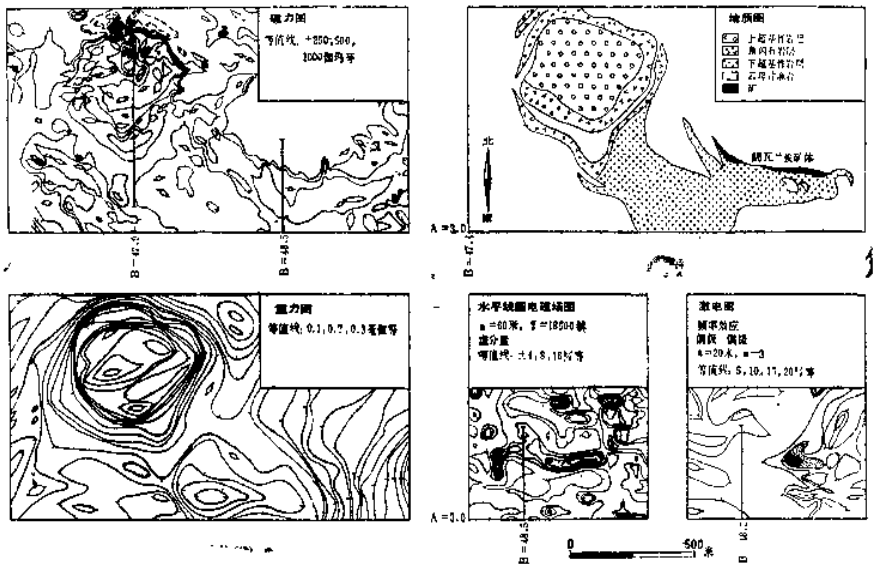


图7 斯多密矿床的物探和地质图

在超基性岩的底部接触带，云母片麻岩很少显示出矿物组分的变化。然而在超基性侵入体的侧翼，云母片麻岩常常含石榴石，在接触带以外20至30米的地带上黑云母被白云母所置换。云母片麻岩岩舌深入到超基性岩石内，常常含有非常大量的石榴石和角闪石，以至于在局部范围内岩石类似于角闪石辉长岩或闪长岩，无论在矿物组分还是结构方面都类似。超基性岩中穿插有一些断续的岩墙，岩墙多少受到蚀变，常常破碎得很厉害，岩墙的组分由辉长岩到花岗岩都有。

最有工业价值的是两个矿体：阔瓦兰彼和西瓦马尔米。前者沿侵入体东西向船形部分的北侧接触带分布，矿体近乎直立，500米长，5—20米厚，它在东部出露，但由于沿轴向倾伏很陡，其西北端的上沿在地下 120 米左右。西瓦马尔米矿体在侵入体西部，是一狭长状近乎水平厚5—30米的板状体，深 200—350 米。矿体含有磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿，在裂隙充填物中次生黄铁矿是常见的组分。

靠近与云母片麻岩的接触带处，硫化物呈粗粒浸染或致密脉状出现，矿脉有时伸入片麻岩。从接触带向内硫化物的赋存形状式从粗粒或脉状浸染变成很细粒的浸染。

斯多密超基性岩体的西部在图 7 的磁场和重力场图上都表现为圆形正异常。在阔瓦兰彼地区矿体出露在下部超基性岩层的北侧接触带上，有一个磁异常是由基性侵入体引起。然而在重力图上在阔瓦兰彼地区的西端有一个负重力异常。在图8上示出穿过阔瓦兰彼的B = 48.5 剖面上重力数据的二维解释，对浮土的影响作了校正。经浮土校正的曲线表明负重力异常主要是由于在超基性侵入体上浮土加厚所致。岩心测定表明超基性岩的平均密度值略低于片麻岩。在B = 48.5剖面上，磁异常、水平线圈实虚分量异常是由超基性侵入体引起，它与片麻

岩的磁化率和导电性存在差异。电阻率数据说明矿石导电性并不好，只有水平线圈虚分量当 f = 18,500 赫时在矿体露头上显示出负异常，图 7 上的虚分量异常与超基性侵入体的北部边界重合得相当好，可能主要是由接触带中的切变造成的。阔瓦兰彼东端的激电百分频率效应异常更清楚地显示出 Ni—Cu 矿化的露头。在 B = 48.5剖面的南部 f = 1775 赫的水平线圈负异常是由含磁黄铁矿黑色片岩引起。图 9 示出B = 47.9 剖面的物探、岩石物性和岩性资料以及所提出的层状构造模型。

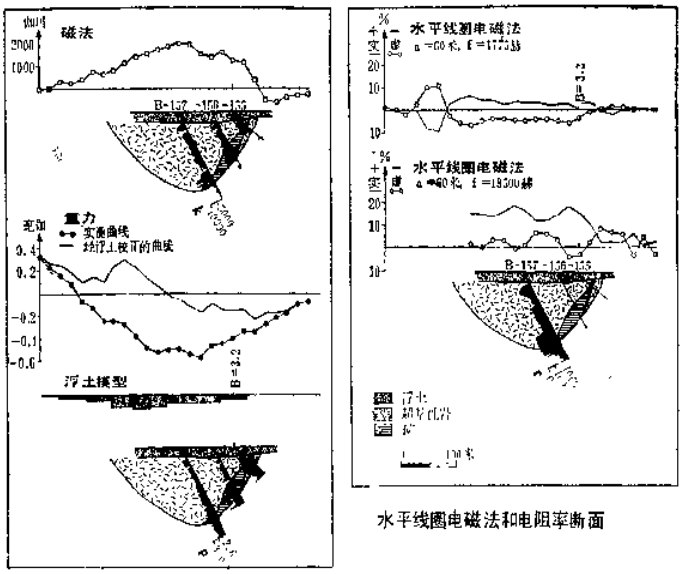


图 8 斯多密地区B=48.5剖面的物探和岩石物性数据

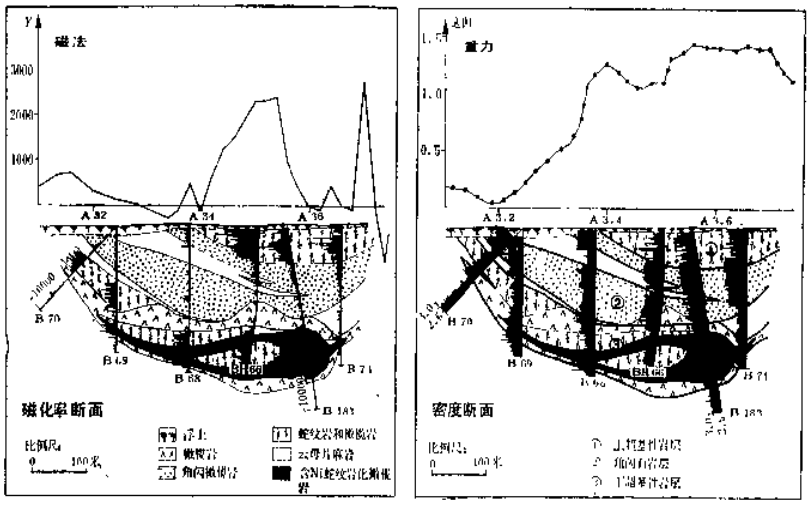


图 9 斯多密地区B=47.9剖面的物探和岩石物性数据

在地质和岩石物性资料的基础上把不均匀的超基性岩分为角闪橄榄岩、橄榄岩、蛇纹橄榄岩和含镍蛇纹橄榄岩。在超基性岩中能遇到云母片麻岩的夹层。角闪橄榄岩和橄榄岩的密度超过3.0克/立方厘米，但平均磁化率相当低，$<2000\times10^{-6}$CGSM。随蛇纹岩化程度的增

高密度降低，磁化率相应增高。蛇纹橄榄岩的密度在2.6至3.0之间，磁化率在5000至15,000之间。含镍蛇纹橄榄岩的密度为2.6—3.0，磁化率一般低于15,000。角闪辉橄岩和橄榄岩就密度来说，蛇纹橄榄岩就磁化率来说都与云母片麻岩有明显差异，后者的平均密度2.75，而磁化率低于500，密度和磁化率的分布与层状构造模型十分吻合：上部超基性岩层对应于含磁铁矿的蛇纹岩化橄榄岩，它是地面磁异常的激励体；角闪岩层对应于角闪橄榄岩，具有高密度、低磁化率；下部超基性岩层由橄榄岩组成，具有高密度、低磁化率，含镍蛇纹岩化的橄榄岩磁性较高。从B—180孔的岩心取了一些非定向标本测剩磁和Q值。闪岩和橄榄岩的磁化率在200至800之间，Q在0.8至7.3之间，未发现磁化率和Q之间有明显的相关关系。

重力异常曲线圆滑说明超基性的密度是均匀的。然而图9的密度值表明岩体大部分都不均匀。磁异常曲线表明磁化率变化很大，这与岩心测定的数值是一致的。图9上的西瓦马尔米矿体在重力和磁测曲线上都没有反映。

（四）彼多拉蒂矿体

彼多拉蒂的铜镍矿赋存于一个600米长的透镜状分异辉绿岩墙中，在两端岩墙只有5—12米厚，但在中部近80米。岩墙与围岩的界线明显，走向N65°W，平均倾角80°SSW。

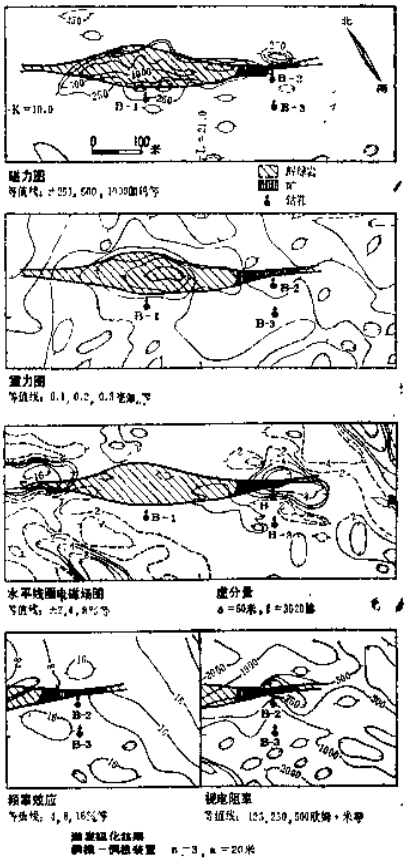


图10 彼多拉蒂矿体的物探结果

彼多拉蒂地区的主要岩石是相当均质的云母片麻岩，最常见的次要组分有石墨、黄铁矿、磁黄铁矿和氧化矿物。云母片麻岩常常蚀变为混合岩化片麻岩。富含石墨、含黄铁矿与磁黄铁矿的黑色片岩层在区内也是常见的。

辉绿岩墙不仅粒度不均匀，矿物的组分也不均匀，可分出下列主要岩性：石英辉绿岩、辉石辉绿岩、含硫化物橄榄石辉绿岩、辉绿岩的细粒边缘带和隐晶辉绿岩岩枝。花斑岩脉和接触变质围岩与辉绿岩紧密相关。岩墙的核心部分为中粒石英辉绿岩，它是主要岩性，由岩墙的中心向边缘方向岩石粒度逐渐减小、基性逐渐增加。辉石辉绿岩厚4—8米，位于核心部分和含硫化物橄榄石辉绿岩之间。在岩墙中矿石矿物的比例也有明显的变化：由中心向边部氧化矿物数量减少，而硫化矿物数量增加。辉绿岩靠近围岩的细粒边缘带厚度在20余厘米至1米半之间。在岩墙的两端，围岩对岩浆冷却有较大的作用，辉绿岩是一种快速固化的细粒类型。辉绿岩在围岩中引起明显的接触变质现象，接触带在一些地方厚度超过10米。穿插辉绿岩的花斑岩脉厚度由几毫米到半米，它们大部分位于离接触带几米的范围内。

富含橄榄石带含硫化物甚少，只有0.5—1米厚，

然而，朝岩墙东南端的方向上富含橄榄石带变厚，同时硫化物增多，能达到Ni—Cu 矿的品位。

矿石有三种类型：橄榄石辉绿岩中的浸染状矿、橄榄石辉绿岩中的硫化物脉、辉绿岩围岩中的浸染状矿。矿石中镍黄铁矿和黄铜矿比磁黄铁矿多得多。

图10的物探等值线图表明磁异常和重力异常是由辉绿岩墙引起的，矿石露头形成水平线圈虚分量的负异常和 250 欧姆·米视电阻率最小值。相反，无论是图 10 中的激电百分频率效应平面图，还是图11中的拟剖面在矿石露头上都没有明显的异常。B— 2 孔中的电阻率测量表明矿石比围岩的导电性好。然而电阻率数据说明，钻孔 B 2 和 B 3 打穿的几个良导带是由裂隙较多的云母片麻岩和不同数量的石墨、黄铁矿和磁黄铁矿引起的。激电百分频率效应在云母片麻岩上的背景很高，推测是由云母片麻岩中所含的石墨和硫化物以及浮土中的粘土引起。

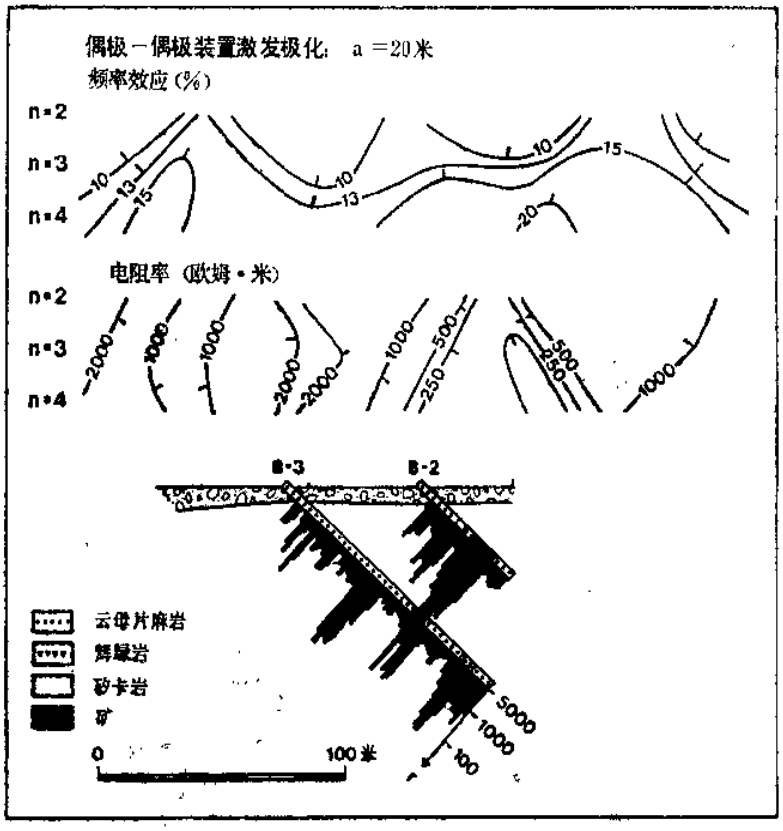


图11 彼多拉蒂地区 L=21.15剖面的激发极化和电阻率断面图

通过用偶极—偶极装置测激电百分频率效应异常的办法是不能圈出彼多拉蒂矿体的。然而从图 7 可以看出，在斯多密等矿床上激发极化测量取得了成功。

（五）希塔哈朱矿床

矿床位于几乎南北向的滑石碳酸盐岩层的南端。该岩层在南端倾角为70°E，但在北端近乎直立。滑石碳酸盐岩被断层所切割，它在东部（也就是在上盘）与石英长石片岩为界，片岩可能为火山成因，含有不同数量的黑云母和绢云母。滑石碳酸盐岩下伏有铁镁质火山岩，在两者接触带有一层角闪石绿泥石片岩和绿泥石闪岩。作为构造带标志的角闪石绿泥石片岩夹层在滑石碳酸盐岩透镜体内也能看到。矿石以大量分散透镜体的形式出现在上盘滑石碳酸盐岩与角闪石绿泥石片岩带之间的接触带附近。透镜状矿体由致密硫化物（硫化物构成角砾岩的基质）和滑石碳酸盐岩中的细粒浸染硫化物组成。主要矿石矿物为磁黄铁矿，镍黄铁矿和黄铜矿。矿石和滑石碳酸盐岩中都含有磁铁矿。

物探工作结果在图12中示出，在对B2和B7钻孔岩心物性测定的基础上得到如下的岩石密度与磁化率值：

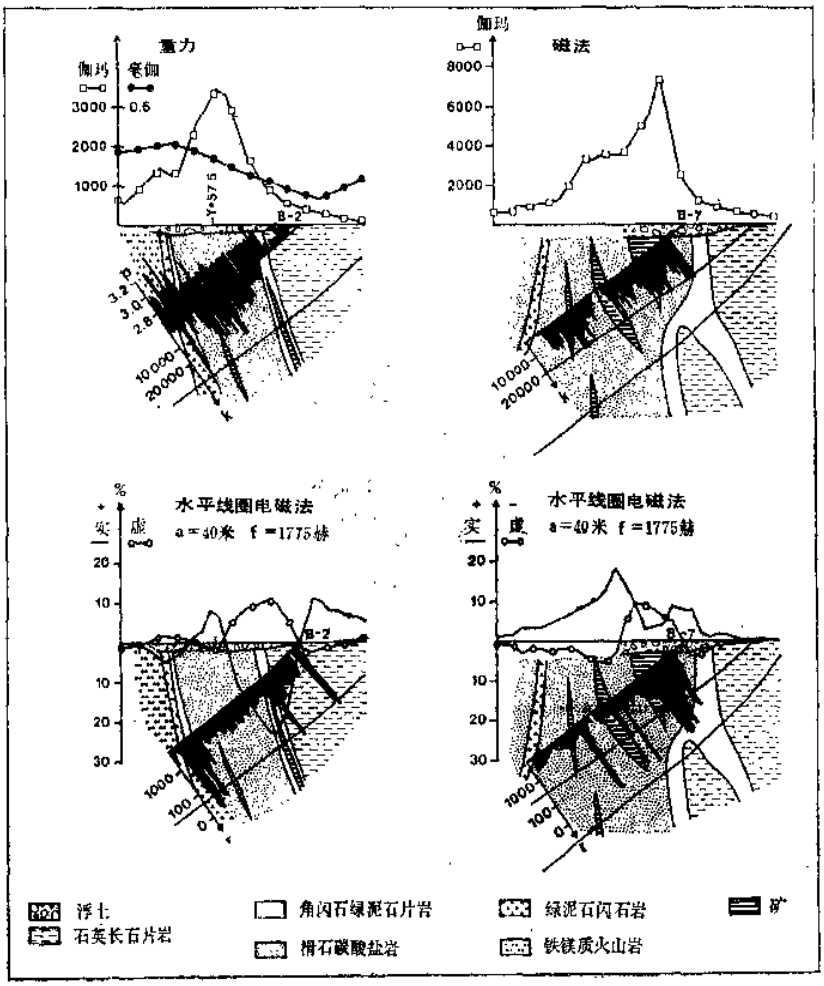


图 12 希塔哈朱地区X=28,00和X=28,10剖面的物探和岩石物性数据

岩石类型	密度	磁化率
矿石	2.90—3.20	14,000—18,000
滑石碳酸盐岩	2.90	6,500—14,000
铁镁质火山岩	2.98	250
石英长石片岩	2.70	1
角闪石绿泥石片岩	2.90—3.00	100—10,000

矿石的磁化率只是比滑石碳酸盐岩略高，此外矿石的密度与铁镁质火山岩和滑石碳酸盐岩也相差无几。石英长石片岩的密度和磁化率都低。

滑石碳酸盐岩体几乎均匀磁化，在图12的$X=28.00$和$X=28.10$剖面上形成很强的磁异常。矿体无法可靠地通过磁测和重力测量圈定，不过钻孔B7在浅部打穿的矿体在磁异常曲线上形成明显的极大值，在某些地方矿石的磁化率超过$20,000\times10^{-6}$CGSM。由于铁镁质火山岩和滑石碳酸盐岩的密度比石英长石片岩高，形成了重力异常。某些矿露头可通过水平线圈实或虚分量负异常圈定，然而井中电阻率测量表明，不仅矿体而且角闪石—绿泥石片岩带也是良导的，因此在片岩带上同样可以得到水平线圈异常。除了角闪石—绿泥石片岩带外，黑色片岩带和含有磁黄铁矿、黄铁矿的地带也是良导的，因此只靠水平线圈法一种方法不能圈定矿化。

镍铜矿床的物探普查

上述矿床实例中的物探和物性工作表明，矿床，至少是它们的容矿铁镁质岩石往往形成物探异常。通过物探异常圈定矿床及其容矿岩石可能性取决于很多因素，如浮土的厚度和物性、矿石和容矿岩石的物性、矿体产状和规模、矿体的埋藏深度等，同时应用几种物探方法会提高探测矿体的能力。对航空物探来说，除线距和航向外，航高对测量结果也有决定性的影响。电磁法的选择对探测效果有很大影响。各种航空和地面物探方法普查镍铜矿的有效性下面将通过野外实例加以说明。

(一) 航空物探

图13示出希杜拉、基尔玛科斯基、科塔拉蒂和泰尔卡拉地区的航磁图，该项航磁工作是由芬兰地质调查所用150米航高和400米线距完成的。在基尔玛科斯基、科塔拉蒂和泰尔卡拉，含镍超基性岩在航磁图上圈不出来，反之，含镍铜矿的希杜拉蛇纹岩体在其北部有明显显示。奥拉外南镍矿的容矿超基性岩筒非常靠近含磁黄铁矿的黑色片岩，结果它的异常部分与黑色片岩的异常重迭。这些例子说明航高较大的航磁图在镍铜矿勘查中的主要用途是靶区的地质填图，只有较大的超基性侵入体可以从较大的高度上圈出，而且要像希杜拉蛇纹岩体一样，岩体的空间位置要有利，能够同其它引起异常的岩石分开。由于线距相当宽，工作结果

在很大程度上取决于测线的位置与异常源的关系，奥拉外南的例子表明，如果超基性岩体磁化强度高，向下延深大，即使横向规模较小，当测线从岩体正上方通过时，也能在150米的高度上探测出来。

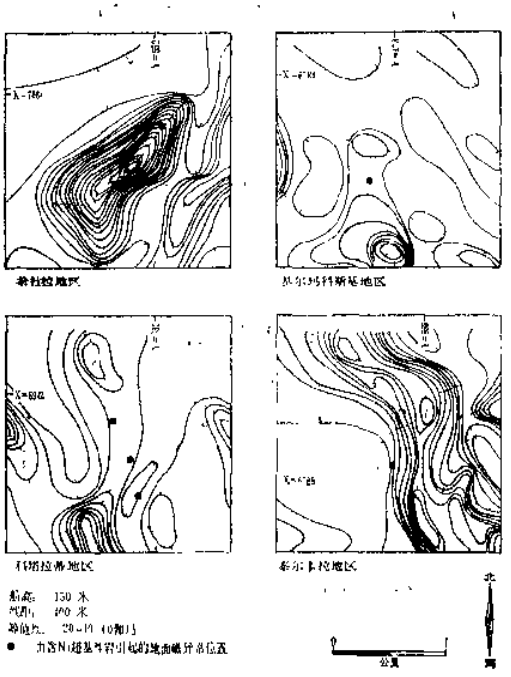


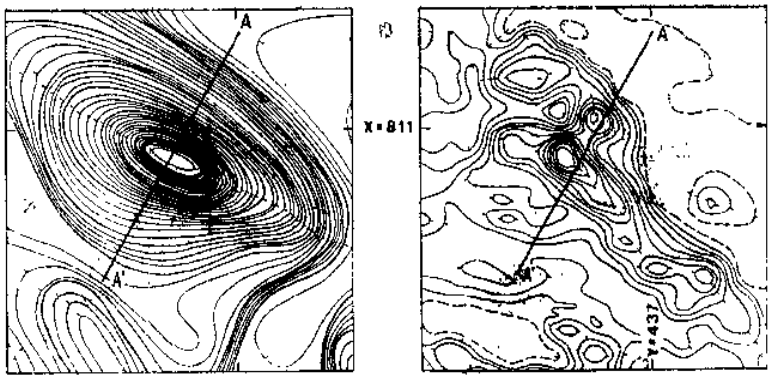
图13 希杜拉、基尔玛科斯基、科塔拉蒂和泰尔卡拉地区的航磁图

在瓦马拉地区对航高40米的航磁和航空电磁图与航高150米和地面的资料进行了对比，在航高150米的航磁图上超基性岩体包括斯多密侵入体都反映不出来，而在航高40米，线距125米的航磁图上斯多密超基性岩体形成明显的异常。该区的航电图出现了很多由黑色片岩引起的异常，大多数黑色片岩含磁黄铁矿，因而在航磁图上也有反映。由于黑色片岩太多，有些侵入体在航空物探图件上无法直接识别。

航磁和地磁图的对照表明，在有利情况下航高40米线距125米的航空磁测结果与地面磁测结果很类似。航高40米的航磁图明显地示出斯多密超基性岩体的形状和规模，在其东端侵入体引起的异常在某种程度上又迭加上黑色片岩引起的磁异常。

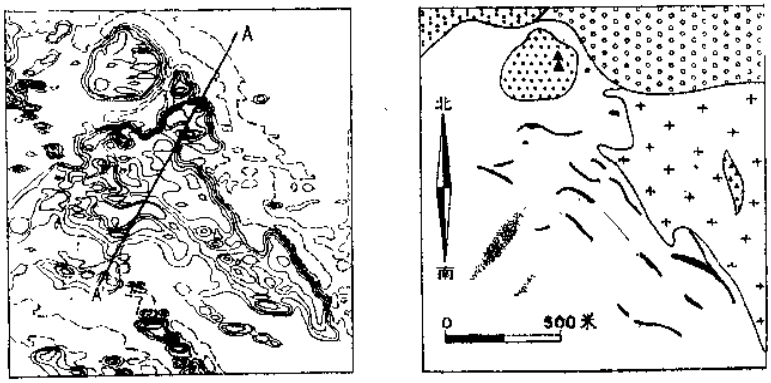
在瓦马拉西北15公里的西塔马基地区，航高150米的航磁资料反映出一个很强的异常，而且在异常的西北部有橄榄岩出露（见图14），所以当时把这个航磁异常推断为完全由超基性岩体引起，后来这里作了航高40米的航磁和航电测量以及地面磁测和水平线圈电磁测量，测量结果见图14和15。40米航高的航磁数据表明在上述大磁异常范围内有几个磁化的地层，橄榄岩在最北端出露，航电实分量正异常并未延伸到这里，因此它的导电性并不好。多数其它强磁异常与航电异常对应良好。地面磁测说明橄榄岩体只在航高150米的航磁异常中占很小一部分，形状近乎园形。航电平面图与水平线圈实分量平面图对应很好，良导带主要是由含磁黄铁矿的黑色片岩组成。通过重力图上的正异常能够说明橄榄岩体的范围就在地面园形磁异常的范围内。引起磁异常和水平线圈异常的黑色片岩在重力图上没有明显反映。如果对航高150米的航磁异常沿穿过异常最大值的AA′剖面进行钻探验证，要是没有露头就不会发现橄榄岩侵入体，钻孔除了黑色片岩外就打不到任何别的东西。

拉努阿地区苏汉科含磁铁矿镍铜矿在航电实分量图上有1600ppm的异常，由于矿体近乎水平，围岩导电性差，所以尽管测线几乎平行矿体走向，异常仍然明显。此外该区的的瓦拉兰彼和尼蒂兰彼镍铜矿，由于磁黄铁矿含量高，也形成航电异常（图16）。超基性岩的某些部分磁化强度高，但总的来说在该区航磁不如航电能较准确地反映矿床。



航磁图
等值线：20，40，60伽玛等
航高150米

航磁图
等值线：100，200，400，600伽玛等
航高40米



地面磁力图
等值线 ±200，400，800伽玛等

地质图
基性火山岩
橄榄岩
石英闪长岩
花岗岩
云母片麻岩
闪岩
黑色片岩
矿头

图14 西塔马基地区的地质和磁测图

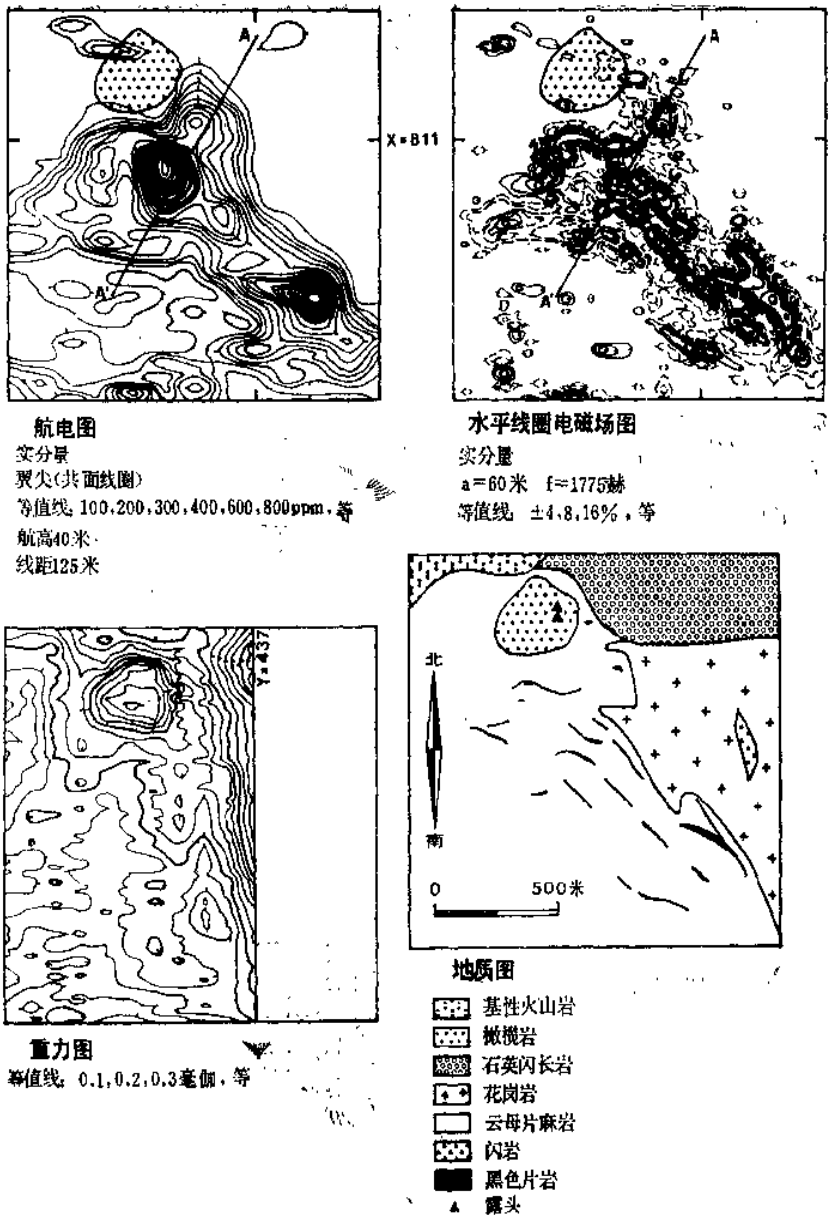


图15 西塔马基地区航电、水平线圈电磁、重力和地质图

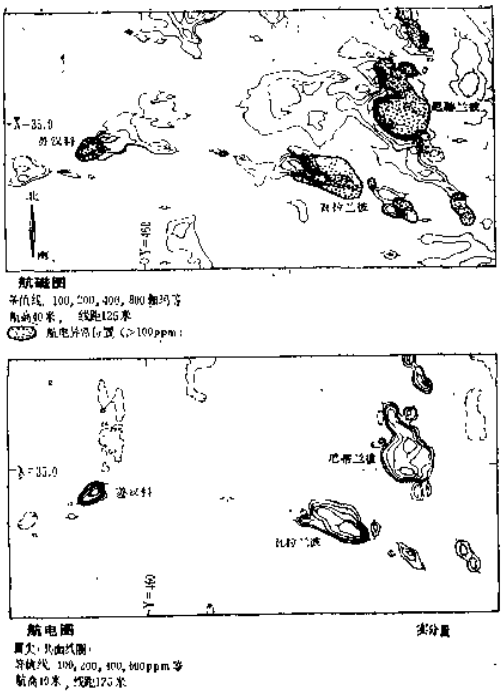


图 16　拉努阿地区的航磁和航电图

（二）地面物探

下面对地面物探在勘查镍铜矿中的作用通过几个实例说明。基尔玛科斯基的勘查工作起始于群众报矿，含矿转石发现于图17所标出的地点，密度3.36，磁化率13,890，电阻率4×10^{-3}

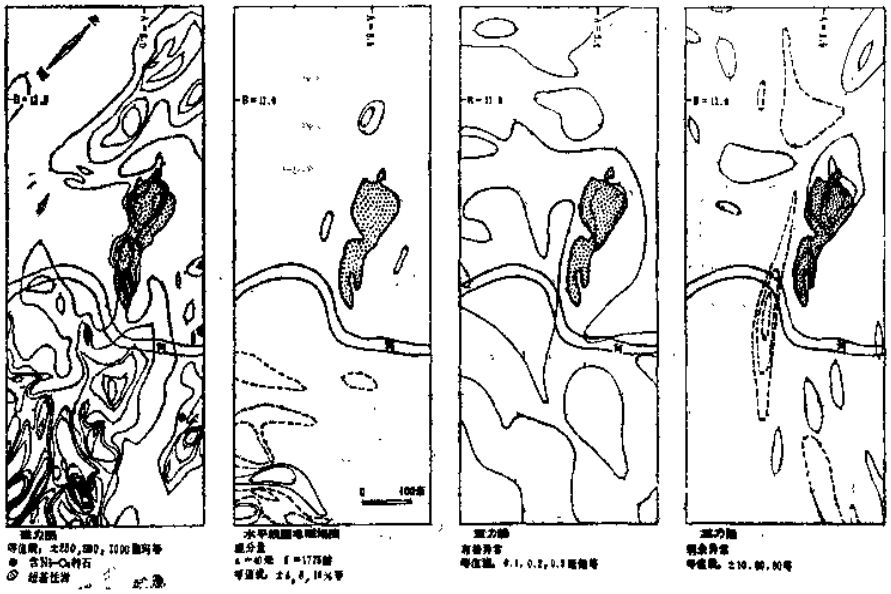


图 17　基尔玛科斯基地区物探图

欧姆·米，在随后的检查中发现了更多的转石，于是开始作地面磁法、水平线圈电磁法和重力，基尔玛科斯基矿体的异常相当明显，在含矿转石发现地点西北400米处。含矿侵入岩位置很好，它的磁异常没有受到围岩的干扰，尽管该侵入体延深不大，在剩余重力异常图上也显示一个正的双峰异常。由于矿石导电性差，浮土中粘土含量高，用f = 1775赫的水平线圈测量未能探测出侵入体，但侵入体上有激电异常。

在奥拉外南地区矿体位于沿海大陆架上，在离矿体1.5—2.0公里外的陆地上见到了转石（见图18），转石含镍0.6—3.25%，含铜0.1—0.6%。在转石以北和以东的海面上有几处航磁异常，在海的冰面上作了磁测以确定转石的来源，，对其磁异常进行了钻探验证，结果在测区西北角见矿，含镍铜超基性岩侵入体形成明显的磁异常。在这个地点航磁图的等值线也出现拐弯，表明有磁性体存在。该地曾用瞬变电磁法区分磁异常。

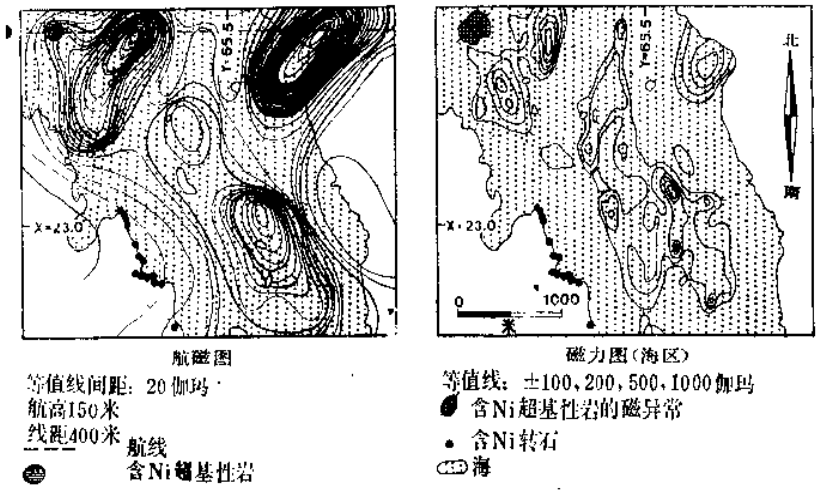


图 18 奥拉外南地区的航空和海区磁测图

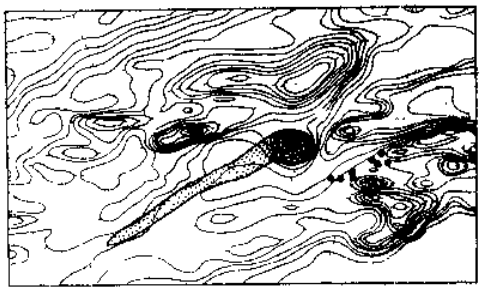
希外拉矿体位于一个辉石镁铁闪石辉长岩侵入体的东端，形成一个等轴状磁异常（图19），离开黑色片岩有一定距离。磁异常和含矿转石是矿化的仅有地面标志。矿体的水平线圈电磁异常与黑色片岩引起的负磁异常重迭。超基性岩侵入体在重磁图上无反映。由于矿体很小，而且与其它引起异常的岩石位置相近，所以根据物探资料希外拉矿体的位置不易确定。

这些例子说明航空与地面磁法、电法的有效性在很大程度上取决于靶区的地质情况，如果该地有磁性的和良导的黑色片岩广泛分布，超基性岩侵入体的异常常与黑色片岩异常迭加。在没有黑色片岩干扰的地区，超基性岩侵入体甚至矿体也能通过航空物探探测出来。

（三）用化探区分物探异常

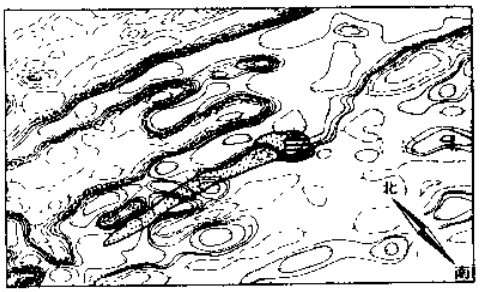
在含磁黄铁矿黑色片岩地区发现大量磁异常和电异常使得愈来愈有必要采用化探方法区分物探异常。所用的主要方法是冰碛物和腐植土取样。冰碛物是被冰川搬运的与当地岩石的混合物。在冰碛物的细粒组分中矿石矿物得以保存，无论如何在硅酸盐颗粒的氧化铁包层中重金属总是可以找到的。腐植土取得其重金属组分是通过靠电化学或毛细管作用上升到植物中的水溶液。在对冰碛物进行取样时，样品用冲击或气动钻取，最大深度打到基岩表面。在

有利的情况下，利用先进的钻探设备能从基岩表面取岩屑。



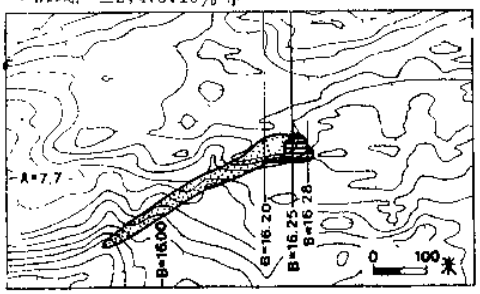
磁 力 图

等值线：±100,200,400,600,800伽马,等
• 含Ni Cu转石



水平线圈电磁场图

实分量
a＝60米， f＝3555赫
等值线：±2,4,8,16%等



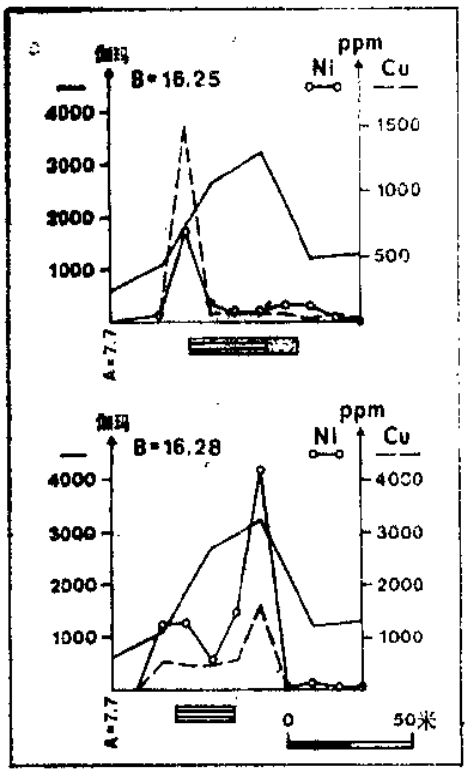
重 力 图

等值线：0.1,0.2,0.3毫伽等

基性岩

矿

图 19 希外拉地区物探结果



露头

矿

辉石－镁铁闪石辉长岩

图 20 希外拉地区的综合物化探工作

图20给出穿过希外拉矿体的B＝16.25和B＝16.28剖面的冰碛物化探取样结果。B＝16.25剖面的磁异常曲线在上下两个图中都绘出。B＝16.28剖面显示出很强的镍异常，而在B＝16.25剖面上只有一个单点镍异常，表明由矿引起的冰碛物异常已经由矿体的位置沿冰川方向向东南方向移动，也就是朝图19所标出的转石方向移动了。因此通过冰碛物化探测量我们可以断定希外拉磁异常是由Ni—Cu矿化引起。

此外在斯多密矿床的矿体上磁异常也被明显的镍异常证实。

结　　论

在芬兰露头矿已基本上找完，今后的勘查工作愈来愈困难，地质工作必须与物探相配合，发现有远景的物探异常后用化探加以验证。

崔林沛根据《On the Application of Geophysics and Geology to Exploration for Nickel-Copper Ore Deposits in Finland》（作者 Matti Ketola）（1982）一书摘编

印度的金刚石勘查

前　言

印度的已知金刚石矿床产在三个相隔很远的地区，即安得拉邦（瓦拉卡鲁尔—拉塔瓦拉姆）、中央邦（藩纳）、北方邦（琼格尔）的不同岩性环境中，但都属于太古—元古代的地盾。印度含金刚石的原岩可分成如下三类：

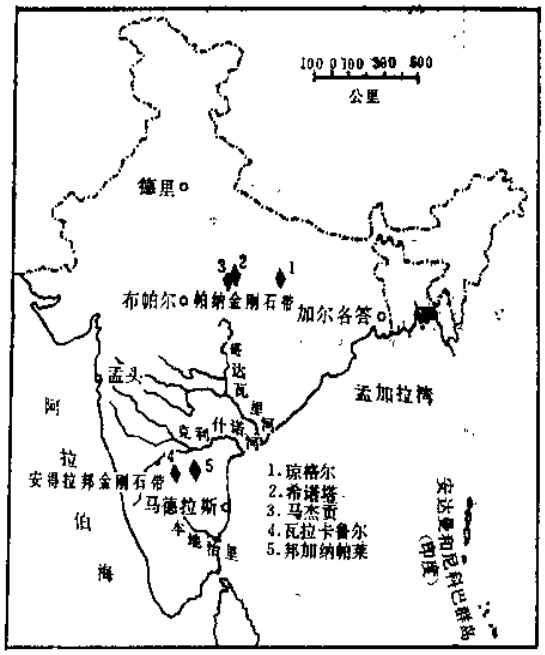


图 1　印度金刚石产地示意图金刚石勘查

1. 原生矿-金伯利岩筒（安得拉邦、中央邦和北方邦）

2. 次生矿-砾岩（安得拉邦的邦加纳帕莱、中央邦的吉里）

3. 砂矿-古老碎屑、现代的河流砂砾（安得拉邦的克里希纳河谷、中央邦巴格海河谷）

在印度，含金刚石金伯利岩的时代基本上是前寒武纪，虽然世界上其他地区含金刚石金伯利岩的时代包括从前寒武纪到白垩纪，还可能到第三纪。印度的金伯利岩赋存在不同的岩性环境中，在安得拉邦它是赋存在前寒武纪花岗岩和片麻岩（25亿年）中，北方邦的琼格尔谷地是在比贾瓦尔组（Bijawar）（25亿年）中，而在中央邦的藩纳地区是赋存在文迪亚系凯穆尔组（10亿年）中（图1）。

金伯利岩——金刚石的主要源岩——赋存在小火山通道或似岩颈体中，实际上遭到强烈的蚀变和风化。因此，金伯利岩几乎没有出露，多数被表土所覆盖，例如安得拉邦的6号岩筒、中央邦的安戈尔（Angor）岩筒和希诺塔（Hinota）岩筒、北方邦的2号岩筒、琼格尔东和贾卡鲁尔岩筒。因此，必须利用一切可能的手段来寻找隐伏的岩筒。所以物探方法在金伯利岩的勘查过程中起着重要的作用，可用来发现隐伏的金伯利岩体和圈定其边界，以及找出可能对金伯利岩侵位有利的深部断裂。

几年来，印度地质调查所在安得拉邦和中央邦完成了大量的金刚石勘查工作。近来把主要逆断层作为勘查金刚石的对象，所用方法包括航空地质、地质、地球化学、地球物理、岩石学、岩石化学、钻探、槽井探、选矿等多学科的综合测量，工作是由地质学家和其他有关科学家们共同组成一支精干的队伍做的。本文是根据作者参加北方邦琼格尔谷地多学科工作的经验，并综合了安得拉邦、中央邦全部已有的普查资料写的。所完成的地质填图揭示了上述地区的岩性地层、构造岩浆的演化过程。

根据航空地质和陆地卫星影像圈定构造位置

金伯利岩基本上只产在稳定的大陆地盾区内。在地盾范围内，与边缘活动带相比稳定期较长的克拉通，是含金刚石金伯利岩勘查的首要目标。据推测，金伯利岩岩浆的生成部位在岩石圈—软流圈附近。因而，这类岩浆的侵位将受到切穿岩石圈的断裂系统控制。区域构造线好像对印度金伯利岩的侵位也起着控制作用。根据安得拉邦航空照片解释，可以清楚地看到金伯利岩火山通道集中分布在走向N30°E、N45°E的区域构造线上。在中央邦和北方邦，正如陆地卫星影像所显示的那样，区域构造演化表明，控制“文迪亚盆地”的两条较大的地缝合线，即南部的“松纳马塔”和北部的“阿拉马拉”（走向NEE—SWW的）区域断裂带，分别对北方邦琼格尔谷地和中央邦藩纳地区的金伯利岩的侵位过程起了重要作用（见图2）。

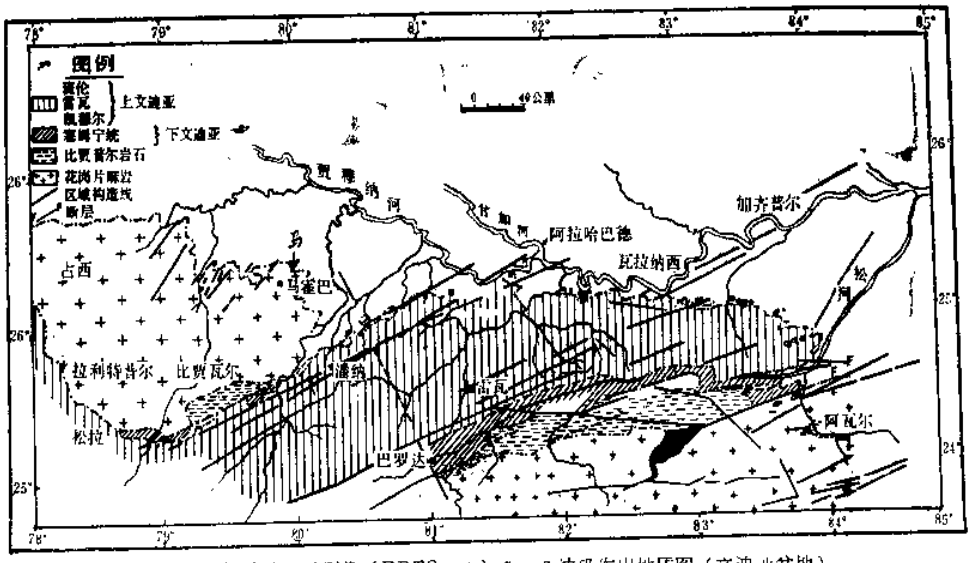


图2 根据地球卫星影像（ERTS—1）5，7波段作出地质图（文迪亚盆地）

最老的克拉通很可能是最平静的，这种观点对于解释金伯利岩的形成和金刚石的稳定性都有重要意义。因而，与印度金伯利岩（瓦拉卡鲁尔、藩纳和琼格尔）有关的前寒武纪克拉通的特点就在于有深断裂（或区域断裂），在复合构造岩浆旋回期间有深成岩浆渗透，金伯利岩发育。

重矿物测量

人们曾研究过金伯利岩和深成包体的矿物分散作用，因而引起这种方法的广泛应用。在北方邦琼格尔谷地完成的重矿物测量研究工作包括：(a)按每平方公里2个样品的密度，沿河流在合适的位置上采集沉积物样品；(b)用10mm、5mm、2.5mm和1mm孔的筛进行筛选和淘洗；(c)在实验室用二碘甲烷分离指示矿物（样品重量：3.2克）。还用磁选机分选磁性与非磁性颗粒。沿纳拉琼格尔、纳拉苏里、比苏尔河及其汇合之后的里汉德河并沿索恩河采集样品。研究结果（图3）表明，指示矿物，如镁铝榴石、镁钛铁矿、铬透辉石的含量相当低，这对在印度用以寻找金伯利岩是非常不利的，虽然这种方法对在非洲和西伯利亚寻找金伯利岩有很大帮助。

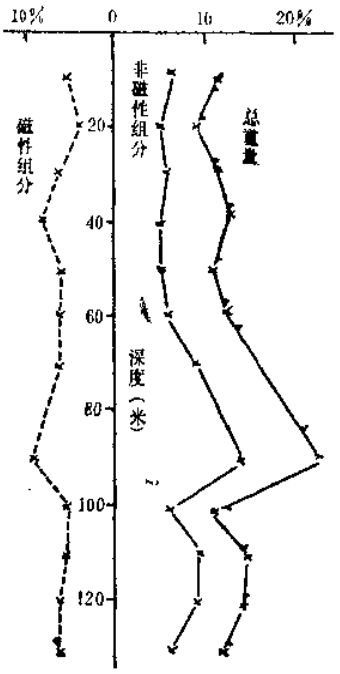


图3 IBH—4号钻孔的重矿物总量、磁性和非磁组分随深度的变化

地球化学测量

反映着金伯利岩地幔成因的超基性性质，以及含有对抗性元素的挥发性组分，便产生了两类元素共同存在这样一种特点，关于这一点，道森(1967)、哈里斯和米德尔莫斯特（1970）都分别指出过。超基性组分包括铬和镍，而其对抗性元素包括K、Rb、Sr、Cs、Ba、Nb、Ta、P和轻稀土元素。琼格尔谷地的地球化学测量，是在比贾瓦尔岩系和有关的火山岩上进行的，测定上述元素以作对比。所作的试点测量表明，采自“B”层土壤的样品待测元素的含量最高，所采集的是去掉岩石碎块之后的较细粒级的土壤。利用已有的地球物理测量剖面，按100米点距的网格进行采样，网格上的采样点若落到岩石露头上则采岩石样品。综合分析琼格尔谷地的地球化学样品的微量元素分布及其比值的变化，可得出如下值得注意的几点（图4）。

1. 1号和2号琼格尔岩筒的铬含量与巴苏陀兰、马杰加万和苏联的金伯利岩的铬含量近似。
2. 琼格尔岩筒中的镍含量，普遍低于巴苏陀兰、马杰加万和苏联金伯利岩的镍含量。
3. 琼格尔岩筒中钴的含量只是与巴苏陀兰岩筒近似。
4. 琼格尔岩筒中钒的含量高于巴苏陀兰岩筒2—3倍。

5. 琼格尔岩筒的Cr/Ni比值与苏联和非洲的金伯利岩十分近似。

6. 1号琼格尔岩筒的Ni/Co比值表明，直到96米深处岩石组分仍然是金伯利岩，在此深度以下围岩是玄武岩。

因而，微量元素性状的全部特征清楚地表明琼格尔岩筒的岩石与印度的其他金伯利岩、非洲和苏联的金伯利岩在某些参数或其他方面存在一致性。

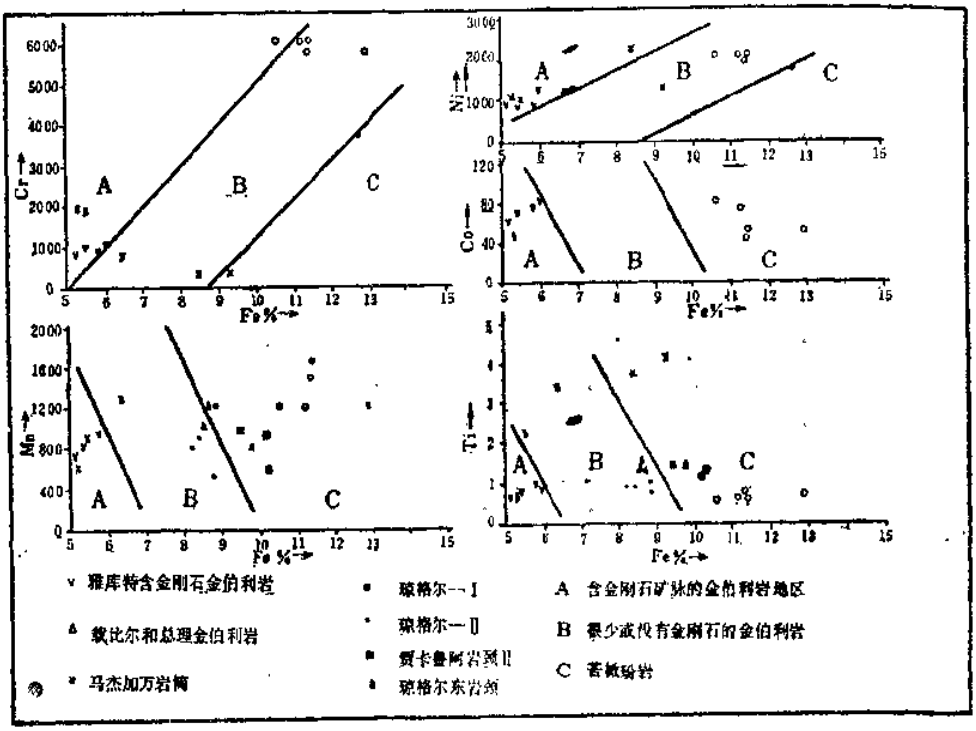


图 4 北方邦琼格尔金伯利岩中铁族元素之间的关系

岩石学和岩石地球化学

将琼格尔地区一些岩筒的岩石学和岩石化学特征与世界上已知的金伯利岩进行了对比，结果提出了一些通用的可以对比的参数作正确判别之用。现将琼格尔岩筒的综合研究结果陈述如下：

1. 主要矿物相和大部分次要矿物，在所有岩筒中都有，说明是来自同一母岩浆。

2. 结构关系表明：喷出相同时伴随有逐步侵入相。

3. 从矿物学角度来说，岩筒岩石是块状的、凝灰角砾岩的变种，实质上是“玄武质金伯利岩”。

4. “岩筒内部的变化”和“岩筒之间的变化”的性质和大小（表1）说明有很强烈的区域性变化或大范围的变化，伴随有次一级的局部或小范围的变化。这种局部变化表现在：中心斑晶—富集区被外围基质—富集带所包围。这也反映在化学参数上特别是在两个中心的

岩筒（1号和2号岩筒）上，在那里，除全铁、碱金属、挥发份和K/Na比值之外，所有参数都显示出所予计的变化。

印度安得拉邦、中央邦、北方邦金伯利岩化学分析结果　　表 1

	安得拉邦瓦拉卡鲁尔						中央邦	北方邦琼格尔	
	1号岩筒	2号岩筒	3号岩筒	4号岩筒	5号岩筒	6号岩筒	潘　纳	1号岩筒	2号岩筒
样品数	1	4	4	5	2	2	12	4	5
SiO_2	38.57	33.72	32.25	39.04	20.71	34.92	35.83	37.34	37.87
TiO_2	1.63	2.45	1.62	1.25	5.10	3.85	4.89	1.12	1.61
Al_2O_3	10.13	6.53	3.00	4.32	4.15	2.65	3.27	5.06	4.91
Fe_2O_3	7.33	6.63	6.54	3.26	9.40	8.13	4.82	6.23	7.00
FeO	4.29	4.49	1.84	4.91	8.09	7.77	3.39	9.00	7.39
MnO	0.14	0.19	0.15	0.15	0.06	0.17	0.14	0.19	0.13
MgO	11.28	20.22	28.71	28.83	31.84	22.02	27.48	21.28	25.46
CaO	15.12	15.75	8.61	7.92	8.41	14.17	3.20	6.41	2.69
Na_2O	0.37	0.43	0.07	0.34	0.35	0.24	0.06	0.49	0.43
K_2O	0.18	2.04	0.71	1.10	0.65	1.06	0.63	0.17	0.07
$H_2O(+)$	6.98	6.42	11.74	7.04	7.68	4.96	13.98	1.47	2.15
$H_2O(-)$	1.32	—	—	—	0.49	—	—	6.51	7.56
P_2O_5	0.69	0.72	0.55	0.82	0.51	—	2.16	0.14	1.08
CO_2	1.46	0.21	3.41	1.30	2.62	9.13	0.16	2.32	—
Mg/Fe	0.80	1.47	2.06	2.82	1.48	1.12	2.76	1.39	1.87
K/Na	0.54	5.30	11.40	3.60	2.00	5.00	11.46	0.38	0.19

区域变化的解释是：岩浆的结晶作用是从岩浆房本身的中心开始、在其东、西边缘附近（周围）结束的，因为沿垂直方向未发现有规律性的变化（根据迄今钻探验证的结果）。这种解释只是部分为模型数据所证实，因为后者在侵位过程中受次生作用的影响。

波动、而且低的 fo_2 值(氧的分压)和渗滤作用在岩筒岩石侵位时是有影响的，这反映在K/Na、Fe^{3+}/Fe^{2+}比值低和挥发份、碱金属、全铁含量变化趋势不稳定上。非磁性的含镁钛铁矿和大规模的蛇纹石化的存在，说明在侵位过程中选择性交代作用仍在继续。

就安得拉邦瓦拉卡鲁尔、中央邦潘纳金伯利岩而论，虽然总的来说，矿物、岩石和主要氧化物组份跟琼格尔金伯利岩相类似，但是就印度全国来说，每处金伯利岩体又有其独特的特征。橄榄石存在于瓦拉卡鲁尔和琼格尔的金伯利岩中，而在潘纳金伯利岩中它就完全被蚀变了，尽管还存在着蛭石和蒙脱石。在潘纳和瓦拉卡鲁尔若干岩筒中大量出现金云母，而在琼格尔岩筒中金云母是非常次要的。在瓦拉卡鲁尔岩筒和潘纳岩筒都含有镁钛铁矿、尖晶石和镁铝石榴石，而这些矿物在琼格尔岩筒却很少。

地球物理测量

运用地球物理方法找金刚石是间接的，实质上就是探测和圈定赋存金刚石的隐伏构造。任何一种方法如磁法、重力、电阻率法的有效性都取决于地质环境、容矿岩石与周围地层之间存在的相应物性参数差异的大小和异常体的埋深。斯顿（1932）在阿肯色州的派克地区用赫奇基斯磁秤成功地找到了橄榄岩岩筒。克拉曼（1935）也报道过在南非德兰士瓦西南部一个金伯利岩体上的磁测成果。按照阿基莫夫和金查夫特的意见（1973），金刚石矿床的予测和普查，主要是利用区域地球物理研究的结果，首先是反映地下较深层位物质结构的深地震测深、磁法测量和重力测量的结果。在非洲南部莱索托用上述地面物探方法发现过许多金伯利岩筒（图5）。

六〇年前后，苏联在雅库特西部和西伯利亚地台曾利用航空磁法探测和圈定含金刚石的火山岩岩筒。

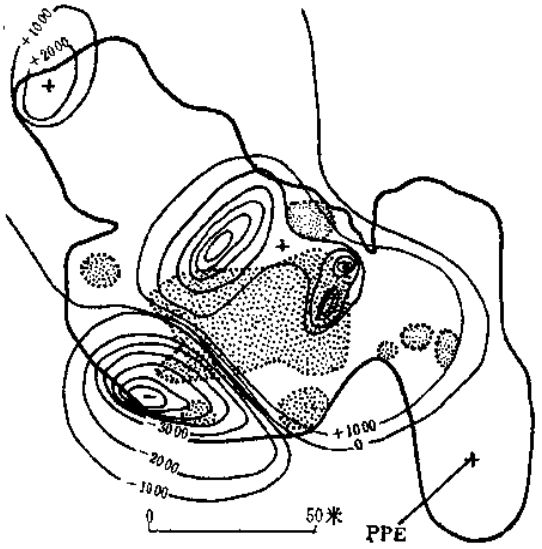


图6 用贾兰德饱和式磁力仪在侵入到砂岩里的科洛金伯利岩筒上的垂直磁场(以γ为单位)。两黑点的范围是岩筒内抗风化的坚硬层.

在印度中央邦藩纳、安得拉邦瓦拉卡鲁尔、北方邦琼格尔，曾作过地球物理调查和航空磁测。对在上述地区用地面地球物理测量所取得的有重要意义的结果，简要介绍如下。

中央邦的潘纳金刚石矿带

藩纳地区做过包括磁法和电阻率法在内的物探工作，面积约为50平方公里。按100米的线距垂直矿脉走向布置测线、按30米的点距进行测量。先在已知含金刚石的马杰加万岩筒上进行磁法和电阻率法测量，目的是为了证实这些方法探测可能存在的其它火山岩筒的可行性。马杰加万岩筒的磁场等值线图(图6)显示出两个清楚的正、负异常带，最大值约为200伽玛，这表明在已知岩筒岩石上观测的磁场包括有感磁和剩磁两部分。电极距为50、100、200英尺的电阻率测量结果表明，当电极穿过岩筒时，在岩筒与围岩（砂岩）接触界面上视电阻率值总是抬高的，而在岩筒上用这三种电极距都测到明显的电阻率低值。地面物探测量已扩展到相邻的土壤覆盖区，在马杰加万岩筒西北约3公里处，所观测到的电阻率异常形态与叠加的正磁异常非常相似。这种地球物理特征揭示了隐伏岩筒的存在，类似于马杰加万岩筒，埋深3—4米。磁法测量已扩展到马杰加万和藩纳之间（相距18公里）的整个范围，结果反

映为一种沿着走向排列的磁异常组合（同磁等值线），有一些明显的等值线圈合可能代表隐伏的岩筒。假设激励体是均匀磁化的直立薄板，初步估计它的顶部埋深大约为 430 米。这种区域磁场特征需要通过详细测量来检验。

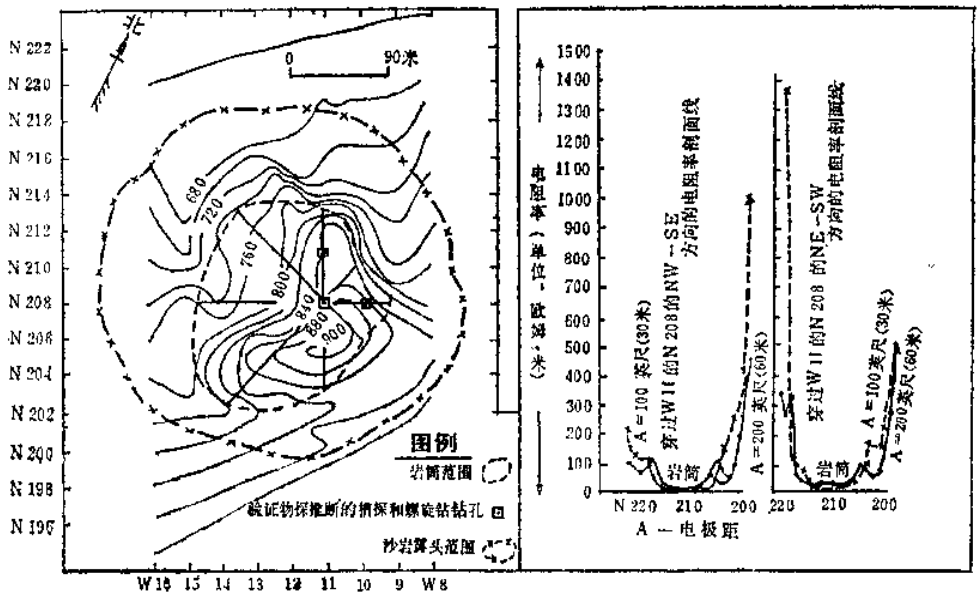


图 6　潘纳金刚石矿带的隐伏超基性岩筒的磁异常等值线和电阻率剖面

安得拉邦的瓦拉卡鲁尔金刚石矿带

到目前为止，在安得拉邦已发现六个火山岩岩筒，三个在瓦拉卡鲁尔村附近，两个在拉塔瓦拉姆附近，一个在穆利吉里帕尔附近。隐伏在 3 米厚的“黑棉”土（block—cottonsoil）下面的 6 号岩筒，完全是用重力、磁法和电法发现的。由于在已知岩筒上毫无疑义地确立了物理特征，并且与未知区的数据直接对比又取得了良好效果，所以这个新岩筒的发现才有可能（图 7）。在这个地区岩筒赋存在侵入有粗玄岩岩墙和石英脉的花岗片麻岩内。遭受风化和蚀变的金伯利岩，尤其是在“黑棉”土覆盖下的 6 号岩筒，相对其周围的花岗岩和片麻岩来说密度较低，自然反映出重力“低”。而在金伯利岩体露头上却反映重力“高”，像 2、3、4、5 号岩筒那样，因为金伯利岩体的密度值比其周围地层高。因此，重力“高”或“低”在判断岩筒是出露或隐伏时是重要的。但是磁法一般无法判断这种情况，值得注意的是，磁场等值线往往并不反映任何型式的隐伏岩筒，因为，岩筒的原生矿物遭受蚀变后，可能成为无磁性的。在瓦拉卡鲁尔地区的电阻率测量是非常有效的，因为风化的岩筒和周围的花岗片麻岩之间的电阻率差异明显。各种极距的电阻率测量结果表明，在不同极距的情况下风化的岩筒都反映出约 20 欧姆·米的电阻率低值，而在花岗片麻岩上反映出约为 100 欧姆·米的相对电阻率高。

在 1 号岩筒区的布格图中，重力等值线呈明显的弧形。而在剩余等值线图上清楚地显示出一个 0.5 毫伽的重力低，等值线看来是沿线性构造的立轴圈闭。2 号岩筒的典型特征是有

一个异常幅度仅 0.2 毫伽的重力“高”，幅度小可能是反映坚硬致密的块状金伯利岩体的体积有限。在这个地区观测到的电阻率异常很高，表明金伯利岩具有绝缘性质。在瓦拉卡鲁尔以西 2 公里处发现一个幅度大于 0.5 毫伽的负重力异常，现已证实是由埋藏3米的含金刚石岩筒引起的(6号岩筒)。没有磁异常就说明没有磁性的变化，这是早已阐明过了的。用电阻率剖面法圈定的接触界面是突变的，半岛岩(peninsular rocks)上的电阻率突然升高，竟高达 300—400 欧姆·米（采用极距 100 米的温纳装置），相比之下，在岩筒内只测得 15—20 欧姆·米的电阻率。

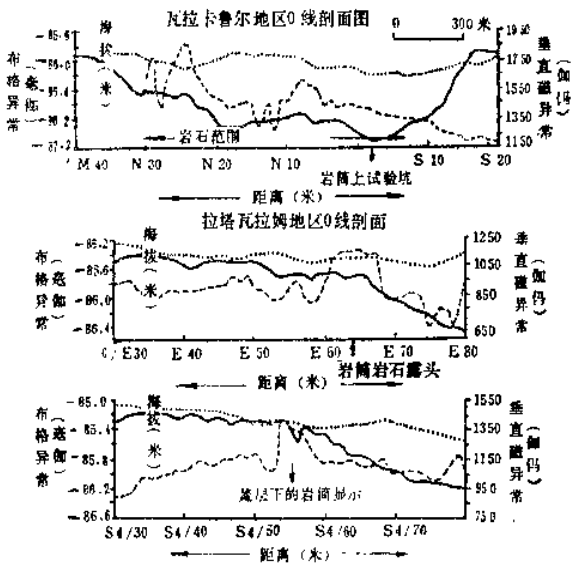


图 7　拉塔瓦拉姆和瓦拉卡鲁尔岩筒的典型重力、磁力剖面图
1—海拔高度　2—磁异常　3—布格异常

为了研究物性，对瓦塔瓦拉姆附近的 3,4 号火山岩岩筒进行了探索，因为这两个岩筒在某些方面与 1,2 号岩筒不同。3 号岩筒没有露出地表，而是隐伏在一两米厚的土层之下，是检查附近矿区界墙的石堆时偶然发现的。这种岩石呈半风化状态，似乎没有任何明显的密度差。这种情况如同岩筒的体积小一样，也是 3,4 号岩筒在布格等值线图上没有任何明显异常反映的原因。然而，重力等值线反映的特征性的东西走向和南侧梯度陡，说明有断层或剪切带存在。引人注目的是，3 号岩筒和 4 号岩筒两个金伯利岩体，分别沿着由 E—W和NE—SW 方向的两个剪切带构成的构造方向分布，本地区出露的许多岩墙也是沿着这两个剪切带方向排列，这说明该构造很可能是超基性岩上升的通道。磁异常图通过其等值线的特征走向能明显地反映出剪切构造，同时重力图上在这两个主要方向也反映出梯度陡的特征。3,4 号岩筒及其邻近地区的电阻率剖面和 1,2 号岩筒的剖面是类似的，同时可以理解成 3 号岩筒异常为低阻型，而 4 号岩筒为高阻型。

北方邦的琼格尔地区（见图 8 、 9 、 10）

琼格尔谷地基本上是由基性火山岩，其次是代表本区比贾瓦尔火山沉积岩系的石英岩、砂岩、页岩组成。前文已经讨论过本区的构造研究和区域构造线走向。用地质和地球物理测量方法曾圈定了四个岩筒即东琼格尔、琼格尔 1 号、琼格尔 2 号和贾考尔纳(Jharkaurna)。这些岩筒的岩石特征在矿物成分和化学成分两方面与瓦拉卡鲁尔岩筒都是相似的，尽管金云母和镁铝石榴石是很次要的组分。

试验剖面布置在已知的琼格尔 1 号岩筒上，从磁法和电法测量结果看，这两种方法都能成功的圈出隐伏岩筒，因为就实际情况而言，在岩筒和周围的玄武岩之间存在着可测量出来

的磁性差和电性差。地震折射剖面测量结果，反映了岩层的埋深及其在地下的大致状态，而负重力异常等值线则反映超性基岩带或金伯利岩带的范围。。现就在琼格尔谷地区四个大火山岩岩筒上所获得的有关结果介绍如下。

琼格尔1号岩筒：磁力高的走向为NE—SW向，在N15°E方向布置的径向剖面线上峰值为1300—1400伽玛。用异常等值线图和剖面图可推断引起异常的地质体产状是直立的。在整个异常带上作过电阻率剖面测量，分别用20米和60米电极距进行测量，结果反映出15欧姆·米和35欧姆·米的低阻异常。所记录到的纵波波速变化范围为1,800—3,500米/秒。

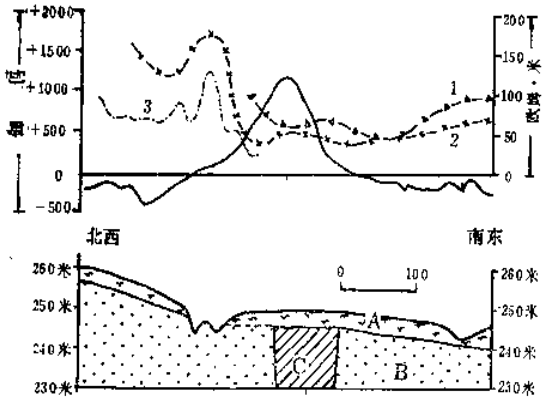


图8 北方邦的琼格尔1号岩筒地质、物探综合剖面图
电阻率剖面：1—100米、2—60米3—20米的电极距 4—磁测剖面曲线 A—土层 B—超基性岩或金伯利岩 C—玄武玢岩

琼格尔2号岩筒：最大值为2,000伽玛的非常高的磁异常，被各用20米、60米电极距测得的分别为20欧姆·米和40欧姆·米的电阻率低和0.2毫伽的负重力圈闭所证实。测得的超基性或金伯利岩的纵波波速为1,800—3,000米/秒，而覆盖层为600—800米/秒。

东琼尔岩筒：强度约为900伽玛的中等磁力高，被在这个岩筒上测得的与上面提到过的同样量级的电阻率低所证实。从该区的航空照片看，东端显示为一个明显的洼地，这意味东琼格尔是另一个寻找岩筒的远景区。然而，明显而又确凿的约750伽玛的磁力高和用20米和60米电极距分别测得的20欧姆·米和50欧姆·米的电阻率低被一个0.4毫伽的负重力圈闭所证实。该异常带似乎向东延伸得更远些。地震折射剖面测量结果表明P波速度的变化范围为2,400—3,600米/秒，而玄武岩围岩的地震波速高达4,000米/秒*以上。

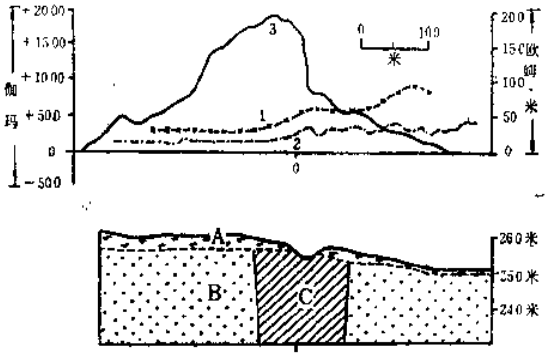


图9 北方邦的琼格尔2号岩筒地质—物探综合剖面图
电阻率剖面：1—60米，2—20米的电极距，A—土层 B—超基性岩或金伯利岩 C—玄武玢岩

贾考尔纳(Jharkaurna)岩筒：磁测结果没有任何有意义的特征显示。然而，在贾考尔纳岩筒上却反映有幅度为0.2毫伽的负重力圈闭。这完全为用20米和60米电极距测得的20—50欧姆·米的电阻率低所证实。致密玄武岩的特征是P波速度约为3,800—5,000米/秒。应当指出的是，这种超基性岩在化学成分上和岩石成分上与在琼格尔1号和2号岩筒上所遇到的不同，它有像苦橄岩那样的成分。

因此，很明显，物探方法即磁法、电阻率法和重力在印度所有的三个金刚石矿田上，找

* 原文为 "above 400m/sec." 有误，应为4000米/秒以上——译者

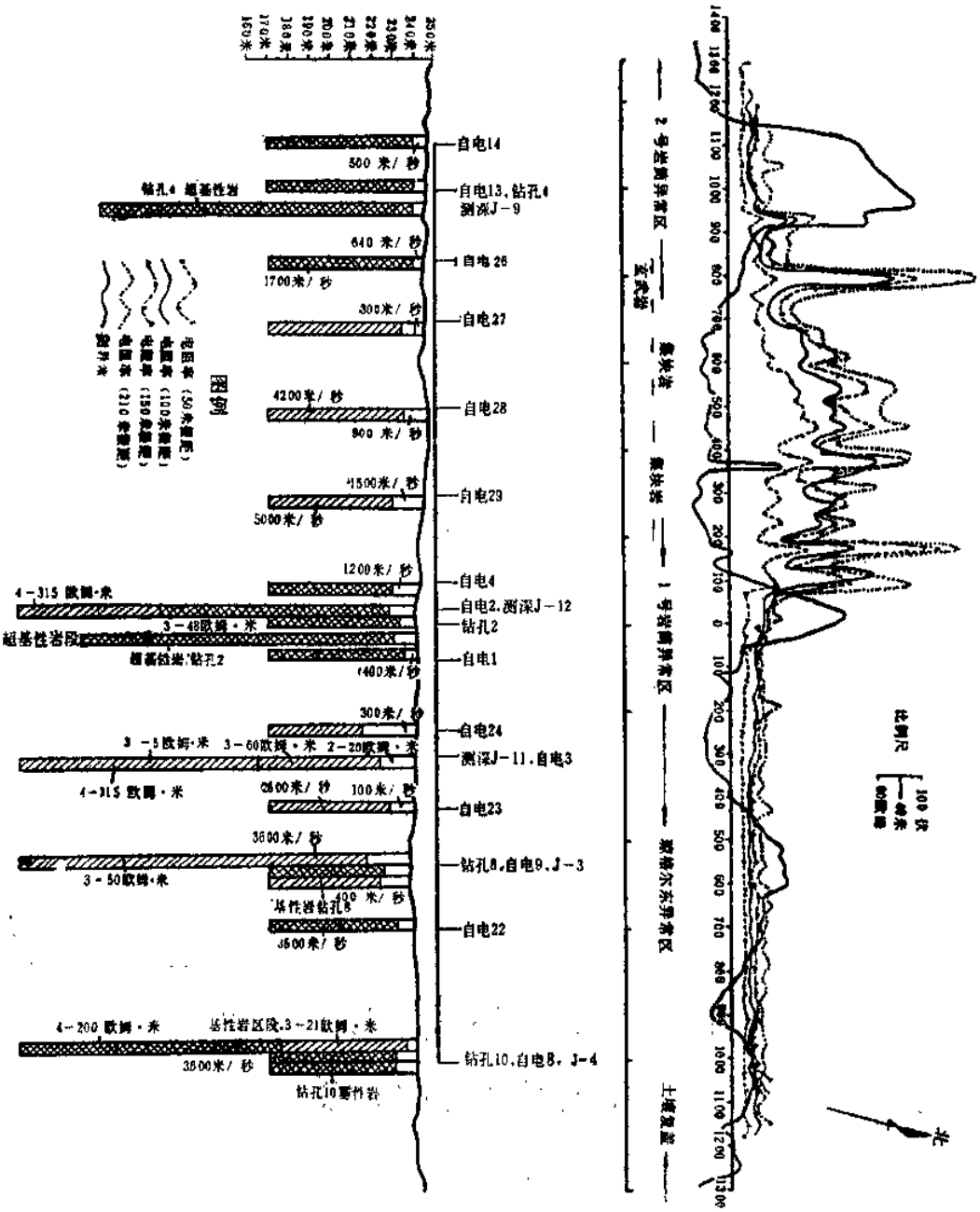


图10　穿过北方邦的瑟格尔地区1号和2号岩筒地段的纵向地电断面图

隐伏金伯利岩体一般说是最有效的。特别是电阻率法能够圈定接触面大部分为土壤所覆盖的岩筒轮廓。磁法在马杰加万和琼格尔地区圈定隐伏超基性岩体很有效。在瓦拉卡鲁尔地区，重力和电法在圈定隐伏岩筒以及在圈定与“半岛”岩石接触面方面，都获得了富有成效的结果。

结　　论

本文介绍了在北方邦米尔贾普尔（Mirjapur）地区的琼格尔谷地作过的包括航摄地质、地质、地球化学、地球物理、岩石学、岩石化学在内的多学科综合普查勘探工作，而且还对照了中央邦和安得拉邦的资料，讨论了上述各种方法在寻找隐伏超基性岩体或金伯利岩筒时所获得的结果。航摄地质和陆地卫星影像的资料指出了在印度寻找金伯利岩火山道的主要线型构造带。地质填图可揭示金刚石矿田的岩石地层和构造岩浆的演化过程。地球化学测量揭露了隐伏金伯利岩体附近铬、镍的富集特征，示踪元素的比值，并与西伯利亚已知含金刚石金伯利岩进行过很好的对比。重矿物的研究没有明确地显示出印度金伯利岩体的指示矿物的特征。岩石学和岩石化学的研究揭示了在印度所有的岩筒中主矿物相和大部分次要矿物都是相同的，虽然在某些方面有变化或个别火山道有其他特征。印度的金伯利岩，大多数都有凝灰角砾岩的变种，实质上是玄武质金伯利岩，虽然金云母在某些岩筒中或者说在马杰加万岩筒和瓦拉卡鲁尔岩筒中占优势。一般说来，在“岩筒的内部”和“岩筒与岩筒”之间氧化物的成分是有变化的。

一般说，物探方法——磁法、电阻率法和重力，在印度所有的三个金刚石矿田上，寻找隐伏金伯利岩体是卓有成效的。电阻率法尤其能够在接触面大部分为土壤所覆盖的地方圈出岩筒的轮廓。在潘纳和琼格尔磁法测量主要是用来圈定覆盖层下的超基性岩体，在瓦拉卡鲁尔地区重力和电阻率法测量都取得了良好的效果。

马宝田译自《Jaur. Assoc. Expl. Geophys.》
1981年 Vol. 11. №.2 p1—12
曹凤琴校

塔斯马尼亚西部火山岩型硫化物矿床勘探

简　　介

本文介绍了以火山岩为主的浸染状至块状多金属硫化物矿床的矿例研究，该矿床赋存在坎布里安山的雷德火山岩中，并与西塔斯马尼亚的西海岸区域岩层有关（图1）。其目的是剖析一下西塔斯马尼亚地区矿产勘探的过程与问题。因为，本文所讨论的是昆斯敦、罗斯伯

利附近约600平方公里的地区，其工作条件与勘探技术，在很大程度上对西塔斯马尼亚广大地区具有广泛代表性。

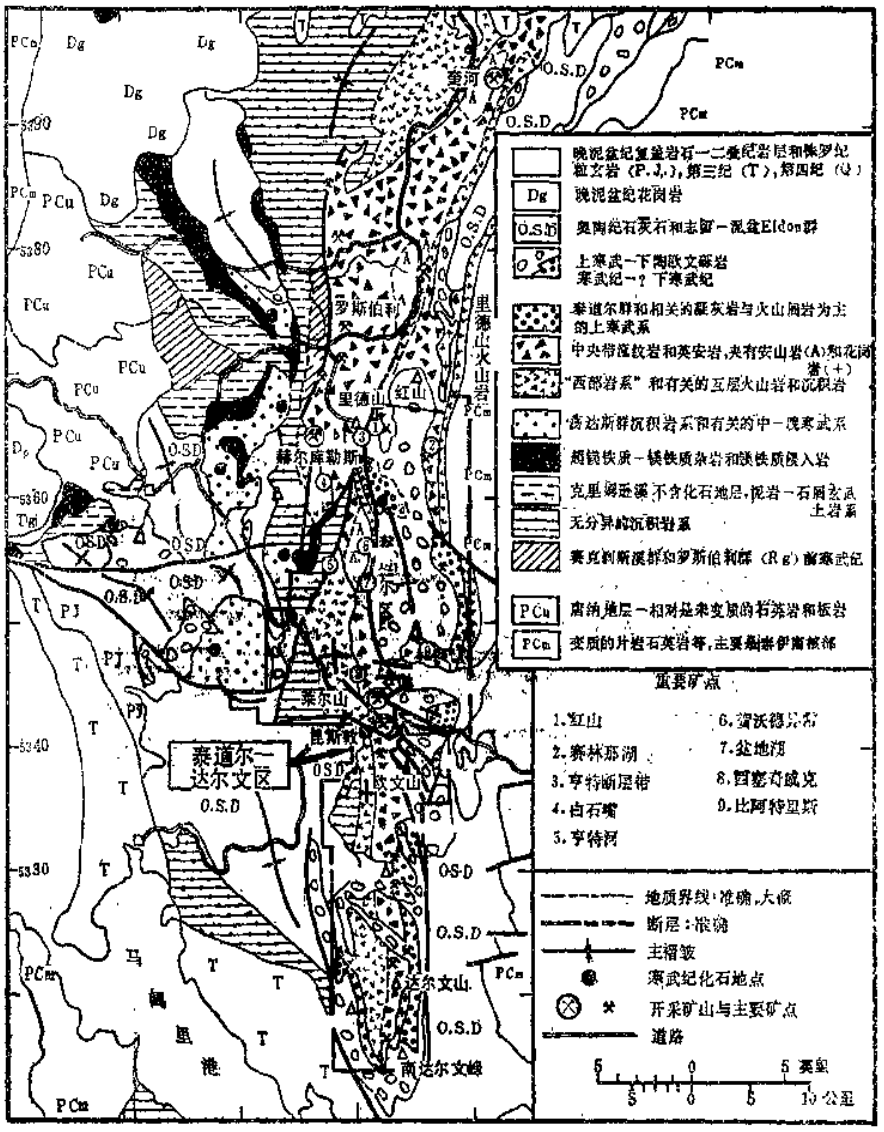


图1　区域地质和勘探位置图

本文叙述的技术内容主要来自泰道尔—达尔文地区的勘探计划（图1），但不包括已确定开采的矿点详细勘探工作情况。区域地质与矿点仅作简要介绍，如果它们对本文整个宗旨是重要的，因为有关这方面资料在其它文章中作了全面介绍（Corbett，1981；Solomon，1981）。

与澳大利亚大多数其它地区相比，这个地区存在某些严重的后勤供应问题，这是由地形崎岖、植被厚、气候寒冷潮湿造成的。在这种地区进行勘探工作的物理环境可与加拿大北部和斯勘的那维亚地区相比。

勘 探 史

第一次报道西塔斯马尼亚有矿是1827年，地点是西北部最远在滞洪河河口附近和在马阔里港的罪犯村岛附近。这就引起了当初的广泛找金热。后来1871年在比绍夫山发现了锡矿，随后在北部开始了大规模的普查工作。

图 2 表示了西塔斯马尼亚主要矿床的发现时间，后来的生产持续时间。除了奎河矿床是近年发现的以外，该区所有其它大矿床或矿田都是在1871年—1898年短短的27年中发现的。此后，该区的勘探史都反映在莱尔山采矿铁路公司（以后称为莱尔山公司）的活动中，该公司与整个地区的勘探结下了不解之缘（Blainey，1954；Reid与Rowe，1979）。到了1903年该公司获得了莱尔山矿区最重要的地产，由于面临矿石储量迅速减少，该公司着手扩大西海岸区的勘探计划。在这个阶段，雇用了勘探队，由于二十世纪二十年代初世界范围的金属价格猛跌而提前结束了。此后该区的勘探工作一直维持在低水平上，几乎没有什么变化，直到五十年代初期才开始了现代勘探阶段。

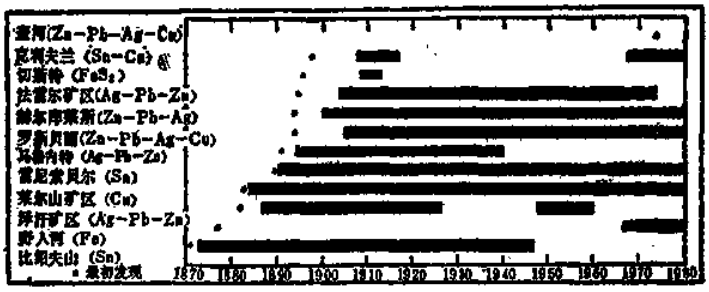


图 2　西塔斯马尼亚主要矿床的发现日期与生产历史

莱尔山公司在这阶段重新又恢复在莱尔山矿区寻找铜矿的工作。1955年该公司和邻近的澳大利亚电解锌有限公司合伙开采它的资源，同时执行一项重大的塔斯马尼亚西南长期无人勘探区的勘探计划。

经历了七年的勘探没有取得成效，该计划便中断了。莱尔山公司又一次将其精力集中到莱尔山矿区。最后的十三年在莱尔山附近的南、北地区经历了由点到面的地表探测和深入勘探时期。

1975年，由于严重的通货膨胀，铜价猛跌，又加上基建费用高等综合影响，莱尔山的采矿工作再一次处于危险之境。这些情况迫使该公司的勘探租地和延续计划，不得不由盖特石油开发公司和澳大利亚金矿联合有限公司共同组织的一项冒险计划来维持。目前这项计划包括莱尔山矿区北面25公里至南面30公里的火山岩带部分，这部分莱尔山公司目前仍拥有勘探执照。（见图 1 泰道尔—达尔文地区）。

总的来讲，现代勘探阶段已使原有已知矿床的矿石储量有了较大的增加，并在该区已划定开采的地段内又发现了新的矿床。唯一重要的新发现要算是奎河多金属块状硫化物矿床，它是1974年由阿培福尔—柯密柯小组发现的（Webster与Skey 1979）。现在，该区正成为许多公司和私人勘探者进行广泛勘探的地区。

区 域 背 景

自 然 地 理

从地貌上看，该区受崎岖的西海岸山脉控制，盖层为含硅质高的、硬欧文砾岩（Owen conglomerate）形成高山峰，其海拔最高点为1,275米。该区广泛发育有更新世多次冰川作用的遗迹，特别是在昆斯敦北山附近。该山的西面，上升的第三纪地面渐渐地向海洋倾斜，被狭窄的河谷深深地切割，峡谷深达400米。

自然植被的变化如下：在海拔大约600米以下，植被有厚厚的温带雨林（几乎穿不透的），它生长在非常肥沃的厚层粘土质土壤上，还有苔地展布在酸性高的沼泽—泥炭质土壤上，在不同的海拔高度上，通常都复盖有硅质岩石和冰川沉积。在海拔800米以上，植被就逐渐显现出高山的特色，这些植物生长在薄层多石的石质土中（图3）。

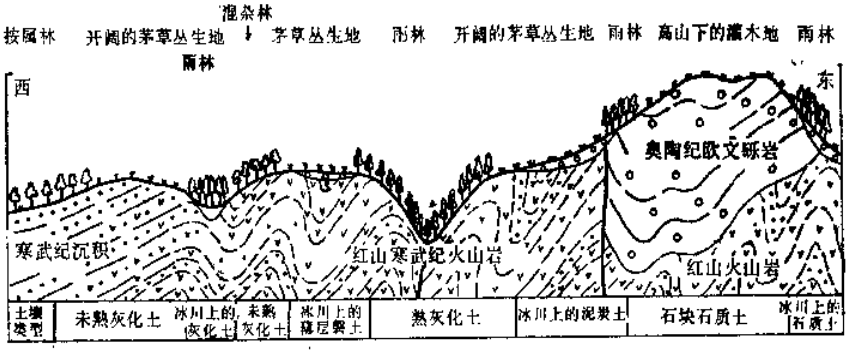


图3 里德山火山岩剖面草图，表示土壤、植被与地貌、地质的关系，剖面长15公里

值得注意的是，该区气候寒冷、降雨量大，在地势较低的地区年平均降雨量在2,500毫米以上，在山前几乎是3,000毫米，这导致山洪瀑发。降雨量主要集中在四月至十一月，因而，由于进出困难、晴天时间短等原因，野外工作基本上限定在夏季的五个月中。尽管如此，反常的天气并不罕见，不得不消减某些勘探项目。

区域地质

里德山火山岩带包括中晚寒武纪钙碱性流纹岩——英安岩火山岩，少量侵入岩体（8.5%），较少的安山岩和少量的玄武岩（10%）和沉积夹层（5%）。在山的东边它们不整合地上复在前寒武纪基底之上，而西侧与深海槽沉积岩系接触，其中有铁镁质到超铁镁质岩体侵入（图1）。

虽然我们对这些火山岩的地质情况的了解，总的来说还不够完整，但是可看出它们是由三个主要岩系构成。由流纹岩至英安岩的熔岩，火山灰流、火山碎屑物和少量侵入体组成的中带在沿西海岸山脉的许多地方出露。西带是由一横向变化的岩系：从长英到中性凝灰岩和集块岩；一些长英、中性、和镁铁质熔岩；以及一些沉积单元所组成。泰道尔群及其相关地

层基本上由火山碎屑岩相组成，它是局部不整合地覆盖在以前形成的岩系上。

该火山岩的蚀变、矿化广泛分布，到处是明显的劈理。在晚寒武世所发生的变形（裘克西造山运动）是在奥陶纪欧文斯岩、戈登灰岩和志留—泥盆纪艾顿群砂岩和粉砂岩的沉积作用之前。在中泥盆纪的一次主要造山运动（泰伯雷伯伦造山运动）造成了广泛分布的褶皱和断裂。因而，整个区域火山岩走向为北-北北西，一般倾向向西，倾角陡。

块状硫化物矿床和勘探靶区

与里德山火山岩带有关的主要矿床的地质与矿化分布情况上面已作介绍，这里仅就主要的一些勘探特征简要地小结一下。

除了里德山火山岩的上部岩系（泰道尔群等）以外，矿化作用遍及南-北带中的整个火山带上。莱尔山南部的一个富铜矿带，主要是由浸染状、脉状的黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和赤铁矿组成的矿床。该带沿中部火山岩带延伸，经过莱尔山铜矿区到红山。莱尔山北部和铜矿带以西是一系列较小的铅-锌硫化物矿床，最后在赫尔库勒斯矿山和罗斯伯利矿山出现了块状锌—铅—银—金—铜的硫化矿，继而向北延伸到包括奎河块状硫化物矿床在内（图1）。

已公布的矿石储量估算数字和从火山岩带几个主要矿床得出的总产量都归纳在表1中。

西塔斯马尼亚火山岩型主要硫化物矿床的总产量和已公布的储量估算数字　　表1

矿区	到1979年为止的产量						目前已公布的储量					
	公吨(百万)	Cu %	Pb %	Zn %	Ag 克/公吨	Au 克/公吨	公吨(百万)	Cu %	Pb %	Zn %	Ag 克/公吨	Au 克/公吨
莱尔山	88.28	1.15			7.98	0.40	28.8	1.46			2.8	0.37
罗斯伯利	0.06	0.59	5.2	16.4	175	3.6	7.7	0.83	5.1	16.8	138	3
赫尔库勒斯	1.94	0.51	5.4	16.9	172	3.5	0.42	0.47	3.6	12.1	61	1.3
弗雷尔	0.728	0.27	11.8	4.8	378							
奎河							3.5	0.35	7.0	12.5	170	3.3

各个矿床的详细介绍

莱尔山铜矿区：该区从1893年开始开采铜矿，现已开采了大约15个矿床。向西陡倾的主要岩系包括长英质熔岩和集块岩、一些小的燧石体，经过热液交代和变质形成的石英、绢云母、绿泥石、碳酸盐（菱铁矿和方解石）、硫化物、氧化物和重晶石绿片岩矿物组合。各种硫化物矿床分类如下：

1. 热液型透镜状矿床，细脉浸染状黄铁矿—黄铜矿赋存在长英质熔岩和集块岩中，例如莱尔太子山，崔恩岬；赋存在燧石和片状硅质集块岩中，如莱尔王冠3号矿体。

2. 热液型斑铜矿—黄铜矿的不规则透镜体赋存在燧石和硅化集块岩中，如北莱尔、西十二等矿体。

3、海底喷发型块状矿床，如布鲁（黄铁矿—黄铜矿—重晶石）矿床和塔斯曼、莱尔王冠矿的延伸（黄铁矿—方铅矿—闪锌矿—少量重晶石）矿床。

各种矿床产在走向长度为4公里多、宽度约1公里的黄铁矿蚀变带内，该带或是达到泰道尔群的基底，或是与奥陶纪欧文碎岩呈断裂接触。在这个带中，矿床的范围与岩性范围大致是符合的，大体上都呈带状。在岩系的下部是细脉浸染状矿体，而越向顶部越是致密块状的。这种趋势与泰道尔群基底向上矿体中的铅、锌、银和重晶石含量的增加是同样的。矿床大小变化范围较大，但是该矿田最大的矿床（莱尔太子矿体）走向长度约为400米，宽度可变，最宽处达180米，而延伸深度至少为500米。

罗斯伯利矿床：罗斯伯利矿山主要是一个向东倾的层状多金属硫化物矿床，其长约1,650米，延深至少为800米，平均宽度约6米，而在皱褶处宽度可达35米。以玻璃质、晶体和石质凝灰岩为主的长英质火山碎屑岩，已经过浅绿片岩相蚀变，而成为一种石英—绢云母—绿泥石—锰碳酸盐—硫化物—氧化物—重晶石的组合。主要容矿岩石是夹有凝灰质沉积物和黑色板岩透镜体的绢云母粉砂岩，而浅蚀变的块状火山碎屑岩超复在它之上。该矿床总的分带表现在下盘为浸染状的大量黄铁矿—黄铜矿，向上变成细条带的块状硫化物（闪锌矿、方铅矿、黄铁矿和黄铜矿），上盘为条带状的块状重晶石—闪锌矿—方铅矿的透镜体。

赫尔库勒斯矿床：该矿床位于沿罗斯伯利矿床走向向南7公里，由一系列小的透镜体和扁豆体组成，其矿物组合和主岩系与罗斯伯利矿床类似。矿化作用延伸总长为1,000多米，垂直深度为250米。

费雷尔矿床：费雷尔矿床位于罗斯伯利东北方向14公里，包括数个狭窄的富银方铅矿的裂隙式矿脉，赋存在（或邻近于）一个层纹状泥岩、凝灰岩和杂砂岩的大透镜体中，该透镜体外面由长英质熔岩和火山碎屑岩包围。共生矿物包括闪锌矿、黄铁矿、黄铜矿和黝铜矿，均在石英—菱铁矿脉石中。

奎河矿床：奎河矿床位于倾斜很陡的岩系中，其岩系为黄铁矿英安岩到安山火山碎屑岩和熔岩，带有少数凝灰质页岩夹层。该矿床由三个主要的透镜状矿体组成，形成一个700米长、250米宽的带。其中最大的透镜体（西部的）大约有400米长，150米深，平均宽度为10米。东部的富铜透镜体由黄铁矿、闪锌矿、方铅矿以及有网脉状黄铜矿矿化组成，有薄层块状闪锌矿—方铅矿上盘透镜体。在地层上位于上部和向西，在主要的致密带状闪锌矿—方铅矿透镜体下面，有一个小的细脉网状矿脉带。其他一般矿物包括绢云母、铁白云石和重晶石，重晶石随岩系向上是增加的，直到最上层形成重晶石透镜体为止。上盘的安山岩火山碎屑岩是未经蚀变的，实际上不存在硫化物矿化。

列为勘探目标的矿床类型

该火山岩带的主要勘探目标可大致分为两类：（1）浸染状/脉状—块状黄铁矿—黄铜矿土（加或减）斑铜矿矿床（莱尔山类型），产在中部火山岩带的长英质熔岩和火山碎屑岩中；（2）大量条带状黄铁矿、闪锌矿—方铅矿—黄铜矿矿床（罗斯伯利—奎河类型），产在长英质→中性的火山碎屑沉积岩岩系中。

列为勘探目标的这些矿床的主要特征将在下面讨论。该火山岩带另外一些潜在的勘探靶区有：大量低品位的银、金矿矿床，以沉积单元为容矿岩石的似花岗岩成因的交代型锡矿矿床。

莱尔山型矿床：它们的特点是在上盘和下盘普遍地存在浸染状黄铁矿、绢云母和绿泥石蚀变晕，硅化作用尽管比较局限但是强烈的。总的硫化物含量一般为10—20%，显著例外的是布鲁矿体，它的总硫化物含量大约为85%，矿床大小范围变化很大，小的西十二块状斑铜矿矿体只是80,000吨（铜含量 9.50%），而大的浸染状莱尔太子矿体，初步估算已超过3千万吨（平均含铜 1.45%）。这些矿床适合用激发极化法和地面电磁法进行探测。这些矿床还具有相当大的体积导电率，可用航空电磁法探测，但是由于现存的采矿设施引起解释上的问题，这一点还没有作充分的论证。虽然一些矿床伴生有磁铁矿，但是磁测不能看作是一种直接找矿的方法。至今还没有编制出用于贱金属分析范围以外的专门的地球化学方法指南。一般来讲，与这些矿床伴生的只是少量的铅、锌矿化的富集。

罗斯伯利—奎河类型矿床：这些矿床的典型特点是吨数不定的一些窄板状的层状矿体（表1）。一般能看到矿物明显的分带性：下盘为黄铁矿—黄铜矿网状脉，向上在上盘附近已变成大量条带状的闪锌矿—方铅矿—黄铁矿—黄铜矿矿化，上复一个富重晶石带。重要的脉石矿物包括重晶石、锰碳酸盐，以及蚀变程度不同的绢云母和绿泥石。

对于这些勘探目标还没有研究出专门的地球化学探途元素，因此化探仍然用样品分析Zn、Pb、Cu、Ag、As、Mn和Ba等元素。

这类矿床一般也适合于用激发极化法和电磁法，在罗斯伯利矿床中有磁黄铁矿的地方，磁法勘探是一种有效的辅助方法。在该地区使用电磁法的经验表明，只有富锌矿体才是良导的（因此可用电磁法探测），在这些矿体中存在相当大量的黄铜矿足以增高矿体（或某一部分）的体积导电率。在这一点上，在奎河矿床上探测到的唯一电磁异常响应，是位于东部富黄铜矿透镜体的上方。然而，所有透镜体都是用激发极化法探测到的。

莱尔矿田的大多数矿床是在上世纪末前后由地表矿化露头发现的，只有布鲁和莱尔卡姆斯托克矿体与大量铁帽发育有关。在1956—1967年间新圈定了三个矿床，即莱尔王冠3号，霍恩岬和西十二矿体。前两个是在大的物探异常带上打岩芯钻发现的，后者是打地下岩芯钻结果发现的。

罗斯伯利矿床最初的标志是一位找金人在1893年发现的含硫化物矿的漂砾石，他作了十二个月的槽探之后，终于揭露了该块状硫化物矿床。那年末，在里德山的一个“细条铁帽”的位置上很快导致下伏的赫尔库勒斯矿床的发现。这就是遍布整个地区的大多数矿点的发现模式。

奎河矿床是1974年发现的，这是经过若干年的系统普查和详细勘探的结果。开始是进行区域填图和水系沉积物地球化学取样工作。接着用航空电磁测量圈定了八个导体异常，选定其中一个作早期评价。水系沉积物的Pb—Zn异常位于该区汇水的一些小河中。在用金刚石钻探揭露东部富铜透镜体和两个Zn—Pb—Ag—Au透镜体之前，先在异常带上采用50米线距的测网进行过电磁法和土壤地球化学测量。

勘探技术

本文提出的勘探战略的设计与演化，是积莱尔山公司连续十三年在里德山火山岩区勘探

之经验的结果。该成矿省各种矿床的发现与开发结果增加了对这类矿床的物理特性的了解。因而，富有成效的勘探战略是使用对该区效率最高、行之有效的方法；同时也承认各种有效方法的缺陷。

在过去的20年中，火山岩带勘探的基本前提是，大量贱金属硫化物矿床（类似于该地区的那些矿床）的产出明显地接近于地表，这便于直接或间接地用常规勘探方法进行探测。但是由于对火山岩带的地质情况了解很不充分，所以至今所使用的勘探程序大部分是根据勘测方法定的，而受现有的成因模式影响不大。

典型的勘探程序（如图4所示）分1—3个阶段，一般至少需要两个野外工作季度来完成。现代的勘探程序集中了地质、地球化学和地球物理的方法。在那些地形和覆盖条件许可的地方，所得到的异常应在金刚石钻进以前，用槽探和井探作检查。以前曾试图用冲击钻钻进，但由于潜水面太高而失败了。

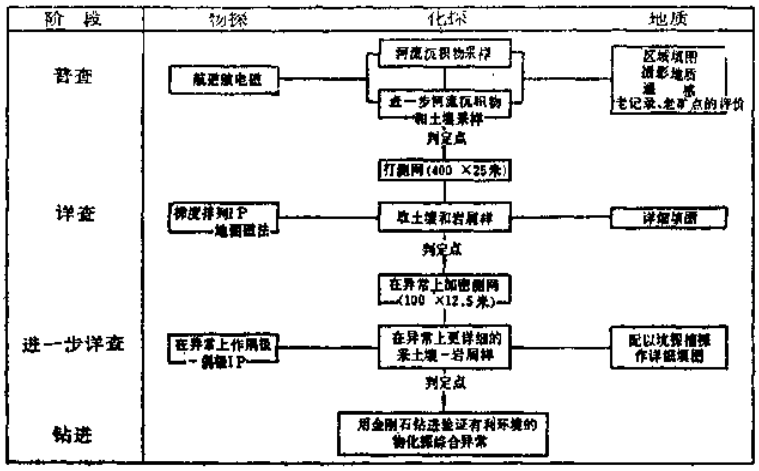


图4 典型普查勘探程序的阶段划分

地 质 方 法

在一特定地区，火山岩容矿的块状硫化物矿床通常产生在一个或几个标志层上或火山岩接触带上，这表明对火山岩岩系的详细了解应作为在勘探程序中选择有利环境的基础。然而，由于里德山火山岩系缺乏标志层，而且在沿走向和垂直走向方向上，火山岩岩相特征变化很快，结果只能对泰道尔—达尔文区的火山岩岩系作充分了解。因而必须广泛使用地球物理和地球化学方法，来划分这些有利层位和接触带。

使用“陆地卫星”和彩色航空摄影，有助于解释区域构造线、断层和褶皱。由于广泛的冰川覆盖层和厚的森林覆盖（局部地区由于丛林起火，测井和开采活动而改变），对该火山岩岩系的摄影地质解释只能是有限的。

该公司地质人员和塔斯马尼亚州地质调查局所作的区域填图和详细地质填图工作，有助于圈定有利环境，提供详细的基岩岩性数据，有利于物探和化探异常的解释。

由于该区许多地方地形陡峭，植被覆盖及冰川沉积厚，所以缺少露头，这就意味着，大

多数地质资料都是从河流切割的地方和从检验常规土壤地球化学测量所采集的C层土壤样品的风化石片得到的。在露头稀少的地区，把每个C层的－10到＋80目土壤样品的一小部分，成排地放在石片板上，用双目显微镜鉴定这些石片，然后确定岩性单元和岩石接触带。

在奎河和西达尔文峰之间的里德山火山岩出现有约200种矿，物这些详细资料来源于1903年—1919年间苏尔山勘探者的勘探活动周报。尽管该区已作了深入勘探、揭露，但是出入不便，地形陡峭、厚的植被覆盖有碍于所有出露矿化的发现。因此，常规的地质填图工作应该包括常规普查，以便发现矿点。

地球化学

近几年来，地球化学分析在水系沉积物测量普查和在已确定靶区的土壤和岩石地球化学测量详查中起着越来越重要的作用。它还用来筛选物探异常。莱尔山矿山的分析实验室不但可提供常规的地球化学分析服务，而且能在新的地球化学方法试验和开发方面提供帮助。它样品周转快，与实验室工作人员联系频繁，增加了勘探地球化学的有效性。

地面地球化学环境：在已变形的火山沉积物堆上，由于更新世冰川作用和近代的寒冷、潮湿和气候变化的影响，结果在低海拔的岭岘、切割地形上有厚的雨林覆盖，在海拔较高处是暴露的灌木丛生的荒地。厚达30米的冰碛物，覆盖了该地区有勘探前景的岩系分布面积20%。因而，在勘探区之间和之中，所分布的土壤类型变化非常大，这样得到的土壤剖面既是复杂的也是变化很大的，甚至距离很短亦是如此。最新一次冰期只过了大约11,000年，因此土壤剖面一般不成熟。

由于大降雨量和寒冷的气候，风化作用主要是机械作用而不是化学作用。由厚植被分解产生的腐植酸淋滤地表土壤，结果形成一种酸性、还原的地表环境。因而，在露头上出现的是新鲜的硫化物，在硫化物矿床上很少见到淋滤层或铁帽。在地形平坦处，土壤地球化学异常往往出现在有直接上覆在基岩源之上的残余土壤的地方。在地形起伏不平的地方，由于重力作用和水成作用，异常通常向下坡位移，结果出现较大面积的异常。在莱尔山矿山附近的地表地球化学环境遭受大量的人为污染，1896年—1969年在那里从事过炼铜工作，结果周围的土壤受铜污染。

针对地球化学环境的这种复杂、多变的特点，在常规地球化学取样工作开始之前，必须使用局部的试点测量。

普查性水系沉积物测量：该地区许多地方都被显示为树枝状水系型河流切割，在勘探岩系发育区每单位面积上的河流数量是一定的。这种河流密度系数，再结合在地表新鲜硫化物是以机械风化作用为主，使得水系沉积物采样成为圈定包含露头和隐蔽露头硫化物矿点地区的一种有效方法。水系沉积物异常一般很强，但是由于异常迅速变弱，分散流距离通常是短的（300米）。

因为采样成本构成水系沉积物测量成本的主要部分，在普查阶段需要取得极大量的数据，因此在每单位面积上要取大数量的样品。一般来讲，采样小队是沿主要的河流系统采样，所有的小河流也和大河流一样按一定规则采样。在沿河流采样时，要作基岩地质填图，在每个采样点上要记录重要的转石岩性。样品要干燥后过筛，常规－80目粒度的用原子吸收分光光度法分析总量的和可冷提取的Cu、Pb、Zn和Mn。粗粒卵石粘在薄板上作为今后参改。

由于在许多河流中有大量水在流动，常常缺少－80目粉砂以致样品重量不够。而在有些地区，河流沉积物中锰和铁的氧化物包层的卵石很丰富。正在进行试点测量，以便评价用这种更替类型的样品圈定西塔斯马尼亚块状硫化物矿床的有效性。外国的经验认为，在一定情况下，活动的贱金属离子，是靠锰和铁氧化物包层固定在河流卵石上的。据报道，这样得到的异常，提高了异常与背景值的对比度，并形成较长的分散流。

详查性土壤测量：系统土壤取样的网格点距为25米，有时加密为12.5米，在物探异常、有利岩性地段上或矿化露头附近点距还可更小些。尽管寻找的目标物宽度可能小于10米，但是在上覆残余土壤中形成的土壤异常可能是这个宽度的若干倍，这是由于残余土壤向陡坡下面扩散的结果。

由于土壤类型分布极端多变，又加之在土壤剖面上横向变化很快，目前所有的土壤样品都是用手摇螺旋钻采自C层(已风化的基岩)。这是唯一一致的层位，90% 的样品采自这层，它一般位于地表以下10—80厘米的地方。上面提到的C层石片板，容易提供重复采样的风化基岩石片，便于土壤异常值的立即解释。样品的制备和分析方法与上述水系沉积物样品的相同，通常再加上分析Ag、As和Ba，以便鉴别异常。虽然在局部地方土壤剖面中锰很富集，但可看出它对贱金属有一种有限的净化作用，在罗斯伯利—奎河型矿床上，常常用作贱金属矿化作用的指示元素。

雨林地区的特点是成熟的残余灰化土壤剖面发育，典型的是有红—棕色斑点的B层存在（图5）。在海拔较高的地方，在缺少大量植被的岩石坡上，多石的泛域石质土也很少发育。在冰川覆盖层上发育各种类型的土壤，变化范围从石质土—沼泽泥炭土（通常形成沼泽地）—灰化土剖面。薄层磐土壤（placosols）的特点是有一薄的不透水铁氧化层或在20—150厘米的某个深度上存在氧化铁层（placon），通常发育在冰川上方。冰川覆盖层的地球化学采样只在开发阶段进行，采样限于A层土壤。到目前为止，在冰川中还未发现过矿化漂砾，在加拿大发展的基底冰碛取样技术，在斯堪的那维亚还没有试验过。

雨林地区的叶沃土或枯枝落叶层与灌木丛植被盖覆，提供了广泛的取样介质，正在进行试验测量，用来评价这种快速普查的土壤测量方法。

岩石地球化学：在常规地质填图中，收集成套的露头标本，并作Cu、Pb、Zn和Mn的分析。这可在一次勘查中，确定每种岩性的背景值和下限值，以便区分和解释土壤和水系沉积物异常。这样还可在工作程序中前期鉴别出矿化露头。另外，在露头作详细的岩片采样，作槽探、坑探，以便评价土壤地球化学异常源和物探异常源。

所有金刚石钻探岩芯，不论是矿化的或是脉石，都要作常规的Cu、Pb、Zn、Mn和全S分析，在关键井段上还要作Ag、Au分析。这些分析结果有助于评价岩石的地球化学特征，圈定矿点周围的原生分散晕。利用岩芯和露头中碱元素和痕量元素组和比值、评价和定量分析围岩蚀变，应在试测阶段进行。

地球物理方法

从现代勘探阶段开始，就采用地球物理方法作为普查的主要手段，因为它能够较快速地圈出主要异常带的存在，这些异常带可能有块状硫化物矿床存在。而且，该地区火山岩是典型的高阻层，良导覆盖层很有限，这与绝大部分澳大利亚本土的情况十分不同。

采用的方法是多变的，要随对火山岩、围岩和硫化物矿床的物理特性情况的不断了解而相应变化。近几年，激发极化法，电阻率测井，岩心磁化率测量的资料，在物探工作设计和最终资料解释方面很有价值。特别是井中物性的详细测定，能指出该孔是否打穿了由地面物探测量所圈定的异常源。

普查测量：在这种地区没有广泛使用航空电磁法测量，主要原因是：（1）用这种方法工作，整个勘探区大约需要10多年才能完成，而早期的勘探者曾在全区范围内找到了许多矿点，为评价直接提供了靶区；(2) 对使用航空电磁系统在崎岖地形上是否能保持固定的离地高度表示怀疑。而航空电磁法试验测量（直升飞机载土莱尔法，固定翼的因普特法）是在泰道尔—达尔文区已知矿化带上进行的。因普特系统由于飞机不能保持适合的离地高度而告失败。同样，在裘克斯—达尔文和赛林那湖区作的土莱尔法测到的振幅响应值非常小，究其原因，多数认为是飞行高度问题，而不是没有导体。

目前，普查性直升飞机电磁测量限于地形相对平坦的地区，特别适用于厚森林覆盖地区或冰川覆盖地区，那些地区早期的勘探者实际上不可能到过。

上面已谈到过，目标矿床不可能具有必须的体积电导率，使其适合于用航空电磁系统探测。因此，由于自然环境对飞机飞行高度的限制，因此目前可用的航空电磁测量只能作为一种踏勘手段。尽管这样，该区北边，在地形比较平坦的地区，麦克发尔公司的H400电磁系统还是成功地发现了一个导体，结合水系沉积物地球化学测量结果导致发现了奎河矿床。

各种比例尺的航空磁测作为一种普查填图工具，广泛地应用于圈定与中央火山岩带有关的岩系和单个的超铁镁质、铁镁质和安山岩岩体。因为该地区政府机构没有作过系统的航磁测量，只有个别公司在局部地区飞过航磁。

该地区的地面普查测量起初受莱尔山区详查测量经验的严重影响。最早是1934—1938年作的野外测量，使用等电位线法和电位比值法。标出了许多异常带，但是主要的异常检查工作没有作，直到1955—1966年又作了一系列重复测量，才确认了早期测量工作的结果。后来的测量包括：电磁法（土拉姆）激发极化法（偶极—偶极）、自然电位法和磁法。在激发极化法异常与电磁法异常重合地带进行金刚石钻进，结果分别于1956年和1967年发现了莱尔王冠3号和霍恩浸染状黄铁矿—黄铜矿矿床。

在用电磁法之前，最初选用激发极化法作地面普查测量，因为激发极化法可探测到浸染状(可充电的，非导电的)和块状(常为导电的)两种多金属硫化物矿床，野外测量生产效率较高。因为它是一种同线测量方法，不需要打为铺设回线用的测线间的垂向连线。在泰道尔地区早期的普查测量(1967—1971)采用测线方向为东—西向，线距约为400米的偶极—偶极排列（电极距为100米)的激发极化测量，辅以磁通门磁力仪测量。测量效率约为1公里/台·班。

后来为了提高生产率应用了单极—偶极排列，测线间距离缩到200米，而生产率仍是约1公里/台·班。

最近，要求一种效率更高的物探测量方法，于是利用梯度排列激发极化法作普查扫面工作。这种方法可大面积地相对快速扫面，测线长为2公里，线距为200米，点距为25米，这样能提供较准确的异常响应的位置。测量效率为1—3公里/台·班，这根据进出条件和地形条件不同而定。然而，与前面提到过的测量方法一样，由于不适宜工作的天气影响使总生产率明显下降，总计要损失野外工作季节中25%的测量时间。将所获得的电阻率和充电率数据，及用常

莱尔山公司从1966—1979年在泰道尔-达尔文区评价的主要矿点　　表 2

矿点名	矿化型式	地表特征	异常类型	金刚石钻进孔数	
				莱尔山公司	以前的公司
1. 红山	带黄铜矿-磁铁矿-黄铁矿脉的含钾熔岩穹丘，西侧有长英质凝灰页岩岩系，主要有块状闪锌矿-方铅矿-黄铁矿透镜体，并广泛分布有浸染状闪锌矿。	在Cu矿脉上有老矿坑，Pb—Zn矿带没有出露	Cu矿带：有IP异常；Pb—Zn矿带：土壤地球化学异常，得到强的土拉姆与IP异常与页岩有关	11	4
2. 赛林那湖	在强剪切和绿泥石化的长英质熔岩和凝灰岩中广泛分布有浸染状和细脉状黄铁矿带(700×500米)	在浸染状黄铁矿-黄铜矿矿和细脉黄铁矿-磁铁矿矿化上有老矿坑	强IP异常 弱土壤地球化异常	7	
3. 海特断层带	在7公里段的主断层带的长英质-中性凝灰岩和熔岩中，有各种块状-浸染状黄铁矿-方铅矿-闪锌矿带和细脉浸染状黄铁矿-黄铜矿矿化	在Cu矿脉上有老矿坑；Pb—Zn矿带被薄冰碛漂砾岩岩屑所覆盖	Cu矿带：IP和土壤地球化学异常 Pb—Zn矿带：强IP异常	8	
4. 白山嘴	在罗斯伯利和赫尔库勒斯矿床走向方向上的长英质凝灰岩-页岩岩系中有浸染状黄铁矿-磁黄铁矿	被淋滤的带有黄铁矿洞穴的页岩	强IP异常； 弱土壤地球化学异常	1	1
5. 海特河	在主断裂带附近的安山火山岩和凝灰质沉积之接触带中的浸染状和细脉方铅矿-闪锌矿透镜体	在出露的Pb-Zn-Ag矿带上有老的矿坑	强土壤地球化学异常，弱IP异常	2	

续表 2

矿点名	矿化型式	地表特征	异常类型	金刚石钻进孔数	
				莱尔山公司	以前的公司
6. 霍华德的异常	浸染状黄铁矿，石英-黄铜矿-方铅矿-闪锌矿脉，重晶石-赤铁矿产于有少量碳酸盐透镜体的长英质-中性集块岩、凝灰岩、火山灰流和熔岩的混杂岩系中	在Cu—Pb矿脉上有老的矿坑，在重晶石矿上有矿井。	在浸染状黄铁矿带上有土拉姆、IP异常，弱土壤地球化学异常	4	
7. 盆地湖	赋存在黑色页岩和绢云母化长英质凝灰岩中的浸染状黄铁矿	广泛的冰川冰碛覆盖厚达30米。	在黄铁矿带上有土拉姆和IP异常	4	2
8. 西赛吉维克	在长英质-中性凝灰岩火山灰流状岩系的黑色页岩中赋存块状黄铁矿透镜体和浸染状黄铁矿	在修老的铁路掘进中揭露的黄铁矿透镜体	强的IP异常，弱土壤地球化学异常	3	
9. 比特莱斯	浸染状和细脉状方铅矿—闪锌矿—黄铁矿矿化存在于绿泥石化长英玻璃质和石质凝灰岩中	矿化出露地表但无老的矿坑	强的水系沉积物/土壤地球化学异常，弱IP异常	3	

规质子旋进磁力仪测得的数据，作同一测线的剖面图和平面等值线图，有助于地质资料（特别在岩石出露少的地区）解释。

详查测量：在普查阶段得到的异常带或异常响应，进一步用单极—偶极排列或偶极—偶极排列激发极化法或用土拉姆法作评价，以便提供有关潜在目标的物理特性、埋深和位置的更具体的资料。土壤和岩石地球化学资料有利于预先评价和选择可供钻探的目标。每个钻孔都作井中激发极化测井、记录充电率、电阻率数据，测量岩心磁化率。另外，应用所作的电位测量圈定由钻孔穿过或地表露头的良导硫化矿体。在海特断层带中块状硫化物矿体附近和红山（表2）地区作的这种测量的两个实例表明，矿体太小没有必要进一步用钻探圈定。

在1966—1979年间，在泰道尔—达尔文地区，已打下了43个占孔，评价过39个矿点。

讨　论

莱尔山公司在该区从1966年以来评价的重要矿点的详细情况如表2所示，其位置如图1所示。其中，只有比特拉斯矿点所揭露的矿化，早期勘探者没作过工作。其它大部分矿点以前都做过一些工作。尽管到目前为止还未圈出一个有经济价值的矿床，但自1966年来已发现了二个小的隐伏的块状硫化物透镜体（红山和海特断层带）和一个大的黄铁矿透镜体（赛林那湖）。在海特断裂带上的矿点上，在一个高激发极化异常上用槽探揭露了一个1.2米宽的带状黄铁矿—黄铜矿—方铅矿—闪锌矿透镜体，上复薄层冰川漂砾岩屑（图5）。图5的土壤地球化学剖面中的数值是由A层冰碛土得到的，可能是由于机械和水成作用，因此异常向

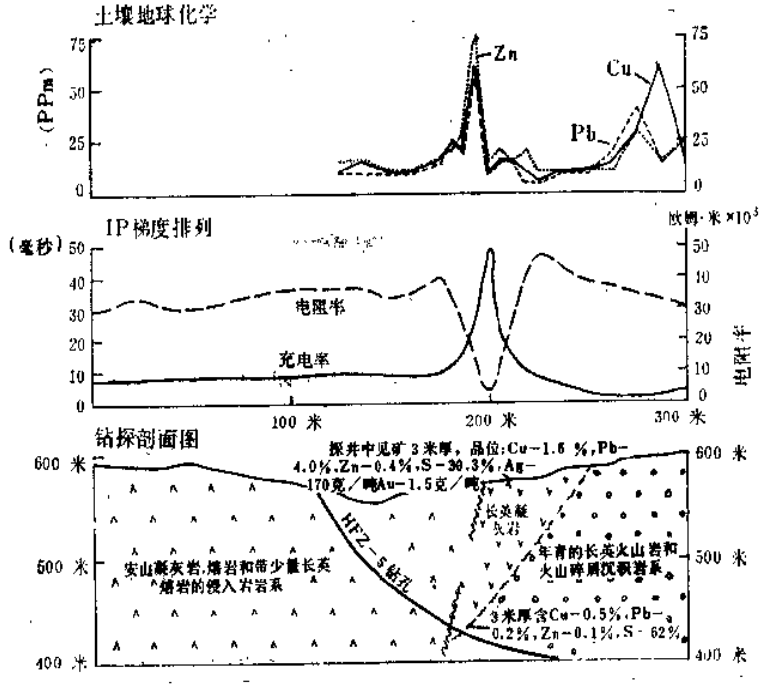


图6，海特断层带块状硫化物透镜体的钻探剖面图，土壤地球化学和激发极化剖面图

下坡位移了。

通常含有石墨或细粒浸染状黄铁矿的黑色页岩透镜体往往是许多激发极化异常的源，它们的贱金属背景值高于周围的火山岩，结果形成激发极化—土壤地球化学综合异常。因为在罗斯伯利和赫尔库勒斯矿床上，黑色页岩透镜体在空间上与容矿岩石共生，所以这些综合异常还需要详细评价和筛选。使用频谱激发极化法和痕量元素岩石地球化学法有助于这些异常的筛选。

目前勘探程序的设计，反映出对靶区硫化物矿床及其围岩的地球物理特性的了解和利用的不断增加。另外，使用碱金属和痕量元素岩石地球化学探测与圈定硫化矿床周围的蚀变晕的工作正在评价之中。

李 颖译自《Economic Geology》（作者：K.O.里德，R.M.D.米雷斯）1981, Vol.76

向源富校

法国海外物探找矿实例

编者按：

法国国家地质科学技术中心于1971年11月3日至5日在奥尔良召开了矿产地球物理讨论会，有160名地球物理工作者参加。会上有法国地质矿产调查局、地球物理总公司、地球物理研究中心、国家原子能署、一些院校和矿山公司等单位的30多名代表，交流了自己在海外开展地球物理工作的经验，并介绍了各种物探方法找矿的成功实例。会后汇集成册。这里仅节译其中几个实例如下。

在沙特阿拉伯的阿尔达尼亚、尤姆阿施·沙拉依布、西贾巴尔等地区发现硫化物矿床

摘要：阿尔达尼亚块状硫化矿透镜体的发现，是从研究1/100,000地质图和磁测图开始的。接着，使用了航空因普特电磁法进行了详查。随后在地面工作中，使用了对布置钻孔最有效的方法：磁法、激电法和自然电位法。

对艾尔·阿玛尔矿床周围进行因普特电磁测量的结果发现了尤姆阿施·沙拉依布矿体。在地面上使用的方法有：土拉姆电磁法，磁法、自然电位法、激电法和电阻率法。

在地面上使用自然电位法、磁法和土拉姆法检查了贾巴尔萨伊德矿床附近的因普特异常。在一个钻孔中见到了少量矿化。井中充电测量结果查明，钻孔附近存在一个导体。

这一系列研究得出的结论认为，工作应分以下四个阶段进行，大范围普查，航空详查，

地面详查和钻探揭露。对前三个阶段的地球物理研究所需费用已经提出了估算标准。

引　言

沙特阿拉伯王国石油和矿产资源部已委托法国地质矿产调查局进行一项庞大的勘探计划，

内容包括：

（1）对整个阿拉伯地盾区进行磁法勘探；

（2）填图和进行系统的地质调查；

（3）对已知矿床进行详细研究；

（4）使用因普特电磁法进行详细航空测量；

（5）对已知异常进行地面详查；

仅进行了5年工作就在三个地区取得了令人鼓舞的成果，地球物理勘探在其中起了决定性的作用。

一、阿尔达尼亚硫化物矿床的发现

对阿拉伯地盾区1/100,000地质图和磁测图进行对比的结果。引起人们对阿尔达尼亚地

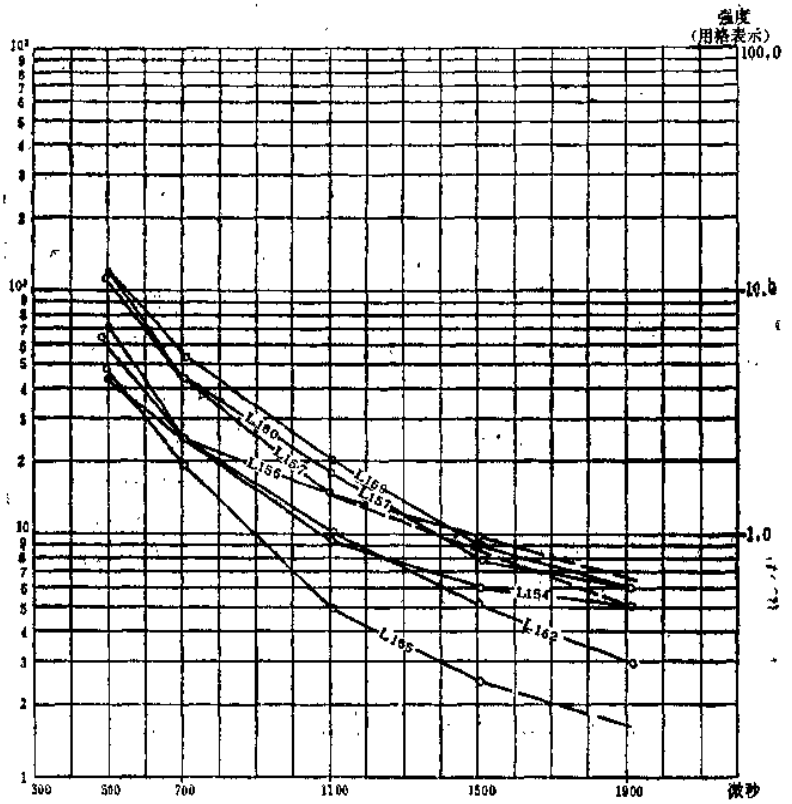


图 1　异常体A的非指数衰减曲线图

区的注意。磁测图对野外地质观测结果作了补充。它说明在艾依·乌法拉地区附近存在一弧形构造（花岗岩侵入体？）；有一方向为北东20°的大断层；顺此方向存在一强磁异常，用两个微粒花岗岩岩墙的异常迭加也解释不了这一异常；存在一些南北走向的小异常，这些小异常对应着充填古老碎屑岩的东西向断裂带。

尽管碎屑岩中的矿化极贫（Ag？），但由于存在这些含矿标志和局部磁异常特征，所以，仍决定对这一地区进行因普特电磁法勘探。

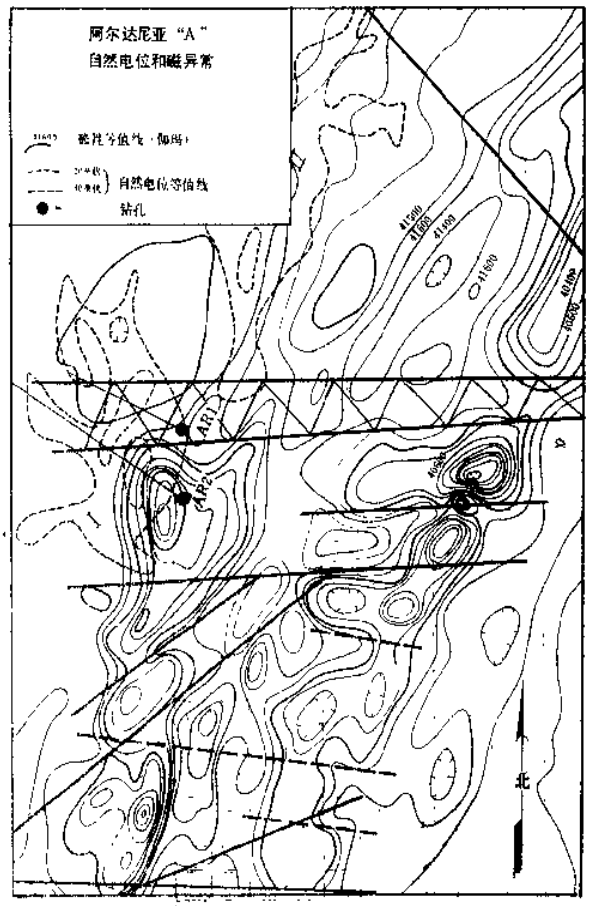


图2　阿尔达尼亚"A"自然电位和磁异常

阿尔达尼亚地区因普特测量结果发现了很多异常。这些异常可分成两类：一类反映二次电磁场呈近似指数定律衰减的异常（半对数纸上曲线呈直线）；另一类反映随时间的延续而衰减越来越缓慢（导电率随深度增大而增大）。第一类可以解释为是由地表导体引起的。第二类（见图1）似乎可以解释为是由深部导体和深部存在良导电层造成的。最后，决定对这些异常进行详细地面工作。根据因普特测量记录编制的磁测图证实了1/100，000磁测图所推断的构造，并且表明，每个微粒花岗岩岩墙都对应着一个单独的磁异常。

地面地质详查(1/5000和1/2000)、自然电位法和磁法，在这一特殊情况下，都是有效的。在铁帽（出露不明显）的正方向和铁帽与磁性层接触并与一大破碎带交切的地方，用自然电位法发现了一处小范围的异常，该破碎带是由于磁性层中断而被揭露出来的（见图2）。

上述各种特征可以解释为是因存在块状硫化矿所致。为了验证这一推断和了解这一矿点可能具有的经济价值，沿着地层向东的延伸部位布了AR_1和AR_2两眼查普占孔，发现了厚为15米的一系列透镜体，含有黄铁矿、磁黄铁矿和闪锌矿。在与微粒花岗岩岩墙接触的钙质片岩里，存在着一定数量的磁铁矿，这就解释了磁异常的地球物理原因。

二、尤姆阿施·沙拉依布硫化物矿床的发现

对包括艾尔·阿玛尔矿床在内的局部地区决定进行因普特电磁勘探，该矿床已为一些老

矿坑所揭露：在艾尔·阿玛尔—伊德萨斯大断层以东，为哈拉邦统英安山岩和安山岩，上哈拉邦统流纹岩和英安岩。

在规模不大的老矿坑北一北东方向 2 公里处的一个名叫阿施·沙拉依布的地方，在一个高阻岩体上发现了因普特异常。有一条硅化带，这在1/20,000地质图上也可以见到，它把这些老矿坑和该异常连了起来。在第28号航测线上出现一个拐点，表明这是一条好的衰减曲线（见图 3）。由于显示了这些良好的地质和地球物理特征，故决定进行地面详查。

地面详查方法包括详细地质调查、自然电位法、激发极化法、电阻率法、土拉姆法和磁法。异常位于一个花岗闪长岩侵入体的流纹质、安山质和英安质凝灰岩岩体上。在与硅化带接触的地方发现了深埋的铁帽痕迹。

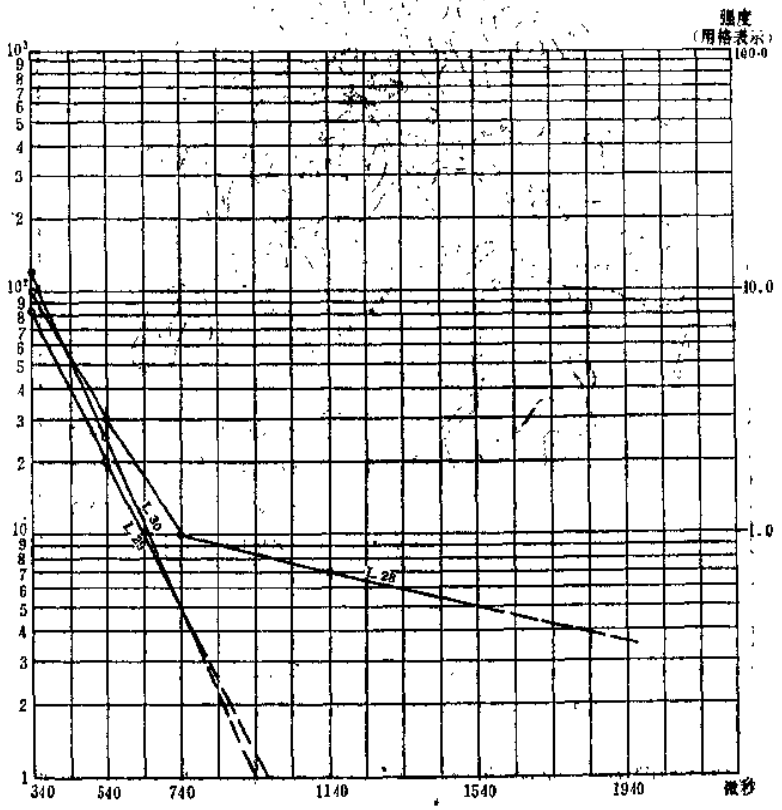


图 3　艾尔·阿玛尔地区尤姆阿施·沙拉依布的异常衰减曲线图

用磁法和土拉姆法查明了断层带和构造：地层走向北西或西-北西，倾向南西 50°，断层走向为北北东（平行于硅化带）、北和北东向。

铁帽痕迹集中的部位出现了一条很宽的自然电位异常带，它与地层走向平行延伸（见图 4）。用激发极化法和电阻率法在北北东向断层上圈出了迭加异常。根据这些资料，推断硫化物矿化的存在以及复杂的构造。

这一推断通过打钻得到了证实。这已是普查中第四口打到硫化矿的钻孔（$N_{o}6$），这些硫化物有：黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿和闪锌矿，有好几层，其中有一层厚度达20多米，含有

1％的铜和13％的锌。

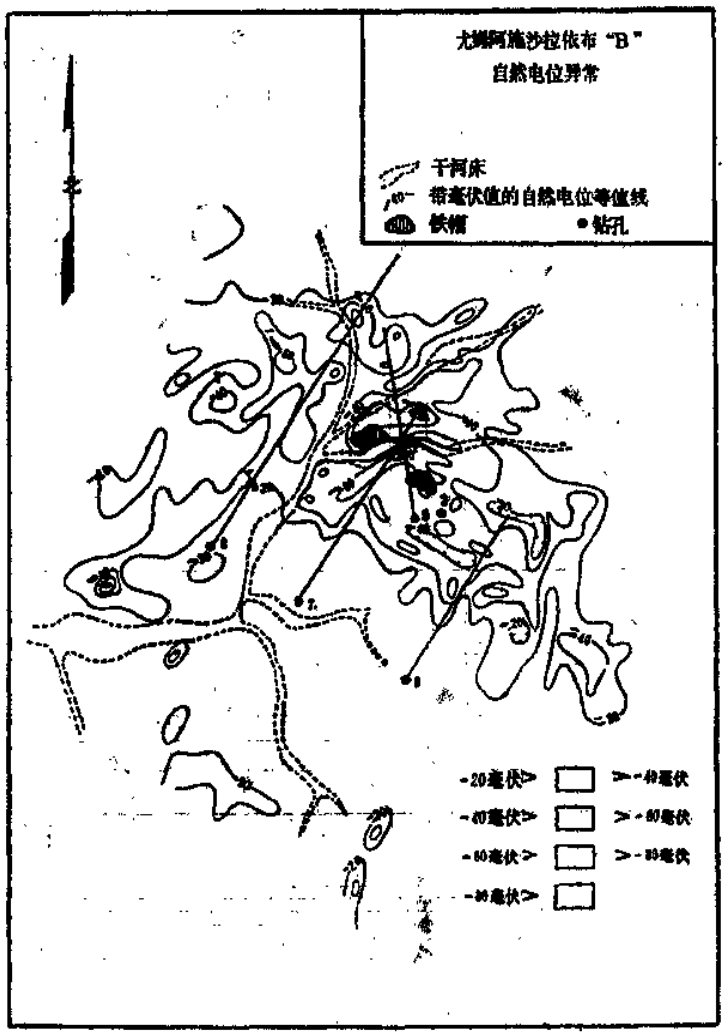


图4　尤姆阿施·沙拉依布"B"自然电位异常

备注：对在异常的南南西方向的尤姆阿施·沙拉依布老矿坑也进行了研究，但没有获得任何积极成果。

三、贾巴尔·萨伊德矿床西部一个导体的发现和研究

对包括贾巴尔·萨伊德硫化物矿床在内的地区决定使用因普特电磁测量，岩性是流纹质和安山质凝灰岩。该矿有异常反映，而在其附近也发现了另一些异常。其中位于西部1,200米处的一个异常显示的衰减曲线与主矿床的曲线极为相似（见图5）。根据这一特征，决定进行地面详查。

在地层出露不特别明显的情况下（因是残积物覆盖区），对磁异常和不很强的自然电

位异常进行了对比。两者的相互关系从 SA_{20} 钻孔得到了验证，该孔打到的硫化物极少。

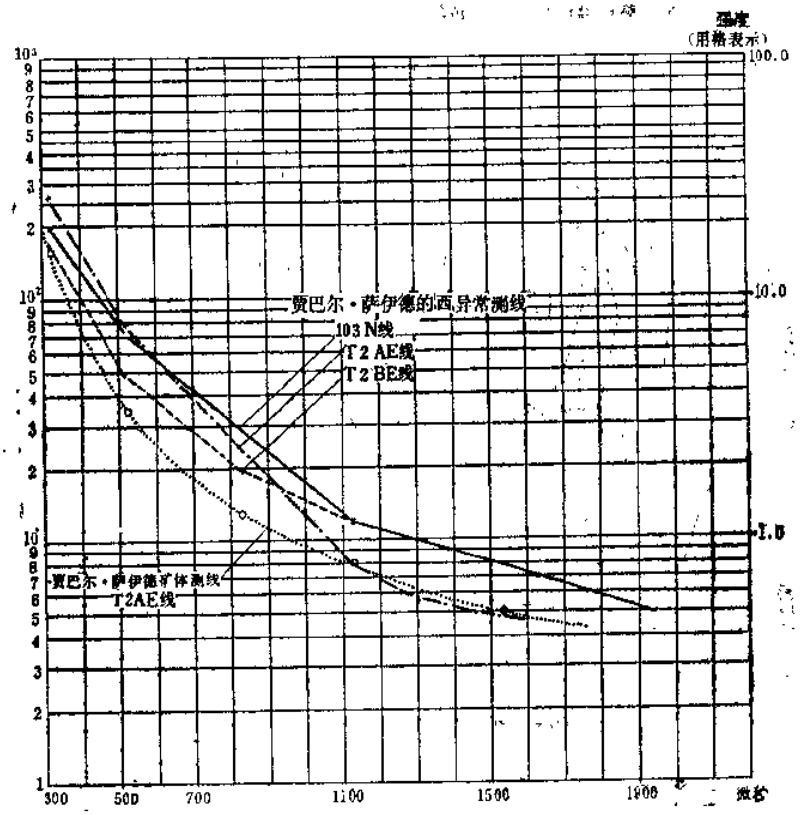


图 5　贾巴尔·萨伊德的因普特电磁衰减曲线图

利用这个钻孔又做到了充电法，其结果表明，SA_{20} 孔是位于一个导体的边缘（见图 6）。第二个钻孔垂直布在充电法异常的顶部，该孔没有见到足以解释物探异常的矿体。第三个孔打的是从东南向西北倾斜的斜钻，看来这是必要的，因为根据等电位曲线的形状，似乎矿体实际上是朝东南方向延伸的。

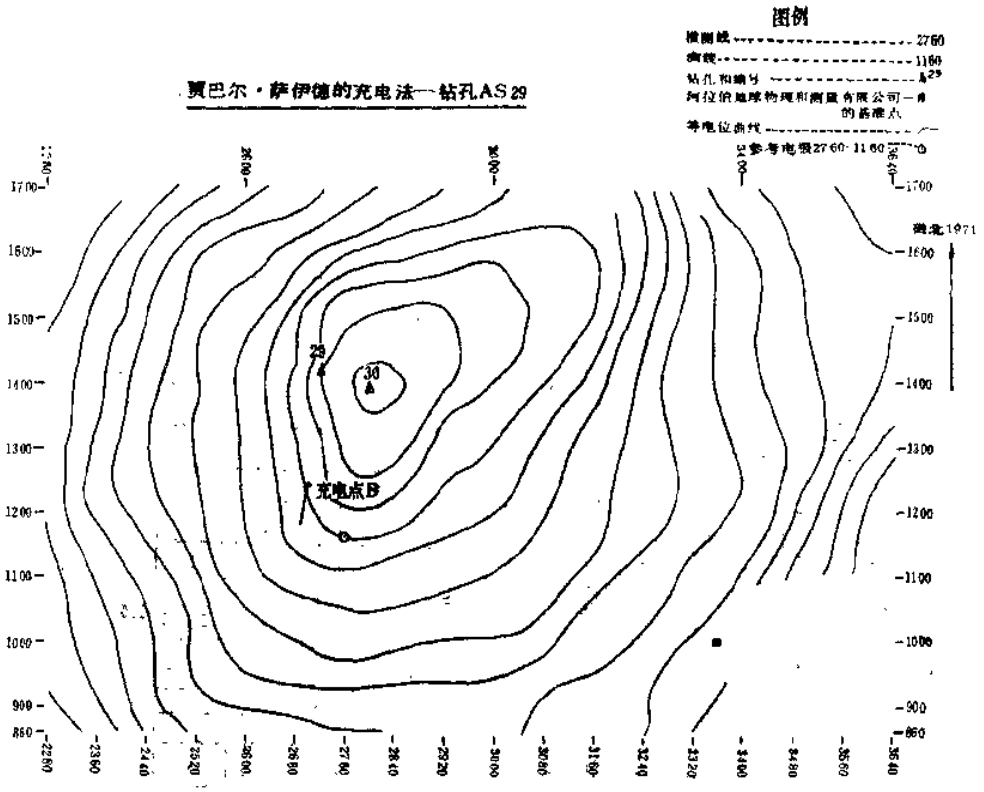


图 6　贾巴尔萨伊德的充电法—钻孔SA₂₉

结　论

通过上述三个具体工作实例可把勘探过程概括为以下几个阶段：

1、大范围普查。使用下列技术方法：

（1）进行包括地球化学在内的地质普查、冲积层的重砂研究，圈定和研究含矿标志；

（2）航摄地质；特别是在裸露地区；

（3）磁测；主要是在覆盖地区；

用这些技术方法的目的应当实现 1/500,000～1/100,000 小比例尺地质填图。

2、详查

在面积有限的范围内，在第一阶段工作中一经发现有利部位，就应使用更精确但也更费钱的技术方法：

（1）进行 1/100,000—1/20,000 比例尺的地质填图；

（2）进行区域化探普查；

（3）进行航空物探：磁测、能谱测量和电磁测量。

在可能的条件下，这些方法应当配合使用。因为我们宁愿结合几种异常来共同指出一个含矿目标，而不愿用单一方法测得的单一异常来圈定含矿目标。

在这一阶段后期，选出一平方公里大小的面积进行地面详查。

3、地面详查

使用的都是很费钱的技术方法：

（1）地质详查（1/20,000—1/2,000比例尺）；

（2）化探普查；

（3）地面物探；

在这个阶段和前一阶段一样，很少愿意用单一方法指出和选定孔位，而愿意结合多种异常来选孔位。

4、钻探

在勘查中，钱花得最多的是打勘探钻孔。有时在见到矿体以前，需要打上好几个钻孔，同时还要进行孔间的精确研究。

在每个勘探阶段工作之前，都应确定好要研究地区的范围和准备好要使用的技术方法。

使用的地球物理方法在不同阶段所需费用可以这样估算（到撰写本文时为止）：第一阶段，只使用磁测：25—50法郎/公里^2；每二阶段，电磁法（因普特）测量：300—500法郎/公里，即为磁测费用的10倍，但面积却只占磁测的$\frac{1}{10}$。地面物探每平方公里的费用是因普特方法的10—100倍，但面积却小100倍。从这些费用估算可以看出，物探费用应包括前三个勘探阶段的所有费用，这一点应当预先估计到。

刘晶源译自《Colloque de geophysique miniére》1973年 p.15-28

芮仲清校，向源富审

在沙特阿拉伯的贾巴尔·萨伊德地区进行多孔充电法勘探

摘要：为了查清沙特阿拉伯的贾巴尔·萨伊德地区已知矿体的延伸情况，在穿过矿体的三个钻孔中用充电法进行勘探。

第一个钻孔是打在主矿体上，充电法测量结果发现了走向北东和北西的两个导电带；第二个钻孔是在主矿体北北东向600米处，结果表明，可能存在一个走向北东—南西、产状陡倾的导体；第三个钻孔是在主矿体以东400米处，结果发现矿体向北北东方向延伸。

用多个孔同时作充电法测量结果共查明了5个导电带，所用弗用比单孔充电法稍高一些。

引　言

沙特阿拉伯王国石油和资源部从1965年起开始了一项大型研究计划，包括领导和管理与私人公司，如阿加斯（Argas）地面地球物理公司，签订的专项合同工程。

计划开始后，就发现了好几个大的远景区，取得的成果令人鼓舞。

本文拟扼要地回顾发现贾巴尔·萨伊德铜矿床的过程以及地球物理勘探在其中所起的不可忽视的作用，并评价地面地球物理勘探所取得的新成果。这些成果是为了查明主矿体延伸部分而在好几个钻孔中同时使用充电法获得的。

矿床位置及其一般情况

贾巴尔·萨伊德地段位于吉达北东340公里和迈哈默德·阿德达阿布城以北40公里左右的地方。

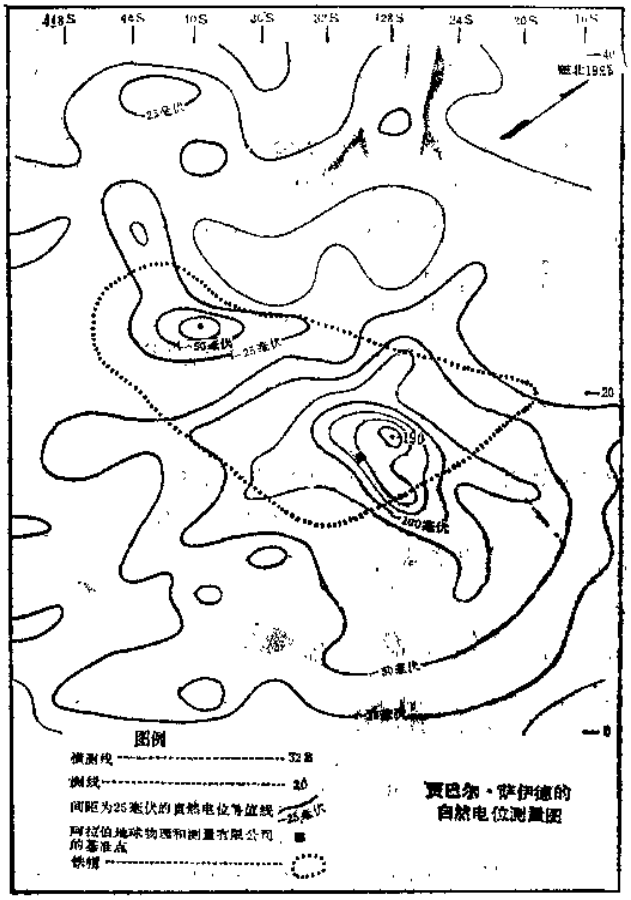


图 1

勘探时在一小山包的顶部发现了一个北东—南西向的含硅质铁帽。用自然电位法（S.P）在铁帽上查明有一个范围很大的异常，走向近似南北，异常值达－190毫伏（见图1）。第一个钻孔在100米深处见到了含黄铁矿、黄铜矿和磁黄铁矿的矿体。后来，为了确定矿体的形状和在附近找其它矿体，又打了另一些钻孔并进行了其它地球物理测量（磁法、土拉姆法、电阻率法和激发极化法）。

充电法看来是圈定矿体延伸的最合适的方法。

充电法的原理

第一个电极放在一个已穿过导电矿体的钻孔里，第二个电极放在离该孔4—5公里的地方。通过供电电极，输入强度稳定的直流电。如果矿石的导电性是属于电子导电，那么导电矿体就具同一电位。这样就可以在地面上沿剖面测量测点上的电位，并圈出等电位曲线。并示出了主矿体A的形状（图2）。人们把在地面上观察到最大电位的地方叫《中心点》。

假设就在附近有另一个矿体存在：

1. 如果两个矿体通过细脉有电性联系，第二个矿体B和第一个矿体A就应有大致一样的电位，那么等电位曲线将把第二个矿体也圈出来。这就会出现另一个《中心点》。这种情况人们称作等电位曲线“相吸”。

2、反之，如果两个矿体没有电性联系，矿体B的电位将是未知数，等电位曲线就会发生特征性畸变（见图2），这种情况人们称作等电位曲线“相斥”。

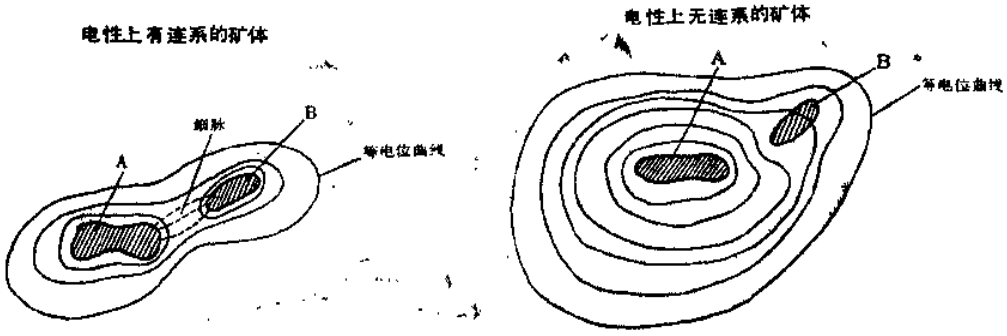


图2.充电法：理论草图

等电位曲线发生畸变或突出的地方就是下一步要进行钻探的目标。

一次布线作三孔测量时，供电电极距都一样，为4.5公里，同一个参考电极。在同一测站上依次向三个钻孔内供电，相应地依次进行三孔测量。照此方式操作，就可以用比单孔测量稍高一点的费用做三孔（或者三孔以上）测量。

在SA_8钻孔中使用充电法（图3）

该孔打在铁帽的南侧，目的是圈出矿体的延伸部分。钻孔在299米—521米间打到了块状矿体，而电极放在345米的深度上。

电位图表明：

——矿体的上部是位于中心点D之下；

——矿体走向大致为北北东—南西西，即沿等电位曲线伸展方向；

——往东南方向，电位梯度变缓，这就证明矿体在这个方向上向下倾伏。

这些推断与过去钻探结果是一致的。

此外，在往北北东方向（A），往西方向（B）和往西南方向（C）上等电位曲线都发生了畸变，说明这三个导电体与主矿体无电性联系。

对该地段还使用了其它地球物理勘探方法：自然电位法、磁法、土拉姆电磁法、激发极化法和电阻率法，其结果都是鼓舞人心的，尤其是在A和B导电带上。

在导电A带上，有一个垂直的勘探钻孔SA_{27}就打在四种异常（自然电位异常、激发极化异常、充电法异常和磁法异常）重迭的地方：在250米处打到了浸染状矿体和一些块状矿夹层（主要是黄铁矿和磁黄铁矿，少量闪锌矿和黄铜矿）。

在自然电位异常、激发极化异常、磁异常和充电法异常同时存在的导电B带上，不久将要打一些勘探孔。

在SA_{27}钻孔中使用充电法（图4）

鉴于SA_{27}井打到了块状硫化矿层，因此，在345米深度上进行了一次充电法测量。

等电位曲线图表明：

——异常中心点的位置与充电点实际上处于同一垂直线上，这就可以推断矿体是近于直立的；

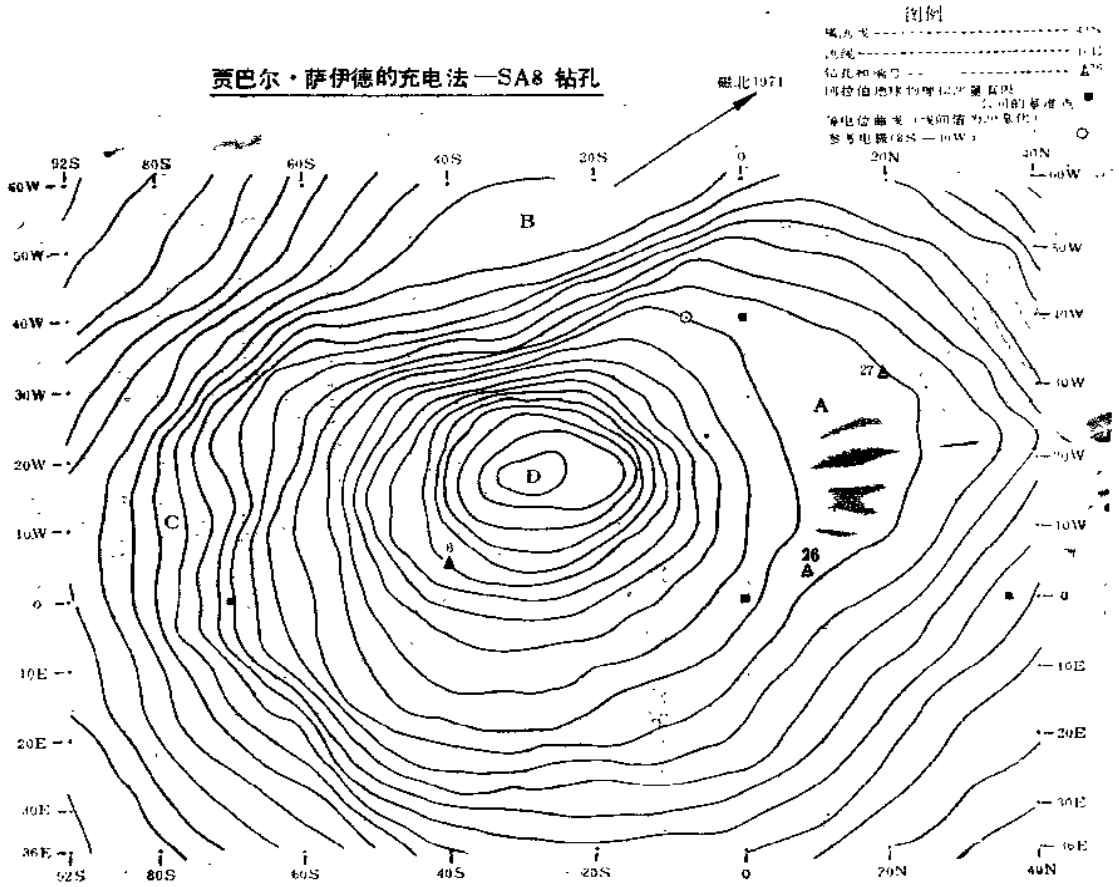


图 3，贾巴尔·萨伊德的充电法——SA8钻孔

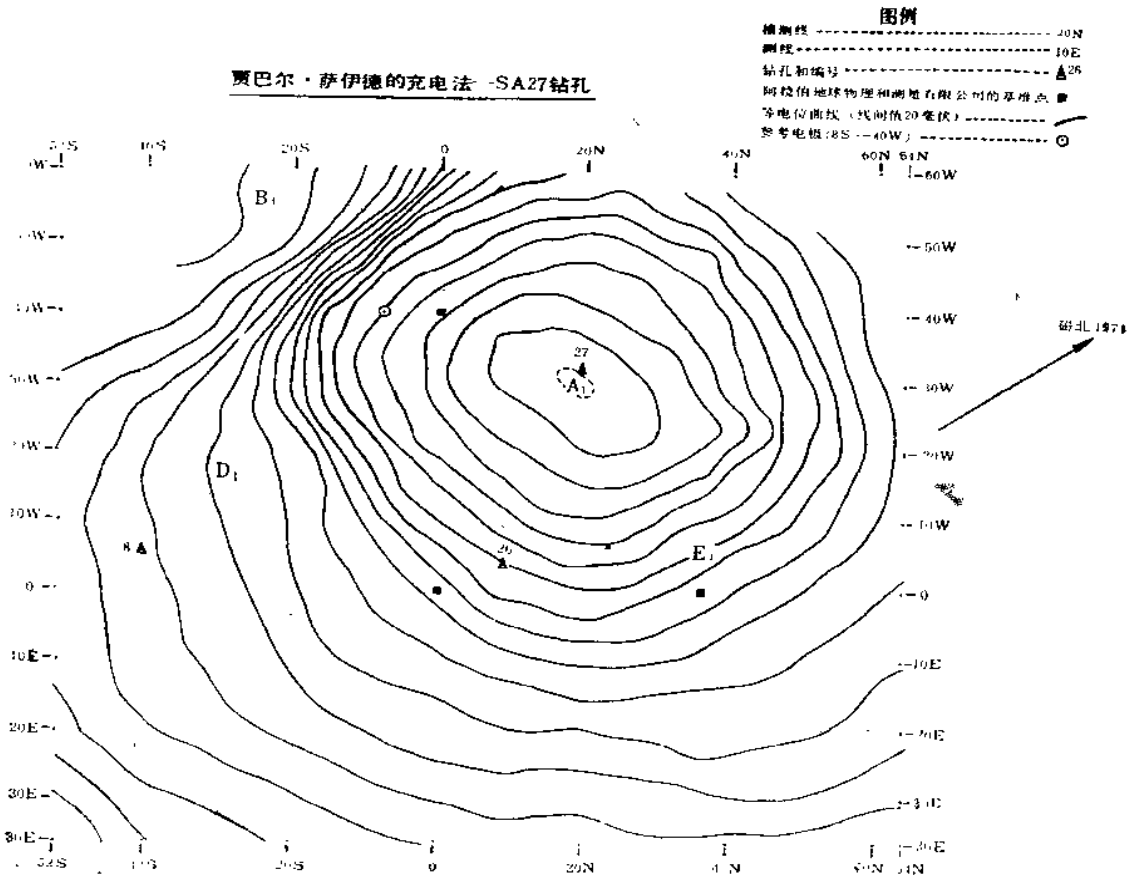


图 4，贾巴尔·萨伊德的充电法——SA_{27}钻孔

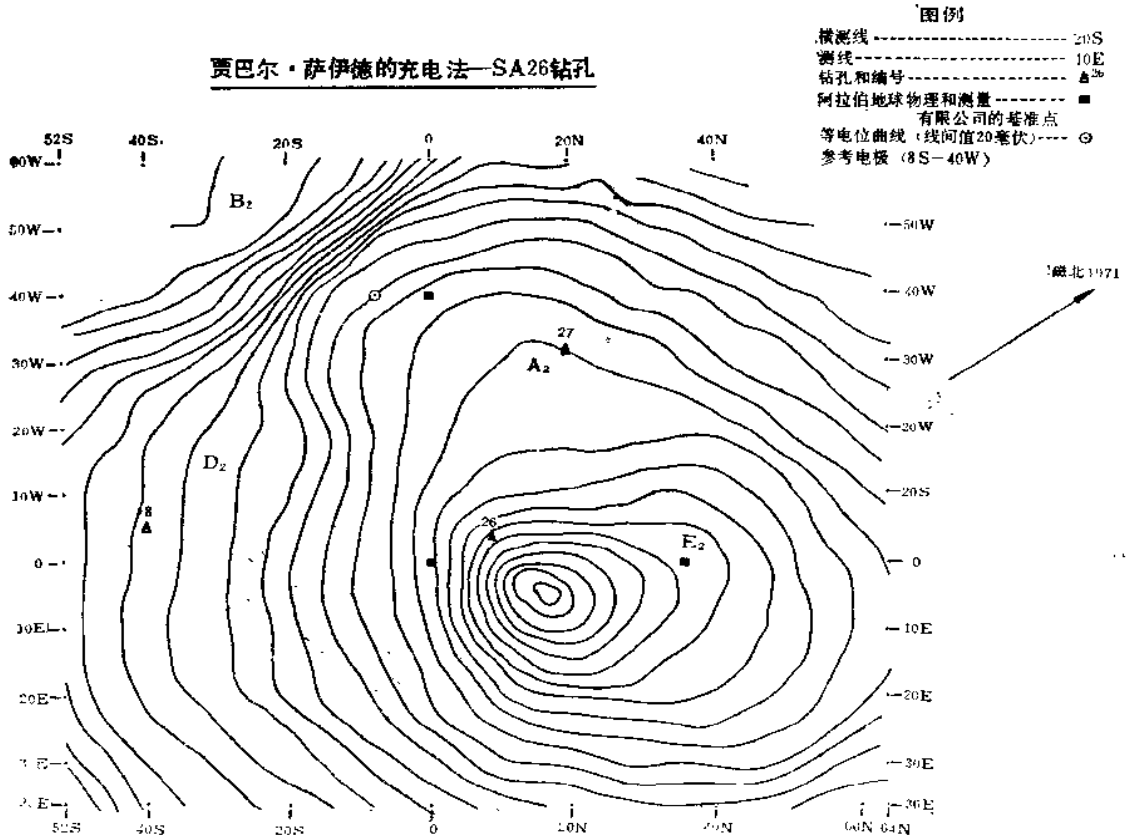


图5贾巴尔·萨伊德的充电法——SA_{26}钻孔

——导电体的走向就是等电位异常的走向，即北东-南西方向；

——等电位曲线的畸变表明存在其它导电体：

① 在西部的B_1，已由前述的测量查明；

② D_1，相当于铁帽下的主矿体；

③ E_1，在封闭的若干条异常等值线上发生微弱的畸变，原因不太清楚。

在SA_{26}钻孔中使用充电法（图5）

打该钻孔的目的是要查明引起自然电位异常的原因，该异常的平均强度与主矿体以东400米处的小铁帽的异常相一致。

在158—187米的深度上，SA_{26}钻孔打到了块状硫化矿（黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿），在187—284米的深度上打到了浸染状黄铜矿；在总共126米的含矿范围内，矿石的平均品位为2.08%。充电电极放在185米的深度上。第二个供电电极和参考电极的位置同前两个钻孔。

等电位曲线图（图6）表明，中心点与电极在地面上的投影相一致；因为电极的放置深度（130米）比前述两次测量的电极放置深度要浅，除了可能是矿化体延伸方向——东北方向之外，从中心点附近开始电位下降都很快。这个导电体E_2在东部谷地是朝已知老矿坑的方向延伸。鉴于等电位曲线畸变微弱，看来导电体规模很小。

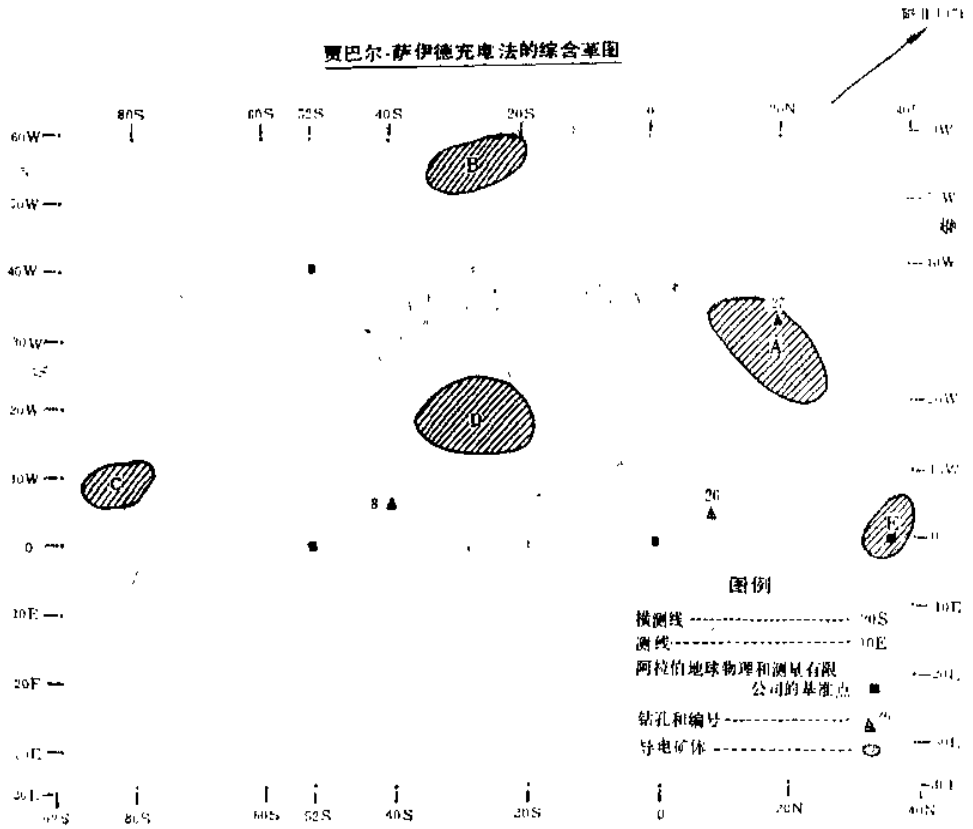


图6，贾巴尔·萨伊德充电法——综合草图

此外，前述几孔测量结果，证实了下列导电带：

A_2：反映的是SA_{27}钻孔中见到的矿体。

B_2：在其它几孔测量中也出现。

D_2：反映的是主矿体。

结　论

综合图概括了这三孔充电法测量所获得的结果。图上标出了5个导电带：

D：铁帽下的主矿体。

A：SA_{27}钻孔打到的矿体。

B.C.E.：需要打钻验证的新目标。

用这三孔测量方法获得的成果显示了这一方法的有效性。

因此，充电法不仅在确定导电矿体的形状，查明矿体的延伸及其扩大规模方面，而且在寻找矿体附近的无电性联系的矿体方面，都是一种很有效的方法。

另一方面，因为钻孔可能打穿紧挨块状矿体边上的次生矿化部分，因此，根据充电法结果能精确地布置下一批钻孔。

刘昌源译自《Colloque de geophysique miniére》1973年 p.101—107

芮仲清校　向源富审

用土拉姆电磁法勘查塞内加尔东部地区

根据联合国矿产研究项目的规定，1970年用土拉姆电磁法查明了塞内加尔东部地区（BAKEL群页岩以及石英岩地区）的一些异常。其中有一处异常至少反映的是一由含矿（黄铜矿—闪锌矿）石英脉充填的断裂，断裂延伸相当大，打钻结果也得到证实。试验了电阻率法测量，结果表明，该断裂也可用电阻率法查明。不过，在这个地区和这样的特殊情况下，电磁异常的范围更大些。另外，野外测得的结果表明，电磁法的效果要比电阻率法好。

图1表示方法的操作原理。

图2表示电磁异常和断裂带的对应关系。

图3（地球物理总公司的理论计算）表示倾斜对异常形状的影响。

图4是反映主要异常（A）连续性的电磁平剖图，次要异常（B）在图上都同样可以见到。

图5是电磁异常与用电阻率剖面测得的异常进行的对比。

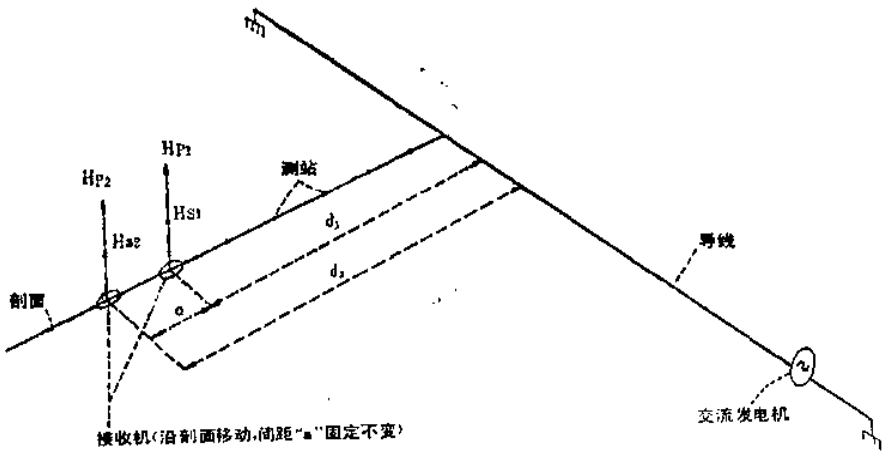


图 1　土拉姆电磁法的测量原理图

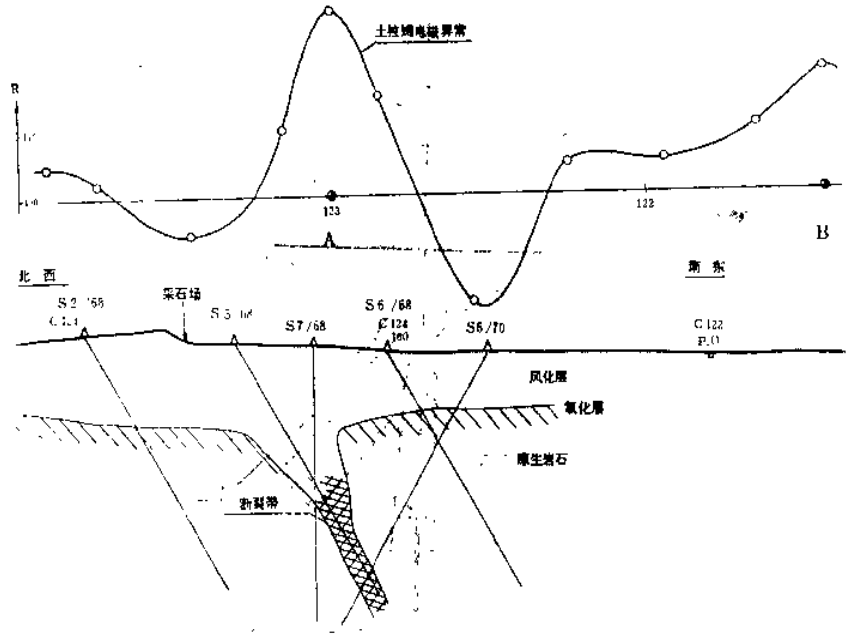
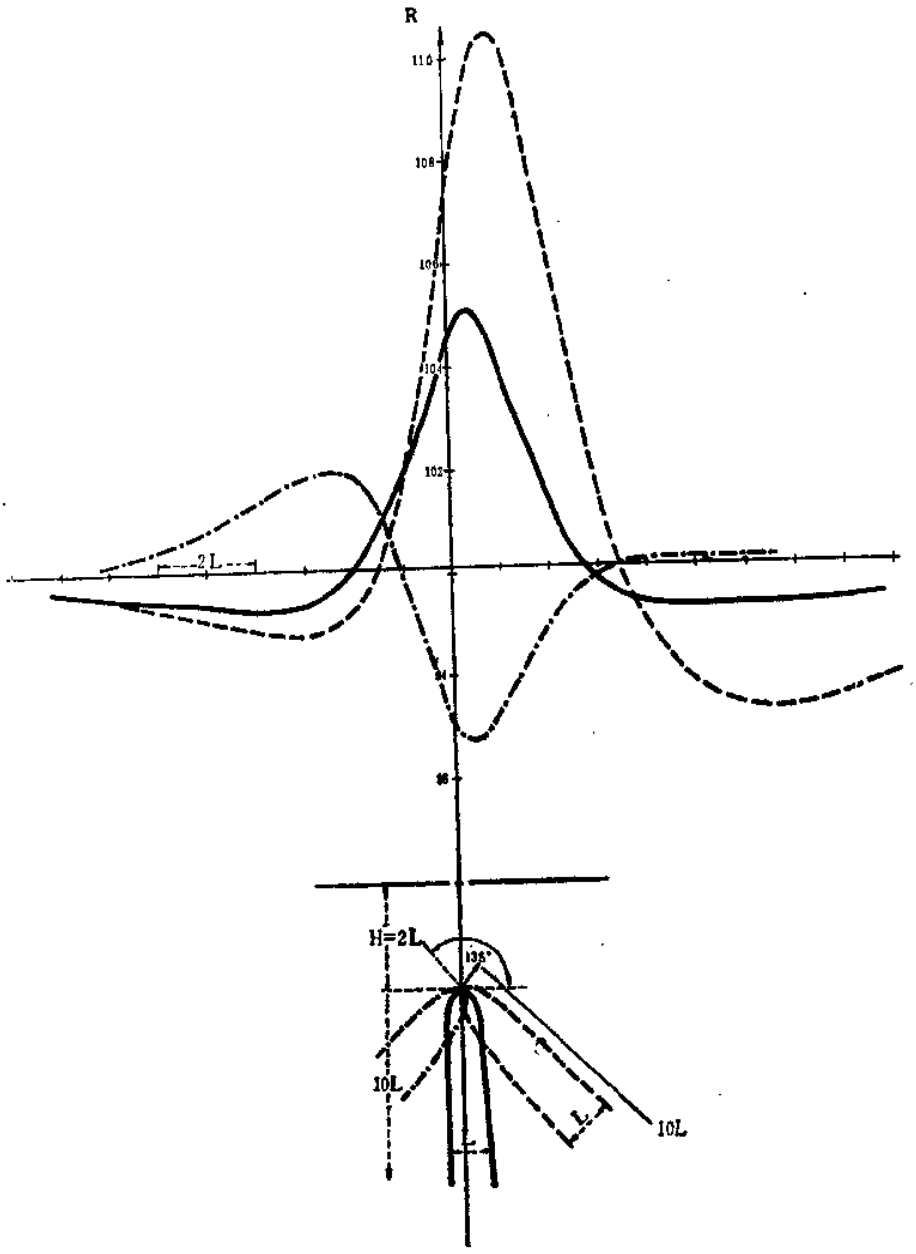


图 2　C剖面



三、土拉姆曲线图。发射导线的位置和斜度对异常的影响

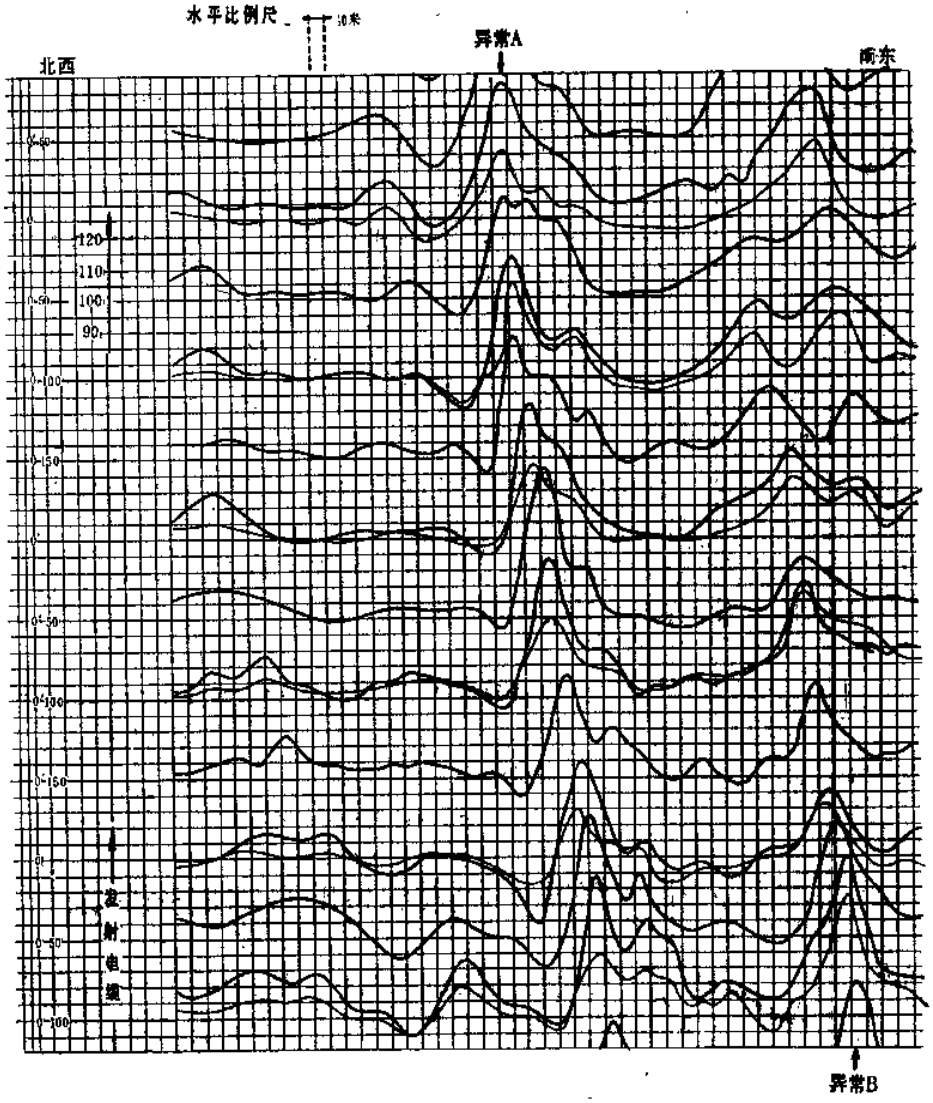


图 4　中心带的简要剖面图

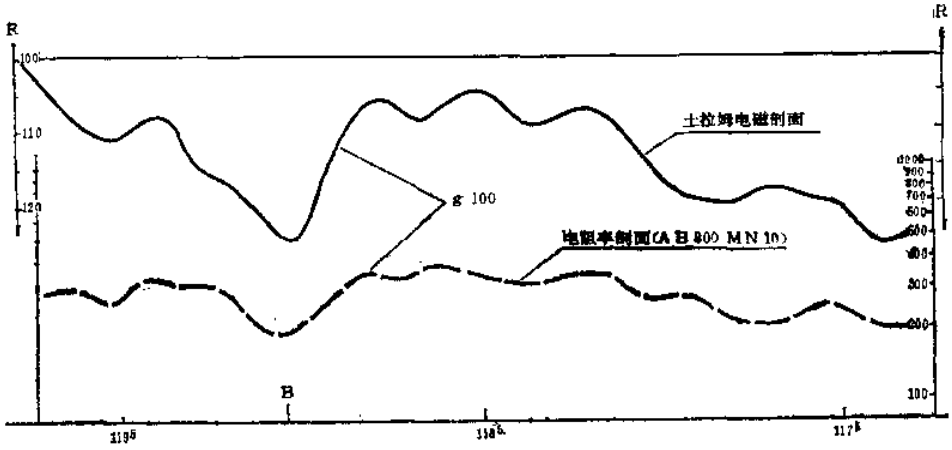


图 5 .土拉姆电磁异常与电阻率异常对比图.

讨　论

伊佛拉德先生：你们用了自然电位法吗？

维兰先生：在该地区试用的自然电位法没有取得结果，其原因可能是潜水面的深度以及矿化不密集而造成的。另外，土拉姆擅长发现断裂。

曼克先生：关于土拉姆法的使用还有一点要说明的：在干旱地区，比如沙特阿拉伯，我们用土拉姆法填制断裂结构图，其判别率高，速度快，耗资少。

刘昌源译自《Colloque de géophysique minière》
（作者：丁维兰）1973年 p47—52
芮仲清校

对贝玛内维卡铬铁矿矿床进行的重力勘探试验

1966年，对马达加斯加安特里阿莫纳地区的贝玛内维卡铬铁矿进行了一次重力勘探试验。试验结果是鼓舞人心的。因此，1968年就对推断的该矿延伸带进行了重力勘探。

在查明的异常部位打了一个钻孔，但未见矿。在对钻孔岩芯样品进行密度测定时发现，钻孔打到的是密度为3.2—3.4的超基性岩，可是在地面上却见不到。

1969年，法国地球物理总公司又在贝玛内维卡和安卡卓多拉这两个已知矿床之间进行了第三次重力勘探。目前，正在一些值得注意的异常部位打勘探钻。

几次重力勘探结表果明，象在马达加斯加这样没有地表标志的特殊情况下直接找铬铁矿是很困难的。这些困难是：

——很难精确计算地形校正；

——不了解地表风化层的厚度变化；

——深部的、特别是由深部地层的极不均匀性所引起的密度变化不清楚。

1. 从贝玛内维卡地形图上可以看出，地形起伏不平，有许多“冲沟”。这些“冲沟”壁近乎直立，在山腰呈疏密不等的手指状。对这种地形进行校正是很难计算的。这需要进行精确的地形测量，但往往难于做到。在这些“冲沟”边上，地形校正值可达3毫伽。我们发现，矿床引起的正异常达到1.2毫伽。

2. 风化层厚度的变化是一个未知数。经钻探得知，此厚度可从0很快变到40米。例如初步计算表明，一个未风化的、密度为3.0的岩体，位于一个密度为2.2的介质环境中，岩体的面积大小为边长17米，埋深35米，顶部离地面5米，密度差就达0.8。这样的岩体引起的异常为0.2毫伽。

3. 由地下介质的极不均匀性所引起的深部密度变化是一个很重要的未知数。密度变化很大，实际上，密度可从2.7变到3.3，甚至3.5。例如，对很多未受风化的岩体样品进行的密度测定结果是：铬铁矿为4.1，底板岩石为3.3，顶板岩石为2.9。平红土的密度为1.8。

因此可以看出，在片麻岩介质环境中，超基性岩矿床和在基性岩中的铬铁矿矿床一样，都能显示正异常，因为在这两种情况下密度差都是0.8。

简言之，重力勘探是成功的。矿床所反映的异常是明显的。但似乎这是处于有利的条件下得到的。后来的勘探，都验证了这些正异常。可是在这些异常部位打钻结果表明，异常都是由超基性岩中的矿体引起的。

应当指出，后来进行的这些重力勘探是在没有地面标志的情况下进行的。

总之，尽管马达加斯加的条件特殊，但如果只限于寻找由密度大的岩石引起的正异常，重力勘探法仍不失为一个有效的方法。特别是，在有地表标志的情况下用重力勘探指导找矿是一种很经济的勘探手段。

例如可以举出伊·克林所研究的新喀里多尼亚铬铁矿矿床的例子。通过这一研究，同时借助于有利的地质条件，主要是围岩具有的良好的均质性，查明了一个小型铬铁矿矿床。

刘昌源译自《Colloque de géophysique minière》1973年 p.147

芮仲清校

用电磁法勘查象牙海岸金伯利岩侵入体

在象牙海岸共和国的塞格拉（Séguéla）北部发现金伯利岩岩墙之后，象牙海岸矿业开发公司力图选择一种合适的技术方法勘探这些金伯利岩岩体。

磁法测量不奏效，就决定使用电磁法。

选用土拉姆法。实际上，岩墙的风化厚度大而且导电，足以形成电磁异常。

系统的测量试验结果表明这种方法是有效的，用此方法发现了近4.5公里长的一系列金伯利岩岩墙。但这并不是说每个岩墙都引起一个电磁异常。另外，常常很难确定岩墙的倾向和精确查明岩墙顶部的位置。因此必须用一系列视电阻率剖面测量来精确检查电磁异常，这

料才能了解岩墙顶部的位置，精度可达10—15米。

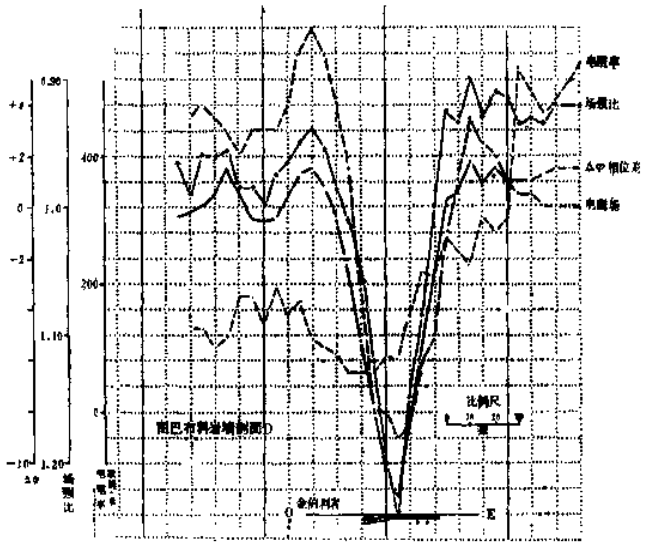


图 1　已知岩脉的电磁异常和电阻率异常

由一名工程师、一名组长和一名操作人员组成的物探小组每月可作详查面积约 6 平方公里，这就大大减少了槽探工作量。

在已知岩脉右侧观测到的电磁异常和电阻率异常均标在图 1 上。图 2 是两条电磁剖面所推断的岩墙位置，已被物探工作后用槽探揭露见到的情况所证实。

讨　论

曼克先生：最近在南非作的一次航空因普特电磁法和磁法测量结果表明，在飞过的10个《岩筒》上，其中 8 个反映有微弱的电磁和磁异常。而用红外摄影方法没有取得任何结果。

维兰先生：是否能区分出非金伯利岩岩墙和金伯利岩岩墙呢？人们有可能通过蚀变深度的研究和电阻率详查解决这一问题。

戴·玛涅先生：在象牙海岸，围岩是什么？

维兰先生：是有伟晶岩脉穿插的非均质花岗岩。

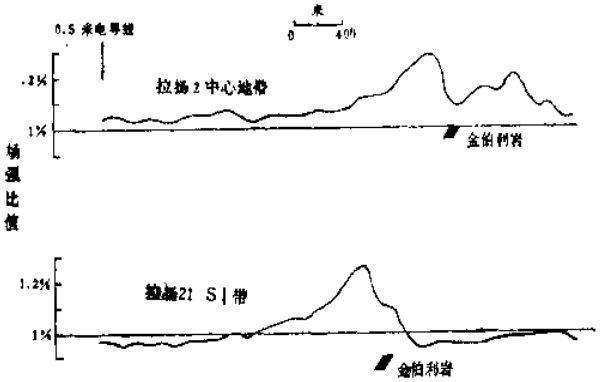


图 2　通过电磁剖面推断岩墙位置

戴·玛涅先生：有这样一种情况，在世界上工业金刚石产量最大的巴克旺加岩墙上，并不是金伯利岩的导电性产生电异常，而是金伯利岩上方的含水层产生的电异常，该含水层并不在围岩灰岩里。在这种情况下，所有的电阻率法都能圈出金伯利岩体。

维兰先生：这说明，在所有的地球物理勘探方法中，都要求地球物理工作者和地质工作者进行密切合作。应当利用勘探地区的那些很少重复出现的特殊情况。

刘鼎源译自《Colloque de géophysique minière》1973年，P. 53—55

芮仲谦校

用激发极化法找锰矿的实例

概　　况

这里介绍的是1969年在摩洛哥塔乌拉（Taoura）地区用激发极化法找锰矿的实例。本实例的意义就在于通常激发极化法很少用于找锰矿。

选择的勘探区位于前寒武纪火山岩系中，岩系由流纹岩、安山岩、凝灰岩和火山碎屑岩构成，并穿插有粗玄岩岩墙。

有好几条产状陡立的透镜状小岩脉，成分是安山角砾岩。在重晶石、石英和白云石的脉石胶结物中含锰：软锰矿、隐钾锰矿（Cryptomelane），特别是褐锰矿。

勘探时探区中心部位的岩脉正在开采，往南，矿坑或平巷开采均已停止。

地球物理勘探结果

电极距AB＝1000米，MN＝20米，布在横跨正开采的矿床中心部位上，同时进行视电阻率和视极化率 P_i^s 测量（激发时间 T＝8秒，断电后 t＝1秒）采样。

激发极化测量结果（图1）清楚地表明，在极化率不超过1％的背景值上，矿床中心部位有一非常好的大于2％的异常，毫无疑问与它对应的就是已知矿床，往勘探区南部，其它

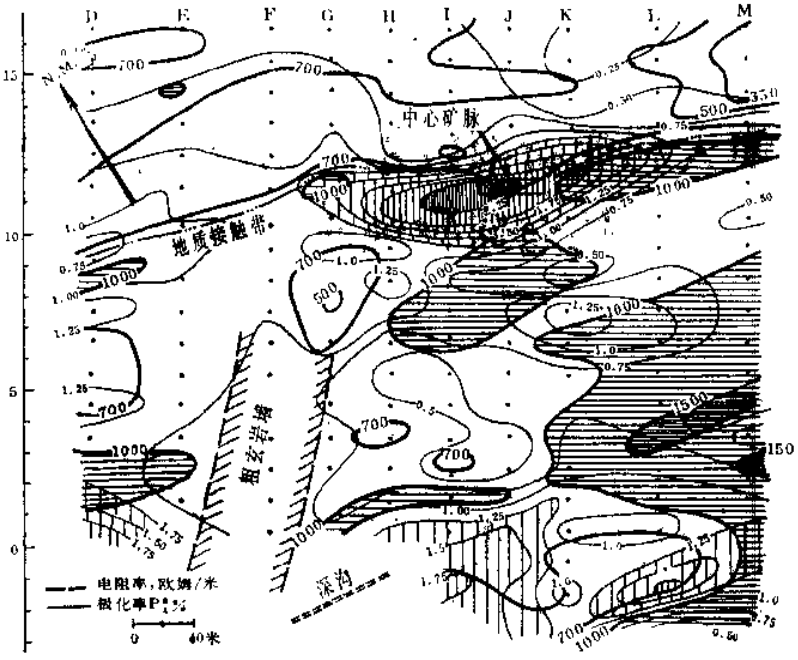


图 1　物探异常图

激发极化异常则与老矿坑有关。

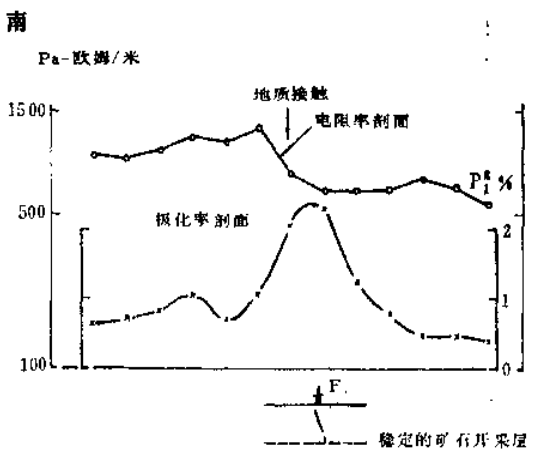


图 2 中心矿脉，J 剖面图

相反，电阻率图没有提供任何有关锰矿的信息；但它指出该地区存在一个地质接触关系或一个断层带，其轴通过矿床中心部位。

在所附 J 剖面线的剖面图上，可见到中心矿脉垂直走向方向上的极化率和电阻率变化（见图 2）。

结　论

尽管所研究的矿床规模不大，但通过激发极化法还是能很好地圈定。相反，电阻率法却一无所获。这就说明了为什么以往使用电阻率法勘探这类矿床时，除了很大的含矿透镜体之外大都是失败的。同样，电磁法的效果也很不理想。

刘昌源摘译自《Colloque de gèophysique minière》，1973年，P. 39

芮仲清校

澳大利亚新南威尔士州伍德劳矿体的地球物理研究实例

一、概　况

1. 伍德劳矿体

伍德劳矿体位于澳大利亚新南威尔士州东南部，南纬35°04′，东径149°34′（图1）。第一阶段探明一个多金属块状硫化物矿体和毗邻的一个以铜为主的矿带。由630万吨的铜、铅、锌矿石（铜含量为1.7%，铅—5.5%，锌—14.4%）组成的块状硫化物矿体是地球物理勘探的主要目标。铜矿带的矿产储量约为370万吨，其中铜、铅和锌的平均含量分别为1.9%、0.1%和0.5%，赋存于许多沿走向分布的富矿体中，有的在块状硫化物之外，有的在其下面。后来的钻探又揭示出几个隐伏的块状硫化物矿体，它们与第一个发现的矿体不相连。但是

这些矿体的埋深超过200米以上，而地球物理勘探达不到这一深度。

块状硫化矿体的顶部接近地表，从矿体顶板到地面依次被表生硫化物薄层、5～15米厚的含铁粘土铁帽层和几米厚的崩塌物及土壤覆盖。块状硫化物矿体的几何形状复杂，南部的走向为030°(磁北)，向西倾斜约40°，北部的走向为305°（磁北），产状接近垂直。在南北部分之间的铰合带中，深部矿体呈扁平状。矿体的平均厚度约为25米，约含75%的硫化物，主要矿物以丰度递减次序排列有黄铁矿、闪锌矿、方铅矿和黄铜矿；主要脉石矿物有石英、火山碎屑、绿泥石和滑石等。块状硫化物最显著的特点是颗粒细，在大部分矿体中呈规则条带状。近地表的铜矿石由产在绿泥石和硅质火山岩中的黄铁矿和黄铜矿细脉和小透镜体构成。

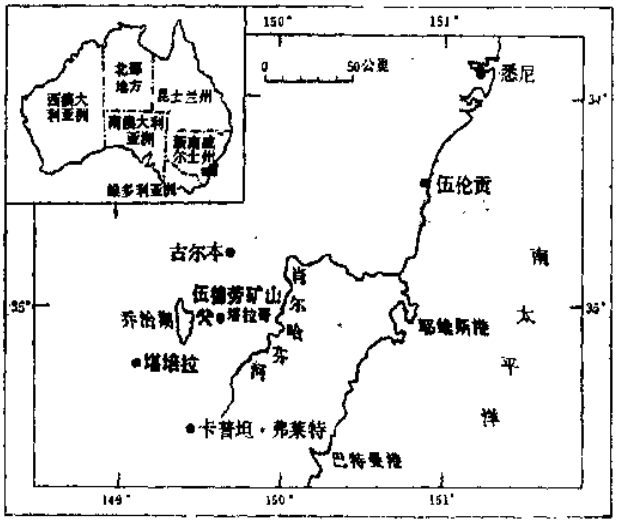


图 1 矿区位置图

矿化的围岩有长石质凝灰岩、碎屑岩和熔岩流以及火山衍生沉积物、页岩、燧石、局部有绿泥石。在块状硫化物矿体的上部和下部，岩层中有拉班玄武岩的次生粒玄岩床侵入。

伍德劳的试验测网

在伍德劳勘探的初期，乔杜戴克斯（Jododex）公司利用现成的近南北向防野兔的分界栅栏作为基线。为了方便起见，局部测网的座标原点就选在该栅栏的北头，该测网用于进行地球化学取样和普查性电阻率和激发极化测量。

鉴于伍德劳地区勘探工作的扩大，原点向测网北部和东部各移动1万英尺，这样有意义的地区就位于西南象限了。因为用作原始基线的栅栏是一个接地良好的金属栅栏，极大地干扰电法测量，所以后来被拆除了。

当建立伍德劳试验测网时，也在使用另一个测网。该测网原本是在经过大量地球物理工作之后圈出的最大地球物理响应区上，由乔杜戴克斯公司作为梯度排列测网2建立起来的。后来决定在伍德劳进行的大多数地球物理研究工作都利用这一测网。该试验测网包括东西向的21条线，线距为100英尺（30.5米），从北到南用A到U的字母标注。每一条线的测点距也为100英尺，用1至20的数字从东向西标注。

伍德劳的试验测网建成后，澳大利亚又采用米制建起伍德劳的米制测网。原始米制测网位于原始第二英制测网以西1万3千米和以南1万3千米处，后来发现有意义的地区位于测网的东北象限。

伍德劳矿体的物理特征

表1概括了伍德劳矿体的物理特性，电阻率、激发极化参数（百分频率响应）、密度和地震速度都有很重要的意义。

与围岩差异最大的是电阻率。这是许多块状硫化物矿体中的一个典型，在这种矿床的勘探中广泛地使用了电法和电磁法。总的来说，还不能从岩芯取样和钻孔测量中确定出块状硫化物矿体有意义的百分频率效应值。用计算机模拟激发极化的结果得出的块状矿体的值约为5%，该值比有些围岩的百分频率效应明显地高，而比另一些围岩的百分频率效应低。

在地震折射法测量中，在块状硫化物矿体上部测得的纵波速度比在围岩上的速度要低得多。

矿体的磁化率实际为零，可是与围岩相比又是变化的，因为在伍德劳地区的某些类型的岩石上获得了明显的磁异常。

伍德劳块状硫化物矿体的主要岩石物理学特征 **表1**

物理特征	数值	与围岩差异
电阻率	0.1欧姆·米	1:1,000—1:10,000
百分频率效应	～5%	变量
密度	3,900公斤/米^3	>1000公斤/米^3
地震速度	～1400米/秒	1:3
磁化率	○	变量

伍德劳矿体的地球物理响应特征

表2是对伍德劳矿体地球物理响应的分类。

对于每种特定的方法来说，与背景相比，响应的大小可分为弱的、中等的或强的以及介于这些之间的。伍德劳矿体上没有出现航空和地面磁异常。

该矿体的地球物理响应进一步还能分成简单的、复杂的和中等程度的。伍德劳矿体的复杂的响应一般或是由于靠近其他响应源，或与矿体本身复杂的几何形状有关。

从表2可以看出，采用航空电磁法中最新的直升飞机数字电磁系统（Dighem Ⅱ）使响应得到改善，这主要是由于使用多种几何形状的线圈，也可能因为这种测量是在露天矿坑上进行的。用先得利直升飞机电磁系统（HEM701）和因普特系统得到了复杂的响应，这是因为矿体的几何形状复杂和倾斜之故。伍德劳地区周围地形不规则，矿体沿走向短，电磁源多，对使用这些方法也造成一定的困难。

在伍德劳使用了各种不同的地面电磁法，得出了中等复杂程度但很强的响应，这说明该矿体是地面电磁法极好的勘探目标，因为块状矿体埋深小，导电率高（表1）。而声频磁场法（其设备有问题）和旁线倾角法是例外，倾角法应用范围十分有限，在澳大利亚的条件下这种方法的失败是不意外的。

大回线和较新的脉冲瞬变电磁法似乎没有比其他方法显示出什么特别的优越性，例如与斯陵格兰姆法相比就是这样，这可能是由于矿体埋深小和导电性高之故，因此，用所有的地面电磁法都能在矿体顶部测出强大的响应。用先进科学技术装备的纽蒙特脉冲电磁系统（PEM）和西罗泰姆（SIROTEM）系统能进行长延迟时间的测量，对某些深的勘探目标来说这两种方法比其他方法都优越。

伍德劳矿体的地球物理响应特征　　表 2

地球物理方法	地球物理响应特征				
	弱	中等	强	简单	复杂
航空：					
磁法			无异常		
直升飞机磁法(先得利701)	———				———
因普特	——	———			———
直升飞机数字电磁法(Dighem Ⅱ)		——	———	———	——
地面：					
电磁法（连续波）					
甚低频(乔尼克斯的 EM16)			———	———	——
声频磁场法（麦克发尔）		———		———	——
声频磁大地电流（乔特朗尼克斯）			———	———	——
倾角法（麦尔发尔的垂直、水平电磁法）：					
旁线观测	———		———	———	——
固定发射机			———	———	——
水平线圈电磁法 (ABEM)					
土拉姆 (ABEM)：					
大回线			———	———	——
小回线			———	———	——
电磁法（脉冲瞬变）					
克龙公司的脉冲电磁法(PEM)			———	———	——
纽蒙特脉冲电磁(PEM)			———	———	——
MPPOI			———	———	——
西罗泰姆 (SIROTEM)			———	———	——
电法					
自然电位			———	———	
电阻率			———	———	
激发极化		———			———
磁激发极化	——	———			———
位场法					
磁法			无异常		
重力				———	
地震折射法		———			———
井中方法			———	———	
自然电位			———		
γ 射线		———	——	———	
电磁（先得利DHP-4）	———				———
电阻率			———	———	
充电法			———	———	

电法中，自然电位和电阻率的响应强而简单，它准确地圈出块状矿体的浅层部分。激发极化和磁激发极化法的响应复杂，这是断层下盘的含黄铁矿黑色页岩附近有可极化的和电阻

性的源所造成的。计算机模拟表明，矿体激发极化响应的幅值为中等大小，肯定不会比可极化的断层下盘岩石的响应值更高。

重力法的响应简单，幅度中等，尽管出现了强的区域梯度场，它也能用于确定矿体的准确位置。

地震折射法的响应强，矿体上部出现了一个地震低速带。该响应复杂，这是由矿体边缘地震波衍射引起的。

井中的自然电位、电阻率和充电法的响应强而简单，这再一次反应出块状硫化物矿体的高导电率和电性上的连续性。

自然γ射线测井得出由中等到强的响应，块状硫化物具有低的放射性。但这种响应受到硫化物内部特征的影响而复杂化，特别是靠近硫化物的上部边缘。其上部边缘的特征使该响应复杂化。

先得利 DHP-4 井下电磁系统，得出了弱而复杂的响应，在该处这种系统不是很有用的。

2. 黑 色 页 岩

在伍德劳附近出现的几个黑色页岩带，其自然电位和电率阻响应与块状硫化矿体相类似。其走向长约为3公里，平均宽度为40米，通常与砂岩、页岩及少量凝灰岩互层。它在电阻率法、自然电位法与许多电磁法中呈现强响应，但其响应较简单，因为该黑色页岩与伍德劳矿体相比几何形状简单、且宽度较大。

黑色页岩在自然电位、电阻率法和一系列电磁法中都产生强的响应，这反映它是良导体。

为了区分黑色页岩，综合应用电磁法（它能产生弱的简单响应，如斯陵格兰姆法、土拉姆法、西罗泰姆法）、重力法、可能还有地震折射法看来是最合适的。

二、区域和局部地质、地球物理环境

本区区域布格重力异常的走向总的来说与控制矿化总体分布的褶皱带主要构造单元有关。

详细观察卡普坦斯·弗莱特—高尔本（Captains Flat—Goulburn）复向斜带南部的区域重力和航磁数据，可以明显地看出，重力高与主要的火山成因的硫化物矿床有关。

在伍德劳—卡普坦斯·弗莱特地区，复杂的航磁异常往往与基性火成物质有关。伍德劳和卡普坦斯·弗莱特矿床都出现在靠近狭窄磁力高的平缓磁力低上，而其两侧都与大的磁力高相邻。

主要产在背斜带上的许多花岗岩体，由于含有磁铁矿，显示出有意义的磁性特征，特别是在靠近这些岩体与沉积岩和火山岩接触带的地方更是如此。

1．拉克兰褶皱带的布格重力图

拉克兰褶皱带的布格重力数据是在澳大利亚重力普查工作中得到的，测点平均间距为11公里，等值线的间隔为5毫伽。

图2、图1是同一个地区，示出东拉克兰褶皱带的布格异常图，所讨论的矿床也示在图2中。

该地区的重力异常走向大致为北和北西向。此外，重力图形一般是复杂的，反映出拉克兰褶皱带的横向密度变化大而快。

施伯内尔曾对该地区的构造单元做过论述（1973、1974），拉克兰褶皱带东南部是由大的复向斜和复背斜带组成。许多南北向构造单元相对于踏勘性重力测量的点距而言较窄，结果，将其与重力异常作详细对比是困难的。

在北部，层状矿化出现在希尔恩德（Hill End）复向斜带上，该带的南部和西部边缘层状矿化程度最高。在该复向斜带中，区域重力模式以与巴苏斯特花岗岩岩基相关的宽大重力低为主。可能与岩基根部有关的－50毫伽闭合圈恰好出现在巴苏斯特城的西部。该异常从巴苏斯特向北延伸，看来与拉克兰褶皱带北部边缘附近较小的园形重力低有关（图2.B、C）。在巴苏斯特南面，异常突然转而向东，横切其他大的构造单元并可能沿着拉克兰河线性体延伸。

在巴苏斯特花岗岩西侧，陡的重力梯度可能与该地区作为希尔恩德复向斜带和莫隆—南部海岸复背斜带界线的科泊哈尼逆断层有关。布勒伽山块状硫化物矿床就位于这一重力梯度带上。该火山成因层状矿床的储量超过85万吨，但综合考虑吨位与品位，这是一个经济价值低的矿床。

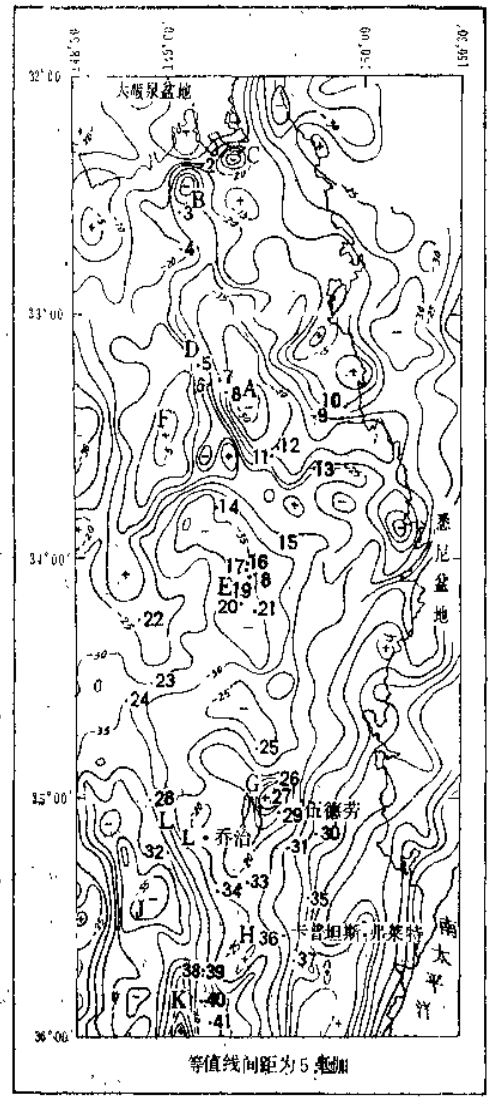


图2 东拉克兰褶皱带的布格重力图

在希尔恩德复向斜的南部，皮鲁德矿床组出现在宽的走向南北的重力低上（图2.E）。

莫隆和洛克里复背斜是复合莫隆—南海岸复背斜带的局部单元，出现在希尔恩德复向斜带的东部和西部。在复向斜以东，洛克里复背斜与踏勘性重力测量的点距相比，是比较窄的，但伴有布格重力高出现。

在莫隆—南海岸复背斜带中最引人注目的布格异常是一个走向南北的重力高，其闭合圈为－5毫伽，位于靠近阿苏斯特花岗岩西面的莫隆背斜上，该异常似乎向东面的巴苏斯特花岗岩的南部延伸并穿过希尔恩德复向斜带。

在拉克兰褶皱带东西端上的卡普坦斯·弗莱特—高尔本复向斜带中有两个最大的已知层状火山成因矿床，即卡普坦斯·弗莱特矿床和伍德劳矿床。这个复向斜带的走向从卡普坦斯·弗莱特向北到伍德劳并从伍德劳以一个狭窄的条带向北北东方向延伸。

在卡普坦斯·弗莱特—高尔本复向斜带上，伍德劳西北部有圆形重力高，在卡普坦斯·弗莱特南部有大致北东走向的重力高。在该复向斜带中还有其他闭合重力低，这些估计与巴苏斯特花岗岩有关，产在该带北部边缘附近。

在卡普坦斯·弗莱特复向斜以西和西南面是科拉—亚斯复向斜带，该带的特点是有北北西走向的重力梯度高值带，在科特复背斜地块北端附近有一个复合重力低。

层状、火山成因的矿化出现在本地区南部，一个明显南北向重力高（图2.K）的东部边缘上，该重力高的中心在科拉—亚斯复向斜带的西部边界上。

科拉—亚斯复向斜带的重力等值线具有梯度低的特点。等值线走向一般为北东-北，横跨复向斜带和毗邻的莫隆—南海岸复背斜带。

科拉—亚斯带北部明显南北向的重力梯度带出现在莫隆—南海岸复背斜带中明显向北倾的重力高的东部（图2.F）。在科拉—亚斯复向斜带的北端圈定了一个中心正好在耶克瓦尔城北的圆形重力高。

在东拉克兰褶皱带西南部的科特复背斜单元具有中等幅值的重力梯度。这些重力梯度与大的断层以及估计与基性火成岩侵入体有关，这种侵入体在该单元的西北侧产生复合重力高。

2. 伍德劳—卡普坦斯·弗莱特地区区域地质情况

该地区最古老的岩石属奥陶纪沉积，是富含石英的杂砂岩、页岩、燧石、粉砂岩复理石沉积的一部分，沉积在深海盆地里。这些被形变了和变质了的岩石出露在复背斜带里，并被志留纪和泥盆纪的似花岗岩侵入。中晚志留世的沉积岩和火山岩位于复向斜带中。

最早的志留纪沉积岩，泥岩、粉砂岩和少量石灰岩都沉积在浅陆架上。地壳断裂和下陷引起了酸性火山作用。流纹岩和英安岩岩流、凝灰岩、砾岩、熔结凝灰岩、火山凝灰岩、火山衍生的沉积物和页岩都堆积在细长的深海沟里。在该地区北部接近志留纪末期较深的断裂导致在酸性火山作用之后又出现基性火山作用。枕状构造的熔岩、玄武凝灰岩、燧石和角斑岩都沉积在卡勒旺地区。从晚志留世到早泥盆世，一个厚的富含石英的杂砂岩、板岩和粉砂岩系由于海进而覆盖在火山岩系上，在局部地区其上面出现早泥盆纪陆相砾岩和浅海沉积。早泥盆纪地层的强烈形变，特别是东西向的挤压和花岗岩类岩株侵入到复背斜带的地壳上层，这实际上就完成了该区的克拉通化过程（Cratonisation）。一些火山断裂深海沟被转变成以断层为边界的复向斜，比较窄的一些被完全倒转了，结果两翼都向西倾。志留纪岩系在大区域范围内变质成绿色片岩相，而且明显向西倾斜的轴平面解理尚保留在复向斜带中。由于该区许多地方为壮年地形，所以有大面积的冲积层和崩积层，这些沉积阻碍了古生代岩石

的出露。

矿床

火山成因的层状贱金属矿床产在该区志留纪长英质火山岩中，或者与志留纪长英质火山岩共生。这些矿床中包括伍德劳矿床和卡普坦斯·弗莱特矿床。伍德劳矿床的地质和位置将在后文中论述。

卡普坦斯·弗莱特块状硫化物矿床在上个世纪末发现，到1962年矿采尽以前，已产出400万吨的铅-锌-铜矿和一些金和银。所有这些矿产都是从两个狭长、扁豆状块状硫化物矿体中采出的，这两个矿体产在火山岩褶皱的一个倒转的翼部，在其中剪切作用和围岩蚀变作用最强烈。

在卡拉旺的火山成因、似层状贱金属矿化与基性火山岩共生。在十九世纪九十年代和本世纪早期曾断断续续地开采过两个小的透镜状矿体，由条带状的块状硫化物构成，包括黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿及方铅矿。看来矿与枕状熔岩、基性岩流和凝灰岩及某些粗玄岩侵入岩岩系中的绿泥石基性凝灰岩带有关。

布格重力

在卡普坦斯·弗莱特复向斜带这一部分中，布格重力场特征相当复杂（图3）。特别引人注意的是卡普坦斯·弗莱特和伍德劳的火山成因矿床与区域布格重力高明显有关。正如图3所示，卡普坦斯·弗莱特矿床位于一个狭窄的重力高之内(－20毫伽闭合圈)，其走向是北东—南西方向。

伍德劳矿床位于一个明显的圆形重力高的东南边缘上。该异常的幅值约为29毫伽，异常中心在伍德劳矿体北北西约10公里处，该异常同时还有一些低幅度重力高值带，其走向分别为北西和南西方向。

沿穿过这个圆形异常中心的两个正交剖面用斯基尔斯（Skeels）方法* 对深度进行了解释。假设异常源是一个物质密度较大的垂直圆柱体。还假设密度差为300和400公斤/米^3，以便给出解释密度的范围。

斯基尔斯法得出的顶部最大埋深在1.8和2.4公里之间，直径约为8公里。因为在重力高附近广泛出露基性侵入岩，所以异常源可以被看作是有一定大小的浅层基性火成岩岩颈。

该异常位于卡拉旺地区，这里基性火山岩的出现说明曾发生过最深的地壳断裂。该重力异常与东西向交错褶皱轴同南北走向复背斜轴的交点是相吻合的。这使得卡普坦斯·弗莱特—高尔本复向斜带两个平行

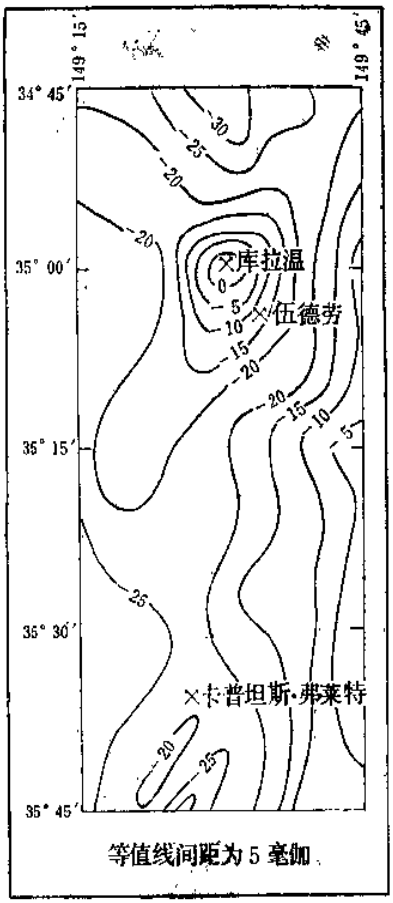


图3 伍德劳—卡普坦斯·弗莱特地区的布格重力图

* 斯基尔斯方法即1963月D. C. Skeels提出的“重力解释中最大深度问题的一种近似解”。发表在“Geopysics” 28, 5, Oct. p724—735——译者注

翼在该区接合。该复向斜带在该区的走向是有变化的，其走向在重力异常以南是由北西向北、而在重力异常以北为北北东方向。

圆形重力异常可能处于一个铰合带中，在这里，基性侵入体出现在大地壳断裂的交点上，从而控制着基性火山作用。

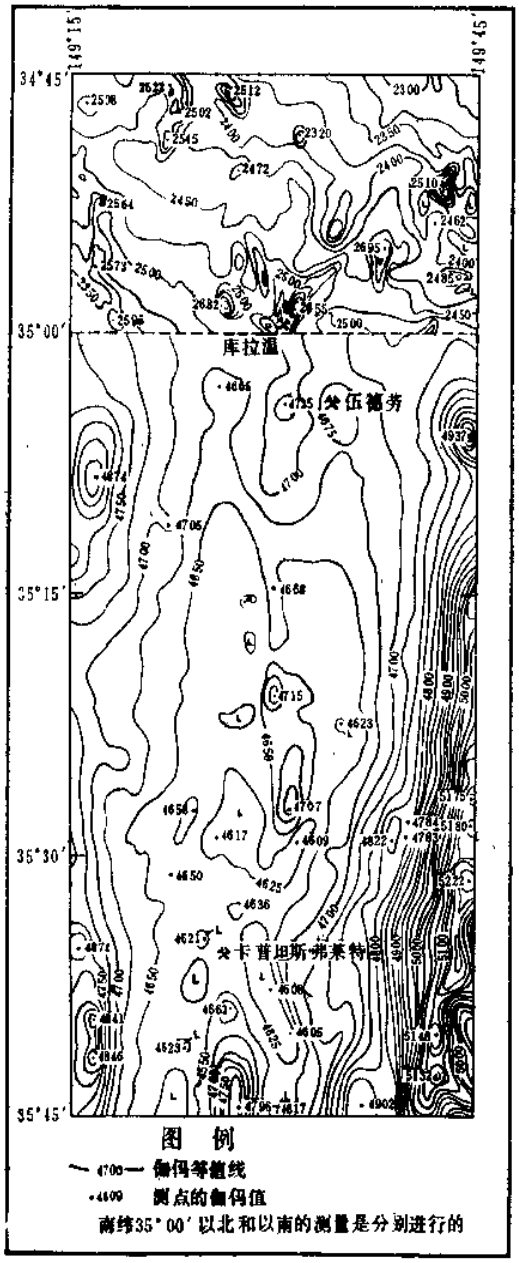


图 4 伍德劳—卡普坦斯·弗莱特地区航磁等值线图

在伍德劳的重力详查中，由于该重力高的影响而形成复杂的重力梯度，其数值向西北方向逐渐增加。

航空磁测

高尔本和堪培拉图幅的区域航磁测量是由矿产资源局作的。沿大致东西方向的测线飞行，测线间距为1.5到1.6公里，飞行高度为150米。

图4示出伍德劳—卡普坦斯·弗莱特地区根据间距25伽玛(nT)的等值线数据得出的简化航磁图。如前所述，该区的航磁数据能反映出主要构造单元的走向，根据航磁资料，这里总的走向也是南北走向。该地区中心地带的磁场值一般较低，而与该区东部、东南和南部的花岗岩有关的磁异常很明显。南部的磁异常出现在萨顿、延德里和乌里亚勒花岗岩上和杰兰格花岗杂岩体上。非常大的磁异常位于本区东南侧矿化程度高的布莱德伍德花岗岩上。

尽管有一个狭窄的线性低幅度磁异常穿过该地区的中心，沿着博罗和依伦顿花岗岩体的西侧从北向南延伸，但总的来说，这些花岗岩体没有明显的磁性。在该地区东部的本岗多尔（Bungendore）城以东进行的少量地面磁测结果表明，上述异常由许多高幅度的异常组成，这些异常与辉长岩岩墙有关。这样一群不连续的异常可能由基性火成杂岩引起（Lockhort—火成杂岩）。这种杂岩主要是由大片辉长岩组成，并有花岗岩大面积的侵入。

这个线性异常带从卡普坦斯·弗莱特以南延伸到伍德劳以北，然后异常特征变得更加复杂，异常走向似乎向东北偏转。在伍德劳附近主要圆形重力高附近也出现了局部高幅度磁异常，这可能是有露头的基性

火成岩所引起的。

图 5 是根据等值线图内插得出的航磁剖面，呈东西向，穿过卡普坦斯·弗莱特矿床和伍德劳矿床，并附有简略地质断面。

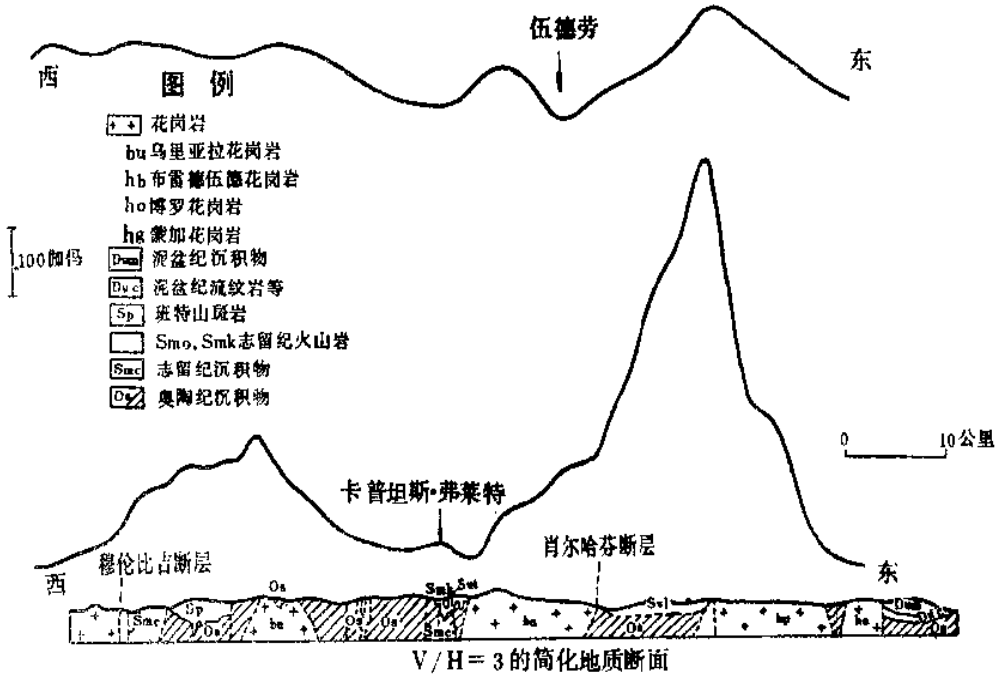


图 5 航磁剖面和地质断面图

这些剖面最明显的特征是在形状上具有相似性，尽管这些剖面相距有 60 公里左右，穿过伍德劳的剖面异常幅度一般要低得多，两个硫化矿床都出现在靠近狭窄低幅度磁力高的宽缓的磁力低上，其两侧都与大的磁力高相邻。

穿过卡普坦斯·弗莱特的剖面东边磁场数据显示出一个宽大的复合异常，幅度约为600伽玛。虽然从异常的形状来看象是不止一个磁源，可是，这似乎与奥陶纪沉积和志留纪沉积以及布莱德乌德和博罗花岗岩之间的火山岩有关。最强的异常似乎没有向西延伸到超过绍尔哈文断层。这个异常与布莱德乌德花岗岩西部边缘和相邻的沉积岩与火山岩之间的接触带有密切关系。在磁剖面的两边出现了一个复合磁力高，幅度约为200伽玛，这个异常出现在乌立亚拉花岗岩西部边缘附近的奥陶纪沉积岩和培因特尔山斑岩之上。该异常似乎没有向西延伸超越穆兰毕芝断层。

这个剖面上的强异常可能是由含铁沉积和花岗岩接触带中的磁铁矿引起的。已知有价值的磁铁矿矿床在该地区出现。形成这些异常可能与基性火成岩的存在有关。

在卡普坦斯·弗莱特矿床和伍德劳矿床附近出现的较小的磁异常，据认为是由狭窄的基性侵入岩引起的。

三、伍德劳矿体早期的地球物理勘探工作

1. 引　　言

1969年七、八月间，麦克发尔地球物理探勘公司在伍德劳开展了物探工作。根据地质普查和地球化学取样结果，把这个地区选为贱金属勘探基地，这次物探工作的目的是圈出和确定浸染状或块状金属硫化物矿化富集带，以便打钻验证。

选用的主要方法有电阻率法和激发极化法，并以垂直磁测为辅，在通过钻探发现伍德劳矿床以前，这是所做过的唯一的一次地球物理测量。

2. 设备和野外工作方法

用麦克发尔P660型变频激发极化装置完成了电阻率和激发极化测量。发射机由一台2.5千瓦的发电机驱动，发射频率为0.125，0.25，1.25，2.5或5.0赫，电流为5安培。发射波形为正弦波。

麦克发尔激发极化接收机对发射波形中的基频都进行滤波，并测量每个频率上的电压和每对频率间电压变化的百分比。用这些数值来计算视电阻率（ρ_a），百分频率效应（PFE）和金属因数。

在伍德劳的勘探中，视电阻率是用2.5赫确定的，百分频率效应是在0.3和2.5赫频率情况下测得的，公式如下：

$$PFE=\frac{\rho_{0.3}-\rho_{2.5}}{\rho_{2.5}}\times 100\%$$

PEF是百分率，可直接从接收机上读出。所有的测量都是用常规的偶极—偶极电极排列完成的，采用的偶极长度（X）为100英尺（30.5米）或200英尺（61米），偶极的间距为偶极长度的1、2、3和4倍。

为了野外计算方便，测量电阻率单位广泛采用欧姆·英尺/2π，虽然这种单位目前已不普遍了。自从起初的解释使用了这种单位后，这种单位就保留下来了。1欧姆·英尺/2π≃0.5欧姆·米。金属因数计算公式如下：

$$MF=\frac{1000PFE}{\rho_a}$$

此外还用麦克发尔公司的M700磁通门磁力仪进行垂直磁场强度测量。

3. 测线的位置

用偶极—偶极排列共完成了12条电阻率和激发极化测线，每条测线约3000英尺(900米)长。这里仅仅探讨邻近伍德劳矿床的五条测线，在所有这些测线上使用的偶极长度均为200

英尺，并有一个附加剖面，其偶极距为100英尺。

垂直磁场强度测量也沿这些测线进行，点距为100英尺。

4。成果讨论

图6示出磁场强度剖面图。应当指出麦克发尔M700磁力仪把南半球的垂直磁场强度作为负值对待的。所以场强增加就形成负异常。

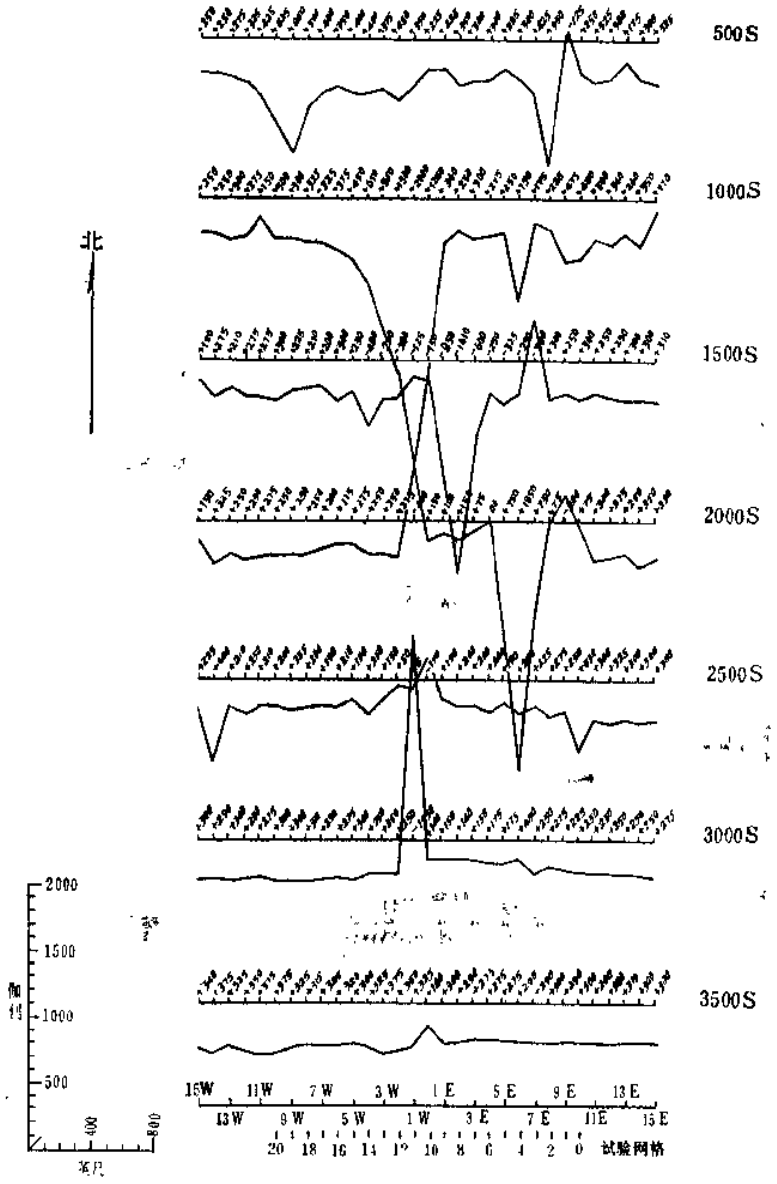


图6 垂直磁场强度剖面图

电阻率和激发极化数据以视电阻率、百分频率效应和金属因数拟剖面图的形式绘制，见图 7 到图12。按所采用的绘图惯例，视电阻率的拟剖面是倒过来的，将n = 1 时的数值绘在最下面。

在最初的解释中，将异常在拟剖面上加以鉴别，分为肯定的、很有希望的或可能的。虽然异常是绘在金属因数拟剖面上，可是这三种参数在解释过程中都得到重视。

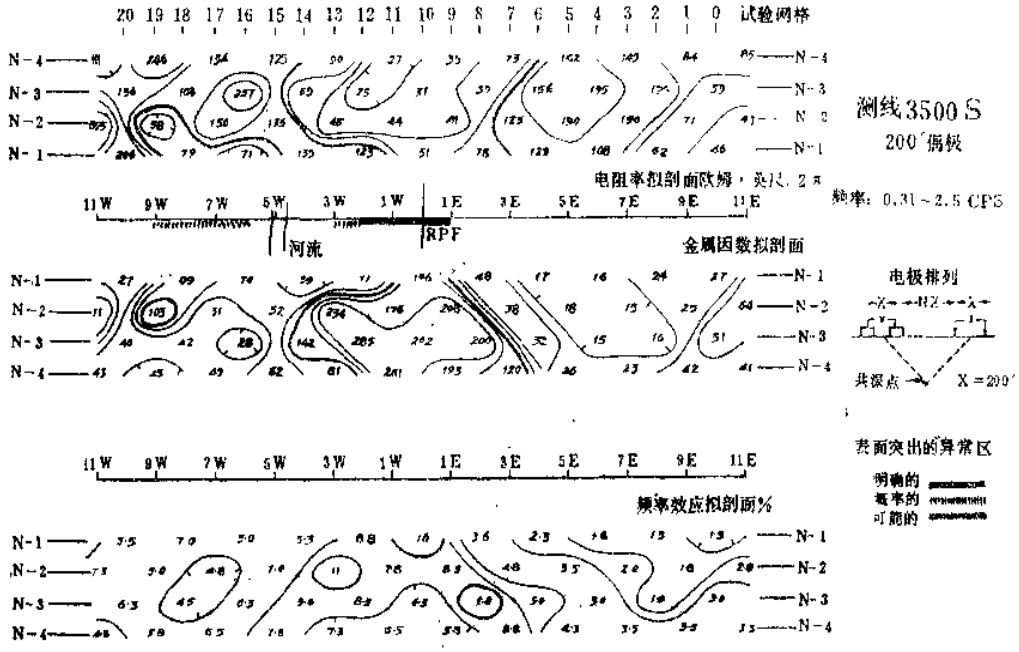


图 7．电法结果，3500S线（61米偶极）

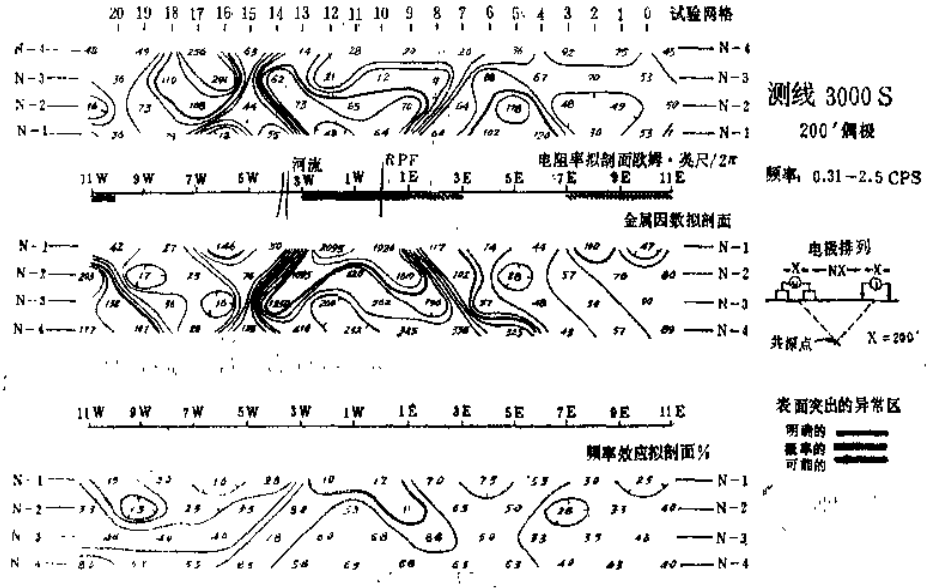


图 8　电法结果3000S线（61米偶极）

异常的分类也示在图7—12中。

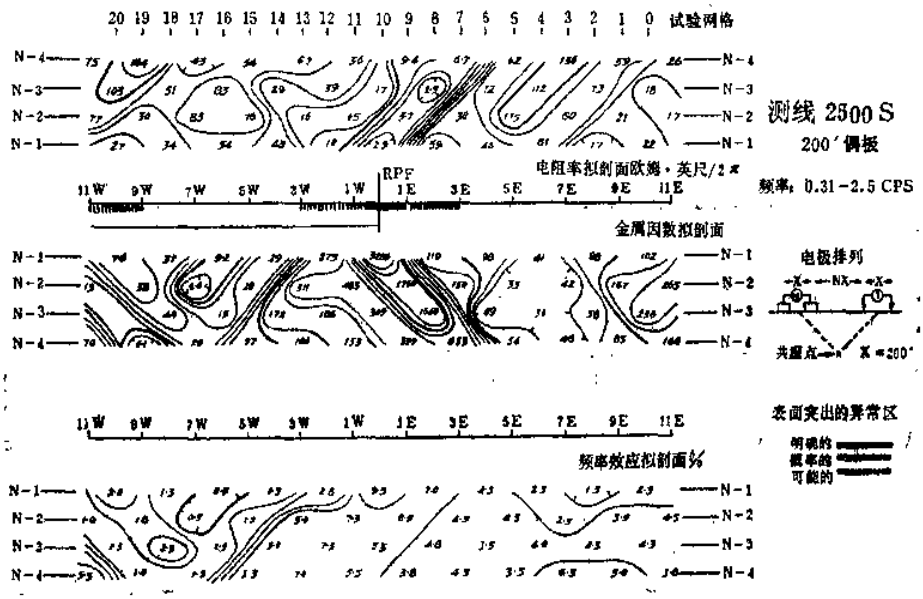


图9，电法结果，2500S线（61米偶极）

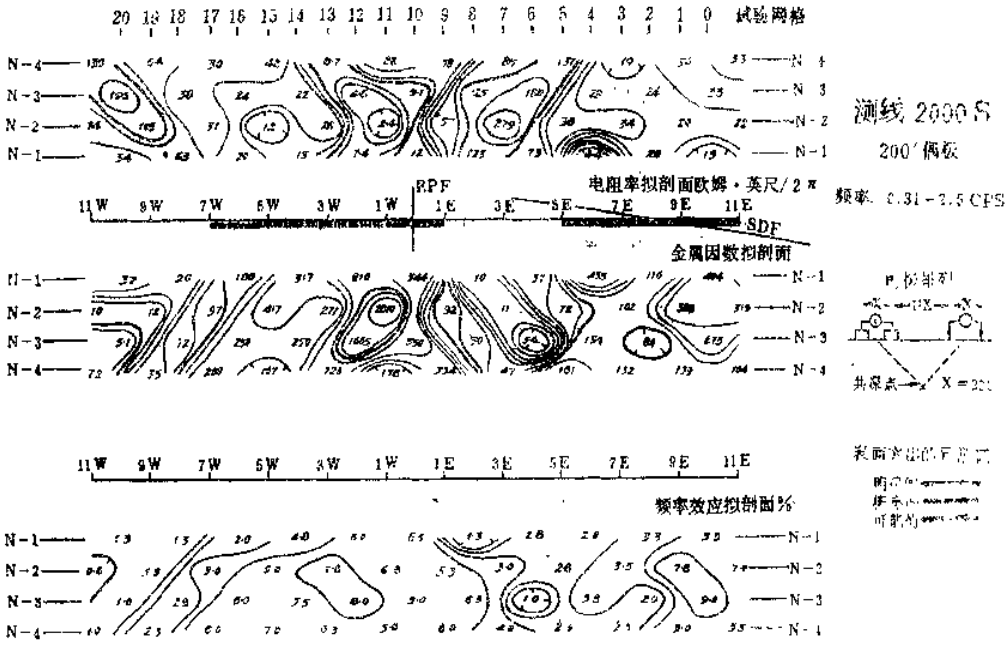


图10，电法结果，2000S线（61米偶极）

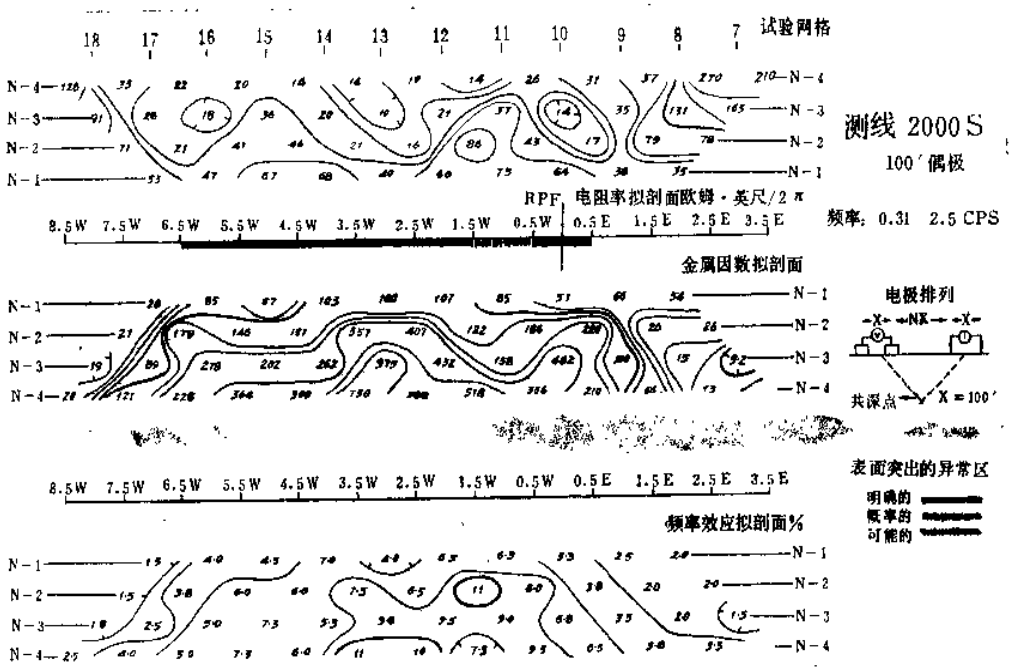


图11. 电法结果，2000S线（30.5米偶极）

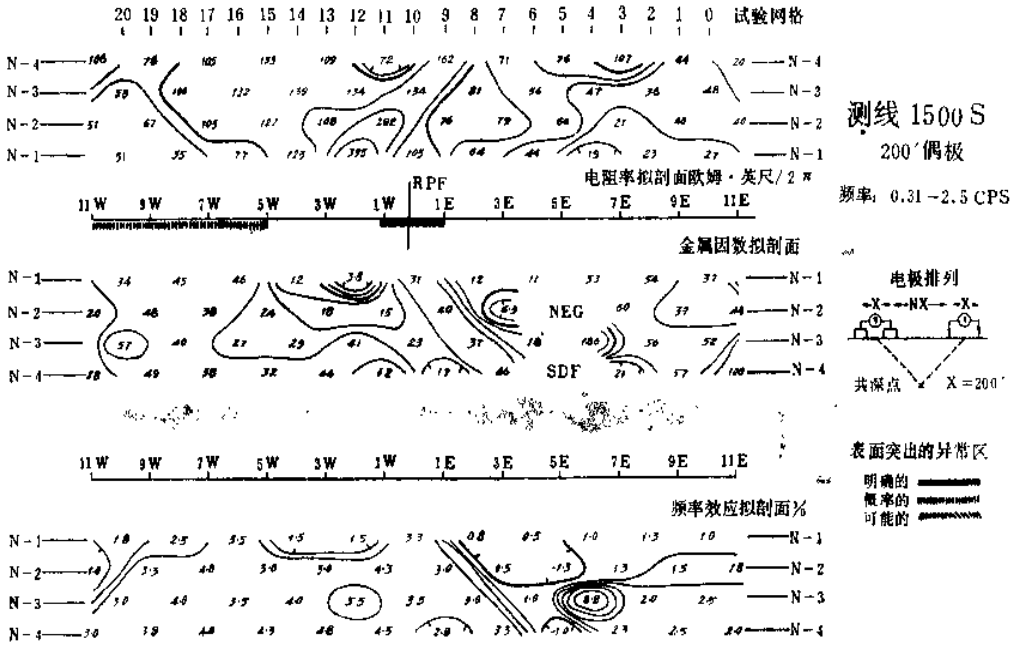


图12. 电法结果，1500S线（61米偶极）

总之，激发极化数据的质量是好的，观测的视电阻率值较高，无明显电磁偶合干扰和导电覆盖层的屏蔽作用。电阻率和百分频率效应的幅度变化明显，结果可划分出若干异常。

一个很大的困难是在基线附近有防兔栅栏的一个分支在接近2500S线处从基线向西延伸并与该测线大致平行。防兔网的底部埋在地下，这样它就成为一个连续接地的金属导体，也就引起明显的电阻率和激发极化异常，这些异常根据测量电极的方向和位置不同而异。

很显然，一个连续性的接地导体可以产生明显的视电阻率，百分频率效应和金属因数异常。如果导体和测线是垂直的，而且导体在电极的中间通过，这些异常最小，但即使如此仍然出现明显的异常。

伍德劳南北的栅栏可以引起明显的电性异常。尽管特别注意使电极离栅栏尽可能远，但在没有把栅栏完全拆走前，其响应是不可能避免的。在伍德劳，栅栏与电极的相对位置在测量中是需倍加注意的，而且在解释过程中还应对栅栏的影响加以考虑。

5．摘要和结论

伍德劳最初的电阻率和激发极化测量，在很大程度上受到接地防兔栅栏的干扰。尽管存在这些干扰，仍可以清楚地解释出2000S线、2500S线和3000S线上的OE附近的块状矿化。在3500S线上还出现一个宽大异常，但幅度降低，说明只是浸染状矿化。在2000S线以北激发极化响应明显减小。

后来的钻探证实了伍德劳块状硫化矿矿床与测量的最初解释是完全相符的。由于有栅栏的干扰，最初的解释不是结论性的，但后来把栅栏拆除进行的测量证实了硫化物矿体的激发极化效应。

点距为100英尺（30米）的磁测未能探测出任何可能与硫化物矿化有关的有意义的异常。在矿化的北面有一个明显的磁异常，这似乎是由基性侵入体引起的。

四、物性测定

1．伍德劳矿体和围岩的物理特性

伍德劳矿体和围岩的物理特征是通过测定岩样、岩芯和在钻孔内测定而获得的。伍德劳的矿化类型非常适合于应用电法和电磁法。块状硫化矿电阻率的范围是0.01到5.0欧姆·米，围岩的电阻率是它的1到10,000倍。矿带易极化，典型的频率效应高达30%，而背景效应为2%到10%。可是所测得的频率效应不一定能代表整个块状矿体。

伍德劳块状硫化矿的平均比重为3900公斤/米^3，比围岩的平均比重要高出1000公斤/米^3。这就表明用重力勘探圈出这类近地表矿床的可能性。

在岩芯样品上和在钻孔中所作的磁化率测量和自然伽玛辐射测量都表明，块状硫化物基本上没有磁性和放射性。

对伍德劳矿体和围岩的物理特性没有进行过统一的全面研究。可是，澳大利亚乔杜戴克

斯公司(Jododex)，矿产资源局和新南威尔士地质调查所对岩芯样品和钻孔进行了各自的物性测定。本文对这三个单位取得的结果已作了概括并探讨了矿与围岩之间的物性差异。

伍德劳块状硫化矿具有非常高的电导率，这是伍德劳岩石最重要的岩石物理特性。因此，尽管做了大量的物性测定，但工作主要集中在对岩芯样品和在钻孔中测定矿体和围岩的电性。

2。岩芯的物性测定

测定方法

在伍德劳早期的勘探中，乔杜戴克斯公司曾在实验室里用选出的岩芯样品做过少量电阻率和激发极化试验，目的是弄清在地面电法解释中碰到的某些复杂问题。测定岩芯的方法很简单，把供电电极板与磨平的岩芯的两头接触，岩芯保持潮湿，但不要把里面的气体都排出，把测量电极沿岩芯轴按已知的间隔放置，用 Heinrichs Geoex 公司 Mark 2 型实验室用的发射机向样品供几个微安的电流，频率为 0.3和3.0赫。用Heinrichs Geoex 公司的Mark 4c 接收机测量电阻率和激发极化效应。

新南威尔士地质调查所也结合钻孔中的测量进行了室内岩芯测定试验。使用比森（Bison)3101 磁化率仪测量打穿扁豆状主矿体的伍德劳276号井中的岩芯磁化率。在同一批潮湿但不排出气体的岩芯样品上，按实验方法，用四根电极的系统作电阻率测量，电流频率为1.0赫。

矿产资源局对伍德劳54号井岩芯样品的物理特性进行了广泛的、测量条件控制得很好的研究。该钻孔没有打到伍德劳主矿体，但是在其西约 400 米处打穿了两个扁豆状块状硫化矿体。用比森3101磁化率仪测定了磁化率，用迪基科 (Digico) 全套结果 (Complete Results) 磁力仪测得了剩磁。测磁化率和剩磁用的样品为园柱状，直径 2.5 厘米，长度分别为 10 厘米和 2.5 厘米。

电性测定（图13）用一个四个电极的水平溶液池。样品在真空条件下浸透在具有0.02西门子/米电导率的盐溶液中。池内充满同样的溶液。在 1 千赫时测定样品电阻率，通过在1.0和0.1赫两个频率上测定电阻率而求出百分频率效应，如下式所示：

$$PFE = \frac{\rho_{0.1} - \rho_{1.0}}{(\rho_{0.1} \cdot \rho_{1.0})^{\frac{1}{2}}} \times 100\%$$

其中$\rho_{0.1}$和$\rho_{1.0}$分别表示样品在0.1赫和1.0赫频率上的电阻率。

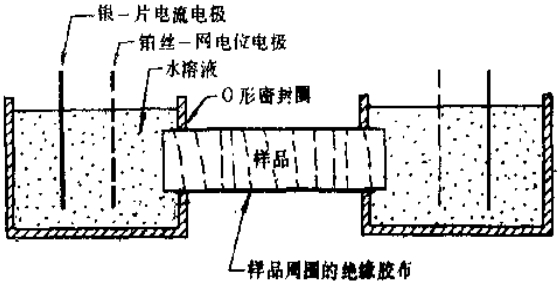


图13. 电导率测量池示意图

用时间域矩形波（2 秒通电、2 秒断电）测定充电率，用存储示波仪记录激发极化衰减的瞬变现象。通过衰减曲线的数值积分得出100毫秒到 1000 毫秒时间间隔的充电率值。电性测定的样品为园柱状，直径 2.5 厘米，长约 8 厘米。

岩芯测定结果

表3包括了岩芯样品测试的结果。只有乔杜戴克斯公司和新南威尔士地质调查所的测量包括块状硫化物主矿体。表3(a)中列出电阻率和百分频率效应值的变化范围，因为测定还不能很好地控制，所以无法列出单个样品的结果。虽然表3（c）中的结果是涉及与近地表矿体不相连的矿化，但是表3中（a）组、(b)组和（c）组之间不同岩石物理特征：如比重、磁化率和电阻率的对比表明，伍德劳54号孔的岩芯测定对伍德劳矿体和围岩有代表性。

电阻率和激发极化特性

乔杜戴克斯公司取得的电性结果变化范围很大。取得的矿样电阻率值变化范围大约从0.01欧姆·米到5欧姆·米，电阻率值一般与样品的硫化物含量成反比。所测样品的平均电阻率为0.3欧姆·米。从上盘围岩中取的样品和从矿体中取的样品的电阻率比值为10,000比1。这样的电阻率异差由新南威尔士地调所和矿产资源局的测量结果所证实。在表3（b）中列出的电阻率值代表着在不排出气体的岩芯样品上进行快速探索性测试的结果，因此，硅含量高的样品的电阻率有可能比真正在现场样品的实际电阻率高一个数量级还多，因为穿过岩石的正常电解传导不存在了。但是，金属导电样品的电阻率可以看做是能准确地反映样品的真实电阻率。

伍德劳的岩芯物性测定结果　　表 3

(a) 乔杜戴克斯—岩芯样品的电性测定

岩石类型	电阻率（欧姆·米）	百分频率效应（%）
块状硫化物	5—0.01	0—200

(b)新南威尔士地调所—伍德劳276号孔不抽空气体的岩芯样品的磁化率和电阻率测定

深度（米）	岩石类型	磁化率（$n\times10^{-6}$国际单位）	电阻率（欧姆·米）
27.4	凝灰岩		279
29.3	凝灰岩		178
56.7	凝灰质页岩		677
93.5	粗玄岩		7,438
114.0	粗玄岩		7,430
134.9	凝灰质页岩	251	110,000
135.9	带有凝灰质夹层的块状硫化物	0	0.1
145.8	块状硫化物	0	0.01
179.0	凝灰岩	327	28,779
191.0	凝灰岩	138	43,188

(c) 矿产资源局—伍德劳54号孔岩芯样品的物性测定

样品号	深度（米）	岩石类型	比重（公斤/米³）	电阻率（欧姆·米）
1	28.30—28.50	粗玄岩	2890	4900
2	64.10—64.25	熔结凝灰岩	2680	9100
3	96.05—96.25	流纹岩	2650	9700
4	168.55—168.65	粗玄岩	2820	1400
5	183.14—183.34	块状硫化物	4680	0.9
6	242.53—242.68	凝灰质页岩	2770	7500
7	265.46—265.60	块状硫化物	3340	16
8	267.60—267.70	块状硫化物	3050	520
9	280.35—280.45	凝灰质页岩	2780	13000

样品号	频率效应（%）	充电率（毫秒）	孔隙度（%）	磁化率（$\times10^{-6}$国际单位）	剩磁（毫安/米）
1	3	21	0.4	580	1.3
2	0.3	4	0.3	60	0.05
3	0.5	5	0.7	50	0.04
4	1	7	0.8	550	5.4
5	25	400	0.2	60	0.1
6	2	8	0.7	80	0.2
7	18	370	0.3	50	1.0
8	15	140	0.5	50	0.2
9	0.3	4	0.6	150	0.2

乔杜戴克斯公司测定的块状矿体的百分频率效应值变化很大。平均百分频率效应无法确定，因为看来它关键是取决于矿石的电阻率，从而也就取决于脉石的含量。表3(c)中的百分频率效应和充电率值证明，在块状硫化物和围岩样品之间极化率差异相当大。可是，根据这些小的岩芯样品取得的变化范围大的激发极化特性可能没有代表性。从地下整个极化过程来考虑很可能主要的极化效应出现在矿体的上下边缘，在这些部位上存在着激发极化作用所必须的硫化物与电解质界面。在块状硫化物中几乎没有什么内部极化，因为它具有细粒特性和低孔隙度，这将大大妨碍内部极化界面的形成。因此，要是试图通过小的矿样评价矿体的整个内在激发极化效应或百分频率效应就会误入歧途，因为内在的百分频率效应与其说大概取决于分布在整个硫化矿本身的微观极化效应，不如说取决于块状硫化物与围岩接触带的大的或宏观的极化效应。

磁化率

表3 (b) 和 (c) 表明，块状硫化物和凝灰质围岩的磁化率非常低以至测不出来。块状硫化物的上段主要是铅锌硫化物，无磁性。块状硫化物的下段和下伏的绿泥石片岩及硅化绿

泥石凝灰岩上部具有微弱的磁性，磁化率从250到375×10^{-6}（国际单位）(20到30×10^{-6}厘米·克·秒·单位）。伍德劳唯一有强磁性的岩石是粗玄岩，其磁化率的变化是从上盘粗玄岩岩席的500至600×10^{-6}（国际单位）到矿体东北方粗玄岩的110至120×10^{-3}（国际单位）。

3．钻孔中的现场物性测定

霍恩和扬格介绍了在四个钻孔中进行的百分频率效应、电阻率、自然电位、点电阻和伽玛放射性等综合地球物理测井，其中，有两个钻孔（伍德劳256和276）穿过块状硫化物主矿体。伽玛放射性测井表明，矿体的伽玛幅射强度一般很低，测井仅仅用于识别凝灰岩和凝灰质页岩，这两种岩石的伽玛幅射强度为0.02到0.03毫伦琴/小时（1毫伦琴=2.58×10^{-7}库伦/公斤（国际单位））。自然电位测井证实，地下水面以上的矿体强烈氧化。

伍德劳256和276号孔的电阻率测井和激发极化测井证实了通过岩芯测定取得的电阻率和百分频率效应的极大差异（表3）。霍恩和扬格得出这样的结论，即块状硫化物的频率效应超过30%，电阻率则低到0.1欧姆·米。围岩的背景频率效应为2%到10%，其电阻率的数量级为1,000到10,000欧姆·米，而粗玄岩比酸性围岩电阻更大、极化率更高。

将W276孔的电阻率测井结果同表1（b）的岩芯测定结果作了对比，这一对比说明在岩芯上测得的和在现场测得的电阻率之间有良好的相关关系。W276孔的电阻率测井结果经过井液校正后，得出块状硫化物的电阻率值约为0.1欧姆·米，长英质凝灰岩为100欧姆·米，凝灰质页岩为1000欧姆·米，粗玄岩为6800欧姆·米。在W276孔穿过的块状硫化物和围岩之间最大的电阻率比值为1:10万。

4．覆盖层的电阻率

如果不说明覆盖层的电阻率和厚度，有关伍德劳岩石电性的讨论就是不完整的。矿体北头的土壤和风化岩石的厚度为5至10米，其南头加厚到20米。从对偶极-偶极视电阻率拟剖面的分析中得到的覆盖层电阻率变化范围为40至100欧姆·米，但铁帽带上例外，那里的电阻率可能更低一些。

5．比　　重

在伍德劳，比重大是区分块状硫化物和围岩的明显的物理特征。可是，块状硫化物比重值的变化很大，取决于样品中硫化物的总量和贱金属硫化物占的比例。

伍德劳矿床还包括被矿化了的火山岩，这些火山岩中含铜，局部地区已达到矿石品位，这些岩石所含硫化物的比例比块状硫化物矿石低，平均比重也较低。

围岩中包括长英质火山岩，这种火山岩以及页岩和粗玄岩局部硅化和（或）黄铁矿化。这些岩类的比重变化范围也很大，但比块状硫化物的变化范围要小。

对覆盖在块状硫化物上的铁帽的许多样品的比重也作了测量，并得出平均值。覆盖在含矿层上的土壤、冲积层和崩解岩石的比重与铁帽的比重相似。由于这些土壤、冲积层和崩解

岩石在局部地区面积很大并且很厚，这就会影响重力测量的结果。

表4列出选择出的一套样品不同的比重值，以说明不同种类矿石和岩石比重的变化范围。表中还示出矿化样品的品位。根据矿化火山岩样得出的平均值比用单个样品得出的值更为准确。

比　重　测　定　　表 4

岩石类型	品位 Cu(%)	Pb(%)	Zn(%)	Fe(%)	比重（公斤/米³）
块状硫化物	3.80	0.89	3.55	36.20	4310
	0.28	3.30	7.15	26.50	4150
	0.64	6.60	13.70	28.70	4520
	0.88	7.05	14.60	24.00	4390
	0.72	5.30	10.60	24.20	4050
	0.74	5.00	9.80	17.40	3600
	1.23	5.40	13.60	28.70	4460
	2.30	1.35	6.00	33.00	4290
	0.50	4.50	10.20	20.20	3930
	4.30	0.47	16.50	32.00	4350
	0.78	17.70	24.00	6.70	4090
	0.86	8.55	16.90	19.80	4100
	1.33	11.00	22.00	12.00	3850
	1.70	3.45	23.00	20.40	4130
	0.96	9.80	20.50	17.00	4230
	1.86	1.61	19.30	18.40	4070
		平均值			4160
矿化的火山岩	0.47	0.03	0.13	7.65	2830
	0.37	0.03	0.23	6.55	2810
	1.03	0.09	0.30	6.50	2770
	0.45	—	0.39	11.20	2950
	0.54	—	0.05	7.00	2820
	0.81	0.04	0.13	7.80	2850
	1.89	0.04	0.43	12.40	3040
	1.37	0.02	0.37	6.20	2820
	0.62	0.01	0.08	10.00	2910
	0.96	0.13	1.13	9.05	2940
	10.90	0.20	0.63	20.20	3330
	2.55	0.02	0.11	16.80	3080
	6.60	0.01	0.37	16.00	3150
		平均值			2950
矿化的火山岩（大样）	1.7	0.14	0.84	9.40	2900
铁帽	28个样品测定的平均值				2130
	变化范围				1570到2800
粗玄岩					3000
粗玄岩					2860
页岩					2750
凝灰岩					2730
凝灰岩					2760

在矿石储量计算中使用的比重值：块状硫化物为3.9，矿化的火山岩（包括铜矿和无经济价值的物质）为2.9，铁帽为2.0。块状硫化物的比重值取3.9，与表2中单个样品的数值相比显得低了些。伍德劳采矿的经验已证实这是一个可靠的平均数值。

6. 结　论

图14中用图示概括出在伍德劳的钻孔中和岩芯上测得的电性特征。从这些结果中可以清楚地看出，伍德劳型的矿化是电法和电磁法勘探的极好目标。

在块状硫化物和围岩之间密度差异大到约1000公斤/米^3，这表明用重力勘探圈定这类近地表矿床的可能性。矿体既无磁性也无放射性，所以这些物理特性不能作为直接勘探同类矿体的手段使用。

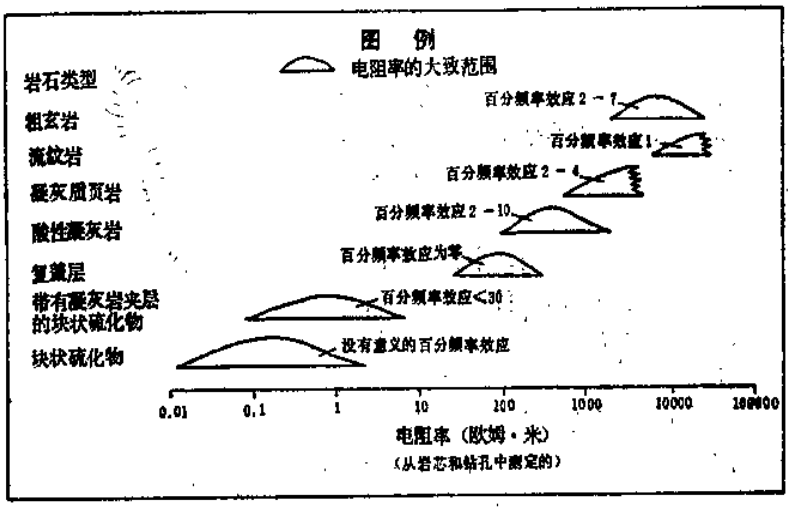


图14　伍德劳的块状硫化物、围岩和覆盖层的电阻率和百分频率效应

五、航　空　物　探

1. 对伍德劳矿体直升飞机电磁数据的评述

概况

用先得利HEM701系统作的直升飞机电磁法详查在伍德劳矿体附近发现了许多异常。其中许多异常相当大，一般来说，实分量与虚分量的响应比值较低，说明是中等到不良导体引起。这些异常可能是由该区的某些岩石类型，特别是良导的黑色页岩引起的。

由伍德劳矿体引起的单个直升飞机电磁异常具有幅度较低、形状复杂和实分量与虚分量的响应比值很大等特征。所有这些特征都可以定性地解释成是由一个单一浅层的、良导的厚板状倾斜导体引起的。

勘探结果表明，直升飞机电磁法探测和圈定类似伍德劳矿体这样的目标是有困难的。而主要的鉴别性特征是实分量与虚分量的比值非常之大。

1971年元月22日到2月11日在包括伍德劳矿在内的一个有价值的地区开展了直升飞机电磁法和磁法勘探工作。直升飞机电磁法勘探是由澳大利亚西格尔（Siegel）股份有限公司用先得利的HEM701系统完成的。这是一种同轴发射和接收线圈系统，线圈安装在一个刚性拖架上，相距9.1米（30英尺）。线圈轴呈水平状态，且按飞行方向排列。该拖架被吊在直升飞机下约30米（100英尺）处，该系统使用1600赫的频率工作，在接收线圈上测量交变磁场的实分量和虚分量。这些分量在接收机上用不失真的正常一次场的百万分之几表示（ppm）。实分量和虚分量在曲线记录器上显示出来，满格为500ppm。在飞行过程中，用校准信号周期性地检查系统比例尺的灵敏度。

伍德劳航空测线的间距一般为185米（600英尺）。拖架离地面的距离为30至60米之间。采用航迹摄影机定位。

解释

澳大利亚西格尔股份有限公司负责直升飞机电磁测量的解释工作，方法如下：把认为是导体引起的异常的实分量响应峰值位置在飞行线的相应位置上绘一个圆圈标出，在飞行线上的位置是通过相邻基点之间的线性内插推导出来的。异常的半峰值点的间距，即半宽度，也沿飞行线用直线段标出。在导体狭窄而陡倾时，该参数只与深度有关。可是，如果在良导覆盖层下有较厚或较深的勘探目标引起半宽度大的异常时，这种关系就变得复杂了。实分量和虚分量的振幅峰值也含有关于勘探目标特性的信息，这些振幅峰值都以ppm为单位标在飞行平面图上，对着峰值的位置。这些振幅的比表示了勘探对象的电导率—规模系数。一般来说，象块状硫化物这样的良导矿体，其比值可达到3或更大些。中等电导率—规模系数的矿体的比值在1和3之间，而低电导率的比值小于1。在某些地区这些比值很有特征性，在另外一些地区它们的范围相互重迭，所以利用这些比值是不可靠的。

在解释中，根据实分量振幅大小（并考虑离地高度）把异常分成Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ三个等级。假设盖层为15米厚，吊舱离地面的距离为30米。Ⅰ级异常，其实分量峰值等于或大于350ppm，在类似条件下，Ⅱ级异常的实分量峰值在100和350ppm之间，而Ⅲ级异常低于100ppm。在飞行平面图上，代表每个Ⅰ级异常峰值的圆圈中全涂上黑色，Ⅱ级异常圆圈一半为黑色，而Ⅲ级异常圆圈中空白。

在飞行平面图上磁异常和电磁异常相吻合，用双圈表示，并标上了振幅值（单位用伽玛）。

伍德劳的测量

图15列出伍德劳矿体附近一部分经过解释的直升飞机电磁数据。

在伍德劳地区测得了大量的航空电磁异常，其中有些异常是由文化设施引起的，但大部分是由地质特征引起的。大多数异常属Ⅱ级和Ⅲ级，其实分量峰值与虚分量峰值的比值大约为3到小于1。其中许多异常有较大的半宽度，有些还与磁异常相重合。

一条测线（148线E）通过矿体的北部，这条线是从西南向东北方向飞行，在这条线上，在紧靠矿体上盘的2731基准点附近测得一个狭窄的Ⅲ级异常。该异常的实分量峰值为40ppm，而且实分量与虚分量的比值很大，后来得知该异常由伍德劳矿体引起。图16示出在

148E飞行线上测得的数据剖面图，该异常的实分量是一个复杂的双峰值，而虚分量没有异常。

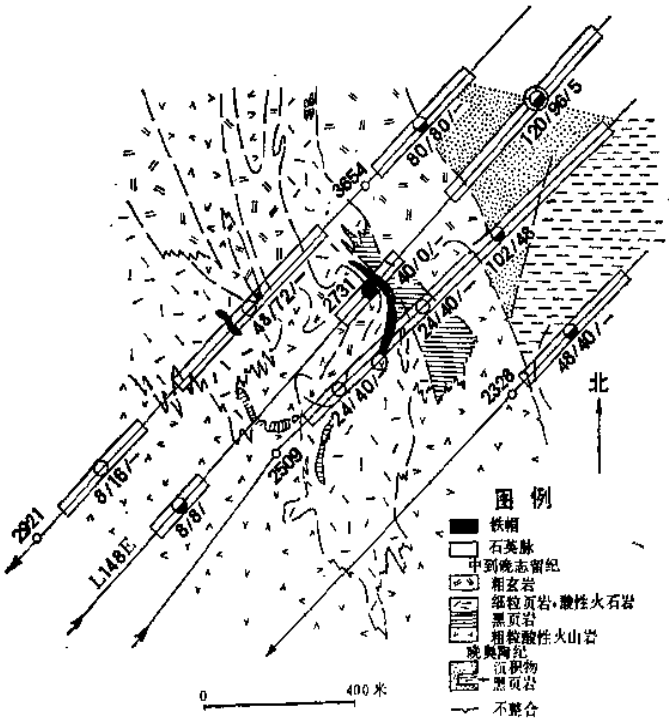


图15 伍德劳的直升飞机电磁数据和地质示意图

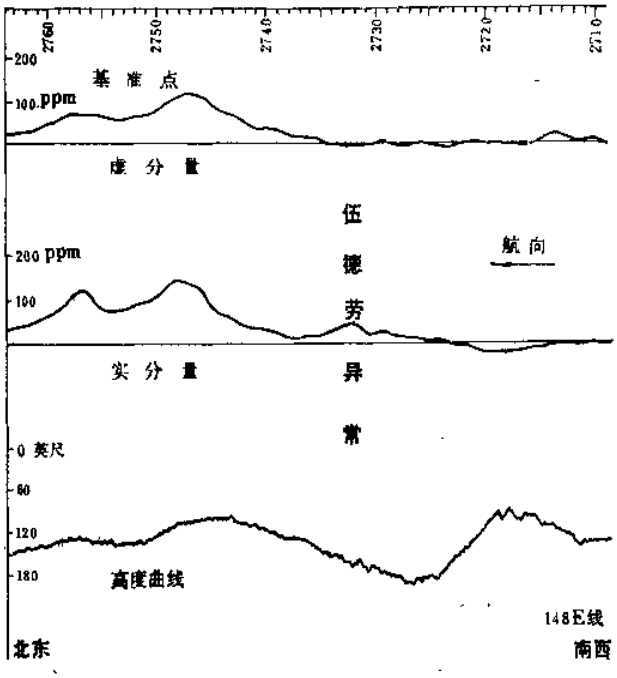


图16 在伍德劳矿体附近，148E飞行线上的直升飞机电磁异常

实分量异常的特征解释起来很困难，由于穿过矿体时吊舍高度发生变化，可能使异常特征变得更复杂。双峰值异常的出现，很可能主要是由于与线圈系统的大小相比，矿体有效宽度太大（增强边缘效应）和飞行线的方向引起的。

在148E飞行线上还出现一个幅值大的Ⅱ级异常，该异常的峰值在2747基准点上，它是由一个宽得多的地质体引起的。此异常实分量与虚分量响应比值较小，这说明它是一个中等至高阻导体，并有弱磁异常与之重合。地质图上，在该电磁异常处有沉积岩出现。因为该电磁异常总的说是出现在宽阔的低洼地形中，不能忽略潮湿地层使电磁响应增强这一事实。

紧靠该异常的北部有一个实分量峰值在2757号基准点附近的异常，据认为是由文化干扰源引起的。

在靠近148E线南面的飞行线上，有两个Ⅰ级弱异常，其实分量与虚分量比值较低，表明有宽大的不良导体存在。因为这些导体出现在山脊的两侧，伍德劳矿体的南半部分就产在这个山脊上，看来，这些异常可能是由潮湿的地面引起的并被容矿岩石的岩性变化增强。

2。因普特在伍德劳取得的结果

在伍德劳矿体上分别测得了两组因普特航空电磁数据。第一组是区域调查的数据，第二组数据的主要目的是做确定工作方向的试验以便得到可以指导在类似地质条件下规划进一步勘探工作的特征，两组测量都使用了Ⅴ型因普特系统和必要的辅助设备。

结果的讨论

澳大利亚乔杜戴克斯股分有限公司于1973年4月第一次用200米测线间距进行了测量。被定为p-1的地带在伍德劳矿体上。

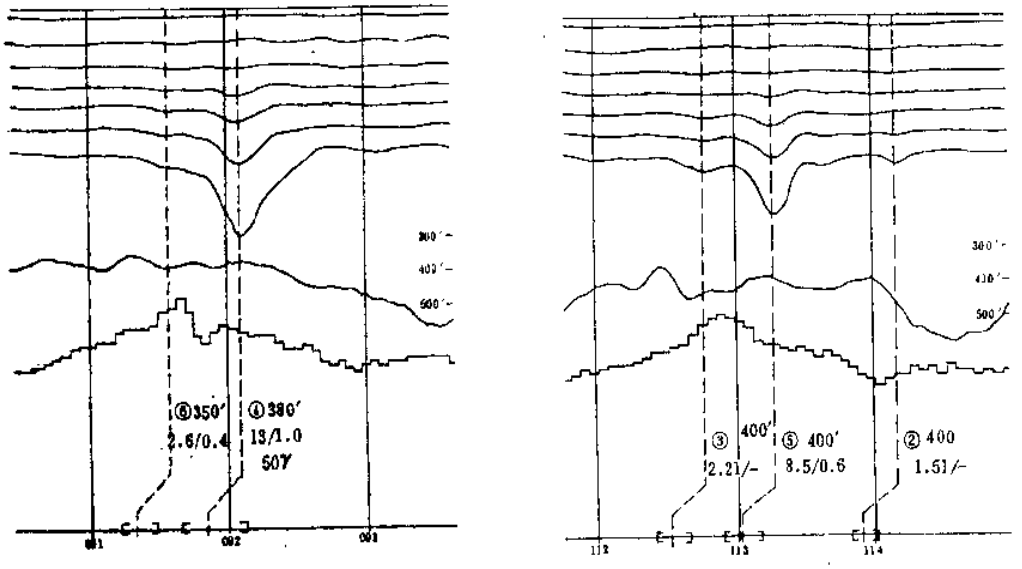


图17 矿体上的航空因普特测量结果

a—136E线； b—135E线

采用了两项标准来区分认为很可能赋存块状硫化物的基岩导体，这两个标准是：①走向长度短；②孤立的或者与主要岩层的走向不整合。

澳大利亚埃索（Esso）公司作的第二次因普特航测数据与第一次测的数据类似。可是，经过对两套数据进行详细对比，仍可以看出有差别。主要是由于两次测线方向和位置相对于良导带有变化而产生了这些差别。

综上所述，可以得出如下结论，即伍德劳矿体可以用因普特方法勘探。两次分别测得的因普特数据相似，即使有些差别也是由于飞行线的位置和方向所致。伍德劳的测量结果具有典型的走向长度有限的倾斜导体的特征。为了探测类似这样的矿体，在每个方向上测线间距都不能超过300米。

3．伍德劳矿体对DIGHEM II系统的响应

1970年金属矿勘探部门开始应用最初的DIGHEM系统，1976年开始应用新的DIGHEM Ⅱ系统。这两种系统都是把一个多线圈系统装在吊在直升飞机下方30米处的9米长的吊舱里。一般采用900赫的频率，因为它对发现良导目标非常有利，能最大限度地减小类似良导覆盖层这样的地质噪音源产生的干扰。

发射线圈和接收线圈之间的距离小可提供高分辨率的数据。与发射线圈和接收线圈之间距离较大的系统相比，这种分辨率能更容易地探测出较小的硫化矿体。最初的DIGHEM系统在加拿大发现新因斯科铜矿体和芒特卡姆铜镍矿体都证实了使用小线圈距的优点。这两个矿床的走向长度分别为100米和200米。

最初的DIGHEM系统仅有一个发射线圈和三个相互垂直的接收线圈，而DIGHEM Ⅱ系统有两个相互垂直的发射线圈和相应的两个接收线圈。DIGHEM Ⅱ克服了最初系统的两个缺点，即：

（1）良导覆盖层削弱了最初的系统有效地勘探基岩的能力，甚至是基岩导体受到激发的情况下也是如此。这是因为，电磁记录道记录了包括来自地质和文化设施在内的各种源的信号，这就减少了分辨由基岩引起的特定电磁异常的可能性。这是过去研制的所有航空电磁系统中存在的固有问题。

（2）用最初的系统不能测出陡倾基岩导体的宽度，不能区分由宽大矿体引起的宽阔异常和由几个距离较近的薄矿体引起的类似异常。同样在过去研制的所有航空系统中也存在着这样的多解性。

引进多线圈DIGHEM Ⅱ系统，在很大程度上克服了上述的局限性，自1976年中期以来就在欧洲使用这种系统，1977年初在北美使用，1979年7月在澳大利亚起用。该系统也在伍德劳使用过。

DIGHEM Ⅱ多线圈系统

多线圈系统包括安装在9米吊舱中的两个独立的正交线圈对。垂直、共轴线圈对与所有其它直升飞机电磁系统的线圈对一样。水平、共面线圈对是DIGHEM Ⅱ系统的特点。这两种线圈对都使用接近于900赫的频率，偶尔也使用其它频率。两个正交发射线圈在两个相互垂直的方向上激发导体，取得的异常可提供导体几何形状的信息。该信息十分有助于把基岩

导体从导电覆盖层和文化设施导体中区分出来。

DIGHEM Ⅱ的数据用数字记录并在自动记录纸上显示。计算机软件是该系统的组成部分，因为数据转换过程太复杂，以至不能用手工完成。简言之，工作程序和显示方法如下：

1. 差分道显示在两个独立线圈对内产生的两个实分量响应和两个虚分量响应之间的差值，例如：

实分量差 = 共轴实分量 - 0.5（共面实分量）；

虚分量差 = 共轴虚分量 - 0.5（共面虚分量）。

差分道有助于消除导电覆盖层产生的地质噪音。这一点很重要，因为这种地质干扰可以掩盖基岩导体的响应，就象以前研制的所有航空电磁系统可能产生的情况一样。差分道可以在地质干扰环境中把基岩导体的信噪比提高一个数量级。

2. 电导记录道主要是一个异常自动分选器。除了有单个的导体出现以外，该记录道的显示一直为零。尖峰值指示出导体的存在，且该尖峰值是用西门子电导单位标定的，计算出的电导表示成垂直半平面模型的导电率与厚度乘积。用计算机来筛选电磁异常，这样就可以用数字数据直接绘制电磁异常图。

3. 电阻率是用弗雷泽提出的方法，根据拟层状半空间模型，从水平共面记录道计算出来的。用电阻率记录道得出的数据可以绘出等值线图，所以，DIGHEM Ⅱ测量可提供电阻率等值线图和电磁异常图。

4. 还可以用计算机绘制出总磁场等值线图和增强磁场的等值线图。通过数字滤波器算子绘制出增强磁场图，该算子的特点与向下延拓算子类似。

工作结果

1979年7月测量时，矿床已开始开采，结果有很强的文化设施干扰，其中包括电器装置的干扰。该系统对这些文化设施干扰有反应，也对该地质体有反应。可是，这两者很容易分开。关于飞行结果需要指出以下几点：

1. 伍德劳矿体异常在垂直共轴记录道上与许多文化设施引起的异常相似。依据在该线圈对上取得的数据，是不能把地质异常源和文化设施异常源分开的。

2. 伍德劳矿体在水平共面线圈对上的实分量异常比文化设施异常大。因此，该矿床很容易从水平共面记录道数据中鉴别出来。

3. 根据电阻率数据能清楚地鉴别出伍德劳矿床，在测线上观测到伍德劳矿床的电阻率最低。因此可以得出这样的结论，在象伍德劳这样的良导块状硫化物矿床的测量中，电阻率参数具有重要意义。还要着重指出，文化设施影响不会使电阻率剖面产生很大的畸变。

4. 取得的最大电磁响应位于伍德劳矿体的西北部，该异常很宽大，可能是由一个较宽的高于正常电导率的地带引起，该地带在水平共面虚分量记录道上产生的异常高达300ppm。反之，在这同一个记录道中，伍德劳矿床的异常仅为30ppm。同样，宽阔的良导带产生了一个100ppm的水平共面实分量异常，该异常比伍德劳矿体的60ppm的异常要大。尽管在电磁剖面上，以宽阔的异常为主，而记录的电阻率表明，伍德劳矿体的电导率比上述宽阔良导带的电导率高，或者说伍德劳矿体的电阻率（6欧姆米）比该良导带的电阻率（30欧姆米）低。因此，在电阻率记录道上比在电磁记录道上更容易鉴别出伍德劳矿床。

5. 根据伍德劳矿床本身的数据，可作出与矿体有关的下列推断：

（1）矿床向西倾斜，因为水平共面实分量记录道的尖峰出现在垂直共轴实分量记录道的左边。

（2）矿床在上盘一侧导电性显得更好，因为水平共面实分量记录道的尖峰出现在水平共面虚分量记录道的左边。

6. 电导记录道是以西门子标定的异常自动分选器，它显示出伍德劳矿床电导值为28西门子。此记录道还分选出上述宽阔良导带中的所有文化设施引起的异常特征和一些不均匀体。设计此记录道是为了显示所有的导电特征，而解释人员的任务之一就是区分不同信号源产生的异常。

结论

事实证明，DIGHEMⅡ系统能够测出伍德劳块状硫化物矿体上有意义异常的幅度。该系统还能在有严重文化设施干扰的环境中区分出块状硫化物矿床。测量结果表明，在有良导围岩和（或）文化设施的地区里，电阻率记录道在区分有意义的导体方面具有最重要的意义。在整个测区，伍德劳矿床上的电阻率异常最大，尽管在其他宽阔的良导带上测到了更大的电磁场幅度。象输电线那样的文化设施产生的电磁异常在幅度上与伍德劳矿床产生的异常相似，但是，已证明电阻率记录道在很大程度上不受这方面的影响。因此，尽管在电磁记录道上有干扰异常出现，但用电阻率记录道可以很好地圈出矿床。

六、地面电磁法

1．伍德劳矿区的甚低频电磁法剖面

伍德劳矿体能形成大的甚低频异常，工作时至少需要用两个甚低频台，且两者的一次磁场方向应基本垂直（图18）。

测量使用乔尼克斯公司的EM16 VLF电磁仪。在矿体上的甚低频响应有令人费解之处，即在矿体的南端没有异常出现，而此处矿体仍是块状硫化物，只是深度稍深一些（图19）。用矿体沿走向导电率的变化及衰减作用都无法解释这种现象。

如果不利用异相响应，在矿体附近和远离矿体2.5公里处弱矿化的黑色页岩上都能测到大小与特征类似的甚低频异常。在页岩上方相对较大的异相异常表明其导电率比伍德劳矿体更低，但是这些异常与矿体上的甚低频响应不同，便于判断，在该区能与其它良导岩石区分开来。

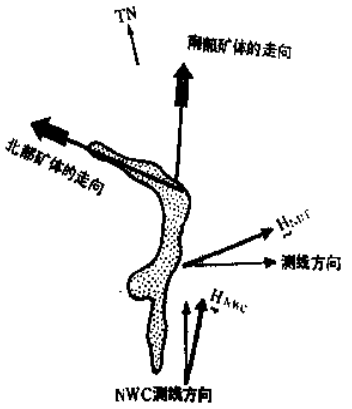


图18 伍德劳矿体与甚低频一次磁场（H_{NWC}和H_{NDT}）的角度关系，H的角标为电台名缩写

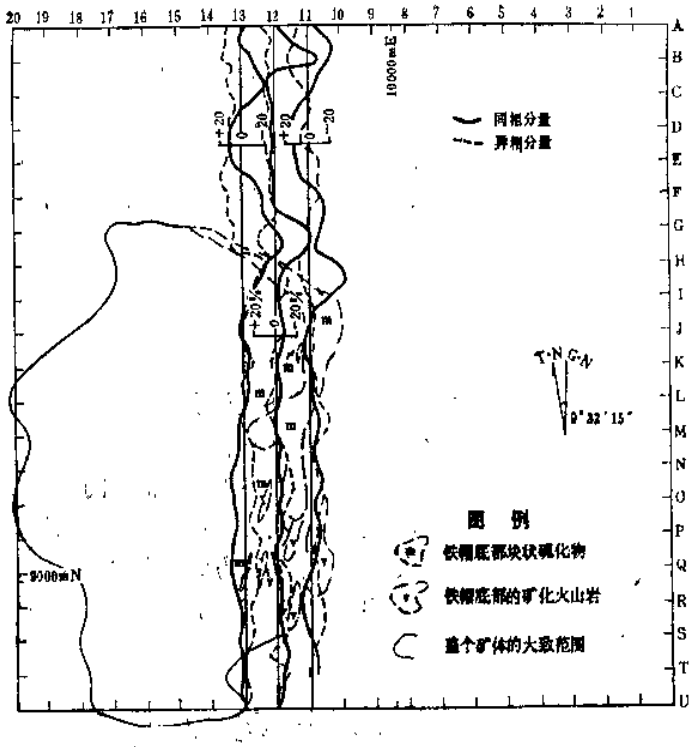


图19 伍德劳测区的基低频测线11，12，13（利用NWC电台）

2．伍德劳矿体上的三条声频磁场法（AFMAG）剖面

1976年1月使用麦克发尔公司的A652AFMAG声频磁场仪作了三条剖面。使用140Hz和470Hz两种频率。结果在伍德劳矿体上得到很宽的AFMAG响应。该异常除了勾绘出块状硫化矿的轮廓外，还表现出其它的特征，如东部的地质界线也被勾绘出来。

3．伍德劳矿体上以接地偶极子作场源的音频磁大地电流测量（AMT）

测量使用1568A型通用无线电波形分析器，发射机使用Geotronics 5千瓦的EMT 5000 IP/EM，发射方波频率为20、33、93、330、915、3300Hz，电流为1—9安培。

该方法工作效率高。在低频段硫化矿体的响应与背景值的差异很大，大约是五个数量级（图20）。等值线图稍稍不对称，反映导体向西倾斜（图21）。异常强度与发射偶极相对于导体走向的位置有关。浅层良导的黑色页岩也能产生极好的AMT异常（图22、23），假如发射偶极跨过黑色页岩，其异常比在黑色页岩之外的异常要高且尖锐。当发射偶极位于矿体旁侧并平行矿体时，矿体上的异常幅度和特征与发射偶极直接在黑色页岩上时的页岩异常相似。只是在黑色页岩上的异常走向长度比矿体上的要大得多，这样就能把二者区分开。

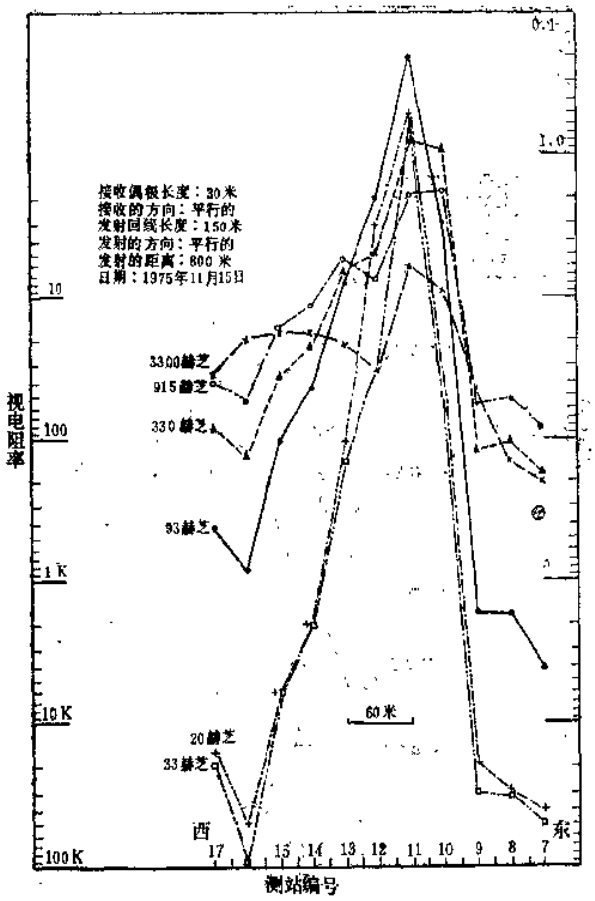


图20　伍德劳矿体I线电场（E）和视电阻率拟剖面

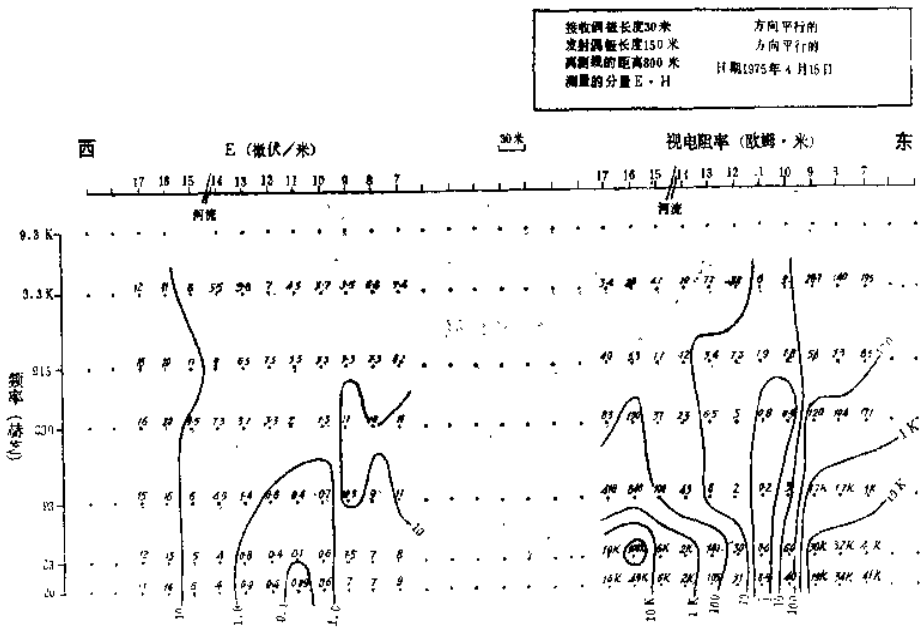


图21　伍德劳矿体I线视电阻率断面图

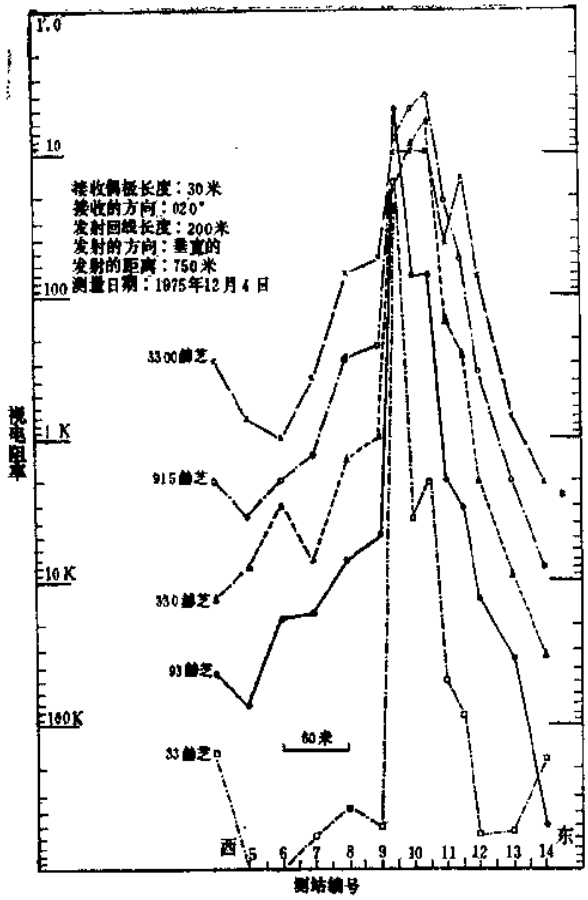


图22　黑色页岩上的电场（E）和视电阻率拟剖面

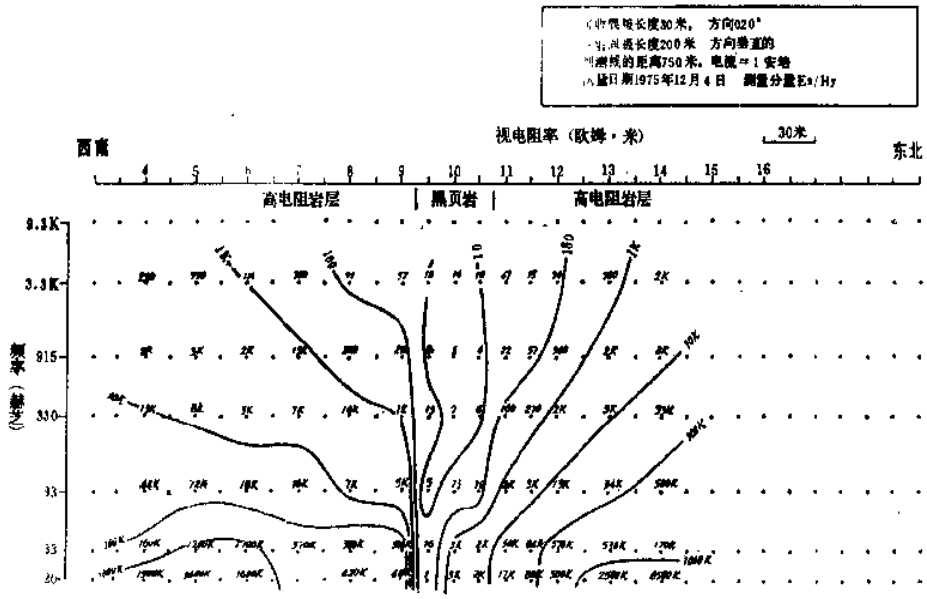


图23　黑色页岩上的视电阻率断面图

4. 垂直回线倾角法

使用麦克发尔公司的VHEM系统，工作频率为600和2400赫。旁线测量采用与矿体宽度相似的回线距，在矿体上方得到较弱的（幅值小）异常。而采用固定发射线圈法，在矿体上方得到大异常，能精确确定矿体北部轴的位置，能确定北部走向范围。

5. 斯陵格兰姆（水平回线）电磁法测量

在伍德劳矿体上部和黑色页岩上部都作了水平回线法测量，工作频率为880和3250赫。结果表明，该块状硫化矿体是电磁法勘探的适宜目标，同相响应强，异相响应弱。响应特征表明它是典型的浅层、陡倾的极良导板状体。由于矿体的走向方向和几何形态的变化，使响应变复杂了。尽管这样，从异常仍可判定矿体的确切位置与走向。

在矿体南部的黑色页岩上，用该方法得到弱异常，反映为典型的不良导体。这表明该方法在该区可用于区分浅层极良导块状硫化矿体与浅层弱矿化的黑色页岩层。

6. 水平回线的模型实验

通过比例系数为1:1000的模型实验得到的异常与野外矿体的异常极其类似，异常大小与形状是一致的。结果表明，主要是良导矿体的浅层部分引起了所用频率的电磁响应。在伍德劳这样极良导矿体上作水平回线法，得到了有关矿体走向、长度、形状、倾角和电导率与厚度乘积等方面的信息。尽管比例模型实验花费了时间，但是它在电磁资料详细解释方面有一定的作用。

7. 大回线土拉姆电磁测量

使用ABEM双频（220赫和660赫）土拉姆2S系统。发射回线交替地铺设在矿体的两侧，在矿体上测量垂直场异常。该矿体是电磁法的良好目标，结果求出了矿体的电导率和几何形态。

8. 小回线土拉姆试验测量

在伍德劳矿体上作了30.5米边长正方形多匝发射回线的土拉姆试验工作。小回线有便于铺设等优点。测量垂直和水平场的结果表明，小回线土拉姆与大回线土拉姆方法可以同等精度来圈定矿体的特征，对于近地表块状硫化矿体更适宜用小回线法。在黑色页岩附近也作了小回线土拉姆工作，得到的异常幅值低，说明这是浅层不良导体，而与块状硫化矿异常全然不同。

9. 地面脉冲电磁法测量

使用克龙公司的PEM进行测量，在矿体上得到很大的异常，表明其电导率非常高。根据晚期取样，计算出电导率与厚度的乘积值，约为90西门子。早期取样值表明在矿体下盘附近存在高电导率体。在剖面线与矿体走向不垂直时，或矿体走向突变时，计算出的倾角就不精确。

10. 脉冲电磁测量

脉冲电磁（PEM）系统测量三个互相垂直方向上二次场的衰减，采用的是纽蒙特（Newmont）公司的系统。测量结果表明测量二次场衰减的三个分量有助于解释矿体的几何形态，因此能更明确地确定钻探目标。

PEM系统对探测和圈定矿带的位置十分灵敏。PEM系统包括发射机、接收机野外设备以及信息转换器和计算机软件这三部分。野外收录的数据，通过计算机将其编辑、显示，最后到了解释阶段。由理论模型来评价矿体电导率是其一重要优点，因为瞬时衰减率与导体规模不是无关的。这样解释时，可将目标根据其电导率进行分级，而与目标的大小无关。

11. 使用MPPO 1型仪器作的瞬变电磁试验测量和比例模型试验研究

采用苏联制造的MPPO 1型仪器作了瞬变电磁（TEM）测量，对该设备作了重大改进，改善了其稳定性。该区有电性干扰，在早期取样上测量精度受到限制，而在2.3毫秒取样时间，用200与300米方形回线普查，在伍德劳矿体上得到大的TEM异常，用20米—200米大小的回线作详查，表明矿体向西倾斜，且顶部离地表较近。从TEM资料计算出视电阻率，在矿体中心附近低于10欧姆·米，而背景值为100—500欧姆·米。

模拟矿体TEM响应的模型实验表明，在伍德劳地区MPPO 1型仪器有效勘探深度为60米。

对于寻找类似伍德劳地质环境的隐伏块状硫化物矿床，TEM是有效的勘探工具。而其成本与激发极化法及常规的电磁法测量近似。

12. 用SIROTEM作瞬变电磁测量

由联邦科学工业研究组织（CSIRO）设计和制造了一种经过改进的便携式多道TEM仪器，称为SIROTEM，在该区作了测量（图24）。结果表明该仪器改善了抗干扰能力，提高了信噪比。用晚期响应能较准确地圈定矿体位置。在黑色页岩上得到的TEM响应较弱，与

回线在矿体以外得到的响应幅值相似，不是良导的响应，故与矿体响应易于区别。

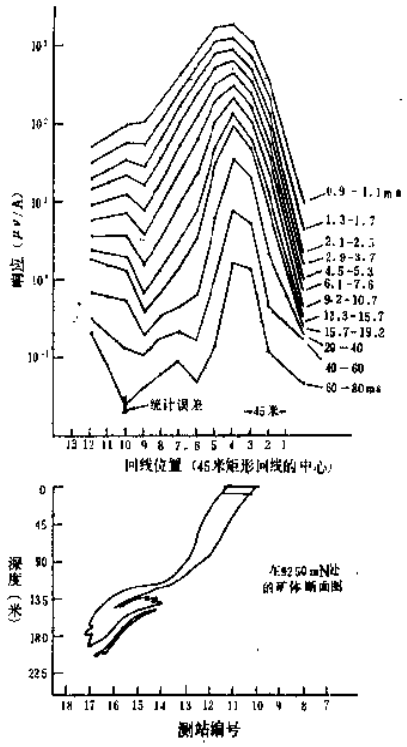


图24、伍德劳Ⅰ号瞬变电磁法剖面

七、地面电法

1。自然电位测量

在伍德劳矿体上测得的自然电位幅值为250毫伏。围绕异常的陡的电位梯度勾绘出矿体形状，还反映出倾向和埋深的变化。

黑色页岩产生的自然电位幅值与矿体上的类似，不易将它与块状硫化矿区分开来。

2。偶极—偶极排列和梯度排列的电阻率、激发极化测量

在伍德劳矿体上作了不同极距的偶极—偶极和梯度排列的频率域电阻率和激发极化测量。大部分测量工作是在通过钻探工作圈定矿体后进行的，目的是详细检查伍德劳矿床的响应，以便有助于外围地区的勘探工作。

把所圈定的电性异常与钻探得到的地质资料相比，有一些异常与矿体偏离，这是由于凝灰岩、凝灰质页岩、黑色页岩、和局部黄铁矿化等也能引起激电响应。这就要求进一步获得

地质资料，来确定激电响应的各种来源。

异常的复杂性反映了矿床的几何形态、特性、品位和矿化点分布以及矿体与围岩之间的差异。

尽管电阻率法和激发极化法能探测到象伍德劳矿体这样的一些目标，但必须细心对待，使解释工作达到更精确的水平。

3。一系列排列的电剖面法

在矿体上作了六种不同电极排列的试验：常规梯度排列、偶极—偶极、等距三极、等距三组电极排列(tripotential，即有 α排列AMNB、β排列ABMN、γ排列AMBN—译者注)、补偿单极排列以及一个供电电极打在矿体上的井地排列。使用享泰克 Mark 3 激发极化接收机测量视电阻率和时间域激电参数。

用所有的排列都测到一个明显、简单的电阻率异常，这与浅层良导块状硫化矿体是一致的。

所有排列的激电剖面都较复杂，这是由于除块状硫化矿体外，在下盘岩石中还有极化源，后者引起大的激电异常，影响了激电剖面。这种影响随着研究深度加大而增加，如反映在$n=2.3$的偶极—偶极激电剖面上和梯度排列的资料上。

时间域和频率域梯度排列的剖面对激电异常特征反映是一致的。

表 5 列出在伍德劳矿体上，用几种常规排列得到的电性响应值：

在伍德劳矿体上用几种常规排列测得的电性响应　　表 5

响应特征	梯度排列	三级排列	偶极—偶极 (n=1)	四级排列
最小的视电阻率（Ω M）	60	3.6	2	10
最小电阻率异常与背景值比	9:1	16:1	25:1	7:1
最大的激电异常（ms）	43	40	38	27
最大激电异常与背景值比	2:1	5:1	15:1	4:1

从表 5 可见，偶极—偶极排列视电阻率值最低，最接近于块状硫化物的真电阻率值。用梯度排列、三极和偶极排列得到的最大激电响应都类似。四极排列的激电异常最大幅值是梯度排列的二倍。

用等距三极排列也得到便于确定矿体边界的电阻率异常，但其异常也是复杂的。与四极排列（温纳）相比，异常值大。

使用一个供电电极打在矿体上的井地装置测量，可以得到类似三极法的剖面，可是这种排列看来对证实激电源是很有用的。

4。伍德劳地区的一次和二次瞬变激发极化效应和电磁耦合的野外研究

瞬变电压衰减曲线是用三种不同电极排列记录的，其最初的快速衰减与电磁耦合有关，衰减慢得多的一段是与地下激电效应有关。这两部分都具有指数曲线的形式，所以把瞬变电压衰减曲线分解为一系列指数函数是有意义的。把图形分解方法应用到数据上，则测得每种电极排列的衰减曲线能令人满意地至少分解为三个指数函数（每个函数包括一个幅值项A、B、与C）及一个衰减常数。衰减常数的倒数命名为张弛时间（τ_α，τ_β，τ_γ），它与幅值项一起用来对比瞬变衰减曲线（图25、26）。

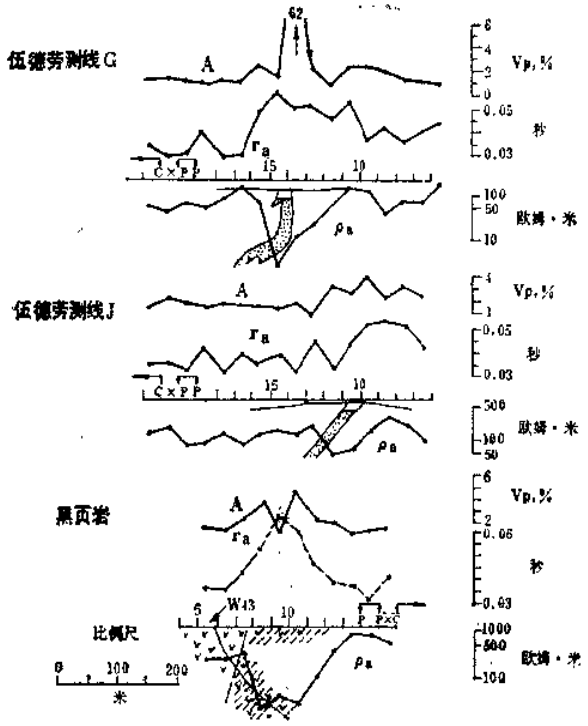


图25 三种装置的瞬变电压分量A和张弛时间γ_α

剖面上用A和γ_α参数作为第一个幂函数，表示最初的快速衰减，这一般与剩下的其它二组参数剖面是不同的。在A和γ_α剖面上的异常形态与低电阻率地区有关，这仅能用电磁耦合来作适当解释。于是认为A和γ_α参数代表伍德劳环境中瞬变电压衰减曲线的电磁耦合分量。

C和γ_γ参数代表较长时间的衰变，一般显示出所有电极排列沿剖面的十分平滑的变化，据为为代表瞬变衰减曲线的激电分量。

B和γ_β参数代表中间的幂函数，它与第一个和最后的幂函数都类似，总的看来更可能与C和γ_γ参数剖面有关。因此B和γ_β看来是包括电磁耦合和激电分量的混合参数。这些参数剖面

常常是变化不定的，要用瞬变电压衰减曲线对电磁耦合和激电效应的细微变化来解释也有困难。

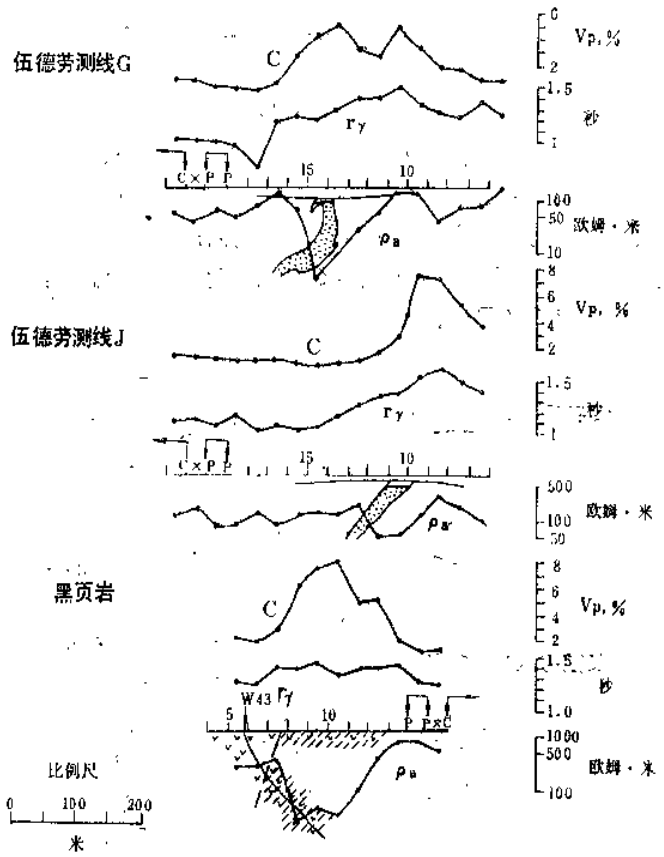


图26 三种装置的瞬变电压分量C和弛驰时期γ_γ

5。激发极化法的相位角测量和计算机模拟

低频激发极化测量结果表明，伍德劳矿体是良导可极化体。用0.13—1.0赫频率在矿体上测量，得到的相位差最大为4°，而且相位差异常与百分频率效应异常相关性很好，这表明没有重大的文化设施耦合。在所用的该频率范围内，感应耦合也最小。在所有的测线上，相位差和百分频率效应之间的线性关系很明显，而相位差值比在浸染状硫化矿上得到的要大。

用二维有限元法模拟，证实有两个主要的极化源，即矿体本身和东边断层下盘的岩石，而后一激发极化源是对极化响应起主要作用的。根据相位比看来不可能区分这些源，在黑色页岩上得到的相位角激电数据与从矿体上得到的类似，没有一种简单的方法将两者区分开。

6．磁激发极化测量

伍德劳矿体上的磁激发极化测量结果表明，归一化的一次磁场（Hn）可明显地圈定矿体上部，表明它是良导的。在矿体上磁激发极化的充电率异常与黑色页岩、弱矿化的粗玄岩和火山岩上的充电率异常是类似的。二次水平磁场（H_s）测量结果也与充电率结果类似，不能提供更多的信息。

在矿体上磁激电与电激电相比，其充电率异常在主要硫化矿体上轮廓更为明显。这主要是由于磁激电和电激电所用的供电电极排列根本不同，磁激电供电电极沿矿体走向排列，块状硫化物矿体的界限就明显。

八．地面磁法和重力以及地震折射法

地面磁测作了垂直分量和总磁场测量，都表明该矿体不是磁性体。该区的磁异常可用来圈定矿体周围出现的粗玄岩侵入体。而侵入是在矿化之后，故与矿化过程无关，所以不能把它作为寻找类似的层状火山岩矿床的磁性标志层。

地面重力在伍德劳矿体上得到的剩余重力异常为0.8毫伽，采用偏三阶趋势面方法除去了区域场影响。异常的形状和面积范围准确地反映出用钻探控制的块状硫化矿床的轮廓。

通过简单的解释求出矿体为板状，块状硫化矿就是引起异常的主要源。

估算的剩余重量为150万吨。块状硫化矿矿体的实际储量，在最初的模型中用4300公斤/立方米计算，结果偏低，后来改用3900公斤/立方米，比较接近实际储量，后者是块状硫化矿的整体平均密度。

该区还有一些小的重力异常，但是在矿体附近近地表处没有其它块状硫化矿出现。

在伍德劳矿体上方作的地震折射测量清晰地确定出块状硫化矿露头下的范围，表现为高速围岩中的低速带。对于圈定浅层、块状铅—锌硫化矿床而言，地震方法是一种很有用的辅助手段。时距曲线有独特的、明显的特征，一般在接收点和炮点位于矿体两侧时出现负的或无限的视速度。地震折射法对于区分浅层块状硫化物矿体和无经济价值的石墨良导带是一种有利的筛选异常的辅助物探方法。

九、井 中 物 探

1．充电法

应用电位法作地表和井下测量，能有效地勾绘出块状硫化矿体的轮廓，清晰地表示出钻孔剖面和地表之间的良导块状硫化物在电性上是连续的。测量结果可准确地表示出矿体形状、位置和近地表的范围，结果还证实，用井中电法测量可以预测矿体在地下的位置，甚至在远离矿体60米的钻孔，也是如此。

2. 井中电法和γ射线测量

在矿区四个勘探孔中作了电阻率、激发极化、自然电位、单点电阻和γ射线测量。

已证实，井中电阻率法、电阻法、γ放射性测量用于测定岩性和确定岩石边界是很有用的。

测井结果表明矿体与围岩之间电性差异极大。块状硫化物的百分频率效应为30%，电阻率为0.1欧姆·米，而围岩的百分频率效应从2%—10%，电阻率为10^3—10^4欧姆·米。粗玄岩是高阻的，其激电效应也比酸性岩石高得多。

化。自然电位值愈接近氧化带以下的块状硫化矿愈高。这种效应可用来探测远离钻孔处的矿

电阻率和激发极化测量表明在两个钻孔附近可能有矿化。

3. 电阻率和激发极化测井

在W276和W57两个钻孔中作了多种电极距的电阻率和激发极化测井，目的是确定**原地**的岩石电性和钻孔周围良导体延伸范围。

在W276孔测得块状硫化物**原地**电阻率低于0.1欧姆·米，而围岩的**原地**电阻率为几千欧姆·米，矿体与上盘围岩电阻率差为1:1500到1:100,000，其激发极化差为5:1。这些衬度值与实验室中的岩心测定值是一致的。

测井的结果还表明，用三极排列比用二极排列更适合于物性测井，它产生的响应幅值大，便于更逼真地估计电阻率值。

根据W57孔多极距电阻率测量得出，在185米处穿过了4.5米厚的块状硫化矿，而其范围可达到离钻孔50米处。这些结果证明，测井技术可有效地用于在单孔中估计钻孔周围的良导硫化物透镜体的延伸范围。

4. 井下电磁法测量

1975年在伍德劳矿体上使用先得利公司的DHP4固定源电磁法井中勘探系统作了野外试验。试验的目的是评价DHP4系统的探测能力，以及研究它在固体矿产勘探中应用的方针。

野外试验结果表明，其探测能力随发射机、导体和井下接收机之间的相互电磁耦合关系的不同而各异，对不同的几何位置变化相当大。在最适宜的电磁耦合条件下，探测半径在该矿体上为30米。

尽管使用DHP4在矿体上得到了响应，但试验表明该系统以其目前的形式只能作有限的应用。但是有几种因素对继续发展固定源井下方法是有利的，其内在的优点是对小的良导目标不灵敏、能得到方向方面的信息等。

刘量源、李原摘译自《Geophysical case study of the Woodlawn Orebody, New South Wales, Australia》一书，1981年

李　颖校

地球物理调查在北奥涅加地区铝土矿矿床预测和普查中的作用

在北奥涅加含铝土矿地区（COБP），早石炭纪维宪阶近海大陆沉积中的铝土矿矿层可以在作过充分地质研究的、大约1500平方公里的面积上进行探查。沿俄罗斯台坪文德—古生代沉积物和巴尔季斯克结晶地盾前里菲结晶岩之间接触带，从COБP往北和往南延伸很长的早石炭纪近海大陆沉积中含铝土矿的远景未被查明，而COБP南北侧的地质研究程度相当低。两侧早石炭纪近海大陆沉积（深至300米）的分布面积有数千平方公里（图1）。最近几年在这里计划完成中比例尺地质测量工作并在最有远景的地段普查铝土矿。

关于COБP已知铝土矿矿床的地质构造、矿床形成的特点和分布规律在一些文章中已有专述。本文将说明在地质-地球物理综合方法中地球物理调查（首先是重力测量）在预测和普查COБP两侧铝土矿矿床方面的作用。

COБP南北两侧的地球物理研究程度比地质研究程度高得多。在所述区域进行了小比例尺和中比例尺重磁测量，在个别地段作了大比例尺航磁测量详查。在许多地区还进行了地面磁测、电法勘探和放射性测量。工作经验表明，在COБP两侧，解决铝土矿矿床的预测和普查任务时航空和地面磁测的资料提供的信息比重力测量资料少得多。这可以解释为，北奥涅加铝土矿以及季赫文铝土矿实际上是无磁性的，而前维宪阶表面起伏中的含铝土矿凹地以及结晶基底中与之相应的盆地在磁场中没有反映。由于含铝土矿岩石的伽玛放射性弱（10—32微伦/小时）及其几十米厚的第四纪和古生代沉积覆盖的屏蔽影响使航空和地面放射性方法的效果也不好。

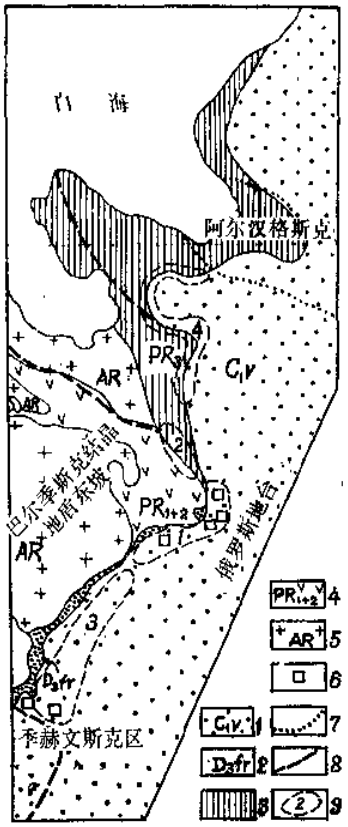


图1 北奥涅加地区的地质简图

1．早石炭纪维宪阶的近海沙-粘土沉积；2．晚泥盆纪弗兰阶红色沉积物（粘土、粉砂岩，砂岩）；3．早寒武纪巴尔季斯克系和晚元古代文德岩组瓦尔代斯克系的近海沉积（粘土、厚层泥岩、粉砂岩、砂岩）；4．早和中元古代（韦特烈内带复向斜的卡赖利阿褶皱山脉）变质火山岩和火山沉积岩；5．花岗片麻岩、角闪岩和太古代白海地块的其他最古老的结晶岩；6．北奥涅加组的沉积铝土矿矿床；7．具有第四纪沉积厚度偏大（大于150米），不利于铝土矿普查的地区；8．大的构造破碎断裂带；9．北奥涅加含铝土矿地区（1）和COБp两侧根据地质地球物理资料普查铝土矿的远景区（2—4）。

早在1950—1955年在СОБР所进行的地质地球物理工作就确定，在一定程度上继承了前里菲期结晶基底起伏的成矿前地形对于铝土矿矿层的分布具有决定性意义。同时还说明，前维宪阶地层层面中的含铝土矿岩层和含铝土矿凹地在物理场中没有反映(表1)。因此，综合地球物理调查的目的在于查明前里菲期基底起伏中的负地形，因为沉积盖层中的隐伏含铝土矿凹地可能和它相对应。应用垂直电测深法配合折射波对比剖面地震测深法能可靠的解决上述任务。地面电磁测量精度不高，只起到了辅助作用。

结晶基底起伏中凹地的参数，它与СОБР沉积盖层中的含铝土矿凹地的对应关系 表 1

凹地	平面大小(km)	面积 (km^2)	延伸程度	主要走向	前里菲期基底深度(M)
伊克辛斯克	26×(2～5)	150	13～5	北西	250—300
别烈佐夫斯克	18×(2～4)	60	9～4.5	东	350—400
瓦赫诺夫斯克	11×(2～4)	40	5.5～2.75	北东	300—400
杰尼斯拉夫斯克	5×2.5	12.5	2.0	东	25—100

西方地球物理托拉斯的工作人员为解决地质填图和构造分区问题，利用ГАК—3М，ГАК—ПТ和其他型号重力仪按通常的方法在СОБР两侧完成了中比例尺重力测量。利用这些资料来解决与预测和普查СОБР两侧铝土矿有关的问题。

根据我们测定的结果和其他作者的资料所归纳出的СОБР岩石物性值表明，结晶基底和沉积盖层的岩石有明显的密度差（表2），这为作出下面的结论提供了依据：在解决与普查铝土矿有关的任务时，重力勘探有足够多的潜在信息。

СОБР的岩石物性* 表 2

岩　石	岩石年代	磁化率 (10^{-6} CGSM)	密度** (克/厘米^3)	电阻率(欧姆·米)	纵波传播速度(公里/秒)
稍有裂隙的灰岩	晚和中石炭纪	$\frac{4}{0-30}$	$\frac{2.58}{2.42-2.70}$	120—3000	2.2—4.6
含矿层的高岭土-含铝土矿岩石	早石炭纪维宪阶	$\frac{20}{10-40}$	$\frac{2.02}{1.92-2.13}$	2—180	1.9—2.2
铝土矿矿层顶部的豆状含铁粘土		$\frac{90}{40-450}$	$\frac{2.57}{2.28-2.65}$		
粘土（带粉砂岩和砂岩夹层）	晚泥盆纪弗兰阶	$\frac{34}{0-60}$	$\frac{2.32}{2.18-2.38}$	2—280	1.8—3.5
厚层泥岩和似厚层泥岩粘土	文德期	$\frac{44}{10-80}$	$\frac{2.29}{2.20-2.38}$	10—20	2.0—3.0
砂岩，细砾岩	里菲期	$\frac{40}{5-90}$	$\frac{2.35}{2.30-2.43}$	50—100	2.5—4.0

续表 2

岩　石	岩石年代	磁化率（10^{-6} CGSM）	密度**（克/厘米³）	电阻率（欧姆·米）	纵波传播速度（公里/秒）
前里菲期基底风化壳岩石		33 10－70	2.30 2.12－2.48	11—350	3.5—4.5
辉石玢岩	中元古代	40 10－100	2.97 2.89－3.05		
苦橄玢岩		51 30－200	3.02 2.94－3.06		
基性和超基性成分的变质熔岩		28 15－70	2.82 2.72－2.88	1800—3200	
基性成分的凝灰砂岩和凝灰页岩		38 5－11	2.78 2.73－2.95		5.9—7.2
石英-绢云页岩		30 10－50	2.56 2.49－2.63		
花岗质砂岩、石英砂岩，砾岩		15 0－45	2.55 2.46－2.67		4.5—5.5
基性成分喷出岩和阳起石-绿泥页岩	早元古代	40 35－40	2.83 2.79－2.92		5.5—6.0
花岗片麻岩	太古代—早元古代	35 0－100	2.67 2.58－2.78		5.7—6.10
片麻岩（黑云母-石榴角闪石		30 0－80	2.75 2.69－2.85		5.8—6.2
角闪岩（单矿物）		20 0－100	3.01 2.95－3.12	几千—数万	6.6—7.0
侵入岩、斜长花岗岩	早、中元古代	55 10－130	2.66 2.60－2.68		5.7—6.0
角闪石化辉长岩		50 15－270	2.93 2.82－2.97	1800—14000	5.9—6.8
弱蛇纹岩化辉岩		1400 550－3300	3.07 3.98－3.15	4000—7000	6.0—7.0 5.0—6.0
蛇纹岩化橄榄岩***		4100 85－21230	2.76 2.64－2.84		
蛇纹岩（含磁铁矿4％以上）***		21000 6500－46600	2.49 2.39－2.56		4.0—5.5

*根据阿尔汉格尔斯克地方地质局、西方地球物理托辣斯，全苏勘探地球物理所，全苏地质研究所的资料。每种岩石样品数量为35至220块。在《阿尔汉格尔斯克总队》计算中心用《明斯克-32》型计算机对测定结果进行统计整理。

** 分子—岩石物理参数的算术平均值，分母－它们的变化范围。

*** 带有石墨、磁铁矿和硫化物细脉的同样岩石具有低的电阻率（几－几十欧姆·米）。

问题不是直接普查铝土矿矿层，因为含铝土矿岩石的厚度不大（在已知矿床范围内为几十米），且产于厚40至175米（图2）的第四纪和古生代岩石盖层下面，所以它对重力勘探是不利的目标。同时，高岭石—含铝土矿岩石与古生代和晚元古代砂-粘土沉积围岩的密度差不大。正是由于这些情况，重力勘探方法在СОБР普查铝土矿初期未得到有效的应用。确实，已知的СОБР铝土矿矿床在重力图上未发现有直接的反映，尽管个别铝土矿矿层在平面图上有很大的范围。

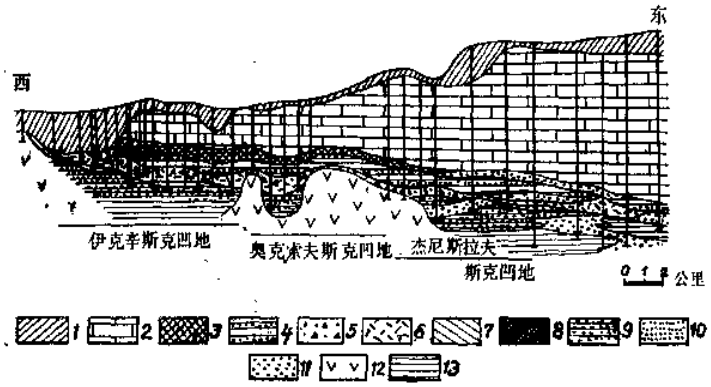


图 2 СОБР—个地段的简单地质剖面

1．第四纪砂-粘土沉积；2．石炭纪灰岩和白云石；3．早石炭纪粉砂岩和粉砂；4．维宪阶含矿层顶部的豆状含铁粘土；5．带有富铁质铝土矿大块碎屑结构的元古代结晶岩红土风化壳的坡积物；6．贫铁质铝土矿的红土风化壳的坡积—洪积物；7．高岭粘土（晚泥盆纪-早石炭纪）；8．硅铝角砾岩；9．晚泥盆纪泥质岩风化壳的云母-高岭土带；10．晚泥盆纪—早石炭纪的砂和砂岩；11．元古代富铁质铝土矿岩石的红土风化壳残积物；12．中元古代的辉绿粉岩和蛇纹岩；13．晚泥盆纪的杂色粘土。

我们把圈出的СОБР含铝土矿凹地的地段与重力场变换图—局部异常（$\Delta g_{局}$）和重力二次垂直导数Wxzz（$\partial^2 g/\partial z^2$）图(1)进行对比结果表明，几乎全部这样的地段在上述图(图3)

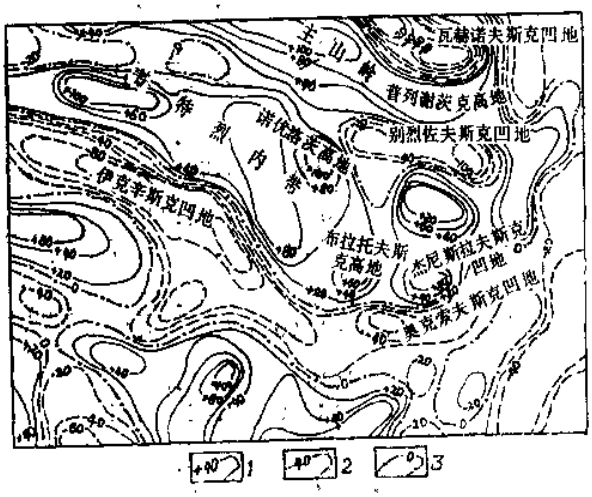


图 3 北奥涅加含铝土矿地区的重力二次垂直导数异常（Wxzz，10^{-14}CGS单位）与前里菲期基底起伏主要单元的对比图

1—3——重力二次垂直导数等值线：1—正，2—负，3—零。

（1）重力场变换图由西方地球物理托拉斯利用计算机按В.В.洛姆塔泽程序绘制。

甚至是中比例尺图上都有反映。例如最大的凹地之一——伊克辛斯克含铝土矿凹地，在平面图上与强度为－40至－80×10^{-14}CGS单位的重力二次垂直导数的负异常相重合（图3，4）。

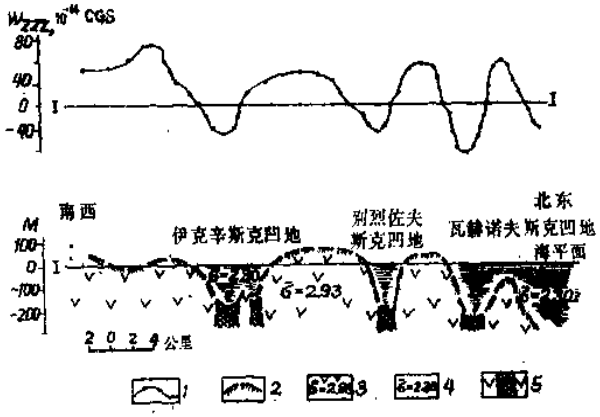


图 4 伊克辛斯克含铝土矿凹地一个地段的Wzzz负异常曲线图
1. Wzzz曲线 2. 前里菲期基底面起伏。

然而计算重力观测场和变换场所期望的异常效应表明，填充含矿层岩石的前维宪阶起伏中的含铝土矿凹地不可能引起类似于上述的重力二次垂直导数异常（在中比例尺重力测量时）。显然，负异常是由地台盖层（自晚元古代至石炭纪末）近海沉积的总影响造成的。近海沉积在前里菲期基底明显表现为构造侵蚀作用的地堑和盆地发育地段厚度偏大。正是这些地段相应于自晚元古代至早石炭纪末稳定沉积的闭塞盆地，在重力变换场的图上得到了反映。结晶基底的岩石引起次要的重力效应，一般来说，在这些地段基底岩石有很多裂隙并受蚀变作用，因此与元古代未变质的火山岩相比密度偏小（表2）。

例如，在普列谢茨克矿床的瓦赫诺夫斯克矿层所打的钻井通过全部沉积盖层后，在基底中揭露出具有约－(0.3—0.4)克/厘米^{3}负有效密度（与韦特烈内带岩系的弱蚀变火山岩相比）的页岩。

在韦特烈内含矿带的复向斜中，中元古代致密的火山岩（σ=2.87－2.95克/厘米^3）组成基底起伏中的高地（图3），在Δg局图和重力二次垂直导数异常图上同样有明显反映。最大的高地在布格重力异常图上有反映。

因此，重力观测场和变换场图除了反映结晶基底的岩石物质成分外，还反映其起伏的主要特征。在深度不大的范围内（至500米），前里菲期基底起伏本身也决定了早石炭纪地层层面起伏，即COБР成矿前起伏的主要特征。从而发现，利用现有的中比例尺重力测量图和其他地质地球物理资料有可能对COБР南北两侧作古地貌分区。因此，在预测北奥涅加和地质构造上与其相似的地区铝土矿普查远景区时，应把重力勘探归入最重要的方法之列。

根据圈出COБР含铝土矿凹地的某些地段在重力场变换图上所反映的规律性，对COБР南北两侧的地区进行了古地貌分区，并划分出对铝土矿地质地球物理详查工作最有远景的地区。研究方法如下，第一阶段先根据Δg图标出前里菲期基底面的最大高地和盆地。然后再从局部异常图和重力二次垂直导数图上所反映的盆地范围内，圈出约几十平方公里面积的Δg局和Wzzz负异常区（包括这些异常周围的局部正异常在内，图3）。第一种异常区假定与里

菲期基底的负地形相重合，第二种异常区与正地形相重合。

第二阶段再引用其他地球物理方法（主要是航空、地面磁测、电法勘探、地震勘探）和钻井及岩石物性研究资料对用上述方法划分出的异常地段进行分类，即分出与基底起伏中的凹地有关的地段和其他只由物质成分决定的地段。例如，与韦特烈内带复向斜卡累利阿褶皱火山岩和火山岩相比具有负有效密度的花岗岩类，可以引起和基底中凹地（沉积盖层的近海沉积厚度偏大的地段）同样量级的重力效应。但是在上述地区，根据综合解释标志和强度不大的负磁场（配合填图钻和岩石物性研究）可以很可靠地把花岗岩类填绘出来。

在这样圈出的结晶基底凹地地段（和与此相应的早石炭纪前地面起伏中的凹地），进行垂直电测深和低频电测深的电法扫面工作，配合少量折射波对比法地震测深（作电法勘探资料的等高线联结）工作（图5）。上述工作更加精确了按重力资料勾出的结晶基底中的盆地轮廓，建议在这些地区进行铝土矿普查工作，并布置机械岩心钻。

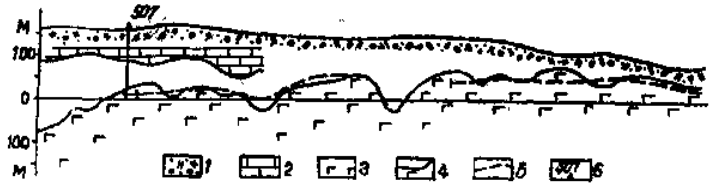


图 5　北奥涅加地区一个地段上沿低频电测深测线的示意剖面

1. 第四纪砂-粘土沉积；2. 中、晚石炭纪的碳酸盐层；3. 前里菲期基底的结晶岩；4和5，分别根据地震和低频电测深资料绘出的基底结晶岩顶部；6. 岩心钻及其编号

陈秀英译自《Геология и разведка》1979，№8，
向源富校

物探方法普查与勘探铝土矿矿床

物探方法在哈萨克斯坦、西伯利亚地台和乌拉尔含铝土矿地区获得了最广泛的发展。在北奥涅加和萨莱尔的物探工作也值得注意。

在上述地区曾发现一系列的矿床和矿化，这反映了物探方法普查铝土矿的现代方法和技术水平。在此基础上开展了新区—伏龙涅茨地块、季曼山岭、乌克兰地块、比斯克-巴尔瑙尔盆地、波利亚尔内乌拉尔、中亚及其他地区普查铝土矿的物探工作。

应用物探方法在土尔盖拗陷普查地台型铝土矿的效果最好。其工作程序如下：

1. 比例尺为1:100,000—1:200,000的航磁和重力测量，沿间距为5—6公里的测线的综合工作：地震折射波对比法、重磁观测、参数井。工作目的是作古生代基底起伏主要形态的填图，以便划分出碳酸盐岩延伸带。

2. 比例尺为1:50,000垂直电测深和1:25,000—1:10,000高精度磁测的普查工作（在

疏松层的简单地电剖面情况下应用两层电剖面法，在渐新统和始新统砂层的高阻屏蔽情况下应用重力测量）。在工作过程中研究坚硬岩石的等深线，完成碳酸盐岩和火山岩接触的详细填图，查明凹地和喀斯特，根据弱的、主要是等轴磁异常判定石质铝土矿。

在这个阶段打验证孔以证实沉陷带的存在，确定其中的白垩—早第三纪含矿层并对磁异常作出远景评价。

3. 比例尺为1:25,000垂直电测深法和1:10,000—1:5,000磁测的详查工作，目的是圈出铝土矿的远景凹地和其中的石质铝土矿矿体。

4. 打钻揭露矿体并将其移交作进一步勘探。上述一套综合工作改变测量比例尺后不仅在土尔盖拗陷普查地台型铝土矿非常有效，而且也适用于该类型铝土矿分布的其他地区。

普查地槽型铝土矿的物探工作目前在北乌拉尔含铝土矿矿区进行，做了地震剖面调查（反射波法、折射波对比法），与此同时作重磁观测。目前根据这些调查确定了该区的一般构造形态、断块构造和可开发深度上的矿层产状。乌拉尔物探人员所积累的工作经验可用于研究其他地区，首先是西伯利亚地台铝土矿和萨莱尔山岭的地槽型铝土矿。

除野外物探与地质勘探工作综合的方法外，特别是在铝土矿矿床的勘探阶段，应用了各种物探调查方法：电测井（视电阻率、自然电位、侧向测井测深），放射性测井（伽玛测井、伽玛-伽玛测井）和磁测井（磁化率测井），井径测量和井斜测量。近年来在综合方法中还包括活化测井。采用测井方法以补充钻探的不足，这首先是和疏松的成粘土质铝土矿井段的岩芯取样率低有关。利用测井可以保证获得更可靠的剖面岩石岩性、铝土矿矿层的产出深度、厚度、矿层中铝钒土含量等资料。

利用已验证的方法在含铝土矿地区的物探调查经验表明，在地质勘探所有阶段——从区域研究铝土矿的远景区至矿床勘探结束——采用这些方法是合理的，这时应严格遵守调查的阶段性。决不允许在未经较小比例尺研究过的地段，即对构造因素和深部地质结构未作应有的考虑，就进行1:10,000的物探详查。

在区域研究阶段，必要的综合方法应包括1:50,000航磁和1:200,000重力测量，目的是研究古生代基底形成的构造条件和岩石成分，1:20,000垂直电测深法用于确定疏松沉积的厚度和坚硬基底的埋藏深度。

在地台型铝土矿分布地区，应用电法勘探（电剖面、垂直电测深）和折射波法地震剖面可以非常可靠的划分和追索硅酸铝和碳酸盐岩。在土尔盖拗陷经验证的这类工作方法，包括按地震波界面速度划分含矿灰岩，作某些更详细的规定后也可用于其他的铝土矿矿省。工作结果应划分出普查远景区，即具有一定的地貌特征（地台型隆起）、保存下来的风化壳，巨大的沉陷带和卡斯特化灰岩带。

在与一定年代（泥盆纪、石炭纪）、岩性成分（灰岩、页岩）的岩石，特殊的构造条件（地槽）有关的地槽型铝土矿分布地区，综合工作中地震勘探（反射波法）应占主导地位，而在有利的地电条件下，则是电法勘探（垂直电测深、偶极电测深，建立场测深）可以补充或部分地代替地震勘探。地震和电法勘探应在重力扫面工作之前，而同时进行的是重力剖面观测。重力扫面测量应提供调查区的构造条件，以便为下一步的物探和地质勘探工作方向提出依据。

一般来说，地台型铝土矿的物探普查工作必须在含矿远景构造地段、沉陷带和含矿层范

围内进行，目的是寻找含铝土矿凹地和磁性铝土矿。这些工作适用于1:25,000—1:50,000电法勘探（垂直测深、电剖面）和1:10,000或更大比例尺的磁测。在不利的地电条件下可应用重力测量和轻便仪器的地震勘探来圈出凹地。在平原条件下应利用车载质子磁力仪完成磁测。

普查地槽型铝土矿时，可以用重力测量，地震勘探（反射波法）和电磁勘探（垂直电测深）更准确的确定构造条件。

在地台型铝土矿详查阶段（比例尺1:10,000—1:5,000），物探工作应研究凹地构造、疏松层剖面的分层和圈定石质铝土矿组成的矿层。综合工作中应包括：电法勘探（垂直电测深，1:10,000电剖面）和磁法详测（1:5,000）。

第二、第三阶段的物探工作应与验证钻和剖面的岩石取样紧密结合。钻井的主要目的是：在第二阶段确定已查明凹地剖面中的含铝土矿层，在第三阶段说明含矿远景构造（凹地、卡斯特）的地质性质和揭露矿层的磁异常。

在铝土矿矿床勘探阶段必须应用测井方法作岩性剖面的分层，划分含矿区段和确定其中的铝含量。

下面讨论物探在提高铝土矿普查的一般地质效果方面主要工作方向。在区域调查阶段综合方法中应包括地震探勘（地震反射波法、折射波对比法）。利用这种方法能获得深部构造的单解资料，因而大大提高圈定含矿远景区的可靠性。工作应从在某种程度上已确定有远景意义的地区开始，而且在这些工作之前应先研究方法的准确性、打参数井或基准井。

需要验证现有的与航磁综合的航电方法和更广泛的使用1:50,000的现代航空物探方法（包括航空伽玛能谱测量），特别是在难以通行的地区，目的是加速对这些地区的远景作出初步评价。使用航电的目的在于免去，即使是一部分，昂贵的地面垂直电测深工作。这时垂直电测深法和钻井主要用于定量评价剖面的参数和详细说明航空物探查明的构造。

可以1970年在土尔盖拗陷用频率为5000和312赫的偶极感应剖面法的航电试验工作为例（中央地质勘探所、北哈萨克斯坦地质局《专业物探》托拉斯）。肯确定，用不同频率极化场矢量的不同比值表示的异常，对应于古生代基底顶部充填有良导疏松沉积的凹地。

在普查工作阶段必须大大提高磁测的精度。

现在全苏勘探技术研究所和《哈萨克斯坦物探仪器》厂制造出质子航磁仪（АМП—7和ЯМП），保证以±2—3伽玛的精度作地磁场的总场测定，而最好的饱和式磁力仪的精度只达±7—10伽玛。这样就可以从空中记录到一般说来与含铝土矿沉积和铝土矿层有关的弱异常，也可以研究与基底结构和成分有关的较细微的磁场结构。

1969年在土尔盖拗陷用直升飞机机载的АМП—7仪所进行的方法试验工作（北哈萨克斯坦地质局和全苏勘探技术研究所）查明，从25个用测网50×20米地面测量所记录到的《矿》异常中，当从空中沿间距50米的测线、用无线电大地测量联测并以飞行速度110公里/小时进行测量时，能反映出18个异常。因此，这种测量对于圈定地面详测区是完全适用的，而且在生产效率和花费方面可以获得很大的效益。

随着苏联量子航磁仪的制造，提高了磁场的测量精度，在普查铝土矿时磁法勘探的应用范围也就大大扩大。1970年《专业物探》托拉斯在季曼用苏联科学院地磁、电离层和无线电电波传播研究所研制的铯磁力仪进行试飞，结果表明有可能圈出强度为几个伽玛的异常。

在可通行条件下，应广泛使用哈萨克斯坦勘探地球物理研究所设计的MCC磁测站进行车载测量。该站所采用的АПМ型质子磁力仪在平原测量磁场的精度为±5—7伽玛，在丘陵条件下为±10—15伽玛。上述磁测站曾在哈萨克斯坦不同地区试验过，并确定，这种测站的工作效率比同样比例尺的地面测量高7—8倍，而研究1平方公里面积的花费减少66%—70%。车载磁力仪可以和航磁测量同时并进，在平原条件下进行铝土矿详查工作。

在山区和多丘陵区徒步测量的技术水平由于现代地面质子磁力仪（在M—20仪器基础上改进的）以及量子磁力仪和梯度仪的制造而得到提高。在土尔盖铝土矿矿床上进行的量子磁力仪科研样机试验获得了成功。

在铝土矿的不同远景区应详细研究航空和地面伽玛能谱测量的可能性。1969年全苏核地球物理和地球化学研究所完成的研究表明，普里安加拉和KMA矿区的铝土矿样品比围岩样品有较高的钍、铀、镭含量和较低的钾含量。同时铝土矿的钍含量比铀、镭高，而钾含量比围岩低50%—66%。在此基础上得出结论，按偏高的钍钾比有可能圈出铝土矿。用航空伽玛能谱仪（АСГ—48测站）在普里安加拉矿床上空的初次飞行查明了改进直接发现铝土矿矿层的方法的有利前提。

确定主要类型铝土矿的物质成分与放射性辐射谱之间相关关系的工作必须继续进行，并于近期要在西伯利亚地台、土尔盖拗陷、中哈萨克斯坦、萨莱尔山岭、普里萨莱尔和一些中亚地区覆盖不厚的铝土矿远景区试验航空伽玛能谱测量。

需全面研究已掌握的航电方法（无限长电缆、旋转磁场、感应法）普查的可能性，其中包括用于按岩性成分对古生代基底分层、研究疏松沉积的分布特点和成分以及隐伏基底起伏的主要形态。在利用已知方法的同时，必须加强航电新方法和仪器的研究；中央地质勘探研究所研究的偶极感应剖面法、全苏勘探地球物理研究所的固定线框感应法和其他。

为了圈定盆地、凹地和卡斯特，划分疏松沉积剖面，研究古生代基底的构造特点应改进地面电法的一些新方法——频率测深法、电磁建立场法、超长波无线电定位法和其他方法。应该研究为意大利物探人员提出的铝土矿极化率偏高的问题，目的是确定激发极化法的普查可能性。

应该更广泛的采用大比例尺重力测量作铝土矿远景区的构造填图，研究用重力测量圈定厚层现代沉积覆盖下的凹地和卡斯特的可能性。

为了研究2—3百米剖面的构造，需要对浅层地震勘探的研制、试验和使用作出大规模的研究计划。全苏勘探地球物理研究所研究的地震连续振动方法是有前景的，1970年这种方法在KMA别尔戈罗德区开始试用于基岩图填、疏松沉积剖面的分层和含铝土矿层的划分。

这里也获得了由《专业物探》托拉斯完成的反射波法与垂直地震剖面法综合试验工作的初步结果。记录到来自覆盖结晶基底（h=450米）的灰岩顶部、基底风化壳顶部附近层位（h=540米）和推测相当于风化壳底部界面（h=600米）的清晰、对比良好的反射波。因此可以期望对这些界面作区域填图，这对准确指出钻探工作的方向是十分重要的。

由于反射波法在地槽型铝土矿的综合调查中具有主导意义，需要特别注意进一步改进这种方法以便适用于北乌拉尔铝土矿类型的复杂破碎介质的条件。将要适当的试验立体观测系统，大数量的检波器组合和爆炸组合和其他的方法手段。

研究地震声测井方法对于提高地震勘探工作在铝土矿上的效果是重要的。目的是为了获

得供地震资料解释用的剖面最佳速度参数和研究含铝土矿地区的岩石物理机械性质。

普查和勘探铝土矿时，在测井工作方面的发展前景与进一步完善活化测井有关。1958—1962年就曾证明钋一硼的活化测井适用于准确确定剖面中含铝土矿井段的埋藏深度、厚度和构造，单解地确定这些井段的矾土含量的误差为1—3%，这种方法在很多情况下应用于实际工作。

后来曾表明，两次完成的活化测井、开始用钋一硼，尔后用钋一铍源，原则上可以定量评价岩石中的高含量氧化硅，这样能可靠地区分铝土矿和具有同样高含量矾土的粘土，可以直接圈出矿层。

进一步发展用活化测井确定铝土矿的硅系数与利用井中伽玛能谱仪和中子脉冲发生器有关，全苏核地球物理和地球化学研究所、哈萨克斯坦勘探地球物理研究所进行了相应的研究工作，并在阿曼格利德矿床上获得了令人鼓舞的初步结果。应用放射性和核物理测井方法不限于只解决上述任务。完全有可能确定铝土矿矿层中氧化铁、钛的总含量、矿石密度和估算水分的含量。

提高铝土矿地质勘探工作效果的重要潜力是应用快速核物理方法分析样品。目前全苏核地球物理和地球化学研究所正研究中子活化分析铝和硅、全苏矿物原料研究所研究α活化分析铝的实用方法。第一种方法基于记录中子与铝和硅相互作用的产物，可以对矾土以1—2%的灵敏度和对氧化硅以2—3%的灵敏度确定铝和硅在50—70克重的样品中的含量（不细磨的情况）。为了应用这种方法进行工作，《地质勘探》工厂生产了《中子—2》装置（生产效率为7小时台班分析15个样品）。

第二种方法不需要厚的辐射防护。应用这种方法可以以1%灵敏度测定粉末样品中的矾土含量。用全苏矿物原料研究所生产的轻便装置《铝土矿》（生产效率一个台班分析30个样品）进行工作。在研究中子活化方法时，随着便于运输的中子发生器和X荧光法的应用，核物理方法分析铝土矿原料的可能性将大为增加。

完成上述物探工作方法与技术的改进将促使提高铝土矿矿床普查与勘探的地质效果。

陈秀英译自《Разведка и охрана недр》1971，№7，
向源富校

法莱梅铁矿区的地球物理研究

—哥多（塞内加尔）矿床的重力研究实例—

摘要：本文主要介绍1978年对哥多磁铁矿床进行重力勘探的成果。该矿床是《法莱梅铁矿区》透镜状矿体的一部分。

在简要叙述地质概况之后，回顾了圈出重力测量区的地球物理勘探工作。

然后详细地研究了应用重力测量的条件，取得的成果及其解释直到建立矿床模式，以说明所观测到的重力场和打钻的初步结果。

引　言

法莱梅磁铁矿床位于东塞内加尔区与马里和几内亚交界处，在达喀尔以东约800公里处（图1）。该地气候属撒哈拉型，有非常干热（白天温度39—46℃）季节和潮湿(或雨季)季节（气候温暖时白天温度为36—38℃），但在雨季交通很不方便。

矿床是逐步发现的。1956—1958年间，D苏勒古拉丰曾对法莱梅平原的《残山》状的巨型磁铁矿透镜体进行了槽探、坑探和钻探。由于磁铁矿中含大量黄铁矿，就放弃了找《铁矿》的目标，从1966年起转向用地球化学、土拉姆电磁法和因普特航空电磁法等寻找硫化物矿床。通过在异常上布钻，没有发现有经济价值的硫化物矿床，而是发现了厚度大、含量高的磁铁矿透镜体。

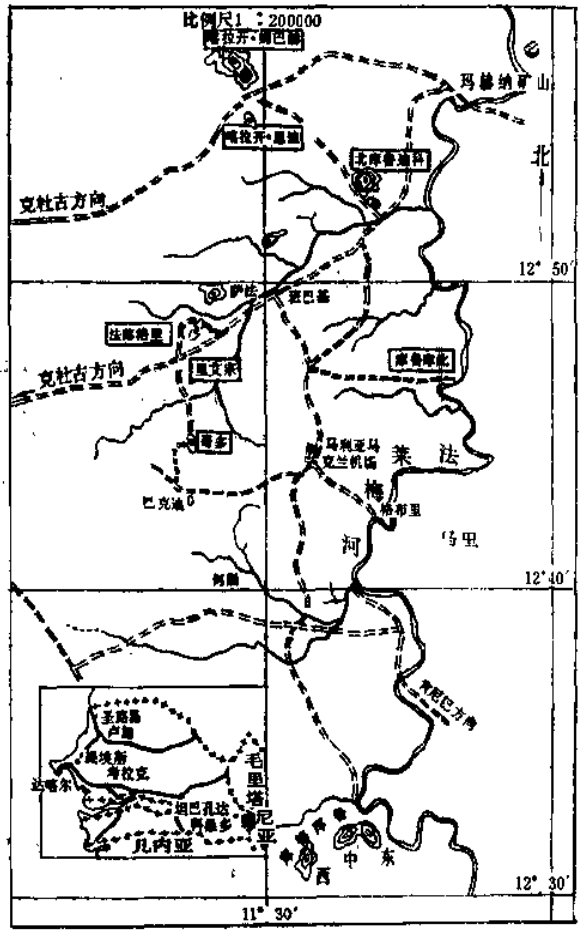


图1　研究区的地理位置图

1974年，法国地调局KRUPP公司进行了铁矿勘查工作，勘查结束后，东塞内加尔铁矿公司（MIFERSO）和地调局KRUPP公司于1975年6月签订了勘探合同。该合同包括1975—1976年和1977—1978年两个工作阶段。这里介绍的哥多矿床是第二个工作阶段进行重力勘探区，该区包括撒拉亚县班巴基村（东塞内加尔）附近四个地段。重力测量进行了三个多月，共完成约5000个测点，其中3550个主要测点的测网为50×50米和50×100米。成果的解释工作分两个阶段进行，第一阶段是野外定性解释，目的是布置勘探孔；第二阶段是在奥尔良进行定量解释，以建立哥多矿床模式和提出哥多、里艾宗和法郎嘎里三个矿床可能的储量数字。通过全部工作我们估算了哥多和法郎嘎里矿床的储量和确定了矿床分布范围，并且证明第四个地段库鲁科比没有大型铁矿体。

地 质 概 况

J. P. Bassot, F. Witschard, J. Walter和J. Chantraine 曾对法莱梅地区进行过研究。在我们工作的地区主要分布有：

——比里米阶 (birrimien) 火山沉积杂岩，

——班巴基 (Banbodij) 花岗岩体

火 山 沉 积 杂 岩

这杂岩体呈一系列近似垂直的单斜构造产出，其走向大致为北东—南西和北北东—南南西。顾名思义，它是火山成因的凝灰岩岩石和沉积岩的混合岩系，并且往往受一定的变质作用。

沉积成因的岩石有：

——绢云母片岩或黑云母片岩；

——砂质页岩层；

——钙质或硅质硬砂岩，具灰黑色和浅绿色岩相，这些非均质岩层具有明显的片理，有时含准拉斑质基性岩；

——云母大理岩出露在哥多山丘北部，这里山丘陡峻，可清楚地看到岩石的沉积成因。

中央部分的火山深成岩主要由变质喷出岩和凝灰岩（往往具有钠长斑岩相）组成。这些岩石与变质微闪长岩错综复杂地混在一起。全套岩石受轻度变形。

一些晚期基性侵入体为闪长岩或辉长岩，它们常常呈陡直的岩墙或圆形小岩体产出。

班 巴 基 花 岗 岩 体

此岩体非常复杂，总的走向为南北向，位于北部的伊里马罗和南部的马迪纳—巴佛之间。主要包括：

——辉石花岗岩；

——淡色花岗岩；

——微花岗岩岩脉；

岩体周围接触变质很发育，全部围岩层均受变质作用，形成1公里宽的变质晕圈。

含 铁 杂 岩

我们研究的对象——含铁岩层就处在上述接触变质晕范围之内。

已知的含铁岩体由厚度数米到百米以上的致密磁铁矿透镜体群组成。这些透镜体产在被微闪长岩岩脉穿插的角页岩中。富集带延伸有限，长度不到一公里或一公里。

已知的大量富集作用与含矿层的构造褶曲有关。由于构造复杂，磁异常性质很不规则，

剩磁随变质程度而异。

抗侵蚀较强矿石出露区，在山坡上堆积了大块和粉末状的磁铁矿物质，形成了厚达20米的名符其实的磁铁矿残积层。该残积层大面积盖在原地矿层之上使之难以用地质方法和磁法确定原矿床的准确位置。

最后应该指出，在某些地段硫化物的存在，使矿石的电阻率降至1欧姆·米以下。在地面详查中，正是这种电性特征使之能用土拉姆电磁法了解矿群的分布情况。

初步地球物理调查

土 拉 姆 法

方法说明：

土拉姆法是把交流电（220或660赫）通过1至5公里长的电缆供入地下，在地下产生一次电磁场，它在地下良导体中感应出涡流，涡流又产生二次电场，二次场的畸变反映这些导体的存在。

在与导线垂直的测量剖面上或在同一个剖面的两个相邻测点上测量：

①磁场垂直分量的振幅比

②两个分量之间的相位差

一台仪器由一个操作员和三个工人操作。剖面间距为100米，剖面上每个测点相距20米，一个星期可测1平方公里。

在发射导线放置适宜的条件下，这种方法可以圈出导体上部分的位置。在这种特殊情况下，土拉姆法在磁性上的优点是，不受塌落在山坡上或铁质砾岩中的磁铁矿矿块的影响；实际上用这种方法可测出唯一连续相当长的导体。

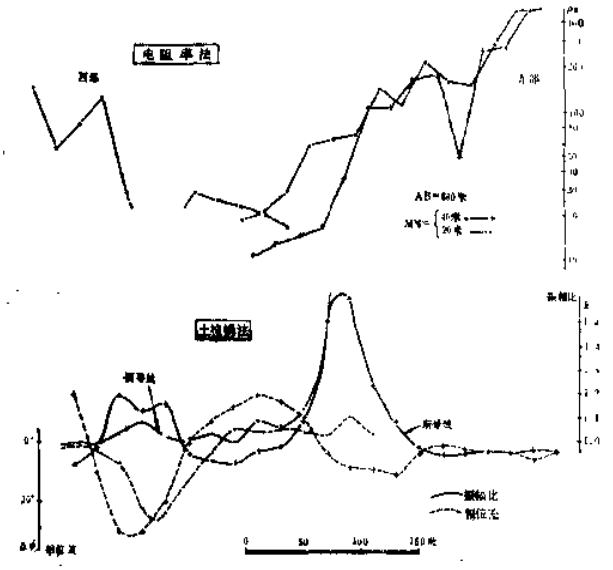


图2 哥多的土拉姆—电阻率法剖面图

测量成果

土拉姆电磁法查明了两个相距200米、近似南北向的导电带（见图2）

①西部—中等导电带，振幅比大，相位差也大，电阻率剖面证实了这一结论；

②东部—高导电带，其振幅比非常大，但相位差小；该导体的导电性之高，以致对电磁波产生屏蔽。当导体轴位于供电导线和测点

之间时，测量就不可能进行，于是我们不得不把导线依次放在该导电带的两侧，以便进行完整的测量，电阻率剖面证实这是一个低阻带。据估算导体顶部的埋深虽然各个剖面都不同，但大致在20至30米之间。

当时，铜地球化学异常的存在使我们先在此导体上布了钻，结果打穿了约100米厚的致密状磁铁矿。这是硫化物矿床勘探中的一次失败，但是，钻探结果却证实了存在着很厚的磁铁矿透镜体。

磁　法

方法原理

磁测图表明与地下不均匀磁性体直接有关的天然地球物理场是复杂的。

岩石的磁性主要来自铁磁性矿物，磁性可以是纯感应成因的，也就是与现代磁场有关。但实际情况比较复杂，因为岩石磁性还包括剩磁部分，这种剩磁是在某一地质历史时期岩石生成时获得的，这个时期的磁场可能与现代磁场明显不同。感磁和剩磁的矢量并存，在野外只能测量这两个矢量的合成矢量。在大多数情况下，感磁比剩磁重要得多，这样以来，为了尽量简化解释工作，剩磁可以忽略不计。

仪器和野外测量

质子磁力仪比老式磁针磁力仪（ABEM）和早期电子磁力仪（SHARPE）大大简化了野外操作。仪器发展的结果赢得了大量时间，使磁法成为一种易于使用、价格便宜的勘探方法。

现在用一台地质测量公司的G816型质子磁力仪，根据地形难易和点距不同，每天可完成2—8公里的剖面，这样就能快速地完成大面积测量。

采用的工作方法取决于地形条件，特别是所测的异常强度。法莱梅的异常强度特别大（数千毫微特斯拉），无需设立日变记录站或布置磁测基线，这就简化了野外工作程序。然而，由于地表存在着风化硬壳——含大量磁铁矿块的铁质砾岩，使测量受到严重干扰。

地表磁性源（崩塌的矿石、铁质砾岩和红土）的影响大小与到探测器距离的三次方成反比。当岩石的磁化率很大时，在探测线圈内产生强磁性梯度。在两次测量之间若探测器在标杆上移动数厘米，该梯度就会使测量不稳定。当提高探测器距地面的高度时就可以消除这种不稳定性。此种不稳定现象的程度如下表所示：

磁测不稳定性与探测器高度的关系

（FAR 6号钻孔，铁质砾岩的厚度为14米）　　表 1

探测器的高度	磁场值（毫微特斯拉）	稳定性（毫微特斯拉）
2.5米	36,075	±1
2.0米	36,095	±1
1.5米	36,130	±1
1.0米	36,145—36,160	±10
0.5米	35,020—35,200	±100

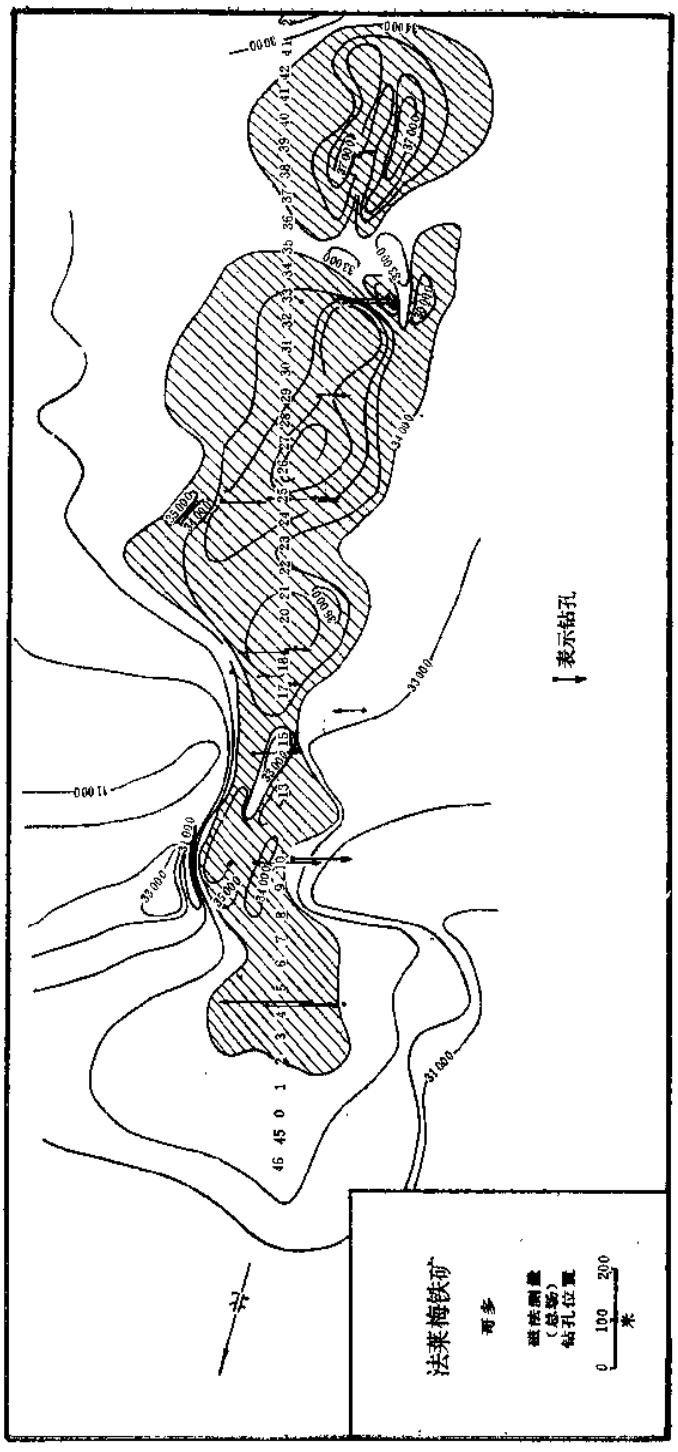


图 3 哥多的地面磁测图

在某些地带，我们发现，距地面高2.5米仍不足以取得良好的测量稳定性。然而在实测中，测量高度仍保持在2.5米，三米高的标杆，实际操作很困难。

磁性研究的目的是对矿床进行区域调查，在我们感兴趣的地段测网为100×50米。在局部地区加密了测网，但加密测网已超出普查工作范围。

成果

垂直分量的磁法初步勘探，查出了一条南北向长一公里多的强异常。在哥多（图3）用地质测量公司的G816型质子磁力仪测量总磁场结果表明，主要异常延伸1700米左右。在该异常以南，第二个椭圆形异常延伸300米。

从整体上看，磁法很有效，因为它可很快地筛选掉那些无经济意义的地区。由于磁性矿物受侵蚀作用而大量分散，这种测量方法不能很准确地圈出矿床。在东塞内加尔区，由于纬度低和构造呈南北向，使得磁法解释更加困难。

在磁测的同时，还打了第一批钻孔，因而很快验证了磁测结果。两种资料对比结果，查明了以下两个极重要的事实：

①磁异常的横向和纵向范围都丝毫反映不出矿化体的厚度；

②在12个勘探地段中，只有两个地段（哥多和法郎嘎里）可能具有工业价值。

取得这些成果之后，决定进行重力勘探，确定哥多和法郎嘎里矿床的形状，以便尽可能准确地布置第二批钻孔。

重 力 勘 探

概 论

方法的原理

重力场是由万有引力产生的，大家知道，如果让物体在真空中降落，则该物体的加速度为980厘米/秒^2。这种加速度是地球引力作用在该物体上产生的。按定义重力加速度g的方向与地球表面垂直。组成地壳的岩石密度越大或越小，重力加速度也越大或越小，此外重力加速度也取决于地形的高程和环境以及测点的纬度。

重力的强度单位是伽或是厘米/秒^2。实际应用的重力单位是毫伽。

仪器

测量工作是用两台MASTER型渥尔登重力仪。该仪器中，包括弹簧在内的全套可活动装置都是由熔化的石英制成的，不易受气温变化的影响。为了改善其精度和限制温漂，仪器密封在杜瓦瓶里，其恒温严格地保持在27°到32℃之间。标定仪器的温度系数，使我们能在保证仪器读数精度的条件下确定最大允许的温度变化为±3℃，在各剖面上，温度变化都保持在这个范围以内，以免温差过大无法进行闭合补偿。当温度变化特别大时，测剖面的延续时间要缩短到预先规定的范围以内。

施 工 方 法

地形测量

由于重力测量的精度主要与测点的高程精度有关，重力测量应当具备完整的地形测量资料，然后进行精确的地形水准测量（根据预计异常的强度，其精度可为1厘米或5厘米）。

仪器定位使用了WILDT I 经纬仪，根据地形坡度的不同，水准测量采用了经纬仪或自动水准仪。

地形测量工作可在重力勘探之前或勘探期间进行，但决不可在其后进行，否则测网就是随机的。

重力测量

测量工作分为两个主要阶段

（一）初步阶段

此阶段进行的全部工作是收集信息，为了很好地了解其意义，我们需要回顾一下重力测量的原理。

4.1节简述了重力法的原理，野外仪器是相对重力仪，也就是只测两个点之间的重力差。准备阶段的目的有三：

1）把一个已知点的g值引入到我们的工作区里；

2）布置重力基点网，把全部测点都联到基线上；

3）在校准基点上定期校正仪器，保证全部工作的精确度。

在实际工作中，一般是按建立基准点、联测和基点网的顺序进行工作。

·基准点

基准点由两个重力测点组成。在这两个重力测点之间进行往返数次的标准测定（最好用两台仪器）以便确定精度最高的g值。一个好的基准点应符合以下标准：

——g值大；

——两测点间的距离短；

——公路状况良好；

——地面稳固（碎石路、水泥制成的里程碑…）

在我们查阅了塞内加尔重力勘探图（法国海外科学技术研究局编）之后发现路加(LOUGA)异常（在圣路易南80公里处）条件最好，因为该异常强（大于45毫伽），测点间距离短（10公里），公路（柏油公路）交通极为方便。

经过两台仪器往返测量四次和利用测量队出发前在法国测得的校准系数，获得该基点的数值是50.10±0.03毫伽。

·联测

联测的目的是把已知点的重力值引进测区。这里的g值是从达喀尔—尤佛机场引进的，依次经汤巴古达和克杜古，最后引到法郎嘎里主要基点。

联测结果都表示在1971年国际重力基点网（I. G. S. N.）系统中，参考基点是达喀尔—尤佛R点。

·基点网

为了尽量减少工作区内部的路程，建立了基点网。作为测量剖面的起点和终点。基点的数目和位置主要取决于工作区的地形特征。这样建立的基点网应有足够的密度，使得剖面的开始或闭合的时间不超过10至15分钟。

该基点网是在法郎嘎里主要基点和辅助基点之间经过数次往返测量而建立的，这样，我们就可得到全部测点的g值。

（二）主要阶段

该阶段是完成全部测点的测量。

重力测量是在经过精度达到厘米级的水准测量点上作的。

测点的测量一般按以下次序进行：

——在基点上开始测量；

——测点测量45分钟；

——返回基点前，复测15分钟（每个剖面选2—3个点）；

——从开始测量到基点闭合时间约60分钟。

然后，在上午6点到9点（气温稳定），剖面测量可持续80分钟，如果气温变化非常大则应缩短到45分钟。

除了测点测量外，还要进行重复测量。重测点均系剖面测量结束时系统取的，以便能检查测量结果的精度和发现仪器的异常性状（温漂、粘摆…）。每个测区的重复测点占15%左右。此外，在计算异常时对异常值有畸变的点进行了系统的重测。这些点是在测区工作完成之后进行重测的。

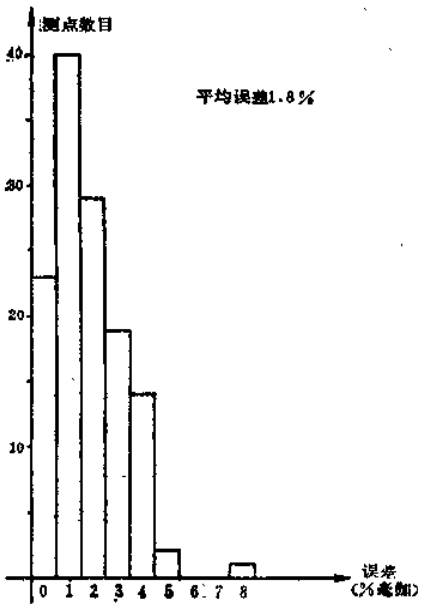


图4 测点误差分布

尽管地形复杂，渥尔登重力仪相对误差较大，但仍遵守了这些严格的条件，因而有可能取得好的成果，其成果质量已由重测误差非常小所证实（图4）。

数 据 处 理

全部计算和校正（不包括地形校正）工作直至布格异常的初步成图都是在野外完成的。这样做可以随时发现和校正有疑问的测点，并可根据测得的结果修改工作计划。

重力异常的计算公式如下：

$$A = g - g_0 + (0.3086 - 0.0419d)\,Z + CT$$

（公式1）

g＝实测重力值（毫伽）；

g_0＝随测点纬度变化的重力理论值（毫伽）；

d＝用于计算的表层密度；

Z＝测点高程（米）；

CT＝地形校正（毫伽）.

·密度

由于表层密度影响布格异常的计算，所以准确地确定密度十分重要，以便更好地补偿地形影响。后面（4．4节）将深入研究密度问题。

·异常精度的确定

各布格异常点的误差取决于公式1中每一项的精度：

——g的误差约为0.05毫伽；

——Z的10厘米的误差产生0.02毫伽的误差；

——测点定位误差对g_0影响很小；

——地形校正误差的上限约为0.03毫伽；

——A的总误差约为0.1毫伽。

地 层 密 度

地层密度是在样品上直接测定和用重力方法确定的。

样品的测定

我们对哥多GOT16号孔，GOT17号孔和GOT26号孔取出的72个样品进行了密度测定，其测定结果依次如下（表2）：

——未变质的矿石	4.1
——氧化矿石	3.5
——硫化物浸染角岩	3.1
——角闪岩	2.8
——云母大理岩	2.65
——蚀变花岗岩	2.5
——粘土	1.6

哥多样品的密度测定 **表2**

岩性	取样地点	测得密度	平均密度
云母大理岩	GOT16 53.20m	2.6 2.6 2.7 2.6 2,6	2.6
	GOT16 55.75m	2.6 2.7 2.6 2.7 2.7	2.7
	GOT16 50.80m	2.7 2.7 2.7 2.7	2.7 2.65
长石角闪岩	GOT16 47.40m	2.9 2.7 2.9	2.8
		2.8 2.7 2.8	
		2.7	2.8
蚀变矿石	GOT16 36m	4.3 3.9 3.7	4.0
	GOT16 33.05m	3.0 3.0	3.0 3.5

续表 2 — 1

岩性	取样地点	测得密度	平均密度	
致密矿石	GOT16 39.15m	3.9 4.0 4.0	4.0	
	〃 〃 39.55m	4.0 3.7 3.6 3.9	3.8	
	〃 〃 40.80m	4.2 3.8 4.0 4.1 4.4 4.3	4.1	
	〃 〃 44.05m	3.7 3.9 3.9	3.8	
	〃 〃 44.35m	3.8 5.3 4.2	4.4	
	〃 〃 47.10m	4.3 3.5 4.2	4.0	
	〃 〃 50.15m	4.4 4.4 4.4 4.3	4.4	4.1
粘土	GOT17 14.90m	1.5	1.5	
	GOT17 17.40m	1.5	1.5	
	〃 〃 20.95m	1.5 1.7	1.6	
	〃 〃 23.95m	1.9	1.9	1.6
蚀变花岗岩	GOT17 27.05m	2.4	2.4	
	〃 〃 28.50m	2.8	2.3	
	〃 〃 30.10m	2.4	2.4	
	〃 〃 31.65m	2.6 2.6	2.6	
	〃 〃 33.20m	2.6 2.6	2.6	2.5
硫化物浸染角岩	GOT26 42.40m	3.08	3.08	
	〃 〃 56.70m	3.52	3.52	
	〃 〃 81.30m	3.04	3.09	
	〃 〃 88.15m	2.68	2.68	
	〃 〃 110.20m	2.84	2.84	
	〃 〃 118.70m	3.71	3.71	
	〃 〃 166.60m	2.96	2.96	
	〃 〃 194.50m	2.66	2.66	3.1

粘土的密度值不具有代表意义，因为样品从取样到密度测定经过极强的干化作用。密度测定结果表明，仅就重力测量结果很难区分出角岩中的氧化矿石，角闪岩中的角岩，云母大理石中的角闪岩和花岗岩中的云母大理岩。但是，未受氧化或氧化的矿石与由云母大理岩，角岩或花岗岩组成的围岩却可明确地区分开。

重力测量结果

重力测量可用于确定地层的总平均密度。其方法有三点法和内特尔顿(Nettleton)法。由于三点法的位置往往是任意选择的；我们主张使用时间较长、但较准确的内特尔顿法。

内特尔顿法的原理简单易懂，我们知道（公式Ⅰ）重力异常的表示式如：

$$A = g - g_0 + (0.3086 - 0.0419d) \times Z + CT$$

在式中中项由两项组成：高程校正值0.03086Z，用它把测点统一到标准点的同一高程；布格校正值 0.0419dZ（测点和标准点之间的地层密度已考虑在内）。

由此可以看出，如果异常A采用各种不同密度值计算，那么所用的数值就有个选择问题。实际上如果所取的d值很小则0.0419dZ项将变小，地改值就会过大；反之，d值很大，则0.0419dZ 项的值就很大，则地改值会过小，在表层密度无横向变化时，特定密度对地改值无任何影响。

这种方法的应用条件有二：第一工作区必须是谷地或山丘，因为该方法不适用于平坦的地形（而如果地形起伏不大，则布格校正值几乎是个常数，甚至校正值不准确也不会给后来工作带来困难）；第二，计算剖面应离开地质干扰引起的异常。

在哥多丘陵地区用该方法表明（图5），在密度取2.5和2.6时，强异常反映在山丘的顶部，而在密度取2.8和2.9时，反而在同一山丘顶部的铅垂方向上出现弱异常。因此，相当下伏地层平均密度的最佳密度是 2.7。这就是以后计算时要采用的密度值，以更好地减少地形影响。

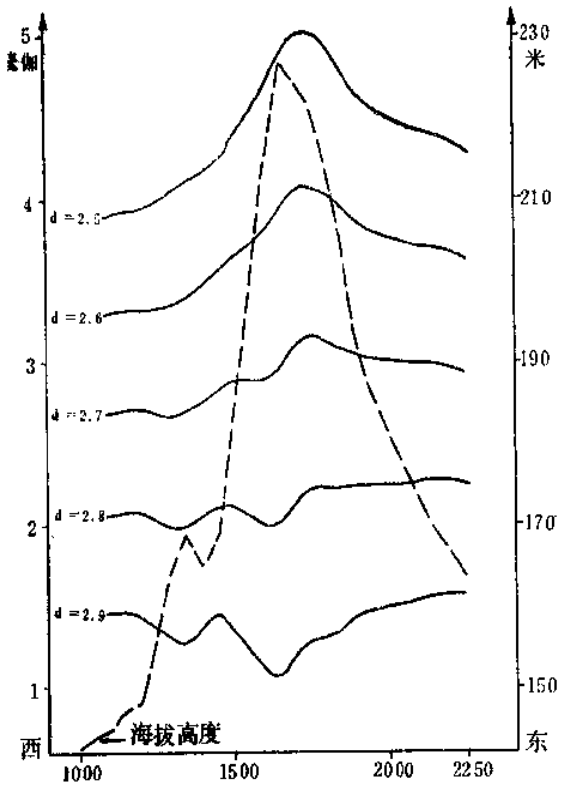


图 5　哥多内特尔顿法（Nettleton）剖面

成　果

布格异常

这是重力异常解释的基础图件。概括地说，正异常位于密度大的物体的铅垂方向上，负异常位于密度小的物体的铅垂方向上，梯度带介于正负异常带之间。

在哥多地区通过布格异常图可划出三个（Ⅰ—Ⅲ）大单元。其划分情况如图 6 所示。

东Ⅰ区，平均重力值为29.5毫伽，相当角岩和微闪长岩（强变质岩石），在南部（ⅠB）该区极其平缓，仅有数个低缓异常（零点几毫伽），对我们的调查没有多大意义，在北部（ⅠA）该区反而受中心带远距离的影响，其表现为一条比较规律的梯度带。这里还可圈出几个小的弱异常，但意义不大。

中Ⅱ区，异常强度约3毫伽，沿南北方向延伸，其宽度向南逐步减小。该带异常断续出现，被北北东—南南西向的基底断层分成八个部分（图 6）。

——北部B带重力异常最大是已知最长的矿化带。比其他异常强且宽的异常，反映存在着大密度体，其规模为200×400米。在异常的中心处，该物体的埋深最浅，向南埋深慢慢增

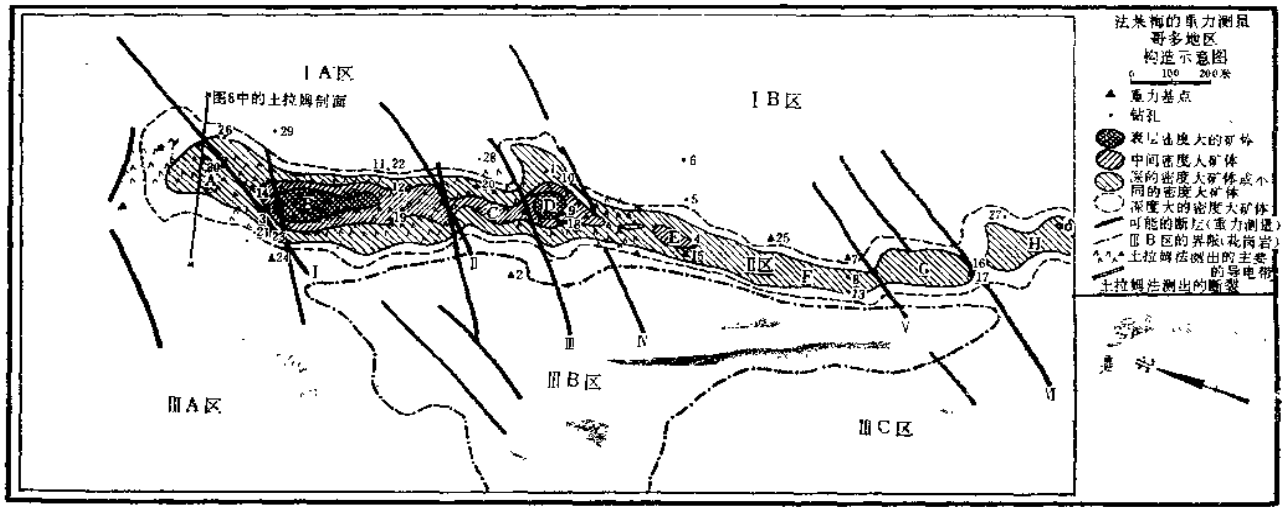

ⅠA区
图8中的土拉姆剖面
ⅠB区
ⅡA区
ⅡB区
ⅡC区
法莱梅的重力测量
哥多地区
构造示意图
0 100 200米
重力基点
钻孔
表层密度大的矿体
中间密度大矿体
深处的密度大矿体或不同的密度大矿体
深度大的密度大矿体
可能的断层(重力测量)
ⅡB区的界限(花岗岩)
土拉姆法测出的主要的导电带
土拉姆法测出的断裂

图 6　哥多的构造示意图

大，而向北埋深增大比较快。

——在B带以北A带与B带被北北东—南南西向的断层所隔，其原因有两种不同的解释：矿化体的埋深变大或者岩性变化。重力测量本身仍不能肯定那种解释是正确的。因此，在这里打了两个勘探钻孔，其结果表明，哥多矿床北部以断层为界，下陷很快。这就证实了重力测量结果（第一种解释）。

——C带是过渡带，其特点是矿化体变薄同时可能埋深加大。

——D带仅次于主矿体，是最重要的地带，该带和其它带一样，以北北东—南南西向的两个基底断层（断裂Ⅱ和Ⅳ）为界。其构造形态非常特殊，实际上在该带的东部，初看上去异常明显，人们不禁要问，难道这里就没有任何大密度物质（磁铁矿？浸入角岩？硫化物？）《充填》吗？

——E带和F带和C带一样是过渡带，在过渡带内大密度体向南逐步变薄。

——尽管G带和H带的特征与E、F带相似，但有两个特征：第一，北北东—南南西向的规模巨大的断层，其断距在大密度体的东部非常明显，此断距分两段，在F和G之间（断层Ⅴ）为50米，在G和H之间（断层Ⅵ）约为75米。区别此带与其他带的第二个特征是从大密度体的断层Ⅴ开始，该带变宽，而大密度体以北开始逐步变薄。

西Ⅲ区，平均重力值为27.5毫伽，相当于比角闪岩（d=2.8）和浸染角岩（d=3.1）轻的云母大理岩（d=2.65）。该区不如Ⅰ区均匀，Ⅰ区中，北部和南部截然不同，北部受梯度带干扰，而南部则未受干扰，该带的特点是中央部分有一个广阔的弱异常，其强度可达1毫伽。由于在南部的GOT17号钻孔中发现了蚀变很深的轻花岗岩（密度为2.5），我们推测，这里存在着被云母大理岩包围的花岗岩岩体（ⅢB区）。

总之，通过布格异常图的构造解释，我们查明了具有不同岩层的一些区。然而，根据这种图两种岩层的接触带却往往难以确定，并且往往表现为一条或宽或窄的梯度带，而岩层接触带就在其中。为确定接触带的准确位置，我们进行一定的数据转换，其目的是对准重力源。

转换图

在重力测量中可进行三种类型的转换即剩余异常计算、垂直梯度计算或延拓计算。数据计算和图的绘制是用IBM370/135计算机通过地调局研制的方法自动完成的。

（一）剩余异常图

剩余异常图即从观测的总异常中减去区域异常的异常图。这种转换只有在区域背景场已经了解的情况下才有意义，而当区域性变化与难以确定的源有关时就不能进行转换。剩余异常图的优越性就在于能更好地显示出弱异常和准确地圈出强异常的位置。

在我们的工区中，区域性变化与角岩、微闪长岩和云母大理岩之接触带有关。因此不可能对全区进行剩余异常计算。

在哥多我们没有进行剩余异常计算，只在矿床模拟计算时，我们加上一个已知密度可对比的厚板，以便产生一个与云母大理岩—角岩接触带相同的效应。

（二）不同高程的垂直梯度图

垂直梯度可以扩大接触带附近的异常等值线间距，进而准确地圈定构造。由于同时放大了各种干扰因素（测量误差，无意义的地表构造……）的影响，因此，对所得资料进行滤波

是很必要的。通过把滤波因子引入计算的方法可直接进行滤波，或者把垂直梯度图延拓到不同高度。延拓图和地表高程图通常是同时自动给出来的，绘制这些图的目的是要逐步消除无勘探意义的小型地表源的影响。

在研究成果之前，应当首先明确垂直重力梯度图解释的某些要点。实际上，梯度异常的解释不同于重力异常的解释。在重力异常图上负异常相当密度小的岩体，正异常相当密度大的岩体。在梯度上应有较多的细微差别，因为转换有时产生重力场内不存在的偶极性。当然，在布格图上查明的高异常或低异常仍然存在。另外却出现一些截然不同的信号的侧向干扰。图7示出一些呈垂直梯度的理论异常，它们是用向下无限延伸和倾斜不同的岩脉计算的。从图上可立即看出，这种偶极性取决于岩脉的倾斜度。当岩脉的密度大于围岩时，一条直立岩脉引起简单的正异常，而当岩脉的密度小于围岩时，则为负异常。当岩脉倾斜时，偶极性就出现，并随岩脉的倾斜度而加剧。至少视为水平岩脉的断层可反映出最大值和最小值对称曲线。

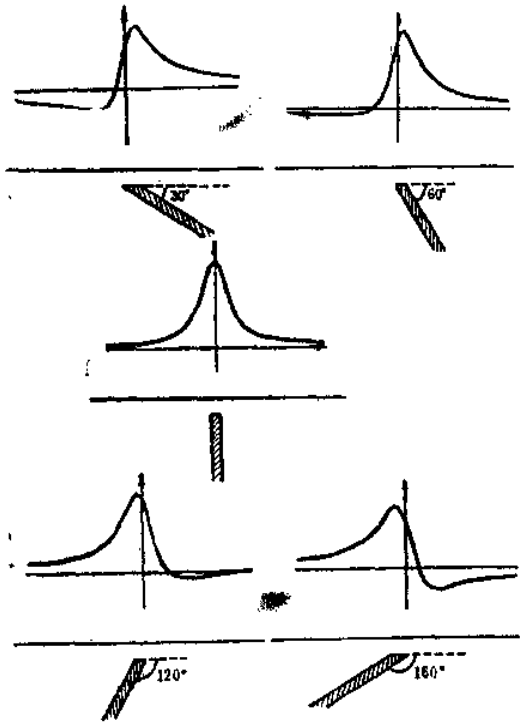


图 7 一条矿脉的重力垂直梯度异常

借助上延25米和50米的垂直梯度图我们可相当准确地确定矿化体的深部产状。在矿体中我们相继分出了四条同心状晕带（图6）：

——内带，这里的高异常肯定是由浅部磁铁矿引起的，也就是说磁铁矿几乎出露，只被地表风化薄层或崩塌物所覆盖；

——中间带，这里的异常仍是磁铁矿引起的，但埋藏深度较大；

——外带或（和）深部带，鉴于异常弱，形态变化小，该异常可有三种不同的解释：浅层薄而密度大的矿体；深而厚的密度大的矿体；基底内岩类分异作用（例如浸染状角岩）。只有布置控制钻才能弄清哪一种解释是正确的；

——边缘带，这里的异常比上面各带的异常还要弱，对研究磁铁矿无意义。

延拓25米和50米的垂直梯度图，可用于准确地圈出布格异常和地表高程梯度图发现的北北东—南南西断裂网的位置，但准确地确定其位置却很难。延拓50米的图终于查明了上述构造向深部延伸的情况，特别是证实了ⅢB区的花岗岩和G、H处弱矿化带的存在（很可能是受磁铁矿浸染的角岩）。

储量计算

根据各种方法圈定的重力异常，可以直接计算出引起该异常的矿体总量。实际上，人们可以发现，即使矿体总量已经确定（根据已知区域场的假说），但矿体的分布还是不确切。

计算按 J.戈盖尔（1955年）提出的方法（面积分）进行。用这种计算方法根据重力数据

可算出任一形状矿体的储量。但是由于矿石和围岩的不均匀性以及这两者密度的变化，使得精度受到限制。

第二种计算方法比较快但精度差，可用于形状简单的接近水平的柱状矿体，在此种情况下，可用下面的公式算出储量：

$$T=\left[\frac{\Delta g_m \times h \times 10^3 \times d_2}{6.67 \times 2(d_2-d_1)\times 1000}\right]$$

其中 T = 储量（单位：千吨/米）

Δg_m = 异常的总幅度值（毫伽）

h = 柱状体中心的埋深（米）（当柱状体的中心深度等于半异常幅度的宽度一半）。

d_2 = 矿石的密度

d_1 = 围岩的密度

在实际工作中，只需切取几条垂直异常的剖面，确定每条剖面上的柱状体中心埋深和异常值（与区域有关的）以及矿石和围岩的密度。选择剖面时应当考虑矿床宽度的变化。矿体总储量等于每段每米矿石吨数乘以段长，再加上其它各段的计算结果。

象第一种方法一样，最终成果的精度，取决于岩层均匀性和密度的变化以及矿体形状的变化。由于哥多矿体形状简单，计算结果：地表矿为7,000万吨，深部矿为1亿3千万吨，即从0到300米矿石总量为2亿吨。按P.玛鲁若用地质数据对该段进行计算结果是1亿9千1百万吨。

模型计算

野外实测和数据处理后编制了布格异常图，该图就均匀层状岩层的理论模型而言，提供了以毫伽为单位的，与地下非均匀性有关的重力场分布。直接解释布格异常图所得的定性资料不能满足建立矿床模型的需要，因此，需要用转换图进行计算，特别是需要用模型进行计算，因为模型能提供异常所反映的矿体大致形状。我们之所以说矿体形状是大致的，因为只了解地表重力场不足以确定深部矿体的分布，因为矿体分布与矿体和围岩之间的密度差有关。但是由于这里有许多钻孔资料，因此确定模型非常方便。

为了简化模型的解释和计算工作，我们按密度分别考虑了各种体积的地层以及它是否覆盖在矿体之上，整个异常将很容易确定，因为在相同的情况下，总异常等于各个单个地质体引起的异常之和。

长期以来，人们想通过模型解释获得与密度差相关的地质体可能埋深和引起实测场的场源。为了实现这样的计算，假设场源的周围岩石形状简单，则求出模型更接近实测场值的埋深值和密度值。在哥多，当地球物理工作者能够通过定量测定提供许多深度值时，就可以进行反演计算。这样，就有可能通过密度与已知深度的相关关系用几个点圈出完整的地下地质体形状。因为模型有局限性，显然这种方法也有局限性，这种局限性是由于对下部情况了解不够所致。实际上，由于下部的情况在观测场中反映很弱，用下部的原始数据确定下部岩层的精度远远低于上部岩层的精度。因此在岩墙处最终模型的精度很有限。

在实际工作中，我们按下面的方式对等量模型进行了计算：消除角岩—云母大理岩的接触效应的影响，模型的建立，最终模型的计算，模型的绘制和成果的讨论。

消除角岩—云母大理岩的接触效应的影响

角岩按其中浸染的磁铁矿多少密度为2.9～3.5，云母大理岩的密度为2.7，这两种岩层之间的接触带将是一条极不利于解释工作的重力梯度带，因为该梯度带位于矿体的西侧。在模型的各种计算工作之前首先要估计接触带的影响并消除之。

为此，在矿体模型的计算中，加入了形状简单，相当角岩—云母大理岩接触带效应的第二个模型的效应，于是在最终剖面上出现了一个在基底上的补充单元（图10）。

为了估算这个单元的几何形状，需要在剖面上予先计算接触带效应，其计算方法如下：

——绘制穿过接触带的验证剖面，如有可能在矿化带以外进行；

——在验证剖面上计算角岩和云母大理岩的区域平均标高；

——确定一个或几个代表接触效应的典型剖面；

——在验证剖面上圈出角岩—云母大理岩接触带；

——按上面确定的标准曲线来确定其它剖面上的接触带位置。这一做法不很精确，因为它是把一条标准曲线与一条实测曲线进行对比，而这种接触带的异常往往被由磁铁矿引起的强度比它大两倍的异常所掩盖，因此用此法圈出的接触带位置虽是合理的，但不够准确。

模型的建立（二度模型的计算）

此项工作的出发点是根据钻孔数据绘制矿床的顶板和底板的等深线图，并参照重力测量对钻孔数据进行内插。这项工作表面看来简单，实际上是很复杂的，因为在同一条剖面上底板和顶板的概念不明确，特别是当主矿体被断成规模不同的许多透镜体时更是如此。

在哥多，人们把底板简化成为大约向北250米，向南150米的南北向斜面。

然后我们用塔尔瓦尼(Talwani)程序对十来条剖面进行模拟计算，并把每次计算结果与相应的剖面进行对比。若拟合不好，则参照钻孔数据改变密度和底板及顶板埋深等参数再进行计算，经多次计算对比，以求得最佳拟合，即理论曲线与实测曲线之偏差最小，从而获得令人满意的密度值。这些计算以及后面的计算都是在IBM 370/135计算机上进行的。

三度模型计算

如同剖面的计算方法一样，三度体模型的计算分两部分：先计算模型的底板，然后计算其顶板。先把底板和顶板的等深线图输入到计算机中，然后计算底板引起的重力场和顶板引起的重力场，并把这两者相加。

把获得的重力场当作总场，然后计算剩余值，这就可自动得出模型顶板的校正值。

把经过校正的模型再输到计算机中去，就可以得到一新的剩余值，这样一直进行到剩余值很小和《对所研究的源是任意的》时为止。

图8系哥多模型透视图，图9系顶板等深图。

模型的绘制和结论

数字计算完毕后，输出成果图并相继绘制出：

——模型透视图（图8）；

——计算模型的重力场图；

——实测重力场与模型重力场之差的剩余异常图；

——模型顶板等深线图（图9），相当于解释开始确定的底板图。

结论都扼要地表示在地质和地球物理对比剖面(包括模型的地形剖面，模型形成的异常，

剩余值和钻孔剖面)上。图10a和b系这些综合剖面的几个实例。为简化计算，矿体底板被认为是介于深150米（6350剖面）和250米（5600剖面）之间的一个平面。剩余异常曲线表明，除一种情况外，在使用比较简单的模型时几乎全部重力数据均考虑在内。对于6750剖面则相反，计算之后存在着一个不可忽略的剩余值。在靠近地表加上一个球形重物体时，剩余值就可被补偿。这样的模型显然不会使地质工作者满意。不管怎样，这说明所选的模型，所用的矿化母岩均匀性和密度变化已不再适用。这在地质上是很好解释的：地表密度大的物质相当于地表附近的受磁铁矿浸染的角岩透镜体。一个倾斜很大的含铁岩层也能引起这类反应。

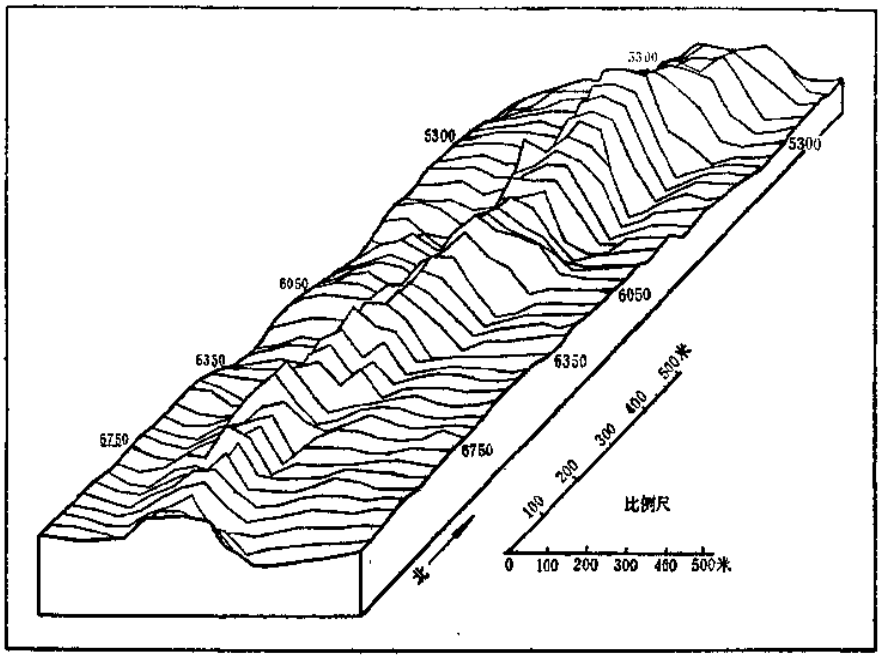


图 8 哥多的模型透视图

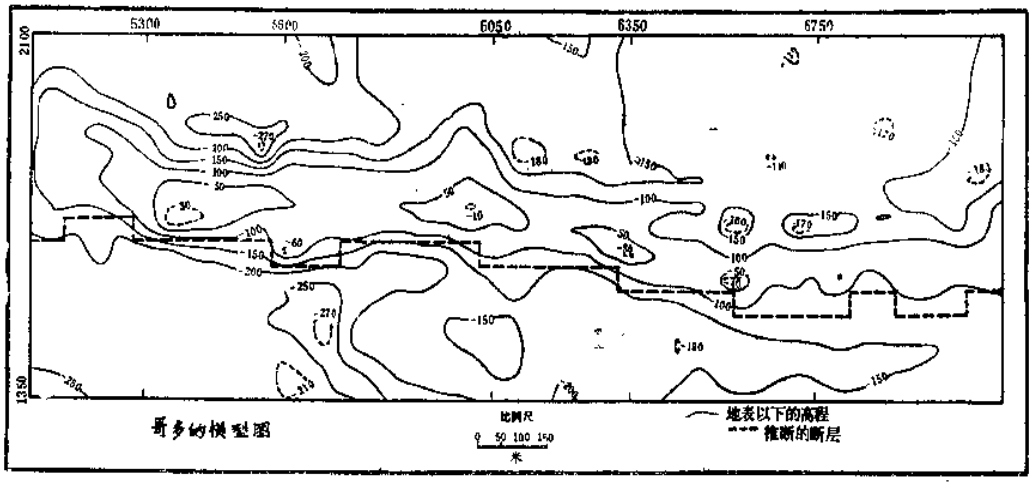


图 9 哥多一矿床模型顶板等深线图

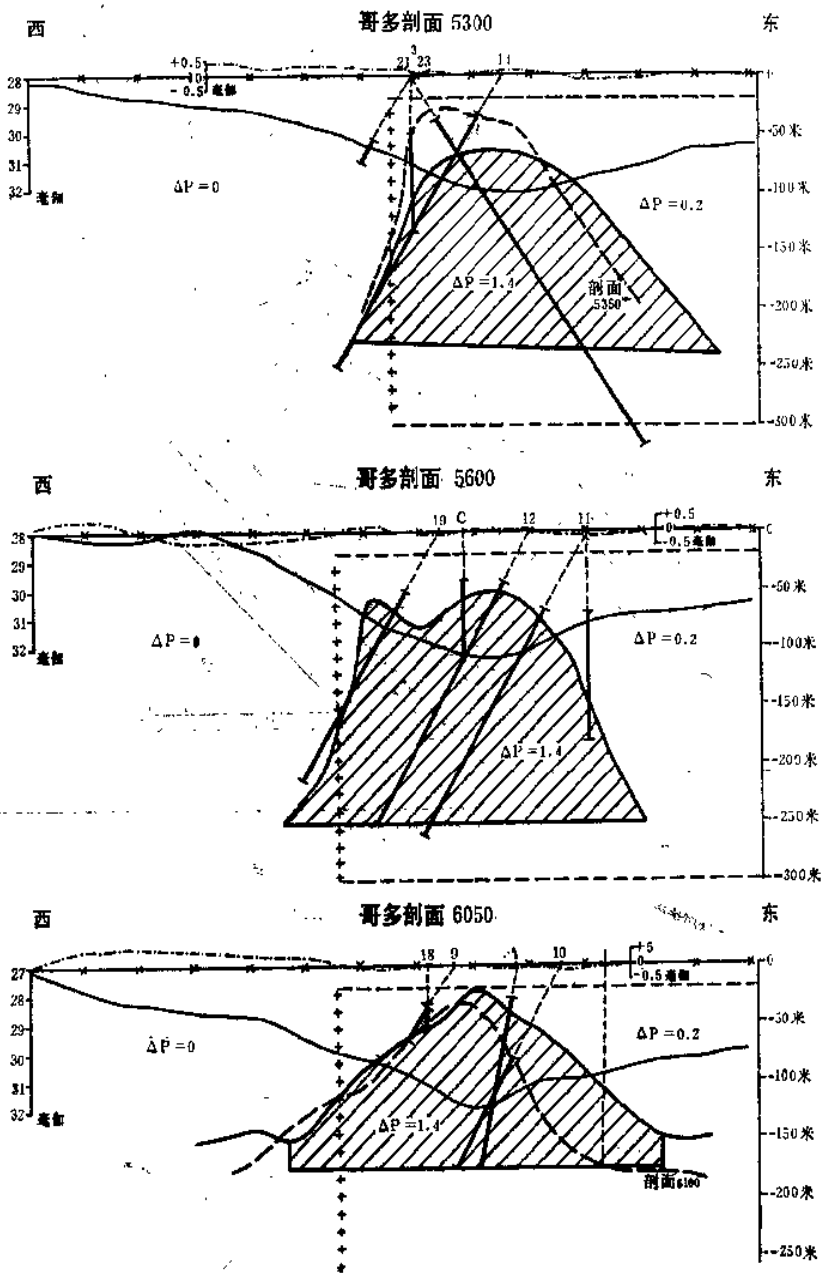


图 10a 哥多的重力和地质对比剖面图

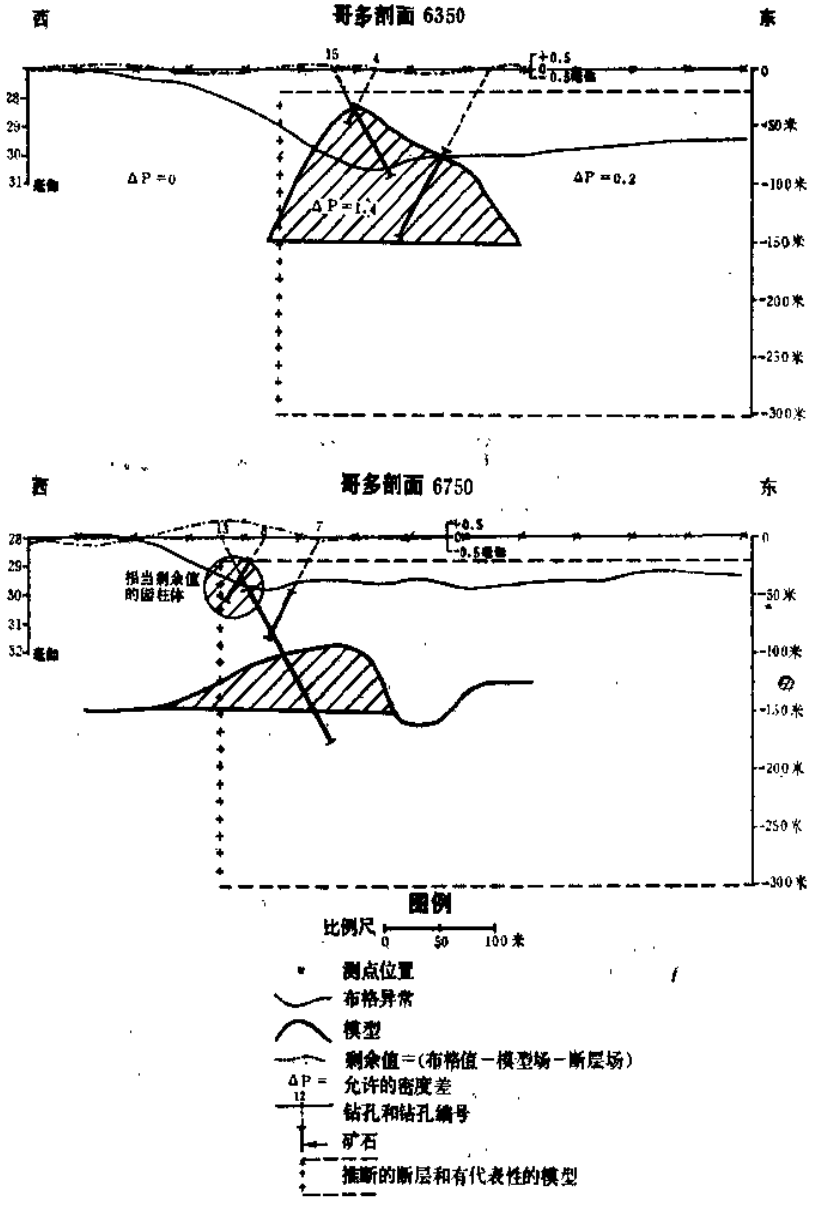


图 10b 哥多的重力和地质对比剖面图

重力、磁法和土拉姆电磁法的对比

根据重力测量取得的新资料，重新研究哥多磁异常图（图 3 ）可以测出浸蚀作用引起的磁性矿物分散的程度。同样，磁异常和重力异常的范围对比（图11）表明，不能要求磁法圈出矿床的详细几何形状。

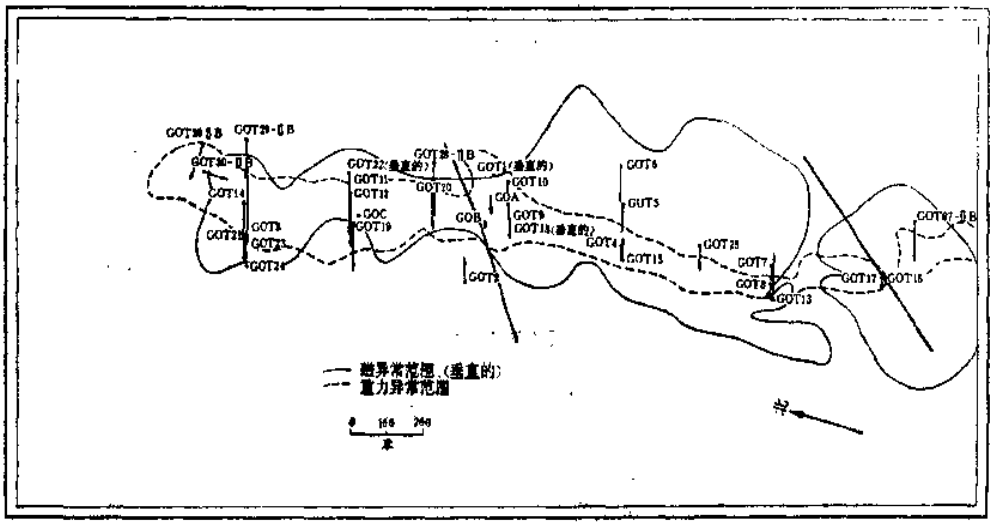


图11 哥多的磁异常和重力异常范围的对比图

通常，在磁场平静环境中进行测量，在没有剩磁的简单构造（例如延伸的岩墙）情况下，磁法可收到良好的效果。在法莱梅，由于地磁纬度低和磁效应集中反映在磁性体的南面和北面的南北向构造上，使磁测资料解释很困难。这种现象在那些构造突然终断的地方尤为突出。这在哥多表现很明显。

在哥多矿床北端逐渐下降，表现为一个喇叭口状的重力异常，磁性很弱。同样，中心在GOT16号钻孔位置上的强磁异常可能是主矿体的南端。全部中等异常反映矿床顶板的地形变化和侵蚀引起的磁铁矿横向变化。

矿体的上部富含硫化物（黄铁矿、磁黄铁矿），磁铁矿的硫化物平均含量很高。主要的导电异常恰好出现在密度大的地带之上，但土拉姆法取得的数据却不同(图 6)。当然，在这两种情况下我们发现A—B和B—C两个带之间的断层，但断层走向却因勘探方法不同而推断有所不同。这种差别不仅是因为重力和电磁法的测量网度较密，而且也是由于土拉姆法本身所引起的，断层仅仅是通过两个导电轴的移动而确定的。

结　　论

从各种地球物理勘探工作的结果中可以看出，在磁铁矿矿床上恰当地使用重力测量能

准确地圈出矿体，而这一点磁法是做不到的。因此，重力测量圈出了哥多矿体的向南和向北延伸。可惜由于磁铁矿向南分散和向北深陷，矿体延伸不具有重要意义。哥多重力资料定量解释可大致圈出矿床的规模和算出大致的储量数字。但是，应当慎重，因为我们曾说过引起异常的矿体应充分肯定，并且要求能大致确定矿体的分布情况，因为地质工作者感兴趣的是磁铁矿，而不是受侵染的角岩，所以在使用重力测量成果时，应持慎重态度。

最后，我们想强调一下这种勘探工作的费用问题。由于重力测量需要对测点进行地形水准测量，所以它是一种费用较高的方法。但是从每米钻探成本来看，重力测量又是很经济的方法（只占勘探总费用的百分之几）。不过，应当恰如其份地使用这种方法（也就是说在足够密的测网上进行适当精度的测量）。如果矿体与围岩（密度为0.8至2.0）之密度差很大，则成功就有保证，当该区已做过地质或磁法研究，目标已详细了解时，如施工缓慢（每队每天完成50至75个测点）只得把重力测量放在第二阶段。

刘昌源译自《chronique de la recherche minière》
1979.1—2月
史崇周校

利用物探资料预测石棉矿床的特点

解决非金属有用矿产的预测和普查任务日益广泛地引用区域方法，其突出的优越性在于有可能研究被疏松沉积覆盖的广阔地区的深部构造，并对整个构造-建造带实现立体填图。

预测和普查有用矿产矿床（本文指的是石棉）的传统方法，可将全部调查研究工作看成是自区域调查开始至普查勘探结束的多阶段过程。中、大比例尺测量替换小比例尺预测工作，这时需拟订出评价矿省，含矿带，矿带和矿田远景的相应的地质地球物理标准（表1）。

小比例尺物探预测的任务是对与石棉工业类型矿床在空间和成因上有关的岩石的物理特征进行分类。当这些特征存在差别并且在有利的地质环境下，这个任务可以用面积性物探测量方法来解决。

众所周知，在褶皱区石棉含矿建造明显地赋存于超基性岩的纯橄榄岩-斜方辉岩建造中。该建造以很长的超基性岩带形式沿深部断裂延伸，并产在大面积含石棉省构造的变质岩层中（在绿片岩相条件下生成温石棉和角闪石岩相条件下生成直闪石石棉）。

所有已知的巴仁诺沃型的温石棉工业矿床都位于优地槽带，而直闪石石棉矿床位于原生优地槽拗陷，赋存在强烈花岗岩化的前寒武变质岩组成的中间地块中。超基性岩岩体构造的复杂性和强的蛇纹石化作用是形成大型温石棉矿床的必然条件。遭受强烈的，但不完全的利蛇纹石化作用，同时生成温石棉蛇纹岩的岩体最有远景。

不同建造的岩石物理特点的规律性变化和与褶皱区内主要构造单元走向相对应的一系列物理参数的成带分布，曾在许多区域内被成功地用于小比例尺成矿预测。考虑到类似研究的

经验和仅在含石棉省才具有的专属特点，我们对区域重磁图及深地震测深资料作了分析，以便查明重磁场、莫霍面的界面速度和地壳厚度的某些一般性变化规律。

含石棉地区的调查工作比例尺 **表 1**

比例尺	地区类型	地区的典型例子	
		温石棉	直闪石石棉
1:5,000,000	矿省	乌拉尔、阿尔泰-萨彦岭	
1:2,500,000 1:1,000,000	超基性岩地块含矿带	波尔塔瓦-基耶姆巴依地块	东乌拉尔隆起
1:500,000 1:200,000 1:100,000	矿带	阿斯别斯特-阿拉帕耶夫矿带	塔尔德克、哈尔别伊复背斜
1:200,000 1:100,000 1:50,000 1:25,000	矿田	巴仁诺沃，克拉斯诺乌拉尔-卢科夫，杰德加林	布格德塞，塞谢尔茨克
1:10,000 1:2,000	矿层（矿床）	巴仁诺沃矿田的中央矿层	捷尔苏茨克，布格德塞矿床

所有的石棉成矿省在ΔTa场中，反映为典型的线性正异常。在成矿省范围内，《玄武岩》层厚度与区域的褶皱时代相关：在阿尔卑斯褶皱区（萨哈林，科里亚克-勘察加等）《玄武岩》层厚度比加里东或前寒武褶皱区的要小。在一般情况下地壳厚度也与此有关。

石棉成矿省具有重力台阶型线性走向的、宽广的强Δg负异常，这些异常反映了优地槽和冒地槽的分界线，它们往往受断至地幔的深大断裂所控制。对每个区域来说地壳深层的弹性波速度大致是一样的。

乌拉尔石棉成矿省的特点是磁场强度最大（比其它成矿省高一个数量级）并为超基性岩体所充填，该矿省相当广泛地发育着铁磁岩系，其中包括磁化率很高（$30\cdot10^{-4}$—$500\cdot10^{-4}$以上）以及规模、年代及成矿专属性都很典型的超基性岩岩体。在沿乌拉尔主深大断裂延深几百公里的不同建造的超基性岩岩体出露处，赋存有铬铁矿、钛磁铁矿、石棉、滑石和其他有用矿产。在乌拉尔褶皱区范围内已知还有发育包含变超基性岩体的前寒武变质杂岩的地区，工业直闪石石棉矿床与变超基性岩体有关。

在小比例尺预测阶段，根据已知超基性岩岩体的建造属性、变质程度和成矿专属性进行初步分类具有特殊的意义。许多研究人员的文章确定了物理参数与有用矿产矿床赋存于一定物理特点的杂岩之间的关系。例如，高密度矿石—铬铁矿、铜镍矿、磁铁矿—的矿床与最致密的未蚀变岩石（纯橄榄岩、橄榄岩、辉岩、辉长岩等）有关。

具有不同成矿专属性的超基性岩岩体，其平均密度的明显差别，是根据大量的统计资

料，通过划分典型的岩石密度组和计算密度加权平均值确定的（表 2）。由表 2 数据可以看出，含石棉岩体中的蛇纹岩的密度值主要是2.5—2.65克/厘米³。应指出，这种密度的蛇纹岩化岩石在其它成矿专属性的岩体中也能遇到，但它们只占岩体的一小部分。具有上述密度的岩石大量发育，结合地质标志，就可以划分出具有一定岩石密度特点的特殊石棉含矿建造型的超基性岩体。这种岩石密度特点与含铬铁矿的纯橄榄岩-斜方辉橄岩建造的密度特点不同。研究克拉克超基性岩岩体密度时业已查明，$\bar{\sigma}$=2.64克/厘米³的蛇纹岩只占其一小部分，并且只位于边缘带，厚200—300米。在克拉克北部和中部，岩体中心部位蛇纹岩化斜辉橄岩的密度为2.8—2.9克/厘米³，而在克拉克南部，纯橄榄岩的密度为3.2克/厘米³。肯皮尔赛、哈巴尔宁和其他含铬铁矿岩体的未蚀变超基性岩具有高的密度值（2.8—3.0克/厘米³），与其他不同变种的超基性岩相比，主要发育超基性岩系。应当指出，含石棉矿建造（密度 2—2.6克/厘米³）和含铬铁矿建造（密度 3—4.2克/厘米³）的矿层密度值有很大差别。

工业温石棉化岩块中蛇纹岩密度的加权平均值($\bar{\sigma}$)　　表 2

含石棉省	温石棉矿床	$\bar{\sigma}$,克/厘米³	样品数
乌拉尔	巴仁诺沃	2.54	104
	杰德加林	2.6	40
	克拉斯诺乌拉尔	2.58	146
	基耶姆巴依	2.58	680
	奥斯塔尼姆	2.52	920
	阿拉帕耶夫	2.61	215
	比利格	2.59	224
阿尔泰-萨彦岭	萨　彦	2.57	107
	阿克塔符拉克	2.55	650
贝加尔-维季姆	莫洛杰日内	2.6	102

上述具有不同成矿专属性（这里指含石棉和含铬铁矿）的纯橄榄岩-斜方辉橄岩建造岩石的密度特点，说明了它们含矿建造类型的独立性。这一点在分析比例尺 1:1,000,000 的面积性重力测量资料时，可作为石棉含矿性的补充标志预测它们之间的区别。然而还必须考虑围岩的区域性岩石密度特征，测量比例尺及其分辨能力要与超基性岩体的大小相适应（对于小的岩体适于利用较详细的测量）。

无论含石棉还是含铬铁矿超基性岩的磁性在很大程度上都取决于岩体的形成条件，变质作用的特点、方向性和强度对磁性均有很大影响。例如，由于富集磁铁矿的线性带发育，蛇纹岩的磁化率（K）明显地增大。磁铁矿在《超基性》岩系的蚀变和未蚀变岩石中富集的机制及其磁性特征研究得还不够。但是根据许多研究人员获得的数据可以判断关于纯橄榄岩-斜方辉橄岩建造的磁性和蛇纹岩化阶段性之间存在的联系。

和其他磁性参数相比（剩余磁化强度，系数Qn），对超基性岩的磁化率作了大量研究。已经查明，超基性岩的磁化率值变化范围很大（由$10\cdot10^{-6}$至$30,000\cdot10^{-6}$）说明铁磁矿物含

量随蛇纹岩化的强度和阶段而变化。温石棉蛇纹岩和利蛇纹石化蛇纹岩相比具有较高的磁化率，这是利用磁测作超基性岩岩体填图的有利前提。目前这是查明不同成矿专属性超基性岩体的唯一的通用准则。

现已查明，直闪石石棉的主要工业矿床形成于活动带发育的造山阶段，赋存于中间地块的轴部以及优地槽早期硬结地块和地台区的地盾中。应当指出的是，直闪石石棉矿床还赋存于由深流花岗岩组成的穹状构造的侧翼。

超基性岩在角闪石相环境中，区域变质作用发生在直闪石石棉富集成工业矿床之前，区域变质作用使纯直闪石岩石大量出现，这种岩石后来又经受石棉矿化作用。

由混合岩化片麻岩组成的古老中间地块，其岩石物理性质与围岩相比，具有低的密度（由2.5至2.7克/厘米^3）和低的磁化强度（磁化率约$100\cdot10^{-6}$—$300\cdot10^{-6}$）。片麻岩、花岗岩和页岩大都是无磁性的，但是有时观测到这些岩石的磁化率变化范围很大，这在很大程度上取决于局部的，经常是孤立地带和构造破碎带的磁铁矿次生富集情况，在这些地带中常赋存有变超基性岩体。利用上述关于片麻岩混合岩化杂岩的岩石物性特点，超基性岩的直闪石石棉和温石棉的富集规律以及面积性重磁测量结果可编制预测图。

小比例尺的编图方法一般来说是传统的方法，它包括在物探图上按阶段划分出大的或较小的构造单元，然后把这结果与地质资料对比，查明反映含石棉岩石物理性质的物理场的形态特点。根据利用小比例尺重磁图评价含温石棉和直闪石石棉的区域远景的前提和可能性（以乌拉尔含石棉矿带为例）可以订出区域地球物理标准。

对温石棉：1）具有强的圈出超基性岩体的ΔTa磁异常，其值约为1592—3184A/M，在个别情况下达6366A/M；2）上述异常位于重力场梯度值相当大而变化缓慢的梯度带上，而Δg等异常线图形呈《弯曲》、《环》、《膨胀》状。

在分析乌拉尔含石棉省比例尺1:1,000,000的重磁图时，统计确定，含温石棉的超基性岩体分布带符合上述两条标准。应当指出，目前在进行普查评价工作的皮里格（哈萨克斯坦西部）矿床正处于具有这两条地球物理标准的带中。

根据初步取得的数据，在诺加依、巴仁科利、巴斯库顿、库曼斯塔卡利及许多其他岩体范围内的石棉矿点也属于远景地带（从物探观点来看），而阿克苏伊和乌列金对于发现大型温石棉矿床是无远景的。

因此，考虑到上述含石棉性的区域地球物理标准，在编制预测图时，小比例尺重磁图最好和地质资料结合利用。

直闪石石棉的地球物理标准：1)大面积分布的厚片麻混合岩带，在磁场中反映为ΔTa的正常值或强度不大的ΔTa负值；2)用典型的、几乎是等轴状的闭合区域重力极小值可圈出中间地块；由花岗岩和片麻岩组成的穹状隆起在重力场中同样也可十分明显的圈出来(局部Δg极小)；3)深变质超基性岩聚集带反映为在大范围ΔTa负磁场背景上的一串规模不大的弱磁正异常。

根据上述地质物理标准，分析了乌拉尔石棉成矿省范围内的全部直闪石石棉含矿带，这些带在整体上与地质资料是对应一致的。哈尔别伊中间地块在重力场中反映为在70或更大的背景值上相差达30—40个条件单位的等轴状相对极小值。在磁场中中间地块与带有小的正异常的弱负磁场相对应。这些场的形态和强度特点与塞谢尔茨克直闪石石棉含矿带的重磁场相

似。哈尔别伊矿带位于不同走向的磁场接合部位；位于优地槽区的负磁场区段，似乎往东南方向位移并被小的ΔTa弱正异常场所包围。这个矿带可以推荐为作更详细普查工作的远景区。

总体上说，对于温石棉和直闪石石棉所查明的区域地球物理标准，不仅可推荐作为小比例尺预测，而且可作为较大比例尺测量的辅助标志。

在中比例尺预测时，根据重磁资料已有的物理-地质前提和从专门辅助的图件中（Δg和ΔTa的转换场图）提取最多的信息来查明预测标准。对这些图的解释，除分析传统的场的特点——强度、梯度带、形态外，还包括一系列地球物理标志：磁场的切割程度、场的变化梯度、场的不均匀性及其他。按H.H保罗甫柯方法计算所获得的新参数提供了补充信息，这些信息在场的实测图上往往不能清楚地显示出来。我们讨论的中比例尺（1:200,000）预测的方法时考虑了用数学方法处理测量结果的可能性，并在标准地区——塞谢尔茨克直闪石石棉矿区（图1）和巴仁诺沃超基性岩体上进行了验证。

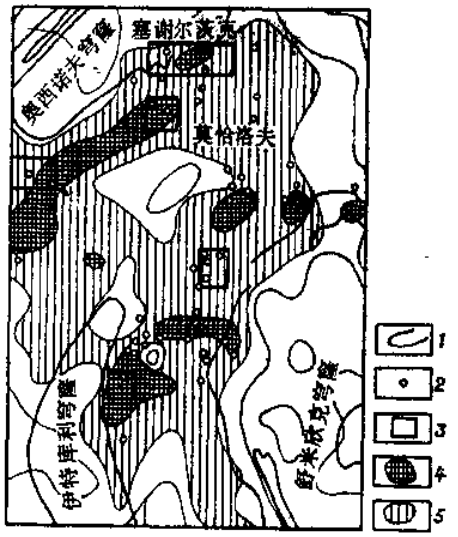


图1　根据地质地球物理资料编制的塞谢尔茨克直闪石石棉矿带的综合预测评价

1. 片麻混合岩穹窿轮廓；2. 已知矿床和矿点；3. 标准地区；4. 根据资料的综合处理结果圈出的最有远景的地段；5. 远景区

在进行预测时，既利用定性的、也利用定量的方法描述实测场：确定各种资料与已知矿床之间的统计关系。预测工作可划分成三个阶段：1)查明石棉矿床的控制标志；2)标志的定量描述；3)全部普查标志的系统化。确定控制矿床的地质规律及其在物理场中显示出的特点，便可拟定一系列的标志，综合这些标志就可以判断研究地区的温石棉和直闪石石棉的成矿远景。下列图件是编制标志图的原始资料：重磁场等值线图，ΔTa和ΔZa曲线图以及1:200,000比例尺的地质图。

下面我们讨论预测时所用的各种标志的地质内容和定量描述方法。

1、场的梯度图。这些图主要反映断裂构造。其中包括重力梯度带对应着控制断块构造的深部大断裂；ΔZa和ΔTa的梯度图同样也反映了这些构造。在编制这些图件时，需在每个单元面积内都求出代表场变化《速度》的值（梯度）。

2. 磁场的变异性（切割性）。它代表了场的不均匀程度。偏高的切割度对应于小岩体（岩枝）的集中地区，这些小岩体与直闪石石棉层具有空间和成因上的联系。利用专门绘制的量板按保罗甫柯方法进行计算。

3、重力导数V_{zzz}和V_{xxz}，是用计算半径为2公里的园鼠板计算的，这些值较突出地反映了受地表和产出不深的物质影响的那部分重力场。

以塞谢尔茨克区直闪石石棉矿床和矿点（塞谢尔茨克、莫恰洛夫、杜巴西欣斯克、科尔马茨克、科斯曼诺夫、休钦斯克、卡泰斯克）为标准。为了估计这些标志的信息量，对原始的地球物理场和变换场进行编号，为此将所用的整个物理场变化范围分成若干区段，每个区段都当作一个独立的标志。此外，也利用了从地质图上取下的地质信息。并且只考虑从标准

单元上观测到的那些标志（即使是只从一个单元上观测到的）。根据已有的标志组确定该地区个别单元的信息权后，就可以判断这些单元的直闪石石棉的潜在远景。

综合解释原始图和辅助图件并考虑一系列地质普查标准的结果，我们编制了区域远景评价略图（见图1）。根据信息标志组合的关系圈出一系列的远景地段，其中一部分与已知矿床或矿点重合，在预测略图上我们并未将它们作为标准。

根据这种方法和编预测图的结果可以判断地区的潜在远景，指出更详细工作的地段。用于中比例尺预测温石棉的类似计算曾在巴仁诺夫矿床做过。为精确确定超基性岩体的构造位置，查明远景区的构造特点，最好利用Δg和ΔZa场的实测值图及其转换图。

在大比例尺地球物理预测的基础上，利用物探详查（比例尺1:25,000和1:10,000）确定局部控矿因素和矿体。以布格德萨直闪石石棉矿床的已知矿体为例，我们拟定了埋深较浅的“盲”矿体的地球物理普查标志。普查盲矿是基于高精度磁测资料和仔细分析梯度带。高精度磁测往往不能圈出直闪石石棉矿体本身，但是作为圈出矿体聚集的热液再造带和石棉矿化带的标志却非常可靠。

在根据磁测资料圈出远景区内，观测到不明显的Δg低值带，没有清晰的《矿》异常，这可能和含矿层的埋藏较深有关。只有埋深小于60米的大矿体才反映有强度为0.15—0.03条件单位的异常。厚度小于29米的小矿只是在它们处于近地表或有地表露头的条件下才能被圈定。

以比利格（穆戈贾累）含温石棉的超基性岩岩体为例，研究和检验了利用大比例尺重磁测量结果结合岩石物性和地质资料的方法。由于增加了普查信息标志的数量，获得了评价温石棉矿田远景的补充标准，根据这些补充标准圈出一些在岩体中心部位打普查钻的地段。岩体被断裂系分成断块，断块内保持有不大的未完全蛇纹岩化的橄榄岩核（横断面约几米），在一些核中赋存有温石棉矿层。根据取得的初步资料确定了五条工业石棉矿化带，但由于这里风化壳很厚难以评价其远景，为解决上述任务，作了下列物探工作：

а. 考虑到岩石的岩性差别，测定和系统整理了岩石的密度和磁性参数。

б. 绘制这些参数的变化曲线图（参数分布的统计分析）和大比例尺的岩石物性图；

в. 绘制磁场分区图和重力剩余异常图；

г. 查明局部控矿因素（《核》的存在、构造成因的特点等）及其在物理场中表现的规律。编制所有地质和地球物理标志的综合图；

д. 综合全部地质和地球物理信息，提出各地段远景的概率估计，查明和圈定准备布置普查钻的范围。

系统的整理岩石密度和磁性资料，可以说明比利格岩体的变橄榄岩及其围岩的岩石物性特点。橄榄岩岩体的蛇纹岩化多期性和强度（大面积叶蛇纹石化同时产生滑石-碳酸盐岩）造成了密度和磁化率变化曲线、ΔZa和$\Delta g_{剩余}$物理场结构的复杂性。根据岩石物性特点分出若干个σ和κ不同的岩石组，而个别岩石组则只能根据综合参数才能区别开，只有在有利条件和高精度重磁综合测量的情况下才能进行填图。

比利格岩体的岩石物性以1:10,000比例尺的岩石密度和岩石磁性图的形式表示出来，在编制预测图时，这些图作为评价石棉含矿性的补充标准。图件按已知方法编制，这时，利用磁异常图和$\Delta g_{剩余}$图可以确定所有岩石组的分布界线。

在比利格岩体中部，重力详测用于圈定实测和剩余重力场中反映出的滑石—碳酸盐岩，

确定在磁场中没反映出来的断裂，以及划分出大概与低密度岩石有关的$\Delta g_{剩余}$负异常区。后者等同于石棉矿化发育区。但是并不排除，剩余重力负异常可能有其他的性质，例如，剩余重力负异常可能与由于橄榄岩核和围岩——蛇纹岩之间存在物理机械性差异造成的裂隙度偏高的地带有关，或与核上方风化壳的深部矿裹的发育地段有关。所有上述关于$\Delta g_{剩余}$性质的可能性解释都需要进行验证。

需指出某些$\Delta g_{剩余}$异常地段与石棉矿化发育带有关的一系列主要因素。第一，橄榄岩核的划分与1:10,000比例尺重力图的解释结果无关，而是根据ΔZa图划分的。第二，岩石密度研究结果表明，由于强烈的蛇纹岩化，橄榄岩核的密度不高。第三，比利格岩体的《岩核＋含石棉岩石》整体与巴仁诺沃矿床的超基性岩体相比，密度较低，范围较小。巴仁诺沃矿床的个别巨大岩核的范围达数公里，一般的也有几十至几百米，$\sigma=2.8-3.2$克/厘米^3，而石棉矿层—几公里，$\sigma=2.6-2.7$克/厘米^3。比利格矿床的岩核的直径为几十至几百米，$\sigma=2.7-2.8$克/厘米^3，而石棉矿层—几百、几十米（很少达800米），$\sigma=2.4-2.55$克/厘米^3。因此在Δg实测场中，它们反映为有特征的等值线形态模式，而不是弱的正异常。最后，第四，上述岩核的分布地段被一系列有利于石棉矿的小构造破坏所分割。所有这些情况使我们可以推断，剩余重力场的局部负极小值发育带，是发现石棉矿化的远景区，建议用钻探验证。

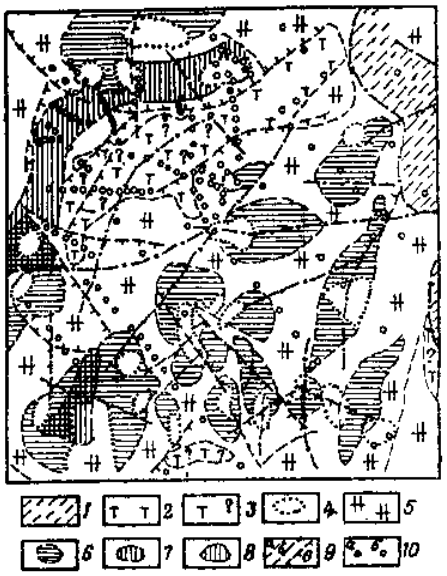


图2　比利格超基性岩体中部的综合解释图

1. 含云母硅质页岩和石英绢云片岩；2. 滑石和滑石碳酸盐岩；3.密度接近于滑石碳酸盐岩的岩石；4.根据磁法勘探资料圈出的橄榄岩核；5.含苦橄岩的蛇纹岩；6. 推断为石棉矿化引起的$\Delta g_{剩余}$负值发育带；建议打普查井；7.根据地质资料推断为石棉矿化的发育带，但未经钻井证实；8.根据钻井结果查明的石棉矿化带；9. 构造破坏带：（а）根据重力图、（б）根据重磁图、（в）根据磁测图确定的；10. 钻井（а—普查钻、б—填图钻）。

总之，分析全部已有资料，可以确定在物理场中反映出来的主要控矿因素，并以综合解释成图的形式把它们表现出来，图上标有温石棉预测远景区的要素。根据此图标出的比利格岩体中的一系列远景区，建议在这些地方布置普查钻探工作。对该岩体的其他地区绘制出磁法勘探解释成果图，划分出断裂构造单元和橄榄岩核，在这些地方进行1:10,000比例尺重力测量和岩石物性研究是合理的，然后编制上述图件。

建议利用重磁测量配合岩石物性和地质资料的综合方法研究含石棉的超基性岩体。

因此，根据某些石棉成矿省不同比例尺重磁测量的综合分析结果，有可能解决区域和普查所有阶段的一列系地质任务。勘察加—科里亚克成矿省是普查温石棉的远景区，这里只完成了中、小比例尺的地球物理调查。考虑到地质构造的复杂性，最好预先进行比例尺大于1:50,000的重磁面积性工作。

陈秀英译自《Советская Геология》1982№2.
向源富校