前　言

《金矿地球物理找矿》，即综合地球物理方法（重力、磁法、电法、地震、核物探及地下物探）在寻找金矿床中的应用，简称为金矿物探。众所周知，地质学、地球物理学、地球化学是地学中的三大支柱，合理应用地质、物探和化探方法是当今解决重大地质问题的基本途径，对于寻找金矿床而言也不例外。金矿床类型繁多，地质情况复杂，需要解决的地质问题多种多样，目前寻找金矿床工作还处于综合信息找矿时代，因此，合理的综合应用地质、物探、化探方法是当前寻找金矿床的有效途径。

70年代以来，在世界范围内出现的找金热潮方兴未艾。自1980年以来，我国也出现了群众性的找金热，随着金矿勘查战略的转移，金矿物探在当前的找金热中再度兴起。到目前为止，我国从事金矿物探人数之多、地区之广、方法之全、成果之显著是前所未有的，同时也充分显示了物探方法在找金方面的优势和作用。但是，物探方法是一种间接找金的手段，有一定的局限性。有少数金矿地质工作者对物探方法在金矿地质工作中的作用和效能尚缺乏全面、系统的了解，甚至有人认为“物探方法能直接找矿”、“某些金矿床中含有磁性矿物或强磁性矿物，磁法具有直接找金的现实意义”，也有人认为“物探方法找金效果不好”，找金应“以化探为主，物探为辅”等等。本书较全面地讨论了物探方法在寻找金矿床工作中的作用和地位，指出了不要单从能否直接找金这一点来衡量，而应从

寻找金矿床的全过程和解决与金矿成矿有关的地质问题中评价金矿物探的重要性、地位和效能。书中强调了在寻找金矿床中，应以地质为基础，地质、物探、化探紧密配合，合理应用、综合分析各种方法所提供的信息，只有这样，才能加速金矿找矿的进程，缩短周期，提高找矿效果。书中还提出了用物探方法寻找金矿床的找矿模式。尽管这种模式不很完善，但可供野外从事金矿物探的人员参考和进一步的研究。

本书由中国地质大学出版社组织编写，在编写和出版过程中出版社的同志多方关心和大力支持。傅良魁教授对本书的编写给予了亲切指导和大力支持，并对全书初稿进行了全面审查，提出了宝贵意见。在本书的编写过程中还得到了应晓建同志支持，在此一并表示衷心感谢。

由于笔者水平有限，经验不足，实际工作不多，书中缺点错误肯定不少，敬请读者批评指正。

编　者

1988.8.

目　录

第一章　概论……（　）

§1.1　黄金资源形势的紧迫性和金矿资源勘查的战略转移……（　1）

§1.2　金矿成矿的地质特征……（11）

§1.3　金矿床的地球物理特征……（17）

§1.4　金矿区物性参数的应用……（31）

第二章　地球物理方法在金矿地质工作中的效能……（39）

§2.1　重力勘探在寻找金矿床工作中的效能…（39）

§2.2　磁法勘探在寻找金矿床工作中的效能…（54）

§2.3　电法勘探在寻找金矿床工作中的效能…（69）

§2.4　地震勘探在寻找金矿床工作中的效能…（98）

§2.5　核物探方法在寻找金矿床工作中的效能……（99）

第三章　物探方法寻找内生金矿床的找矿模式……（107）

§3.1　物探方法寻找内生金矿床的总体模式…（107）

§3.2　金矿成矿远景预测阶段物探方法的效能……（110）

§3.3　金矿床区域性普查找矿阶段物探方法的效能……（119）

§3.4　金矿床局部地区普查、详查找矿阶段物探方法的效能……（132）

§3.5 金矿床勘探阶段物探方法的效能……（157）
§3.6 苏联对物探工作阶段性的划分……（163）
第四章 物探方法寻找砂金矿床的找矿模式……（168）
§4.1 砂金矿床的形成和富集规律……（168）
§4.2 砂金矿区的地球物理特征……（175）
§4.3 物探方法寻找砂金矿床的效能……（178）
第五章 地、物、化探综合方法在寻找金矿床中的效能……（192）
§5.1 概况……（192）
§5.2 合理利用地、物、化综合方法是当前寻找金矿床的有效途径……（194）
§5.3 地质、物探、化探综合方法寻找内生金矿床的找矿模式……（197）
§5.4 地质、物探、化探综合方法寻找砂金矿床的找矿模式……（200）
第六章 寻找金矿床的物探新方法……（201）
§6.1 电电勘探法……（201）
§6.2 地电化学提取法……（211）
§6.3 接触式直接找金法……（227）
第七章 金矿物探的应用实例……（236）
§7.1 山东招掖金矿带物探方法应用的地质效果……（236）
§7.2 日本菱刈金矿床物探方法应用的地质效果……（262）
§7.3 砂金矿床物探方法应用的地质效果……（274）
§7.4 层控金矿床地质填图中物探方法应用的

地质效果……（282）
§7.5 充电法在图山城金银矿床上应用的地质效果……（290）
§7.6 核物探在寻找火山岩中近地表金银矿的应用效果……（297）
参考文献……（302）

第一章 概 论

§1.1 黄金资源形势的紧迫性和金矿资源勘查的战略转移

一、黄金资源形势的紧迫性

黄金是人类最早应用的贵金属之一，古代帝王将相用黄金做装饰品和用具，标榜自己的地位和权势。近代则用黄金作为国际贸易中的结算手段和货币的信用基础，其储量、产量的多少和增长速度直接影响着各国政治、经济的发展和在国际上的经济实力及地位。近年来在现代工业技术中黄金用量日增，各国竞相提高黄金的储量和产量。据1984年英国《矿产手册》公布的世界黄金储量为34245吨，资源量为71500吨。储量主要分布在南非、苏联、美国、加拿大和巴西等国，以上五个国家金的总储量占世界总储量的84.3%，其中南非储量最多，占世界总储量的52.7%。近十几年来，由于黄金价格上涨，兑换率很高，黄金正处于有利地位，因而本世纪70年代中期开始的风靡全球的找金热方兴未艾。各国均千方百计强化金矿勘查工作，大幅度增加用于金矿的勘查投资。据报道：美国在金矿勘查方面投资增长速度很快，1961～1981年的20年间，金矿投资

增加了一百倍。金矿在整个固体矿产勘查投资总额内的比例也迅速增加，1961年占0.9%，1971年占7%，1981年占40%，1983年已占55%，超过了固体矿产总投资的一半。1961～1983年的23年间，用于金矿勘查的总投资为14.5亿美元，共发现40～50个金矿床，总含金量为1446吨。加拿大用于金矿勘查投资也逐年增加，据美国公司人员推测，1983年加拿大金矿勘查投资已占金属矿产总投资的65%。80年代以来，加拿大每年用于金矿投资达1.85亿加元以上。据加拿大能源矿业资源部统计，1961～1982年加拿大发现的金矿至少有90个，总含金量约为2488吨，其中最重要的有安大略省的赫姆洛金矿，储量约590吨。

80年代以来，世界金矿在产量、需求量上都不如70年代头几年，看来在世界范围内70年代为黄金的高峰时期。80年代以来，世界黄金产量、需求量与70年代相比都减少了，因而价格下跌。尽管如此，由于黄金至今仍是国际贸易结算手段和货币信用的基础，因此世界各国对黄金的兴趣仍有增无减，竞相增加黄金的储备。根据国际货币基金会资料，1984年美国黄金储备为8220吨，西德（联邦德国）为2925吨，瑞士为2603吨，法国为2559吨，意大利为2084吨，荷兰为1371吨，比利时为1069吨，苏联估计为1866吨。一个国家黄金储备的多少反映了其在国际贸易中的实力和地位。

目前，我国的黄金资源处于“等米下锅”状态，我国公布的黄金储备数字为400吨，与上述国家比较相差很远，显然与我国的国际地位是很不相称的，远远不能满足我国四化建设的需要，目前我国已探明的黄金储量绝大部分已被利用；一些正在开采的矿山资源不足，资源危机局面亟待解决，据黄金局对××个国营矿山统计，有×个矿山资源枯竭，即将关门，还有

×个矿山资源危急，工业储量不足五年使用。1975年以来，我国政府对黄金地质工作十分重视，制定了一套促进黄金生产的办法、政策，增加投资，使黄金生产得到较快发展。据1984年统计，我国探明储量超过千吨，占世界第四位。1981年我国黄金产量占世界第九位；1984年占世界第六位，但产量仅占世界金产量的2.4%，超万两县有14个。但是，目前我国金矿无论是储量还是产量都是很少的，黄金资源的形势很紧迫。因此，我们必须在当前改革、开放的大好形势下，大力加强黄金矿基础地质工作，采用综合找矿手段，开阔思路，勤奋工作，尽快扭转我国黄金生产的被动局面。

二、黄金资源勘查战略方针的转移

我国认识和利用黄金历史悠久，根据许多出土文物考证，我国在夏商时期就认识并加工金矿物，而且技艺十分高超。世界采金也已有几千年历史。从古代到本世纪初，人们寻找金矿床主要是应用单一的地质方法或手段，找到了大量的地表露头金矿或埋藏较浅且地表有显示的金矿床，为人类社会发展和文明做出了巨大贡献。迄今，地质方法或手段仍然是人们寻找金矿床的主要手段或基本手段。但是，随着金矿勘查工作的日益深入和金矿地质研究程度的不断提高，露头金矿大部分已为人们所发现和开采利用，而未被发现的露头矿愈来愈少，因此，除了继续寻找未被发现的露头矿，尤其是新类型金矿床和砂金矿之外，人们不得不把深部隐伏金矿床作为主要的寻找对象，使得找矿难度愈来愈大，成本愈来愈高。在这种情况下，仍然使用单一的地质手段寻找金矿床已不能完全适应当前金矿地质所面临的新形势和艰巨任务。

目前，金矿勘查战略已发生明显转变：即由寻找露头矿转向寻找深部隐伏金矿床；由寻找易辨的常规类型金矿床转向寻找难辨的新类型金矿床；由寻找单个金矿床转向寻找成矿区、成矿带。就找矿手段而言，要加强综合信息找矿；加强理论找矿；加强间接找矿。所谓综合信息找矿，即综合利用地质、地球物理、地球化学、遥感等方法，对所获得的各种资料和信息进行综合分析研究，选择有希望的找矿远景靶区或勘探靶区，通过在靶区中进一步工作探明金矿床或金矿田。理论找矿则强调用地质理论指导，建立成矿模型进行推断，寻找深部盲矿和难以识别的新类型金矿床。理论找矿同样需要综合信息。地球物理方法是综合信息找矿工作中必不可少的重要方法之一。

三、国内外金矿物探概况及地质效果

（一）国外金矿物探概况及地质效果

1、国外金矿物探概况

国外在本世纪初就已开展了金矿物探工作，目前应用较多的国家有苏联、加拿大、澳大利亚、美国、日本、印度等国。应用的主要物探方法有磁法、重力、电法（航空电磁法、甚低频电磁法、激发极化法、电阻率法和自然电场法等）、地震勘探、核物探及地下物探。各国应用的物探方法的种类和侧重点有所不同。苏联除了应用常规的物探方法之外，还利用航天照片普查金矿；应用压电法普查勘探石英脉型和伟晶岩型金矿床；应用航空和地面核物探方法，主要是航空γ-能谱测量、井中核物探（中子-中子测井、中子γ能谱测井、中子活化测井、γ能谱测井和γ-γ测井等）。据不完全统计，1973～1981年的九年间发表有关金矿物探的重要文章近50篇。苏联金矿物探工

作者М.И.Киселев将金矿物探找矿的全过程分为四个阶段：构造—地质填图阶段；金矿田构造研究；详细普查；初步和详细勘探。苏联在70年代提出了将电法与化探相结合的一种直接找金的新的找矿方法——地电化学提取法，在找矿实践中取得明显的地质效果。

澳大利亚应用的物探方法主要有：磁法（航空磁法和地面磁法）、激发极化法、电阻率法和瞬变电磁法。航空磁法主要是在大面积红土覆盖地区进行快速扫面，寻找与金矿有关的超铁镁质岩层。激发极化法主要用于寻找含金硫化物矿床，地质效果良好。电阻率法主要用于寻找具有高阻特征的石英脉型金矿，地质效果明显。

加拿大应用航空磁法和航空电法进行扫面工作，地面物探则主要应用甚低频电磁法、激发极化法和磁法。根据物探工作结果选择勘探靶区，然后进行勘探工作。赫姆洛（Hemlo）金矿的发现，物探方法起了重要作用。

美国应用较多的物探方法有：磁法、浅层地震和电阻率法等。霍姆斯塔克（Home Stake）金矿在勘采过程中利用了物化探方法，特别是在磁异常变弱的地方寻找探矿工程遗漏的矿体获得良好效果。这是由于赋存金的碳酸盐相或硫化物相含铁建造的磁性比氧化物含铁建造磁性低所致。基于这点重新检查含铁建造分布区的航磁异常对寻找同类矿床具有重要意义。在拜哲山（Badger Hill）砂金矿、怀俄明州提敦县提敦国家森林区砂金矿上，应用浅层地震、重力、磁法、电阻率测深和测井方法取得了较好效果。

日本多用航空电磁法、电阻率法、磁法和重力等。目前日本最大的菱刈金矿床，就是根据航空电磁法异常经钻探工程发

现的。

此外，印度、尼加拉瓜、埃及等国均不同程度地应用了物探方法，找到了一批金矿床。

2．国外金矿物探的地质效果

近几十年来，世界上发现了许多不同类型的特大型金矿，仅80年代以来，世界各国就发现了六个特大型世界级（储量大于100吨）的金矿床，其主要分布如下：

（1）美国金境金矿：储量127吨；（2）美国麦克劳林金矿：储量100吨；（3）日本菱刈金矿：储量120吨；（4）加拿大赫姆洛金矿：储量500～600吨；（5）巴布亚新几内亚波格拉金矿：储量100吨以上；（6）巴布亚新几内亚希尔岛金矿：储量100吨以上。

上述六个巨型金矿中，日本的菱刈金矿和加拿大的赫姆洛金矿在发现和勘探过程中，物探方法起了重要作用。例如，日本菱刈金矿的发现航空电磁法起了决定性的作用。I.N.Johnson曾发表了一篇文章，题目是《菱刈金矿是航空电磁法发现的》。该矿区早在日本藩政时代就已发现浅部金矿，断续开采，60年代浅部金矿已经采完。地质学家预言，若能采用先进手段搞清深部地质构造，有可能找到深部隐伏金矿床。1975～1979年间进行了重力测量、航空电磁法和地面物探测量，查明了深部地质构造，后经3个钻孔验证，孔孔都打到了高品位金矿脉。一个世界级特大型金矿床被发现了，这是日本目前最大的金矿床。

加拿大赫姆洛金矿是80年代以来发现的六个世界级大矿中最大的一个。它是由多个公司同时勘探的，为了加速金矿床的勘探进程和提高地质效果，各个公司除进行地质踏勘、地质测

量工作外，均首先开展物探工作。例如，科罗纳勘查公司1980年开赴该区后，首先进行了航空电磁法和磁法测量，根据磁异常选择出进一步勘探靶区，经钻探后发现了赫姆洛金矿床的东矿体。拉克矿产公司1981年7月开赴该区，进行了踏勘性地质填图后，即开始航空电磁法和磁法测量。1981年秋冬两季用甚低频电磁法、激发极化法和磁法进行航电地面检查，根据异常检查结果选择出勘探靶区。1982年验证激发极化法异常时，结果一钻见矿，最后发现了赫姆洛金矿床的B矿带和C矿带，即赫姆洛金矿床的两矿带。有人在该矿区勘查历史中这样写到："在赫姆洛金矿床勘查过程中，某些物化探方法是行之有效的。可用激发极化法圈定靶区，然后对每一个异常区用钻探进行验证，这就是拉克·诺兰达公司矿产租地迅速发现金矿带的成功经验。"

苏联著名的穆龙套金矿田的发现，就是首先进行了地质和地球物理测量工作，确定了金矿化产于一定的构造单元和构造接合部位，然后根据金矿与毒砂有密切关系，提出依据砷的地球化学异常找金方案，结果发现了包括穆龙套金矿在内的一系列金矿床。

美国著名的霍姆斯塔克金矿在勘、采过程中利用了物化探方法，尤其是在磁异常变弱的地方寻找探矿工程遗漏的矿体取得了较好的地质效果。又如美国加利福尼亚州内华达县拜哲山地区的第三纪古河道的砂金矿，为了圈定含金层位的深度、厚度和范围，使用了折射地震法、重力法和测井方法，结果节约了40%的钻探工作量。南非维特瓦特斯兰德金铀砾岩矿床是举世闻名的大型金矿床。该区在未引入物探方法之前，人们只限于寻找露头矿，引入物探方法之后，使找矿工作取得重大突破，相继发现了三个隐伏金矿床。此外，在澳大利亚、印度、

尼加拉瓜等国，也不同程度地开展了金矿物探工作，取得了良好的地质效果。

（二）国内金矿物探概况及地质效果

1．国内金矿物探概况

我国从60年代初就已开始应用地球物理方法寻找金矿，至今已有近30年的历史。纵观我国金矿物探发展的历史可以看出，金矿物探发展具有以下几个特点：

（1）起步晚，发展快：

国外本世纪初已开始应用物探方法寻找金矿床，我国仅在60年代初才开始，比国外起步至少晚20年。60年代初，金矿物探力量薄弱，方法单一，多限于在已知矿上的试验工作，例如辽宁省在1966～1967年间，在五龙金矿上就是利用电阻率法中间梯度装置追索已知石英脉的延长，寻找与已知石英脉平行的未知石英脉，取得了良好地质效果。

60年代初金矿物探工作刚刚起步，由于众所周知的十年动乱而被迫中断。党的十一届三中全会以后，国家工作重点转移到经济建设方面来，随着我国经济建设的发展和对矿产资源的需要，金矿物探工作再度起步和迅速发展，尤其是1980年以后发展更快，其主要标志是：

i．金矿物探队伍迅速扩大，全国各地广泛应用。目前，我国地质系统、冶金系统、有色金属系统及武警部队等系统，均有相当一部分物探人员从事金矿物探工作。就地区而言，目前，差不多每个省都有一支金矿物探力量投入第一线工作。我国从南到北、从东到西都遍及着金矿物探工作者的足迹和汗水。

近年来，冶金部在沈阳成立了黄金学院，专门为黄金的勘

探、开采、冶炼培养高级人才。中国地质大学（武汉）成立了黄金研究所，其他一些研究院（所）都成立有黄金研究室等。大力加强黄金矿产资源的勘、采、选、冶方面的科研工作。教学、科研和生产紧密结合，将会大大促进我国黄金地质事业的发展。

ii. 金矿物探方法种类多样、齐全。80年代以来，我国使用的物探方法种类较多，目前国外应用的各种物探方法我国几乎都已应用，其中主要的物探方法有航空磁测、航空电法、地面电法（激发极化法、电阻率法、自然电场法、充电法及甚低频电磁法等）、地面磁法、重力、浅层地震、地下物探、核物探、x荧光法、地电化学提取法等。压电法正在研究之中。

iii. 地质、地球物理、地球化学紧密结合，取得了较好的地质效果。

（2）国家对黄金地质工作很重视，制定一套鼓励黄金事业发展的方针政策。

十年动乱之后，国家对黄金地质工作十分重视，自1975年以来，国务院曾多次召开黄金工作会议，研究黄金的勘、采、选、冶问题，制定了鼓励黄金生产的方针政策。专门成立了黄金办公室，加强管理，深化改革，增加投资，大力促进黄金生产工作。

2. 国内金矿物探的地质效果

近十年来，在国家的大力支持和广大金矿地质工作者的辛勤劳动下，发现了一批大、中、小型金矿床，增加了储量，扩大了生产。在这些矿床的发现过程中，物探方法都起到了重要作用。

山东物探队自1960年以来，在胶东地区进行了长期的、大

面积的综合物探工作，完成了1:5万航空磁测、1:2.5万第二代航空磁测和放射性测量（地矿部航空总队和物化探研究所完成）、1:10万区域重力测量、地面物化探面积性普查和详查工作，其中有1:5万电阻率联合剖面法、1:5万～2万磁法和激发极化法。此外还进行了1:5万水系沉积物测量、1:1万～2万土壤测量、壤中气汞量测量和岩石测量，检查验证物探异常的取样钻孔千余个的岩石测量等。发现和评价了大批物化探异常，取得显著的地质效果。目前正在开采的大、中型金矿床，如新城金矿、焦家金矿等都是位于激发极化法异常区。胶东金矿带的发现物探方法做出了重要贡献。

河南铜帕围山城金银矿是河南省区测队于1967年在该区进行1:5万水系沉积物测量时，首次圈出了破山和银洞坡Pb、Ag异常区。1975～1979年在整个成矿带上进行了1:5000激电中梯法和化探土壤测量扫面工作，发现了大量的激电、化探异常。以上物化探工作对该矿床的发现、勘探起了重要作用。该队还总结出用物化探找金矿的经验：在普查阶段利用激电中梯法、联合剖面法与化探土壤测量相配合，比较成功地圈定了矿化带的范围和赋存状态；在详查、勘探阶段利用充电法确定矿体延伸、产状和连接等问题，效果良好；使用电测井划分岩矿（化）层界线，对找矿和勘探起到了一定的指导作用。河南小秦岭是我国著名的金矿区，在其北矿带第四系覆盖区，根据构造控矿规律，首先用视电阻率测深法确定第四系的厚度，圈出基岩等深图和有利控矿构造部位。在此基础上用激电中梯装置扫面，圈出含金硫化物矿化蚀变带，配合地质间接找金。

辽宁省金矿物化探工作开始于60年代初，最初阶段仅限于在含金石英脉上用电阻率法中梯装置圈定高阻异常，1966～

1967年在五龙金矿上便是如此。以后又在柏仗子金矿、四道沟金矿和白云金矿上使用了激发极化法、磁法等方法，取得了较好的地质效果。又如在华北地区的内蒙赤峰红花沟金矿、内蒙喀喇泌旗十家金矿、河北青龙三家金矿、晋南金贝沟金矿的发现，物化探方法都起了重要作用。我国黑龙江省著名的团结沟金矿床，在其发现过程中，使用了磁法、自电、激电、电阻率测深等方法，取得了良好的地质效果，加速了该金矿的发现和勘探进程。

综上所述，我国自1980年以来金矿物探工作得到了迅速发展和广泛应用，取得了较好的地质效果。金矿物探已成为当前寻找金矿床必不可少的综合手段之一。

§1.2 金矿成矿的地质特征

人类认识、开采、冶炼、加工和利用黄金已有几千年历史，并提出了各种类型金矿的成矿理论和成矿规律，积累了丰富的地质资料和实践经验，撰写了许多专著及教材。在前人成矿理论和成矿规律的指导下，在世界范围内广泛地开展了金矿地质工作，陆续找到了许多大型金矿床。这里不对金矿地质学的理论进行系统的阐述，仅从利用地球物理方法寻找金矿床必须具备有利的地质前提角度出发，简单介绍一下金的成矿地质特点以及物探可能解决的地质问题。

一、金矿床的主要类型

由金矿地质学知道，金矿可形成于所有的地质时期、各种地质环境和岩石类型中，从太古代到新生代、由稳定的地盾区

到活动带均有金矿分布。金矿床类型繁多，地质构造复杂，目前尚无统一的分类标准。根据国内外已经发现的特大型、大型金矿床的地质情况，人们公认金矿床有以下几种主要类型：

1．破碎带蚀变岩型金矿床（焦家式金矿）；

2．含金石英脉型金矿床；

3．微细浸染型金矿床（卡林型金矿床）；

4．元古代含铁硅质建造中的金矿床（霍姆斯塔克型金矿）；

5．含金砾岩型金矿床；

6．伴生金矿床；

7．砂金金矿床。

若读者对以上各主要类型金矿床的详细地质情况有兴趣，请参阅有关专著、论文和教材，这里不再赘述。

二、金矿成矿的地质特征

1．金的稀有性和分散性

金是周期表上的I_B族元素，与Cu、Ag同族。它是地壳中含量最低又极为分散的元素之一，在地壳中其丰度值为3.5ppb，约相当于铁、铝、钾、钠、钙、镁的千万分之一，铜、铅、锌的千分之一。金在各种岩浆岩中的含量也很低，与地壳中金的丰度值同一数量级。因此，原始岩浆不易直接形成岩浆型金矿床，迄今也未发现这类金矿床。金元素即使在各种地质条件作用下形成有经济价值的金矿床，其含量仍然是很低的，每吨矿石中仅几克到几十克。金的这一特性直接影响着金矿物探的效能。

2．金矿成矿的层控性

在世界范围内，金矿床的形成往往与各种含金高的岩层有着密切的联系，一些重要的金矿床都受一定地层的控制，这些含金地层称为矿源层。我国的主要矿源层有太古代鞍山群、胶东群、太华群、辽西群、元古代的辽河群、滹口群、歪头山组、陈蔡群、泥盆系的古道岭组等。这些矿源层中包含有许多著名的大型金矿床。

在矿源层中金矿床的分布往往与特定的岩石建造（或含金建造）有关。如超基性—中基性火山—沉积岩建造，含铁硅质岩建造，含碳泥质页岩建造，含碳陆源碎屑岩建造等。尽管金矿床所赋存的岩石类型比较多，但对各类岩石无明显的专属性。富铁镁质和硫化物的岩石是金矿形成的最有利的矿源岩（层）。前寒武纪的绿岩是最重要的赋金岩层，在世界上有绿岩带之处几乎总有金矿床存在。

古老含金地层（矿源层）的局部重熔或交代重熔形成重熔岩浆对金矿化的影响也是金矿床层控性表现之一。在古老含金地层重熔过程中，由于高温的影响，岩层的磁性将受到破坏而减弱，工作中应予以注意。

以上情况表明，金矿床形成于一定的含金地层及特定的含金建造中。

3．金矿成矿物质的多源性及初始物质来源的深源性

地球各个圈层内金的含量是不同的，地壳中金的丰度值为3.5ppb，地幔中为5ppb，地核中高达2600ppb。金矿地质学家根据金在地球内部的分布认为，金矿成矿初始物质来源具有深源性，即地球早期演化阶段，金集中在地核和地幔中，上地幔是地壳中金矿成矿物质的主要来源。幔源物质必须经过一定通道（深大断裂）到达地壳或地表，所以内生金矿床的成矿与莫

霍面（地幔与地壳的分界面）的埋深和变化特点有关。了解莫霍面的埋深和变化特点对金矿成矿预测是十分重要的。

金矿地质学家对地壳中各种类型金矿床，尤其是那些工业意义较大的金矿床的研究结果表明，其成矿物质（金和其它伴生的有益元素）更多的还是来源于壳源。同时还查明，大多数金矿成矿物质来源都不是单一的，而是多源的。我国学者最近几年对我国金矿床的矿质来源进行了较深入的探讨，一致认为金的来源具有多源性。王鹤年等将我国金矿床金的来源归结为幔源、壳源和混合源等三类。

4．金的后生成矿性、多期性和继承性

由于金在地壳中的含量很低，极其分散和原始岩浆不易直接形成岩浆型金矿床，所以真正有工业意义的金矿床的形成，一般是由含金丰度较高的矿源层（岩），经过长期的、多期次的构造作用，导致金的多次活化、迁移和迭加富集而形成不同规模的金矿床。这表明金矿成矿具有后生性、长期性、多期性和继承性。

金矿成矿的后生性和迭加富集，决定了构造作用的重要性，实质上构造是后生改造作用的动力。从太古代至新生代所有的内生金矿床都明显地受构造控制，矿床（点）都产出于一定构造中的特定部位，构造因素是形成金矿的重要前提。尽管在区域上金矿化具有层控特点，但具体的金矿脉与围岩界线清楚，一些浸染型金矿床（如胶东焦家式金矿）也严格受破碎蚀变构造带控制。金矿的容矿构造大致可分为以下几类：

（1）断裂构造：绝大部分内生金矿床是赋存在断裂构造中。断裂可依其形成的力学性质划分为张性、张扭性、扭张性、压张性和张压性等，单一的压性和扭性断裂对成矿是不利

的。大部分太古代变基性火山岩中的金矿及部分古、中生代的金矿都受断裂控制。

（2）褶皱构造：背斜的鞍部、转折端、向斜的槽部以及褶皱构造引起的层间破碎带和轴部复杂的节理、裂隙系统是金矿容矿的又一重要构造类型。辽宁的四道沟、白云金矿，河南的桐柏银洞坡金矿，湘西的沃溪金矿以及桂东的许多金矿，主要是受褶皱和由褶皱引起的层间破碎带及轴部的节理、裂隙控制。褶皱构造控矿是我国元古代和古生代泥质碎屑岩建造中金矿床的一大特征，世界范围内似乎也有这种共性。

（3）火山构造：破火山口的环状、放射状断裂、火山颈、火山角砾岩筒及火山口附近的其它不规则断裂是中、新生代火山岩、次火山岩型金（银）矿床的主要容矿构造。如延边的刺猬沟、五凤、五星山、小西南岔等火山岩金矿、浙江遂昌银坑山、龙泉八宝山、天台大岭口、河北洪山等金矿或金银矿就是受火山构造控制。

（4）爆破角砾岩筒：由浅成侵入作用引起的爆破角砾岩筒也是金矿的重要的容矿构造之一。山西耿庄、辽宁锦西水泉、江西洋鸡山等金矿就是受爆破角砾岩筒的控制。黑龙江团结沟金矿、山东七宝山金矿是公认的斑岩金矿，但绝大部分金矿体的容矿构造是爆破角砾岩。

（5）物理化学性质上有利的围岩圈闭：岩石物理性脆、易裂隙化或孔隙度大、化学性质活泼易熔蚀交代也造成一种对矿液圈闭的有利条件，起到容矿作用。细脉浸染型金矿（卡林型金矿）以及某些接触交代型金矿或伴生金矿就是受这种机理控制。

在寻找金矿的过程中，利用物探方法寻找、追索和圈定不

同规模的断裂构造带及研究其间的相互关系，将会取得明显的地质效果。

5．金的亲硫、亲铁和亲铜性——金矿成矿的共生组合

在周期表中金界于亲硫（Zn、Cd、Hg、Pb、As、Sb、Bi及S、Se、Te等）与亲铁元素（Fe、Co、Ni、Pt族等）之间，故金既具有某些亲硫性，又具有一定的亲铁性。金虽极少与硫化合成硫化物，但在金矿化中，自然金多赋存于硫化物中。金的亲硫性表现在金常常与硫化物中的黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂、黄铜矿等密切共生，成为金矿床中主要的矿物组合或伴生元素。有些金矿床中的硫和金大致呈正消长关系，即硫化物含量高，金的含量也高，如台湾金瓜石石英脉型金矿，当石英脉中出现黝铜矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物共生时，含金石英脉的金品位比单纯的含金石英脉大为提高；山东胶东金矿区也有这样的特点。

金的宏观分布特征说明，它的亲铁性似乎大于亲硫性。铁陨石中金的含量高达5～10克/吨（平均为8克/吨，一般为0.67～1.03克/吨），比地壳中金的平均含量要高1000倍以上。铁矿物和含铁矿物中金的含量也较高，如磁铁矿含金可达0.329ppm（如我国夹皮沟金矿中的磁铁矿含金达到0.20ppm），赤铁矿含金近于0.01ppm，橄榄石含金0.014ppm，黑云母含金高达0.924ppm。金与铁的这种密切关系，可能与它们具有很强的原子亲和力有关。

金的亲硫、亲铁性这一特点，为利用物探方法圈定硫化物矿化带间接找金提供了良好的地质前提。

6．金的惰性

金具有$5d^{10}6s^{1}$电子构型，其核内比Ag多32个正电荷，对

外层电子吸引力很强，使金具有化学性质的稳定性。在低温或高温时，金都不与氧直接起作用；常温下金与单独无机酸均不起作用（但易被混合酸王水所溶解）。金的比重(相对密度)较大（19.3）。基于金的惰性和比重大等特点，当原生金矿床或含金岩石在地表经地质营力作用破坏后，在某些有利的环境条件下，金可富集而形成有经济价值的砂金矿床。

砂金矿的含金砂体与其下部的基岩表面的形态、岩性、构造及地球物理性质有明显差别。这便是用物探方法解决与砂金矿成矿有关的地质问题的地质前提。

§1.3 金矿床的地球物理特征

在某地区能否投入物探方法？投入哪些物探方法？投入物探方法后能否取得较好的地质效果？除了具有良好的地质前提之外，关键取决于该区是否具备良好的地球物理前提。本节将简述之。

一、金的物理性质

由于金具有闪亮的金黄色泽，极为使人注目，所以远在纪元前1500多年就被人们所发现和利用。经人们进一步研究发现，金的原子序数为79，原子量为196.967，比重为19.32（20℃），熔点1063℃，不易氧化，抗酸性很强，无磁性，具有高导电性、高导热性和高延展性。例如，1克纯金可拉长3000多米，可锤成0.0004毫米的薄金片，可压成27.85平方米的金箔。纯金硬度很小，硬度为2.8，用小刀划得动。

由于金具有以上物理性质，除了用于国际贸易和医学、电

镀方面之外，随着近代工业发展，黄金在核反应堆、火箭和喷气式飞机、电子工业、人造纤维工业等方面也得到了广泛的应用。

二、金矿床的地球物理性质

地球物理方法中有多种分支方法，如电法勘探、磁法勘探、重力勘探和地震勘探等。每种分支方法都要求有一定的与其它方法不同的地球物理前提，如电法勘探要求岩、矿石在导电性和激电特性方面有明显差异；磁法勘探要求岩、矿石在磁性方面有明显差异；重力勘探则要求岩、矿石在密度方面有明显差异等。在金矿普查找矿中，必须根据工作地区的地质、地球物理前提和地质任务合理地选择物探方法，只有这样才能取得较好的地质效果，值得注意的是，地球物理前提是其中的关键。下面将概要地叙述金矿床的地球物理性质。

（一）金对岩、矿石物理性质的影响

在 §1.2中已经谈到，金在地壳中和原始岩浆中丰度很低且极其分散，即使在有经济价值的金矿床中，金的含量也十分低。金的颗粒极细，往往以星点状态分布在岩、矿石中。由表1-3-1可见，深成岩、火山岩及次火山岩中金的平均含量值仅1～7 ppb。

金虽然具有高导电性，但对电法勘探而言，当导电矿物连通时，它对岩、矿石的导电性才有明显的影响；当导电矿物为球粒状时，其含量占岩、矿石体积60%以上时，对岩、矿石的导电性才有明显影响。由于金在岩、矿石中含量极低且呈星点状分布，故对岩、矿石的导电性无任何影响。激发极化法虽然能对星点状电子导电矿物起作用，但因金的含量太低而无济于事。金为无磁性矿物。

表1-3-1

岩石类型		岩石名称	金平均含量(ppb)	样品数
沉积岩	酸性岩及中酸性岩	花岗岩	1.70	310
		花岗闪长岩	3.00	380
		长英岩(花岗岩及云英岩脉)	4.20	23
成岩	中性岩	闪长岩—石英闪长岩、英云闪长岩	3.20	281
	基性岩	辉长岩、辉长—闪长岩	4.80	580
	超基性岩	纯橄岩、橄榄岩	6.60	149
火山岩及次火山岩	酸性岩	流纹岩、英安岩、霏细岩、黑曜岩	1.50	188
	中基性岩	玄武岩、安山玄武岩、安山岩、粗面安山岩	3.60	696

(引自美国地球化学手册)

由以上分析可见，金的存在不会对岩、矿石的物理性质（如导电性、激电性、密度等）有丝毫改变，在天然场或人工场的作用下，金不会产生用现有物探仪器能观测到的明显的地球物理场变化。由此可得出结论：在自然界中不具备用地球物理方法直接寻找金矿床的地球物理前提(地电化学提取法除外)，即地球物理方法不能作为一种找金矿的直接手段，只能作为一种间接找金矿手段，主要用来解决与金矿成矿有关的地质问题。因此金矿物探工作必须与地质工作紧密配合才能取得较好的地质效果。

目前，个别金矿物探工作者却认为，物探方法可用来直接找矿，例如有人在文章中这样写到："首先应明确物探方法的地质作用决不限于直接找矿，当然，用物探方法直接找到金矿床或金矿体是最理想的，但是，间接找矿的作用也是不可忽视

的。”显然这种提法是缺乏物性依据的，是不妥当的。个别金矿地质工作者总抱怨“物探方法找矿效果不好”、“不理想”等等。这说明个别金矿地质工作者对金矿物探的效能缺乏全面了解，殊不知在自然界中根本就不存在物探方法直接找金的地球物理前提。这一点应引起人们的充分重视。

下面将要介绍的不是金本身的地球物理性质，而讨论的是金矿床的地球物理特征。

（二）金矿床的导电性和激电性

1．金矿床的激电特性

在§1.2中已谈到，金具有强烈的亲硫、亲铁性，在自然界中金与铜、铅、锌等硫化物密切共生，金常常赋存在硫化物中。表1-3-2给出了某些金矿区含金硫化物的含金性。

由于许多金矿床中均含有不同数量的硫化物，含硫化物的金矿石与围岩在激电特性方面具有明显的差异，硫化物含量愈多，其差异愈明显。因此，在自然界中具备了用激发极化法圈定硫化物矿化带和矿化富集地段间接找金的良好地球物理前提。因此，目前在实际工作中应用较多，效果较好。

根据金与其伴生矿物的组合关系，H·B·佩特罗夫斯卡娅将内生金矿矿石划分为以下四种类型：

（1）贫硫化物含金石英矿石：硫化物含量<0.5%。（2）少硫化物含金石英矿石：硫化物含量在0.5～5%。（3）中等硫化物矿石：硫化物含量为10～20%。（4）多硫化物矿石：硫化物含量为50～70%以上。

根据我国的实际情况，金矿地质工作者将我国的金矿石划分为以下三种类型：

（1）少硫化物金矿石：硫化物主要为黄铁矿，有时含有

Cu、Pb、Zn或W、Mo等硫化物。这种矿石多见于复石英脉或石英脉型热液矿床。（2）多硫化物金矿石：此类矿石的特点是毒砂或黄铁矿很多，金呈显微包体状态赋存于硫化物中。（3）多金属硫化物矿石：此种矿石除金之外，有时有Cu、CuPb、PbZn或PbAg，硫化物含量可达10%或10～20%。自然金除与黄铁矿关系密切外，还与Cu、Pb矿物密切共生，多为高中温热液型矿床。

表1-3-2

矿物名称	矿床类型		金平均含量 (ppm)	样品数
黄铁矿	卡拉马扎尔（苏）	铜钼矿	3.20	69
		含金石英脉	211	131
磁黄铁矿	肯德逊(加)	铜镍矿	12.60	25
	诺里尔斯克(苏)		0.08	?
黄铜矿	卡拉马扎尔（苏）	铜钼矿	17.00	53
		含金石英脉	8.00	6
方铅矿	卡拉马扎尔（苏）	铜钼矿	12.00	7
		含金石英脉	11.00	11
闪锌矿	卡拉马扎尔（苏）	铜钼矿	23.00	5
		含金石英脉	1.30	3

一般来说，中等、多硫化物和多金属硫化物矿石类型含金属矿物较多，具有较强的激发极化特性，对开展激发极化法工作

十分有利。但是贫硫化物矿石类型金矿床，激发极化法将不会取得好效果。

表1-3-3给出了山东省胶东地区几个金矿区各种岩、矿石标本物性测定结果统计表。

表1-3-3中极化率（η）值大小表示岩、矿石激发极化特性的强弱，用百分数表示。分析表1-3-3所列η值可以看出，富矿石——黄铁绢英岩化花岗碎裂岩含硫较高，一般为8.24～9.24%，富矿石的极化率皆在22%以上，最大极化率值高达70%；贫矿石—黄铁绢英岩质碎裂岩含硫较低，一般为3.65～5.84%，极化率值仅4～10%。在该区的金矿床中金的品位与硫的含量大致呈正消长关系。图1-3-1给出了该区金矿床中金与硫的关系曲线。在其它条件不变的情况下，极化率η随着金属矿物总含量的增加而增大。九曲矿区中黄铁矿含量与极化率关系便是如此(表1-3-3)。岩、矿石物性测定结果表明，金矿体与围岩间有明显的激电特性差异，故在该区用激发极化法圈定硫化物矿化带和硫化物富集带具有良好的地球物理前提，在实际工作中已经取得了较好的地质效果。

除了上述电子导电的金属矿物在人工电场作用下能产生激电效应外，石墨也是电子导电矿物，它在人工电场作用下也能产生激电效应。因此，石墨化地层(包括某些碳质地层)能产生明显的甚至是强大的激电异常，给激发极化法间接找金矿床带来了干扰，在实际工作中应注意区别硫化物矿化带与石墨化地层引起的激电异常。值得注意的是，在寻找金矿床的过程中，石墨化地层并非无用，一般来说，金在氧化环境下在腐植酸类地层中易于富集，因而有金来源的情况下，黑色碳质岩石是金富集的有利围岩，可做为间接找金的标志层或指示层。如1979年

表1-3-3 山东省胶东金矿床各类岩、矿标本物性测定结果统计表

岩石名称	采集地点	测定块数	极化率 (%)			电阻率 (Ω·m)		
			η_{max}	η_{min}	$\overline{\eta}$	ρ_{max}	ρ_{min}	$\overline{\rho}$
含金蚀变花岗岩型矿石(富矿)	焦家金矿区	48	70.3	12.2	28.6	5230	176	1120
含金蚀变花岗岩型矿石(贫矿)	焦家金矿区	51	10.9	4.88	7.49	3510	275	960
含金蚀变花岗岩型矿石(富矿)	新城金矿区	56	57.3	11.2	22.1	7420	218	1450
含金蚀变花岗岩型矿石(贫矿)	新城金矿区	51	10.8	4.12	7.25	9910	666	2270
含金蚀变花岗岩型氧化矿石	新城金矿区	30	8.0	3.0	5.09	1270	314	693
含金蚀变花岗岩型矿石	三山岛矿区	28	40.1	4.18	10.7			
含金蚀变花岗岩型矿石	马塘金矿区	28	29.6	4.16	9.0			
含金黄铁矿石英脉型矿石	焦家金矿区	32	23.8	1.34	5.97			
蚀变花岗岩	焦家金矿区	74	13.2	0.38	2.89	8180	335	1900
蚀变花岗岩	新城金矿区	117	11.6	1.0	5.37	9900	218	1850
碎裂状花岗岩	焦家金矿区	38	5.96	0.9	2.29	2470	67	804
玲珑花岗岩	焦家金矿区	23	6.58	1.55	4.38	8810	179	1430
郭家岭花岗闪长岩	河东金矿区	108	6.73	3.11	5.23	7470	625	4260
斜长角闪岩	新城金矿区	52	7.63	0.94	3.54			328
斜长角闪岩	焦家金矿区	136	7.69	0.94	3.93	606	50	319
黄土		6						38～70
矿化水		3处						5
煌斑岩	焦家	42	7.06	0.94	3.54	294	17	52
石英脉	焦家	38	5.96	0.9	2.29	209000	2670	59500
含金黄铁矿石英脉 黄铁矿含量>30%	九曲	31	73.3	8.33	35.9			
含金黄铁矿石英脉 黄铁矿含量=10～30%	九曲	38	61.2	4.25	26.7			
含金黄铁矿石英脉 黄铁矿含量<10%	九曲	41	36.9	2.75	14.8			

（引自山东地矿局物探队肖振岳、顾留成）

加拿大地调局在柯克兰湖-拉尔德尔湖地区进行了航空电磁法测量，在拉尔德尔湖群岩层内发现了许多电磁异常，这些电磁异常大都是由含石墨沉积岩引起的。这种岩石本身含有不同数量的金、银、铅、锌、铜和铁矿化。有时石墨化地层与金矿床在空间上有一定关系，圈定石墨化地层可起到间接找矿作用。

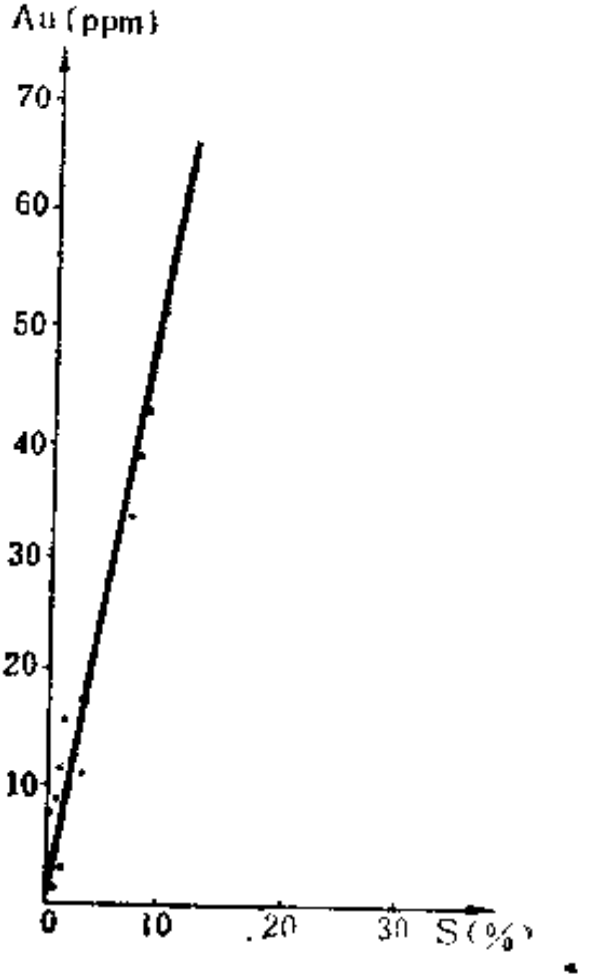


图1-3-1 玲珑金矿田52号脉金硫相关图（引自于文功）

伴生金矿床是世界金产量的主要来源之一，其最大特点是，矿床中含有大量的硫化物矿物和氧化物矿物。例如，云南某硫化铜镍矿床（伴生金矿）中主要金属矿物有：磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿、磁铁矿等；甘肃某黄铁矿型铜矿伴生金矿中，主要金属矿物有黄铁矿、黄铜矿、少量的闪锌矿、磁铁矿、方铅矿等。因此伴生金矿床与围岩之间具有明显的激电特性差异，具备了用激发极化法寻找伴生金矿床的良好的地球物理前提，可以取得较好的地质效果。

2．导电性

在自然界中金矿床由于含有较多的金属矿物、或赋存于断裂构造带中和石英脉中等而具有不同导电性。了解金矿床的导

电特性对间接找金是很重要的。

（1）到目前为止，人们已经发现的与生金矿床绝大部分都与不同类型的断裂带有关。在断裂构造带中岩石由于破碎而含水(有时还有断层泥等)，其导电性比原来未破碎岩石的导电性明显增大，或电阻率ρ明显减小。表1-3-3中碎裂状花岗岩电阻率几何平均值为804 Ω·m，而郭家岭花岗闪长岩的电阻率几何平均值大于4000 Ω·m。因此在自然界中具备了用电阻率法圈定断裂构造带的良好的地质-地球物理前提。

（2）石英脉及其它岩脉是寻找金矿床的一种标志层，其导电性可分为以下几种情况：

i. 厚而完整的石英脉：此种石英脉电阻率值很高。利用石英脉标本测出的电阻率值与此类石英脉电阻率值类似。表1-3-3中石英脉电阻率几何平均值高达59 500 Ω·m；内蒙赤峰红花沟金矿区中含金石英脉的电阻率值达33 654 Ω·m，该区含金黄铁矿石英脉电阻率值降低，其电阻率值为22 916 Ω·m。厚而完整的石英脉与围岩间具有极明显的电性差异，用电阻率法(如中梯装置)可以较容易地圈定石英脉的范围、规模及走向等。内蒙赤峰红花沟金矿、内蒙喀喇泌旗十家地区金矿、辽宁五龙金矿区等皆出现这类现象。

ii. 当石英脉较小而破碎时，往往与围岩间无明显的电性差异，电阻率法也不会取得好效果。若这类石英脉含有较多硫化物时，激电法将是有效的。也可用压电法寻找石英脉型金矿和评价其含矿性。

iii. 当小而破碎的石英脉赋存于断裂破碎带中时，尽管石英小脉本身为高阻，但其总体反映为低阻异常（中梯装置ρ_s为低阻异常；联剖装置ρ_s为正交点或低阻带）。如河北省青龙县

三家金矿区含金石英脉严格受F_1北东向主干断裂两侧派生的次一级断裂带控制，构造裂隙带中含水，导电性较强，故用电阻率法得到联剖正交点和中梯低阻带。

（3）局部的蚀变带，往往使其电阻率局部升高，呈现出高阻异常特征。表1-3-3中的含金蚀变花岗岩的矿石电阻率值相对较高，其值均在1000 Ω·m以上。山东胶东地区有些金矿就属这种情况。

（4）有些金矿床产于不同岩性的接触带上，有的接触带处即为断裂带或破碎带。如山东省胶东地区胶东群地层（Arj）与玲珑花岗岩（γ_5^1）相互接触，有的金矿床便赋存在该接触处。胶东群地层电阻率值一般为200 Ω·m左右，而花岗岩的电阻率值一般在1000 Ω·m以上，二者具有明显的导电性差异，故用电阻率法可以圈定这类接触带。

（5）伴生金矿床由于含有较多的金属矿物而呈现出低阻体的特点，许多实例都表明了这一点。但是，当金属矿物含量较少时，其导电性与围岩差别不大，电阻率法效果不理想，此种情况激发极化法可取得较好效果。

3．金矿床的磁性

从金矿成矿的后生性和初始矿源的深源性可知，金矿成矿与各种火成岩、火山岩、变质岩、各种火成岩岩脉、火成岩与某些沉积岩接触带有密切关系。这些岩石均具有不同的磁性，这就是应用磁法解决与金矿成矿有关的各种地质问题的地质-地球物理前提。

（1）上地幔与地壳的磁性有明显差异，故可用磁测结果经过一定的数据处理，求出莫霍面的埋深、变化特点及地壳厚度。

（2）在深大断裂带形成过程中，常常伴有各种岩浆活动，形成沿断裂带走向呈线性分布的各种火成岩体。如郯庐大断裂带的情况便是如此。火成岩与其它岩石的磁性有明显差异，形成深大断裂带上磁异常的线性分布。

如果在断裂带形成过程中没有伴随岩浆活动时，岩石的磁性由于岩石破碎而变弱，即断裂带相对围岩磁性而言是个低磁区，常常出现低于背景的低磁带或数值不大的负磁异常带，如胶东的灵山-北截断裂带上的磁异常就是一条数值不大的负磁异常带。

（3）由于各种火成岩体、火山岩和岩脉都具有较强的磁性，具备了用磁法圈定这些岩体、岩脉以及这些岩体与沉积岩等接解带的良好的地球物理前提。岩脉可以作为找金标志，有时岩脉本身可以构成矿体。例如，黑龙江老柞山金矿，区中岩脉与矿化关系比例密切，矿区西部的岩脉本身就是矿体；湖北大冶陈子山金矿区，花岗闪长岩脉与金矿关系最密切，金矿脉多分布在花岗闪长岩脉与石英闪长岩接触带附近；湖南的黑土型金银矿赋存在超复岩体与灰岩正接触带的氧化带中；青海门源松树南沟金矿西矿段产于斑状花岗闪长岩和细碧玢岩的接触带中等等。用磁法圈定岩体、岩脉及与磁性有关的接触带，可进行间接找金。

（4）国外主要金矿类型之一的霍姆斯塔克金矿产于前寒武纪含铁建造中。我国东风山金矿也属此种类型。该区金矿产于前寒武纪磁铁铁闪石英片岩层下部，严格地受此层位控制。这类金矿床特点是，含有大量的磁性矿物。具备了在该类矿床上用磁法开展工作的地球物理前提。

（5）在伴生金矿床中，往往含有不同数量的磁铁矿、磁黄

表1-3-4 山东胶东金矿带不同岩、矿石磁性测定结果

地时层代		岩(矿)石名称	采集地点	块数	$\kappa\times4\pi\times10^{-6}$(SI)			$Jr\times10^{-6}\times(10^3A/m)$		
					极大值	极小值	平均值	极大值	极小值	平均值
太古—元古界	胶东群 (Ar_2-Pt_1^{jj})	黑云母斜长角闪岩	尹家 郑家 新城	230	33800	微弱	4000	16300	微弱	1090
		黑云角闪岩	掖 县	27	24200	310	9600	147000	30	12400
		斜长角闪岩	掖县 焦家	106	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱
		黑云母斜长片麻岩	尹 家	5	2000	150	1150	290	60	160
		(同 上)	苗 家	22	1480	微弱	570	500	微弱	100
		混合岩化黑云母斜长片麻岩	尹 家	34	19000	微弱	780	3480	微弱	180
		(同 上)	苗 家	9	1810	微弱	540	810	微弱	310
		(同 上)	尹家 郑家	152	1840	微弱	16	1140	微弱	30
		黑云母斜长片麻岩	镡 家	5	190	微弱	40	670	微弱	130
		蛇纹石化大理岩	掖 县	66	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱
		黑云母磁铁矿(鞍山式铁矿)	山上杨家	34	89600	370	23500	170400	160	14200

元古界	粉子山群(Pt_1^2f)	片岩 滑石片岩	掖县粉子山	3	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱
印支期	玲珑花岗岩(γ_5^1)	黑云母花岗岩	朱桥 新家	94	1710	微弱	440	1240	微弱	120
		（同上）	三山岛 仓上	117	840	微弱	90	160	微弱	20
		（同上）	桥西头 宋家南	32	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱
		（同上）	焦家金矿	38	4820	1110	1820	2090	120	600
印支—燕山期	($\gamma\delta_5^2$)	郭家岭斑状花岗闪长岩 $\gamma\delta_5^2$)	河东金矿	71	360	50	180	120	微弱	40
燕山期	($\gamma\delta_5^3$)	花岗闪长岩($\gamma\delta_5^3$)	史家村	22	1640	20	370	170	10	60
		石英闪长岩($\gamma\delta_5^3$)	山上杨家	35	1160	120	440	150	0	70
		蛇纹石化花岗岩	桥头村	11	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱
		碎裂状花岗岩	焦家金矿	38	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱	微弱

（引自山东物探队）

铁矿等，具有较强的磁性。如湖北省鄂东地区的伴生金矿床：铁矿床、铜铁矿床、铁铜矿床、黄铜矿型铜矿、硫铁矿床等，就含有大量的磁铁矿和磁黄铁矿。用磁法寻找和圈定此类伴生金矿床比较有效，具备了良好的地球物理前提。

表1-3-4给出了山东胶东金矿带的磁性参数测定结果。

4．金矿床的密度

岩、矿石密度差异是投入重力勘探方法解决与金矿成矿有关的地质问题的必须的地球物理前提。

（1）地幔与地壳的密度值：

地壳上部花岗岩层平均密度约为2.7g/cm^3；地壳下部玄武岩层平均密度约为3.1g/cm^3，二者密度差为0.4g/cm^3。组成地幔物质的密度在3.4～5g/cm^{3}之间。这表明，在自然界中具备用重力勘探方法解决莫霍面深度、变化特点和地壳厚度问题的地球物理前提。

（2）金矿区岩、矿石密度：

我国金矿床类型繁多，地质情况复杂，不同金矿区岩、矿石类型不同，其密度也不同，因此进行重力测量之前，应对测区中岩、矿石进行测定，做为投入重力方法的地球物理前提和资料解释的依据。表1-3-5中给出了山东省胶东地区金矿带不同岩、矿石的密度值。分析表中所列密度值可以看出，该区不同岩、矿石密度值关系大致为：变质岩＞郭家岭花岗岩＞蚀变岩、金矿石＞玲珑花岗岩＞第四系。在该区用重力勘探可以划分变质岩与花岗岩界线。

表1-3-5　山东胶东地区金矿带不同岩、矿石的密度值

地层时代		岩、矿石名称	块数	密度(g/cm³)		
				极大值	极小值	平均值
太古—元古代	胶东群	变质岩	260	3.10	2.33	2.73
	粉子山群	变质岩	179	3.02	2.63	2.79
第四系		黄　土	12（大样）	2.02	1.33	1.60
印支期		玲珑花岗岩	590	2.65	2.48	2.57
印支—燕山期		郭家岭花岗闪长岩	88	2.84	2.58	2.64
		蚀变岩金矿石	450	2.98	2.30	2.63

（引自山东物探队）

§1.4　金矿区物性参数的应用

应用物探方法寻找金矿时，为了提高地质效果，一般都采用综合物探方法。金矿床的矿物组合和其所处地质环境是多种多样的，各种共生矿物和地质环境常常具有不同的物理性质，故一个金矿床的整体往往也有几种不同的物理性质，这些条件为投入综合物探方法提供了物性前提。此外，还应考虑物探方法与

表1-4-1 湖北某金矿区各类岩、矿石密度、磁性、电阻率、极化率参数测定统计表

岩矿岩名称	块数	密度(g/cm³)			块数	κ×10⁻⁶CGSM *		
		最大值	最小值	平均值		最大值	最小值	平均值
黄铁矿	3	3.59	3.37	3.44				
黄铁矿化钾长石化Qδ	3	3.12	2.67	2.82	2	7312	6672	6992
黄铁矿化钾长石化rδπ	7	3.66	2.53	2.79				
钾长石化Qδ	4	2.97	2.61	2.71	45	6267	257	3290
弱钾长石化角闪石Qδ	1							8260
钾长石化rδπ	3	2.62	2.59	2.60				
石英闪长岩Qδ	29	2.97	2.36	2.70	16	5625	682	3099
花岗闪长斑岩rδπ	12	2.67	2.52	2.60	1			2241
凝灰岩	18	2.64	2.39	2.50	4	0	0	0

岩矿岩名称	块数	ρ(Ω·m)			块数	η(%)		
		最大值	最小值	平均值		最大值	最小值	平均值
黄铁矿	2	115	22	69	3	52.44	8.16	26.6
黄铁矿化钾长石化Qδ	5	3150	60	778	29	28.8	2	10.27
黄铁矿化钾长石化rδπ	3	1353	15	707	7	19.87	4.83	10.41
钾长石化Qδ	47	67820	9	7331	70	18.0	0.68	3.8
弱钾长石化角闪石Qδ					6	11.54	1.44	3.74
钾长石化rδπ	3	92099	7583	38912	3	6.84	3.03	5.09
石英闪长岩Qδ	33	10983	58	2664	48	7.96	0.63	2.42
花岗闪长斑岩rδπ	8	14303	3060	9132	8	8.66	2.58	4.76
凝灰岩	15	217	6	96	18	1.40	0.31	0.84

*：磁性没有换算为SI制

（引自湖北省鄂东南地质大队周亚特、李辉文、何建明）

化探、地质紧密配合。本节将以一个金矿区和黑龙江省的金矿床物性为例，说明物性的重要性。

一、湖北省某金矿区的物性参数

湖北鄂东南地质大队金矿物探工作者，对某金矿区的各种岩、矿石的密度、磁性、导电性和激电性进行了测定和统计，其测定结果示于表1-4-1。该区在1966～1976年间主要是寻找刘家畈式磁铁矿；1977～1981年间主要寻找斑岩铜矿热液型多金属矿；1981年后转入找金矿，最后发现了这一单金矿床。虽然该区有些岩、矿石测定的块数太少，但测定的参数较齐全。

该区金矿脉多分布在Ⅱ号花岗闪长岩脉与石英闪长岩接触带附近。黄铁矿、黄铜矿及石英为金的载体矿物。矿石类型有五种：含金硅质岩型、含金黄铁矿型、含金构造角砾岩型、含金黄铁矿石英闪长岩型和含金黄铁矿花岗闪长岩斑岩型。

分析表1-4-1测定结果可见，各类岩、矿石密度值变化规律是：黄铁矿＞黄铁矿化火成岩＞未蚀变火成岩＞凝灰岩。各类火成岩磁性差异较小，但火成岩与火山岩的磁性差异明显。故可用磁法圈定火成岩与火山岩的接触界面。黄铁矿及黄铁矿化火成岩具有低阻高极化特征，极化率η＞10%；不含黄铁矿岩石极化率值较低，凝灰岩极化率最低，其值小于1%。综上所述，将该区各类岩、矿石按其物理性质的不同可分为以下几类：

1．黄铁矿化岩石（矿带）：具有中等磁性、低电阻率、高极化率、高密度特征；

2．无矿化火成岩：具有中等磁性、高电阻率、中等极化

率、中等密度特征；

3．火山凝灰岩：具有弱磁、低电阻率、低极化率、低密度特征。

为了圈定矿化带，根据本区具体的地质-地球物理特征，选用了激发极化法、电阻率法为主要工作方法，重力配合，同时还选择化探与物探方法配合工作。这一套组合方法在该区取得了较好的地质效果，为该矿床的发现做出了重要贡献。

二、黑龙江省原生金矿床的地球物理、地球化学特征

黑龙江省金矿分布广泛，资源丰富，素有“金镶边”誉称。该省综合研究队将已做过的物探方法的反映结果及土壤测量元素共生组合关系，结合金矿床（点）的地质环境，将全省原生金矿床（点）的地球物理-地球化学特征分类如下：

（一）高极化率、良导电性、有氧化-还原作用、弱磁、单金型金矿床

该类矿床为脉状含金-多硫化物型单金矿床，多产于花岗岩、闪长岩与下古生界接触带处。矿体具有明显的低阻高极化率的特点，能产生激电异常和电阻率法异常。若水文地质条件合适，可产生自电异常。该类矿床为弱磁性，磁法效果不理想。土壤测量中Au异常显著，As、Sb、Ag无异常反映。寻找这类金矿床可选用激发极化法、电阻率法、自然电场法和化探等方法，将会取得较好的地质效果。

例如，呼玛县某金矿区的含金石英脉，产于海西中期花岗闪长岩与上泥盆统硅化黑云母石英片岩接触带内，含金石英脉内含有10%以上的金属硫化物（黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、黄铜矿、自然金等）。激电法在矿带上获得了10～16%的规则异

等；电阻率法中梯装置在矿带上获得低阻异常带，电阻率法联剖装置得到低阻正交点异常。自然电场法获得明显的负异常（最大值达-100mV）。但是磁法在矿化带上仅为平静的负磁场。土壤测量在矿化带上仅有金异常，而无其它元素异常显示。

（二）低极化率、高电阻率、无氧化-还原作用、弱磁性、Au、As、Sb型金矿床

该类金矿床为硫化物含金石英脉，故为高阻低极化体，无氧化还原作用，弱磁性，土壤测量Au、As、Sb异常明显。例如，嘉荫平顶山金矿床，含金石英脉产于元古界花岗岩中，含少量金属矿物（自然金、黄铁矿、磁黄铁矿）。围岩蚀变有硅化、黄铁矿化、绢云母化、高岭土化、碳酸盐化、绿泥石化。在已知金矿脉上，激发极化法中梯装置、自然电场法无明显异常。石英脉赋存于断裂带中，故电阻率法中梯装置有低阻异常带，联剖装置（ρ_s）有正交点，但分异性差。后者与土壤测量的Au、As、Sb异常吻合，反映了金矿脉的分布方向。此外，嘉荫县连珠山金矿点，石英脉所在空间无断裂带存在，故电阻率法联剖装置为高阻反交点，其位置与含金石英脉位置吻合。

（三）低极化率、高电阻率、无氧化还原作用、中等磁性、Au、As、Sb、Bi、Ag、Cu、Pb型金矿床

该类矿床上激发极化法规律不明显。由于含金石英脉产于燕山期花岗岩中，岩体磁性中等，所以可选用磁法配合电法圈定岩体；土壤测量Au、Sb、Bi、Ag、Cu、Pb有明显异常。例如五道沟二支沟金矿就属这一类型

（四）高极化率、高电阻率、有氧化还原作用、弱磁性、Au、As、Sb、Ag型金矿床

该类金矿床含有较多的金属硫化物，属硫化物型金矿床，与围岩间存在明显的激电特性差异，但导电性与围岩差异不大。水文地质条件合适，可产生自电异常。土壤测量有Au、As、Sb、Ag组合异常。金矿体以脉状、网脉状、细脉浸染状产于花岗闪长斑岩中。

例如，团结沟金矿便属此种类型。矿体以脉状、网脉状、细脉浸染状产于花岗闪长斑岩体中。矿石矿物有黄铁矿、白铁矿、褐铁矿、自然金、辉锑矿及微量方铅矿、黄铜矿等，金属矿物总含量可达8～15%。在主矿体上磁测ΔZ变低；自电出现负异常；激发极化法的视极化率（η_s）增高；视电阻率(ρ_s)则无明显异常；土壤测量在矿体上有清晰的Au、As、Sb、Ag组合异常。显然，从物性分析出发，对这类金矿床选用激发极化法、自然电场法与土壤测量相互配合，可望取得较好的地质效果。

（五）高极化率、良导电性、无氧化还原作用、低磁性、Cu、Mo、Ag、Pb型金矿床

在矿化带上极化率高、视电阻率低，磁测ΔZ低缓。用激发极化法、电阻率法和磁法配合可圈出矿化带。土壤测量获得Cu、Mo、Ag、Pb组合异常。金矿体不规则，以囊状、窝子状产于闪长玢岩与碎裂伟晶花岗闪长岩接触带处的角砾岩中。东宁县金厂金矿则属此种类型。

（六）高极化率、良导电性、有氧化还原作用、弱磁性、具有放射性、Pb、Zn、Cu、W、Sb、Te型金矿床

该类金矿床以有放射性异常、自电异常为其特点。土壤测量有Pb、Zn、Cu、W、Sb、Te异常，Pb、W与Au关系密切。含金石英脉呈网脉状产于次火山岩与流纹岩类的外接触带。塔

源金银矿便属此类金矿床。

（七）强磁性、Au、Co型金矿床

本类金矿床具有强磁性，磁法可确切地圈出与铁共生的矿层。金矿体呈层状产于前寒武系变质岩中含铁石英岩下盘。例如东风山金矿即产在前寒武系变质岩中的含铁石英岩下的金-钴共生的金矿床。矿体呈层状。

该省金矿物化探工作者依据原生金矿床上的物性、物化探效果和金矿的地质条件，拟定出该省普查原生金矿床的物化探工作程序：

1．首先在地质上有成矿可能的地区进行小比例尺化探扫面，圈定金的化探异常区和与金有关的伴生元素异常；

2．在已圈定的化探异常区中开展1:5万土壤测量，圈出成矿有利地段；

3．在已圈出的成矿有利地段中开展1:1万物探及化探，寻找金矿化带或圈定矿体；

4．最后，在圈定的矿化带上，开展大比例尺物探详查，并配合钻探验证。同时进行测井工作，以详细研究异常性质和金矿体。

目前金矿物探、化探工作在我国已普遍使用，但是缺乏总结和提高工作。在这种情况下黑龙江省金矿物化探工作者对该省原生金矿床上的地球物理-地球化学特征进行总结和拟定寻找原生金矿床的物化探工作程序，这是一件很有意义和很重要的工作。各个省也都应根据各自的具体情况进行总结提高。黑龙江省拟定的寻找原生金矿床的物化探工作程序对该省的金矿物化探工作起到了促进和指导作用，有一定的实际意义。但是，这一工作程序尚不够完善，有待进一步研究和提高。

第二章　地球物理方法在金矿地质工作中的效能

地球物理分支方法较多，其中有重力勘探、磁法勘探、电法勘探、地震勘探、核物探和地下物探等。每种方法在解决金矿地质问题和找矿方面各有特点，实际工作中应扬长避短，综合使用，才能取得较好地质效果。

为了使金矿地质工作者也能参考此书，在介绍每种地球物理方法在寻找金矿床中的效能之前，首先简要介绍一下方法原理。

§2.1　重力勘探在寻找金矿床工作中的效能

重力勘探是金矿成矿远景预测、区域性普查阶段中应用的主要物探方法之一，在解决区域性和深部基础地质问题方面有明显的优势。

一、重力勘探的基本原理

(一)重力勘探的理论依据

重力勘探是在重力测量学的基础上发展起来的一门应用学科。

重力勘探是以物理学中万有引力定律为其理论基础，以勘

探对象与围岩之间的密度差异为其地球物理前提，通过观测和研究地球表面重力场的变化规律，达到查明地质构造和矿产分布的目的。这种地球物理勘探方法称为重力勘探。

地球是一个具有一定质量、两极半径(6356.75公里）略小于赤道半径(6378.16公里）的旋转椭球体，在其表面或附近空间，一切静止的物体都同时受到两种力的作用，一是地球全部质量对它所产生的引力$\vec{F}$，二是地球自转而引起的惯性离心力$\vec{C}$（图2-1-1），这两种力同时作用在某一物体上的矢量和称为重力$\vec{P}$，即

$$\vec{P}=\vec{F}+\vec{C} \qquad (1)$$

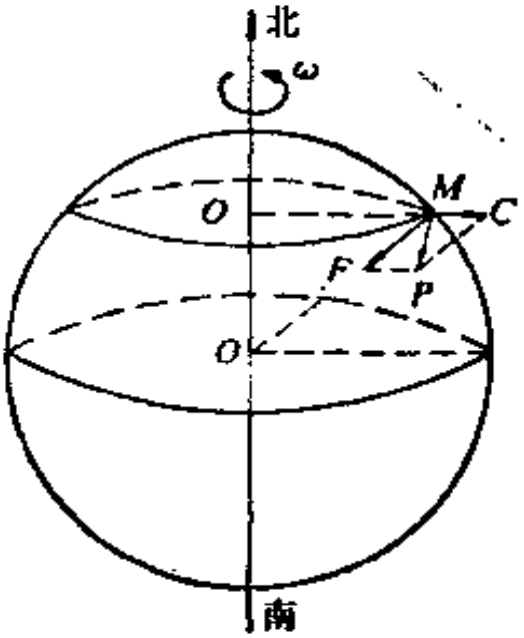


图2-1-1　重力的组成

重力场及重力场强度：地球周围均为重力作用的空间，这一空间称为重力场。重力场中的任何物体都将受重力作用，其大小与物体质量m的大小有关。在重力测量中规定，以单位质量在重力场中受重力作用的大小作为标准，比较地球表面各点重力的大小，即

$$\frac{\vec{P}}{m}=\vec{g} \qquad (2)$$

（2）式中g称为重力加速度。（2）式左端表示单位质量所受的重力，即重力场强度。可见，空间某点的重力场强度无论在数值上和量纲上都等于该点的重力加速度，且二者的方向一致。在重力勘探中常把重力场强度或重力加速度简称为“重力”。

在厘米、克、秒单位制中，g的单位是厘米/秒^2(cm/s^2)。为了纪念第一个研究重力的意大利科学家伽利略，[illegible]/秒^{2}称为“伽”，在实际应用中可按以下规定换算：

1厘米/秒^2＝1伽　(Gal)

1伽$\times10^{-3}$＝1毫伽　(mGal)

1毫伽$\times10^{-3}$＝1微伽　(μGal)

毫伽是重力测量中常用的单位，微伽是高精度重力测量时使用的单位。

地下不同形体重力场的正演理论计算及反演问题，重力勘探教程中已有系统阐述。

（二）重力勘探的物性依据

按照组成地球的物质成分，可将地球分为地壳、地幔和地核三部分（图2-1-2）。地壳最上部有一层厚度不大的、密度极不均匀的沉积岩和风化土。地壳可分为两层：上层主要由密度较小的富含硅、铝的花岗岩组成，称为花岗岩层或硅铝层，平均密度为2.7g/cm^3；下层是由富含硅镁的玄武岩组成，称为玄武岩层或硅镁层，平均密度约3.1g/cm^3。花岗岩层与玄武岩层的分界面称为康拉德界面（简称康氏面）。康氏面上下岩层之间存在0.4g/cm^{3}左右的密度差，是地壳中主要密度分界面之一。

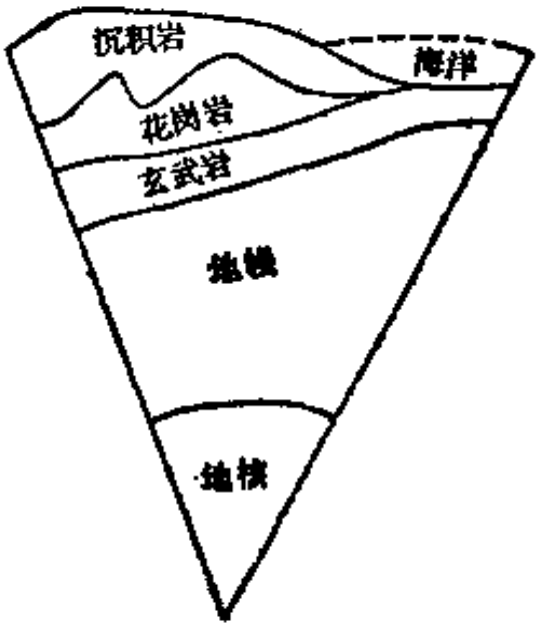


图2-1-2　地球的结构

从地壳向下到2900公里左右深处的部分称为地幔。其物质成分与地壳有明显的差别，上地幔主要为基性岩和超基性岩，下地幔主要为铁镍氧化物。组成地幔物质的密度在3.4～5.0 g/cm³之间，随着深度的增大而增大。地壳与地幔的分界面称为莫霍洛维奇面，简称为莫氏面或莫霍面。莫霍面上下层之间的密度差为0.3g/cm³左右。

由上述可见，在地壳中存在着两个区域性或全球性的密度分界面——康氏面和莫氏面。这两个界面的变化特征或埋深变化直接影响着地壳结构、地壳厚薄，也影响着金矿化带的分布，它们是影响区域性重力异常变化的主要原因之一。

地壳中不同岩层和矿物的密度值也各不相同，表2-1-1中给出了不同岩、矿石的密度值。从表2-1-1中可以看出，沉积岩的密度主要取决于岩石的孔隙度，孔隙度越大，岩石密度越小。其次还与沉积岩层的岩石年代和埋藏深度有关，一般来说，沉积岩年代越老、埋藏越深，其密度就越大，尤其是粘土和页岩最为显著。

岩浆岩的密度取决于所含矿物成分。由酸性岩过渡到基性岩、超基性岩时，随着铁镁质矿物含量的增加，岩石密度也随之增大。侵入岩密度较高，火山岩，尤其是熔岩密度较小。

变质岩的密度与其原岩密度有关。一般来说，变质岩的密度随着变质程度的加深而增大，随酸性减弱而增大。

岩石密度还与含水有关，含水愈多，密度也愈大。含水度对于沉积岩密度的影响可达10%左右。

一般金属矿石具有较大的密度，其范围约为3.5～5.0g/cm³，矿体与围岩间的密度差异有时可达0.5～2.5g/cm³。由于金属矿规模较小，一般产生的重力异常较弱。大部分非金属

表2-1-1 常见岩(矿)石密度值

名称		密度(g/cm³) 变化范围	最常见值	名称		密度(g/cm³) 变化范围	最常见值
沉积岩(物)	黄土	1.4—1.93	1.64	金属矿	闪锌矿	3.5—4.0	3.75
	冲积层	1.96—2.0	1.98		褐铁矿	3.5—4.0	3.78
	砾岩	1.70—2.4	2.0		黄铜矿	4.1—4.3	4.2
	粘土	1.63—2.6	2.21		铬铁矿	4.3—4.6	4.36
	砂岩	1.61—2.76	2.35		磁黄铁矿	4.5—4.8	4.65
	页岩	1.77—3.2	2.40		钛铁矿	4.3—5.0	4.67
	石灰岩	1.93—2.90	2.55		软锰矿	4.7—5.0	4.82
	白云岩	2.28—2.90	2.70		黄铁矿	4.9—5.2	5.0
岩浆岩	流纹岩	2.35—2.70	2.52		磁铁矿	4.9—5.2	5.12
	安山岩	2.4—2.8	2.61		赤铁矿	4.9—5.3	5.18
	花岗岩	2.50—2.81	2.64		辉铜矿	5.5—5.8	5.65
	斑岩	2.60—2.89	2.74		毒砂	5.9—6.2	6.1
	闪长岩	2.72—2.99	2.85		锡石	6.8—7.1	6.92
	辉绿岩	2.50—3.20	2.91		辉银矿	7.2—7.36	7.25
	玄武岩	2.70—3.30	2.99		方铅矿	7.4—7.6	7.5
	辉长岩	2.70—3.50	3.03		辰砂	8.0—8.2	8.1
	橄榄岩	2.78—3.37	3.15	非金属矿	石油	0.6—0.9	
	辉岩	2.93—3.34	3.17		褐煤	1.1—1.25	1.19
变质岩	石英岩	2.50—2.70	2.60		无烟煤	1.34—1.8	1.50
	片岩	2.39—2.9	2.64		石盐	1.9—2.3	2.15
	千枚岩	2.68—2.80	2.74		岩盐	2.1—2.6	2.22
	大理岩	2.6—2.9	2.75		石膏	2.2—2.6	2.35
	蛇纹岩	2.4—3.10	2.78		铝土矿	2.3—2.55	2.45
	板岩	2.7—2.9	2.79		硬石膏	2.9—3.0	2.93
	片麻岩	2.59—3.0	2.80		重晶石	4.3—4.7	4.47

表中数据摘自W.M.Telford等人的著作《Applied Geophysics》

矿矿石的密度均较小。

岩、矿石的密度一般是在实验室中用天平或密度计对标本进行测定，并通过统计处理而求得，也可用其它方法求得岩层的密度。

（三）重力勘探的工作方法和观测结果的整理和图示

1、重力勘探的工作方法

重力勘探的工作任务大体上分为预查、普查、详查和细测四种。每种工作的任务、比例尺、测点间距、测点密度及工作目的均列于表2-1-2。

重力测量的方法可分为路线测量、剖面测量和面积测量三

表2-1-2　重力勘探的工作任务、比例尺、测点间距和密度、工作目的

工作任务	比例尺	测点间距(m)	测点密度(点/km²)	工作目的
预查	1:1000000	7000—10000	0.01—0.02	1.快速提供工区大地构造的基本轮廓； 2.提供进一步工作的靶区。
	1:500000	3000—5000	0.04—0.1	
普查	1:200000	1500—2000	0.25—0.5	1.进一步圈定区域地质构造的详细轮廓、大的火成岩体的范围、形状、沉积岩内部构造等； 2.比较确切地指出成矿远景区。
	1:100000	500—1000	1—4	
详查	1:50000	200—500	4—25	1.较详细地研究工区重力场的分布规律和特点； 2.提出构造和地质体的准确位置和产状。
	1:25000	100—200	25—100	
细测	1:10000	50—100	100—400	1.间接找矿； 2.配合其它物探方法研究某种物探异常的性质、确定地质体产状； 3.为山地工作的施工提供确切资料。
	1:5000	25—50	400—1600	
	1:2000	10—20	2500—10000	

类。路线测量多用于重力预查阶段，主要沿一条或几条交通干线进行，路线之间的距离较大，且彼此很少有联系。剖面测量多用于详查和细测，预先沿剖面线布置好间距相等的测点。面积测量是重力测量的基本形式，应根据地质条件及工作任务的要求使测线和测点构成一定形状的、规则的测网。一般来说，可采用长方形或正方形测网，测线方向大致垂直于探测对象的走向。

重力勘探采用的是相对测量，所以在工作时需在工区选一总基点，总基点的重力值作为零值（即正常场值）。实际工作时用重力仪分别在总基点和测点进行观测。当工区较大时，还设立分基点，总基点与分基点之间要进行联测。详细技术要求这里不赘述。

2. 观测结果的整理和图示

重力观测结果的整理包括两方面内容：一是求出测点与总基点间的重力差值，此值并非是真正的重力异常值，其中还包含有各种影响因素；二是对下列各种因素进行改正：

（1）地形校正；（2）中间层校正；（3）高度校正；（4）正常场校正。通过上述四项校正之后的重力异常才是由地下地质体引起的真正重力异常。在进行各项校正时，常常把高度改正和中间层改正合并起来进行，称为布格校正，经布格校正后的异常称为布格重力异常。

为了使重力异常的解释推断更方便，常用各种图件将重力异常的分布和变化规律形象地表示出来，这种图件称为重力异常图。重力异常的基本或主要图件有三类：（1）重力异常平面图；（2）重力异常剖面图；（3）重力异常剖面平面图。

二、重力勘探在寻找金矿床工作中的地质效能

由金矿地质学知道，与金矿成矿有关的地质问题多种多样，重力勘探在解决其中一些问题时有明显的优势，工作中应充分注意。

（一）利用布格重力异常研究地壳深部构造

从金的成矿规律知道，金矿成矿初始矿源来自深部幔源，切穿地壳的深大断裂带是初始矿源的通道，金往往富集于深大断裂带附近的次级或小断裂及其交汇部位，形成有经济价值的金矿床。因此研究莫霍面埋深、变化特点、地壳厚薄及地壳中深大断裂构造，不仅对于研究地壳的演化、大陆与海洋形成、划分大地构造单元等地学基础理论问题有重要作用，而且对于金矿及其它各种内生矿产的成矿预测也具有十分重要的意义。

1．莫霍面埋藏深度与布格重力异常的相关性：

大量事实证明，布格重力异常与地壳厚度（即莫霍面深度）之间存在着相关性，即重力异常值越高，地壳厚度越薄，莫霍面埋藏越浅；反之，重力异常值越低，地壳厚度越大，莫霍面埋藏越深。此外，布格重力异常还与地形有明显的对应关系，二者近似于镜像关系，如图2-1-3。

2．我国布格重力异常的基本特征与深部构造

图2-1-4和图2-1-5给出了我国布格重力异常图和莫霍面深度图。这两幅图反映出我国布格重力异常和莫霍面深度的分布规律。

（1）我国布格重力异常的变化趋势，是由东部沿海向西至青藏高原逐渐降低，其下降幅度达600mGal以上。东部沿海地区的胶东、辽东及渤海地区，布格异常平均值为+30mGal

左右，西藏高原及雅鲁藏布江一带降低到－575mGal以下。这表明我国地壳厚度是由东部沿海向西南逐渐加厚，东部沿海地区莫霍面深度为34～36公里，而西藏高原及雅鲁藏布江河谷地区莫霍面深度达70公里。

（2）纵观全国布格重力异常线的走向，其分布规律性也很明显，在总的重力异常变化趋势背景上，有几条规模巨大的重力梯级带纵横于全国，而且它们大都与我国主要的褶皱山脉有密切关系。从异常走向展布特征来看，大体上可分为两组：在我国东部地区以北北东及北东向为主，其中以纵贯我国南北的一条北北东向梯级带规模最大，北起黑龙江大兴安岭，经由太行山向南直至云南的滇东南地区。还有福建沿海及川西地区的梯级带也很明显，它们都与该区的山脉有关；在我国西部地区

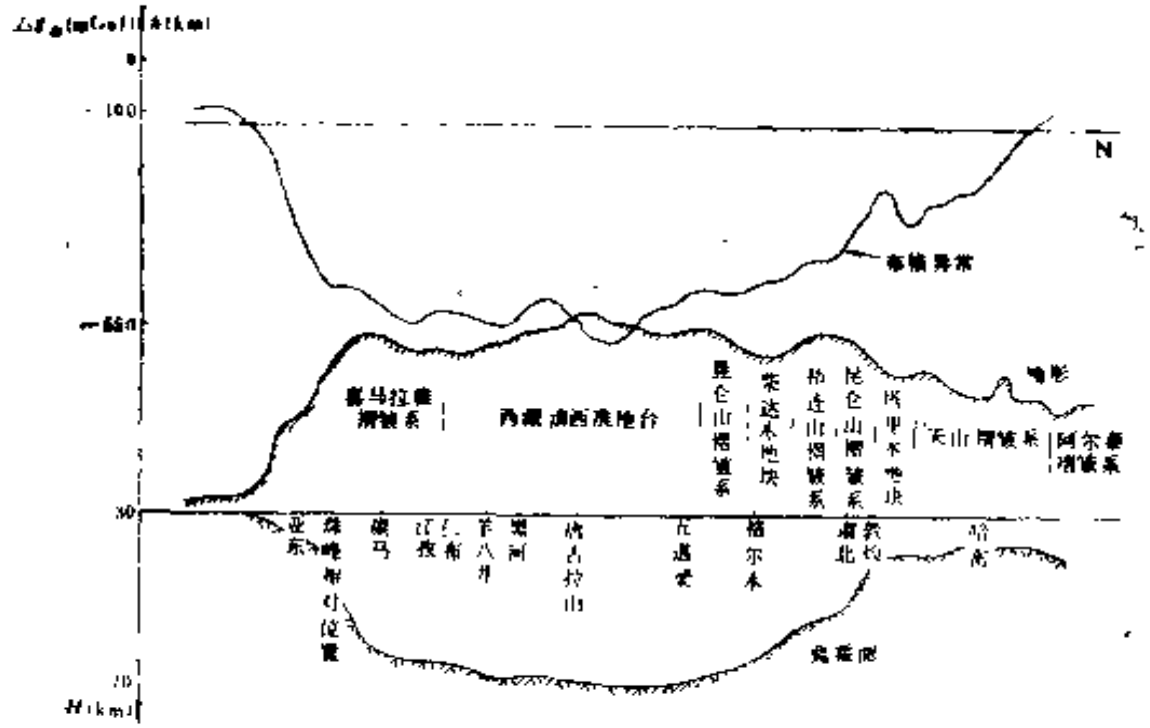


图2-1-3　喜马拉雅山及青藏高原重力异常、地壳厚度和地形剖面图
h-高度；　*H*-深度

则以北西西向或近东西向的梯级带为主，它与东部异常走向相互垂直甚至交汇。这种异常走向截然不同的特征反映出我国东西部不同的深部地壳构造走向的变化规律。从异常强度上来看，西部梯级带的梯度变化较东部大得多，而且与地形高度有密切关系。如西藏南缘的梯级带与喜马拉雅山相吻合，北边梯级带的西段与昆仑山相重合，东段则分成南北两支，北支与祁连山相关，南支与巴颜喀拉山有关。这些重力梯级带都对应着莫霍面的陡坡带。

（3）在上述几条巨大的重力梯级带之间分布着变化比较平稳的区域重力异常，这表明，这些地区区域性地壳构造的活动性较小，长期处于稳定状态，它们多属于比较坚硬、稳固的地台区，如我国的东北地台、华北地台、华南地台、西北部的塔里木地块等。如果从板块构造的观点对我国深部地壳构造进行划分，基本上可以分为三大板块：东部板块、西北板块、西藏板块。在西藏板块的南面还有印度板块。在地壳运动过程中，由于西藏板块处于北、东、南三大板块挤压应力的作用下，不但使其板块边缘形成强烈的褶皱山脉，而且还使整个西藏板块向上抬升，形成地理上的青藏高原和云贵高原。

Tatsch(1975)观点的本质是板块运动控制了全球性金矿的分布格局。天津地质研究院罗镇宽等人认为，板块运动控制了我国金矿的分布格局。他们根据中国板块构造的轮廓(李春昱，1980）以及近几年在这方面研究的新进展，将我国金矿划分为四大成矿域（塔里木—中朝板块成矿域、准噶尔成矿域、华南成矿域、冈底斯—拉萨成矿域）和58个成矿带(具体名称略)。可见，研究深部构造对金矿的成矿预测是很重要的。

（4）在大的区域异常背景上分布着一系列不同形态、不同

规模的局部重力高带（正异常）和重力低带（负异常）。重力高带对应着莫霍面相对局部凸起，地形上为平原或盆地，如准噶尔盆地、四川盆地、鄱阳湖盆地以及黑龙江的三江平原等。重力低带对应着莫霍面的局部下陷（即地壳局部加厚）。地形上与一些较小的山脉对应，如东北的小兴安岭、长白山、泰山、黄山、武夷山、天山山脉等。

（二）根据重力异常划分大地构造单元

大地构造单元是指地槽区和地台区。

地槽区：是地壳运动较为复杂的构造单元，它以强烈的褶皱作用、变质作用、火山作用、成矿作用等为其主要特征。由于强烈的振荡运动和褶皱运动，使地槽区形成巨厚的沉积建造，并在造山运动中地槽回返褶皱成高山地形，地壳厚度往往是很大的。

地槽区布格重力异常的主要特点是：有巨大的负异常背景，区域重力异常等值线多沿一定方向伸展达数十至数百毫伽，正负异常呈线性排列。区域重力异常与构造地形呈镜像关系，布格异常值的趋势常常表现为随着地形的升高重力异常值降低，反映了地壳的加厚；局部异常变化剧烈，可能反映了岩性和构造的复杂性。图2-1-6给出了地槽区布格重力异常的平面特征。

地台区：总的说来区域布格重力异常等值线方向性不太明显，其幅度和梯度也比较小。在比较平缓的背景上呈现出一些幅度不大、较为开阔、线性分布不甚明显的次一级异常。这与地台区基底结构和起伏以及沉积岩系分布特点有关。图2-1-7给出了地台区布格重力异常的平面分布特征（松辽平原的重力异常分布）。

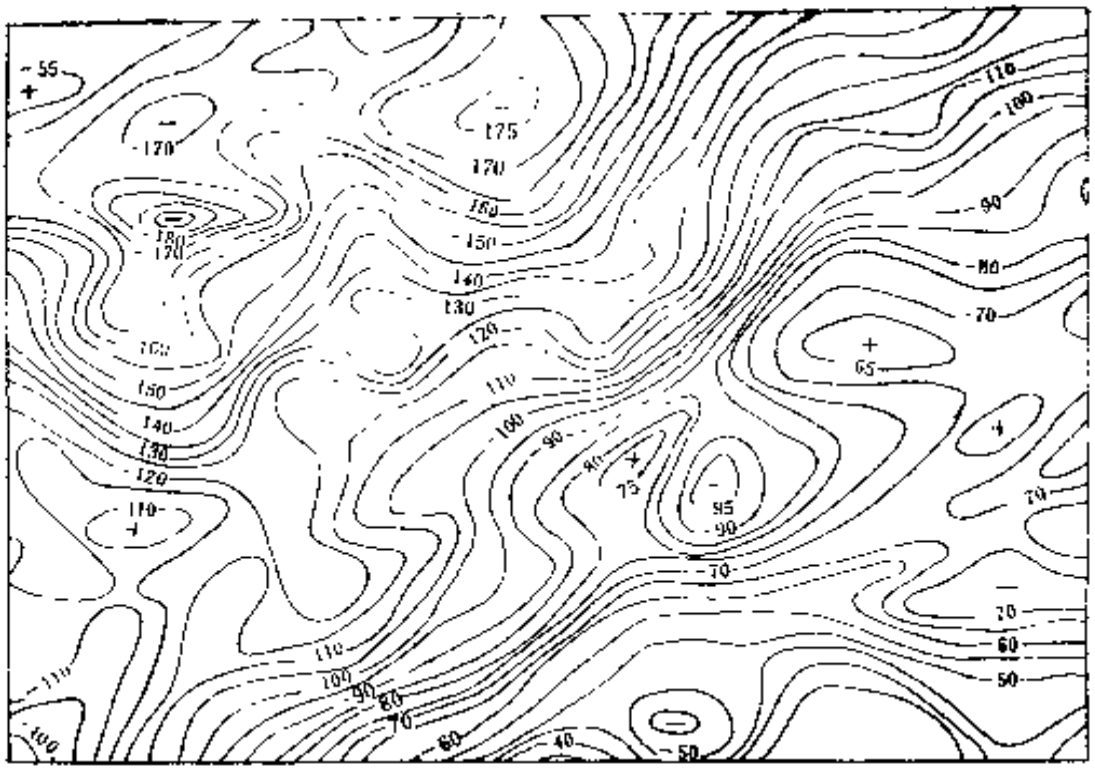


图2-1-6　地槽区布格重力异常平面特征

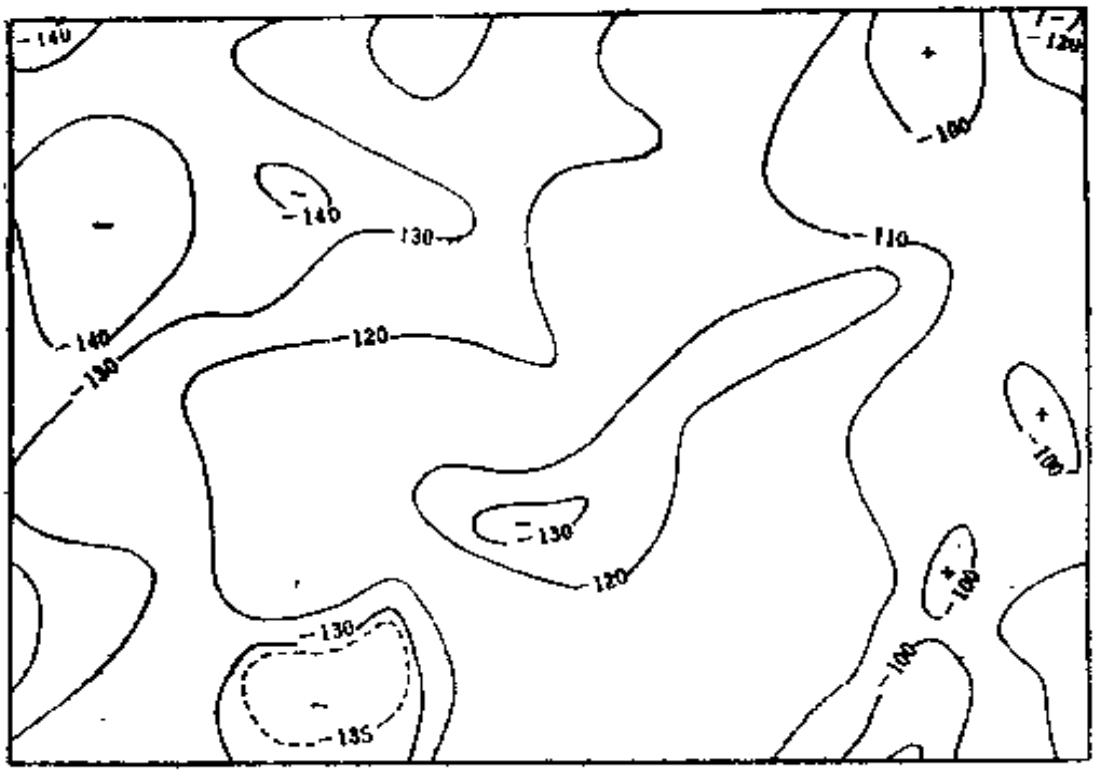


图2-1-7　地台区布格重力平面异常特征

在地槽区和地台区之间的过渡带，布格重力异常最显著的特征是呈现出巨大的重力梯级带，它是深大断裂的反映。

（三）利用重力资料研究区域地质构造

在寻找金矿床的过程中，除了解基岩面的埋深、变化特点之外，为了缩小找金靶区，还需了解区域性地质构造。重力勘探是解决这一问题的主要方法之一。现以华北平原为例说明如下。

华北平原属中国地台的一部分。基底由前震旦纪变质岩系组成。吕梁运动后相当长的时期内，华北平原为一稳定地区，沉积了海相碳酸岩类的地层。加里东运动晚期地台整体上升，缺失上奥陶、志留、泥盆及下石炭纪的沉积，中石炭纪又开始下降，为海陆交互相沉积及陆相沉积……。燕山运动后平原地区开始下降，周围地区褶皱成山。喜马拉雅运动晚期继续下降。因此，华北平原绝大部分地区均为很厚的第四系、新第三系所掩盖。在这样厚的覆盖地区用常规的地质方法进行区域地质构造单元划分是不可能的。但是，利用重力勘探和下节将要介绍的磁法勘探却能经济、快速地解决，经部分钻探验证是正确的。

华北地区岩石密度测定结果表明，在华北平原的沉积地层内，岩石密度值往往随地层年代由老到新而相应地由大变小。在巨厚的沉积中存在两个密度分界面，即古生界与中生界间密度分界面——下部密度分界面，界面上下的密度差为0.41～0.60g/cm^3；中生界与新生界间密度分界面——上部密度分界面，界面上下密度差为0.33～0.51g/cm^3。这些密度差异在地层有起伏的情况下，均能引起相应的重力异常。

利用重力异常特征研究区域地质构造的主要依据是：异常

的形态轮廓、分布范围、幅度变化以及梯度变化等的差异。上述的密度变化特点、重力异常与区域地质构造单元之间大致有这样的规律：重力高带往往反映为古生界以下老地层的隆起带、背斜褶皱带、断块凸起或地垒、结晶基底的凸起等。重力低带则多反映沉积盆地、坳陷、凹陷带、断陷或地堑等等。

根据华北平原的布格重力异常平面图，并结合地质钻井和其它地球物理资料，可将华北平原北部地区划分为博野坳陷带、沧县隆起带、济、黄坳陷带与临清坳陷、内黄隆起等几个区域构造单元，并推断出若干条大的断裂带（图2-1-8）。

（四）利用重力资料确定断层位置及规模

当断裂两侧的岩层发生明显的垂直位移或水平错动，并且有明显的密度差异时，利用重力资料确定断层位置、走向和长度等便具备了良好的地球物理前提。这时，重力异常一般地表现为沿断裂分布的一系列呈线状平行排列的等值线密集带或等值线的同形扭曲带，如图2-1-9所示。前者多反映为垂向断裂或张性断裂，而后者则表现为平移断裂或压扭性断裂。如果在重力高或重力低的两翼相对应地出现两组密集等值线，则表明在强烈褶皱运动中，由于发生断裂而形成地堑或地垒式的构造，如图2-1-10所示。它们多系张性或张扭性断裂。

如果沿断裂带有火成岩侵入体的活动，在重力梯级带上就会出现串珠状的局部磁异常或分布零乱的强磁异常，如图2-1-11所示。

断裂带不仅可以作为划分构造单元的边界，而且它们与地壳构造运动的性质、岩浆及热液活动、金矿分布等都有着密切的关系。因此，追踪和确定断层位置、规模、走向、性质等具有很重要的地质意义。

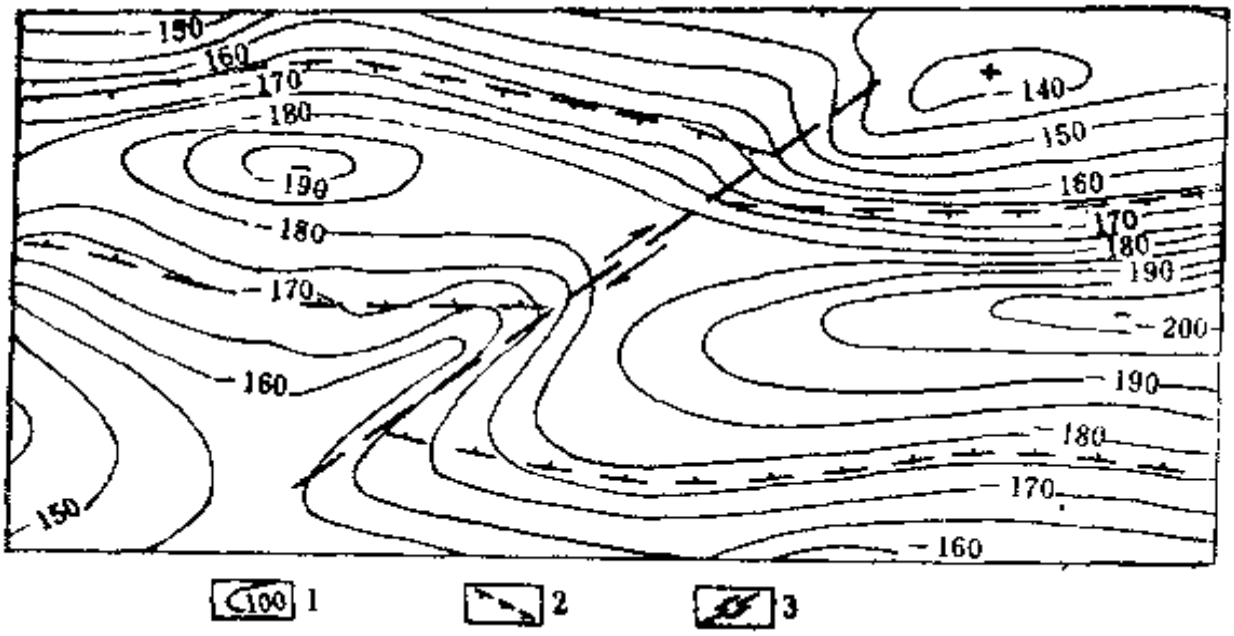


图2-1-9

1-布格重力异常等值线；2-解释推测之垂向或张性断裂及倾向；3-解释推测之压扭性或平移断裂

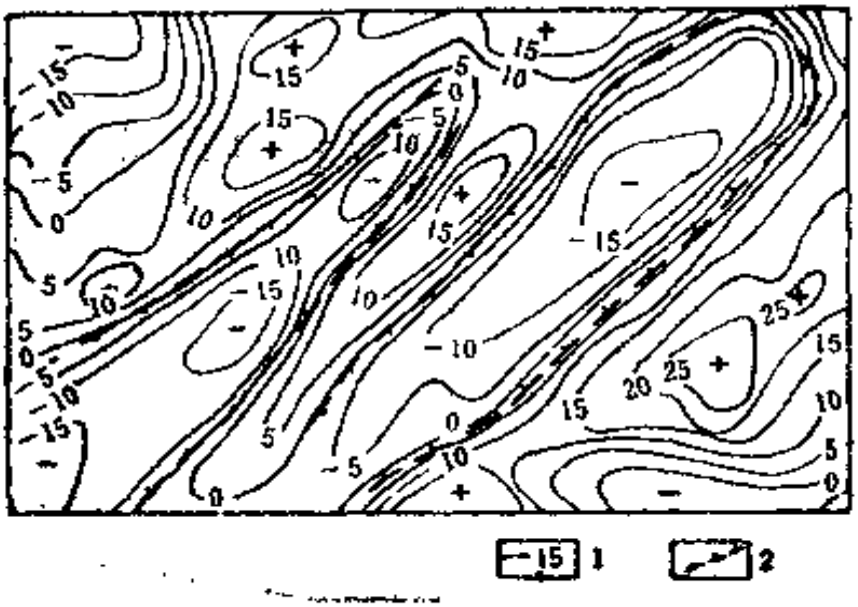


图2-1-10

1-布格重力异常等值线；2-解释推测之断裂及倾向

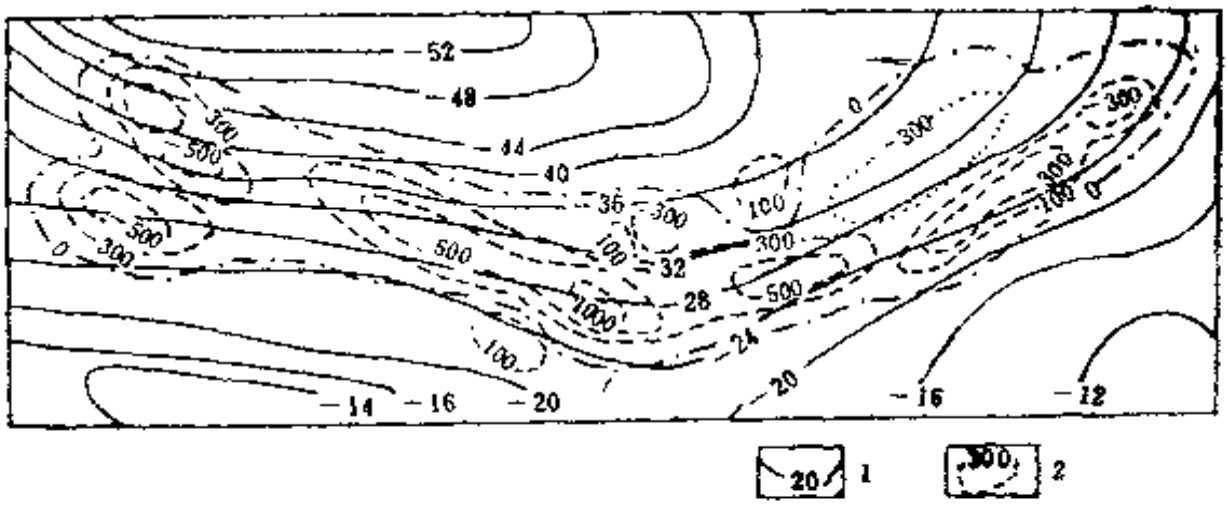


图2-1-11

1-布格重力异常等值线；2-局部磁异常等线值

此外，利用重力资料也可以圈定火成岩体以及地质填图等，此处不再赘述。

（五）利用重力勘探可寻找某些伴生金矿床

因为伴生金矿床中常含有密度值较大的硫化矿物和氧化物矿物。

§2.2 磁法勘探在寻找金矿床工作中的效能

从§1.2中知道，一些重要的金矿床皆与某些岩体、岩脉、磁性地层、岩体与其它地层接触带等有关。例如，美国的霍姆斯塔克金矿床与前寒武纪含铁硅质建造有关；我国黑龙江老柞山金矿、东风山金矿、湖南七宝山金银矿床等都与岩体、磁性岩脉、接触带等有关。此外，磁法在解决与金矿成矿有关的地质问题方面效果明显，故磁法是金矿物探中的主要方法之一，

目前应用较普遍。

磁法勘探是以物理学中的磁学原理为理论基础，以岩、矿石间的磁性差异为地球物理前提，通过观测（在地面或空间）和研究磁场的空间变化规律，达到解决各种地质构造、成矿预测和找矿的目的。磁测按观测场所不同可分为：地面磁测、航空磁测和井中磁测。区域成矿预测中多用航空磁测，也可用大面积地面磁测；在解决局部地质构造、寻找磁性矿床、与磁性有关的金矿床及伴生金矿床多用地面磁测。

一、磁法勘探的基本原理

（一）磁法勘探的物性依据

岩、矿石由于含有（铁）磁性矿物而具有磁性，各类岩、矿石所含磁性矿物的种类和数量都不相同，因而它们之间存在磁性差异。表征岩、矿石在地磁场中被磁化程度的物理量为磁化强度，用字母$\vec{J}$表示。它由两部分组成：一部分是被现代地磁场磁化后取得的，称为感应磁化强度（简称感磁），用字母$\vec{J}_i$表示；另一部分是岩、矿石形成时受当时地磁场磁化后获得的磁化强度被保留下来的部分，称为剩余磁化强度（简称剩磁），用字母$\vec{J}_r$表示。总磁化强度可用下式表示，

$$\vec{J}=\vec{J}_i+\vec{J}_r$$

感应磁化强度取决于岩、矿石的磁化率（κ）和现代地磁场强度$\vec{T}$，其方向一般与$\vec{T}$一致，即

$$\vec{J}_i=\kappa\vec{T}$$

在地磁场中磁化率可视为常量，它是表示岩、矿石磁性强弱的主要参数，κ值愈大，表示磁性愈强，反之则弱。岩、矿石磁性强弱主要取决于铁磁性矿物的含量。

表2-2-1给出了各类岩、矿石磁化率的测定结果。分析测定结果可见，尽管岩、矿石的磁性变化范围很大，但仍具有一

表2-2-1　各类岩(矿)石的磁化率

名称		$\kappa(4\pi\times10^6SI)$ 变化范围	$\kappa(4\pi\times10^6SI)$ 最常见值	名称		$\kappa(4\pi\times10^6SI)$ 变化范围	$\kappa(4\pi\times10^6SI)$ 最常见值
沉积岩	白云岩	0—75	10	非金属矿	石墨		−8
	灰岩	2—330	25		石英		−1
	砂岩	0—1660	30		岩盐		−1
	页岩	5—1480	50		石膏		−1
岩浆岩	花岗岩	0—4000	200		方解石	−0.6—−1	
	流纹岩	20—300			煤		2
	辉绿岩	80—13000	4500		粘土		20
	粗岩	20—16700	5000	金属矿	黄铜矿		32
	玄武岩	20—14500	6000		闪锌矿		60
	闪长岩	50—10000	7000		锡石		90
	辉岩		10500		菱铁矿	100—310	
	橄榄岩	7600—15600	13000		黄铁矿	4—420	130
	安山岩		13500		褐铁矿		220
变质岩	片岩	25—240	120		毒砂		240
	千枚岩		130		赤铁矿	40—3000	550
	片麻岩	10—2000			镜铁矿	240—9400	600
	石英岩		350		磁黄铁矿	10^2—5×10^5	125000
	蛇纹岩	250—1400			钛铁矿	2.5×10^4—3×10^5	1.5×10^5
	板岩	0—3000	500		磁铁矿	10^5—1.6×10^6	5×10^5

表中数据摘自W.M.Telford等人的著作《Applied Geophysics》

定规律：岩浆岩磁性一般较高，由酸性岩到基性岩，随着二氧化硅含量逐渐降低，铁磁性矿物含量逐渐增加，岩石磁性也逐渐增强。一般来说，岩浆岩磁化率均在几千至一万($\times10^{-3}$A/m)。

沉积岩磁性一般很弱，磁化率K常见值仅几十($\times10^{-5}$A/m)，其中有许多沉积岩可视为无磁性。变质岩的磁性常与变质前岩石磁性强弱有关，通常，变质岩的磁化率值介于沉积岩和岩浆岩之间，其磁化率值为几百($4\pi\times10^{-6}$SI)。非金属矿的磁性很弱，而金属矿中以磁黄铁矿、钛铁矿和磁铁矿的磁性为最强，磁化率高达几万($4\pi\times10^{-6}$SI)。显然，用磁法勘探可圈定磁性岩体与地层、研究具有不同磁性的地质构造、寻找含磁性矿物的各种伴生金矿床等等。

(二)磁法勘探的理论依据

人们长期观测结果表明，地球周围存在着磁场，此磁场称为地磁场，它类似于一个大磁铁的磁场。近代对地磁场的研究表明，地磁场是由基本磁场、外源磁场和磁异常三部分组成。

基本磁场：如图2-2-1所示。设地磁场强度为$\vec{T}$，在地球不同位置其幅值及倾角是不同的。$\vec{T}$在XOY面内的投影$\vec{H}$称为水平分量，其方向即为磁北方向；$\vec{H}$与X轴的夹角称为磁偏角，用D表示。$\vec{T}$与XOY平面的夹角称为磁倾角，用I表示。$\vec{T}$在Z轴上的投影称为地磁场的垂直分量，用$\vec{Z}$表示。

磁法勘探主要是测量地磁场垂直分量$\vec{Z}$和总磁场强度$\vec{T}$的相对变化值，故属于相对测量，与重力测量类似。

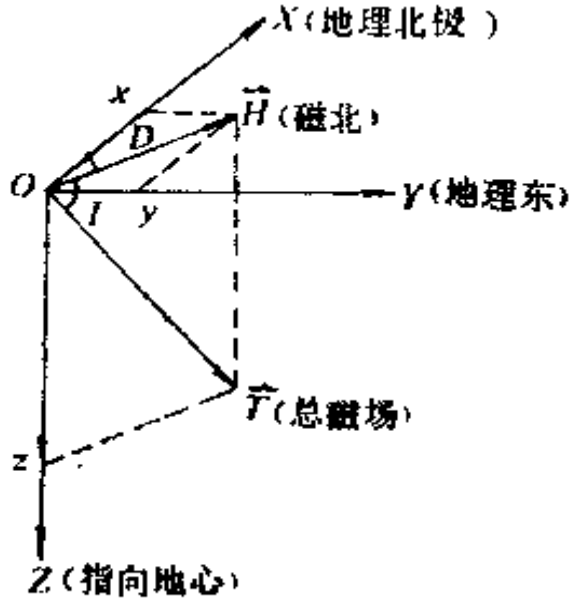


图2-2-1　地磁要素

在世界范围内，地磁要素Z、H和I按下面规律分布：等Z线、等H线和等I线都大致平行于地理纬线；在赤道附近，垂直分量Z和磁倾角I为零，水平分量最大，其值达0.3～0.4奥斯特(Oe)*，地下含磁性矿物地质体在这里将受到“水平磁化”；随着纬度向两极逐渐增加，Z和I的绝对值逐渐增加，而H值却逐渐减小，在这些地区地下含磁性矿物的地质体将受到“倾斜磁化”；在地球两极附近某地，地磁场倾角I达±90°，水平分量H为零，垂直分量的绝对值最大，其值达0.6～0.7奥斯特(Oe)。此处便是地球的磁极。处于两地磁极附近的地质体受到“垂直磁化”。我国南方和长江中下游地区为倾斜磁化，黑龙江地区可近似看作垂直磁化。

外源磁场：这种磁场起源于地球外部并迭加在基本磁场上的各种短期磁变化，它仅占地磁场很小一部分（不到1%），但组成比较复杂。例如，太阳黑子活动引起的磁变化、日变化和磁暴等。这些都是磁法勘探中应避免和需要校正的干扰磁场。

磁异常：实践表明，消除了各种短期变化磁场后，实测地磁场与基本磁场（即正常磁场）间还存在着差异，这个差异称为磁异常。磁异常实际上就是地下岩、矿体或地质构造受地磁场磁化后，在其周围空间形成、并迭加在地磁场上的局部异常。磁异常中由分布范围较大的深部磁性岩层或区域地质构造等引起的部分，称为区域异常；由分布范围较小的浅部磁性岩、矿体或地质构造引起的部分，称为局部异常。

地面磁测中，主要是观测地磁场垂直分量的相对变化值，称为垂直磁异常，用Z_a或ΔZ表示，即

$$Z_a=\Delta Z=Z-Z_0$$

* 根据法定计量单位和地质行业计量单位手册上要求，磁场单位用纳特(nT)表示，即$1Oe=10^5nT=10^5\gamma$(下同)。

式中Z表示实测地磁场垂直分量值；Z_0表示正常场的垂直分量值，单位为纳特(nT)。对Z_a或ΔZ还须进行以下校正：

（1）日变改正；

（2）温度改正；

（3）零点位移改正；

（4）纬度改正（基点与测点不在同一纬度）。

Z_a或ΔZ进行以上四项改正后的结果才是真正的、用于推断解释的磁异常。

航空磁测是测定总磁场强度的相对变化值ΔT，称为总磁场标量异常，即

$$\Delta T = T - T_0$$

式中T表示实测的总磁场强度值；T_0表示正常场的总磁场强度值。磁测结果同样需要进行相应的校正后，方可用于推断解释。

关于不同形状磁性地质体的磁异常的理论计算、曲线形态及资料解释方法，磁法勘探教程中均有系统的论述，有兴趣者可参阅。

（三）野外工作方法及观测结果的图示

正确地确定磁测任务是提高磁测地质效果的必要条件。磁测工作可分为普查和详查两类。普查工作包括小比例尺填图，中、大比例尺填图和矿产资源的普查；详查工作主要是通过研究磁异常的形态特征来寻找和评价矿产资源或解决其它地质问题。

表2-2-2给出了磁测工作的任务、相应的比例尺与测网。

地面磁测主要有以下工作：（1）选择基点：基点应选在磁场稳定的地方，如沉积岩区或磁性干扰较小的地区。测区较大时，须设立一些分基点作为辅助测量用。基点与分基点组成基

点网，其间的磁场差值要通过联测确定。（2）测点观测：测点观测有一定的技术要求和精度要求，可参考有关规范。

表2-2-2 磁测工作的任务、相应比例尺与测网

比例尺	线距(m)	点距(m)	地质工作阶段	测量方法
1:1 000 000	10 000		小比例尺区测填图	航空磁测和海洋磁测
1:500 000	5000		小比例尺区测填图	
1:200 000	2000	200～1000	中比例尺区测填图	
1:100 000	1000	100～500	中比例尺区测填图	
1:50 000	500	50～250	大比例尺区测填图	航空磁测、海洋磁测和地面磁测
1:25 000	250	25～100	大比例尺区测填图	
1:10 000	1000	10～30	找矿	地面磁测
1:5000	50	5～20	找矿	
1:2000	20	4～10	勘探	
1:1000	10	2～5	勘探	
1:500	5	1～2	勘探	

航空磁测工作主要有：（1）基线飞行：目的在于确定仪器的零点漂移或当天磁场的相对零值。（2）测线飞行：即测量全区磁场的飞行。（3）特殊飞行：包括联系不同日期测量成果的飞行、对测量成果重复检查飞行以及观测日变的飞行等。

磁测结果可绘成磁异常剖面图、剖面平面图和平面等值线图等。以用于推断解释。

二、磁法勘探在寻找金矿床工作中的地质效能

磁法勘探是目前金矿地质工作中应用较多的物探方法之一，概括起来，磁法可用来解决以下几方面问题。

（一）利用磁测结果可以研究区域性莫霍面的埋深、变化特点及地壳厚度

在§2.1中已较详细地阐述了我国莫霍面深度、变化特点和地壳厚度，那些数据都是利用重力资料和深地震测深资料求出的。磁法勘探同样也可以解决这一问题。但应该强调说明的是，在解决上述问题时，重、磁方法应进行综合利用，尤其要与目前获得的深地震测深资料进行综合解释，才能得到较准确的数据。

（二）利用磁测结果研究区域地质构造

在区域地质调查中，磁测工作主要用于划分大地构造单元，圈定岩体和断裂，提供进一步普查找矿的远景区。

为了应用航磁资料解决区域地质调查中的有关地质问题，就应首先了解各类岩石上的航磁异常特征。

沉积岩上航磁异常特征：沉积岩的磁化率一般在100×10^{-6} A/m以下，可视为弱磁性或无磁性。因此，沉积岩区在航磁图上反映为接近零值的平稳磁场，可视为正常磁场。如图2-2-2所示。

岩浆岩上航磁异常特征：岩浆岩的磁性相当复杂，即使同一类岩石其磁性也因地、时代不同而有很大差别。火山岩中磁性矿物分布不均匀，其磁化亦不均匀。火山岩引起的磁异常呈跳跃变化，梯

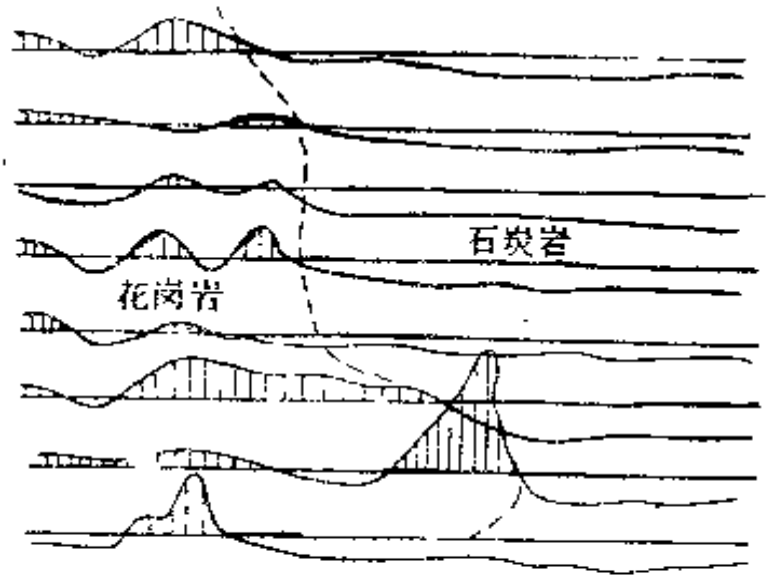


图2-2-2　东北某地花岗岩与灰岩接触带的ΔT异常

度大而尖锐，以致相邻测线上异常难以对比。一般来说，基性火山岩的异常强度较大，酸性火山岩异常强度较小。图 2-2-3 给出了某地玄武岩上的磁场特征。

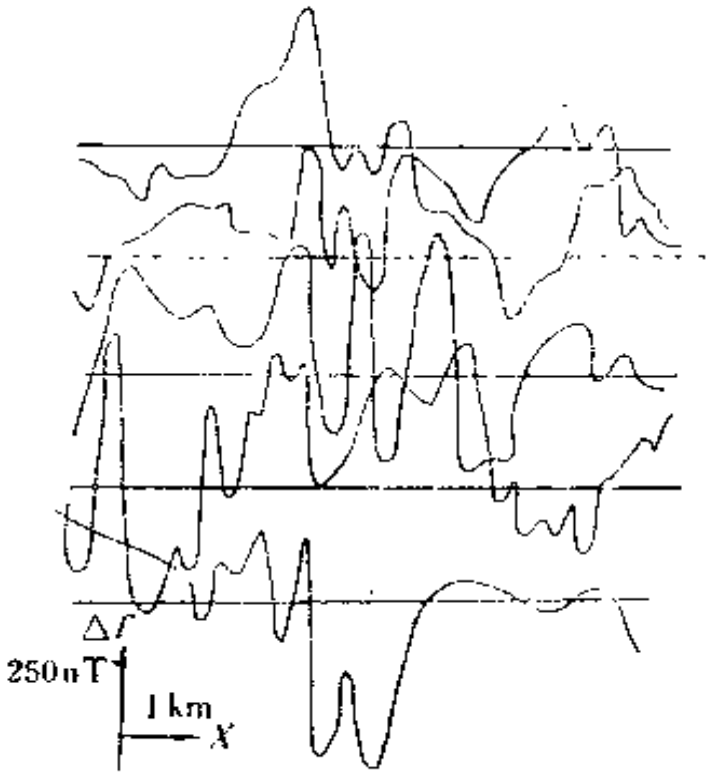


图2-2-3　某地玄武岩上的ΔT异常

各类侵入岩的磁化率较稳定，其磁场有强有弱，但比火山岩的磁场平稳得多。基性、超基性侵入岩能产生很强的磁场而酸性花岗岩侵入体磁性却不强(图2-2-2)。

变质岩上航磁异常特征：变质岩的磁场在强度上也有很大差别。副变质岩磁性较弱，而正变质岩磁性较强，能引起数百至上千纳特 (nT)的异常，其中尤以角闪片麻岩为最强。有些混合岩含磁铁矿极不均匀，异常跳动十分剧烈。

在区域地质调查中，利用航磁资料可以研究结晶基底的构造、盖层沉积构造、断裂构造、圈定火成岩和接触带等等。

根据我国区域物探对金矿区的工作结果表明：金矿带、金矿床的分布与区域地质构造有一定关系，而区域地质构造又与区域物探异常分布有一定关系，即金矿带、金矿床分布与区域

物探异常分布有一定关系。图2-2-4给出了燕山地区金矿床（点）分布与区域磁异常分布的关系。该图清楚地表明：燕山地区的金矿床（点），总体上分布在靠近正航磁异常区附近的低、负磁异常区内。这一特点不仅是燕山地区如此，而且我国胶东地区金矿带、金矿床分布与区域磁异常的分布也有上述特点，如第三章中图3-3-3、图3-3-4和图3-3-7所示内容也均说明这一点。我国金矿物探工作结果说明，上述特点在某种程度上具有普遍性，而不是个别现象，工作中应予以注意。上述现象的原因在第三章中详细讨论。

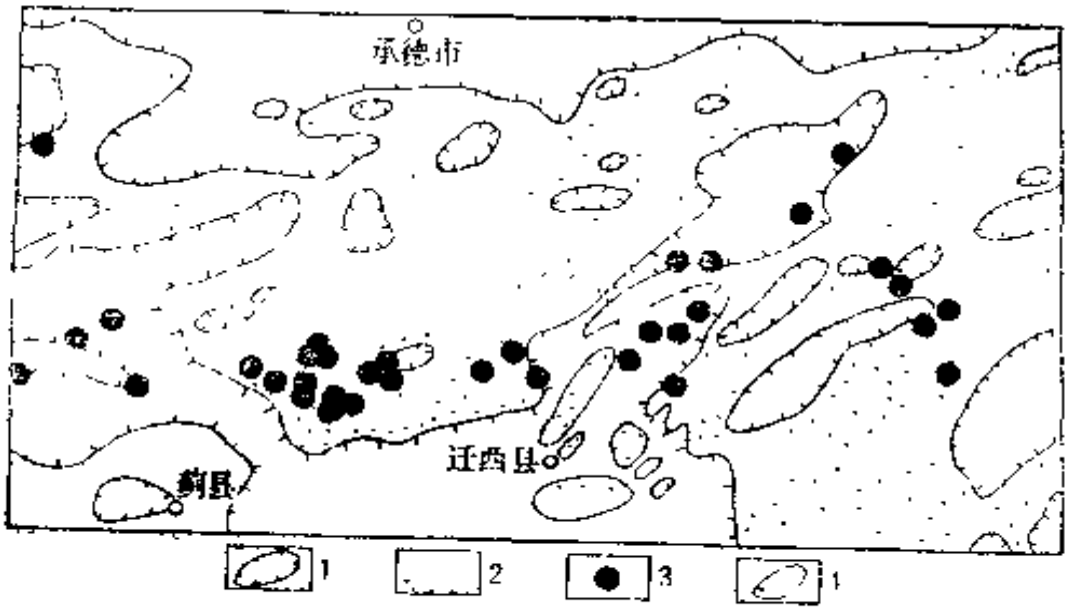


图2-2-4　燕山地区金矿床(点)分布与区域磁异常分布的关系（引自潘勇飞）

1-正航磁异常及其范围；2-负航磁异常(−1～−250nT)及其范围；3-金矿床(点)；4-正航磁异常中的负异常

（三）利用磁测结果寻找和圈定不同类型、不同规模的断裂构造

由地质学知道，规模较大的断裂构造常常有岩浆活动伴

生。在这种情况下，磁异常大多表现为长条状线性磁异常，或串珠状、雁行排列的线性磁异常，并且断裂带两侧的磁场往往有很大差别。图2-1-11便是在断裂带中有岩浆活动，磁异常呈串珠状分布的具体例子。图2-2-5是郯-庐深大断裂中段的ΔT磁异常图。

此外，还有一些断裂带没有岩浆活动伴生。当断裂带发生在磁性岩石中时，由于岩石断裂破碎磁性减弱，故断裂带常常表现为线性磁场低值带或负值带。图2-2-6是胶东某区断裂破碎带上的磁测剖面曲线。该图上反映的断裂破碎带上磁异常特点是显而

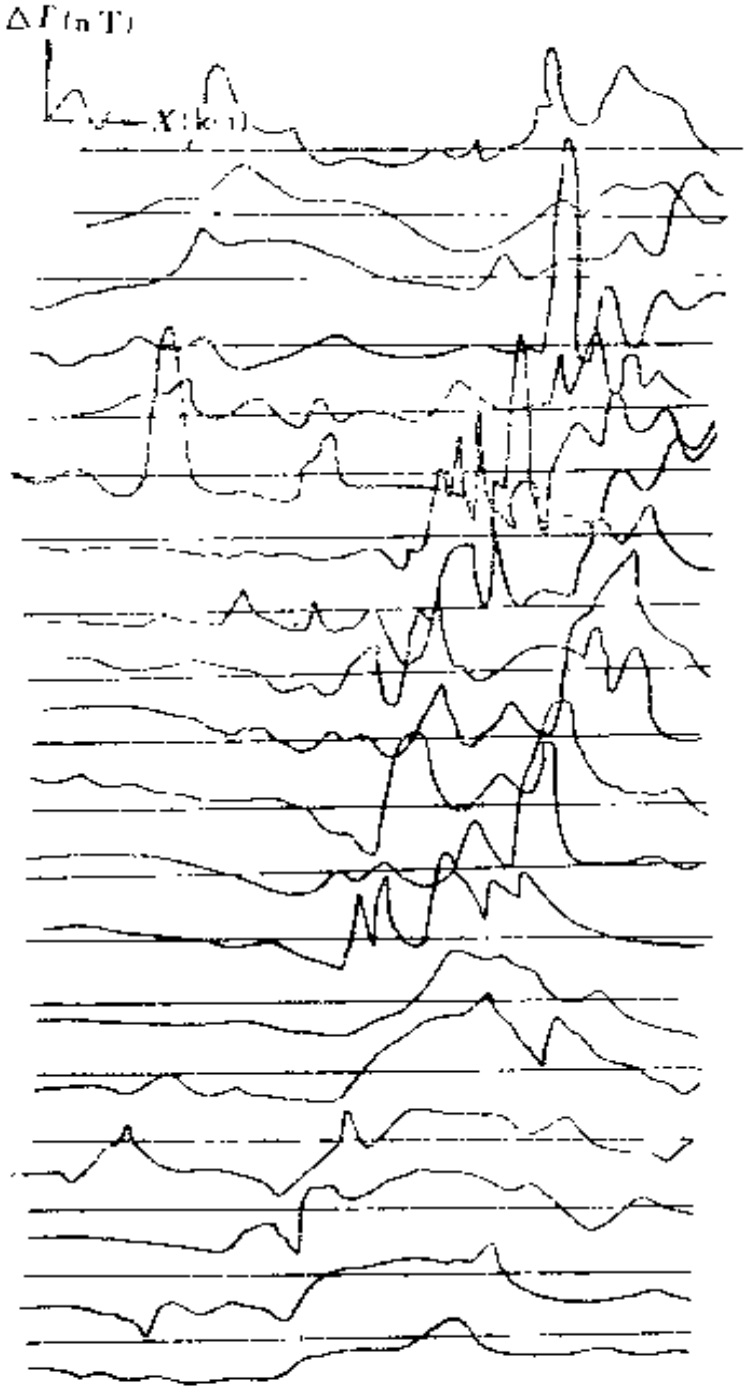


图2-2-5　郯城—庐江深大断裂中段的ΔT异常

易见的。另外，不少金矿床赋存在断裂破碎带及蚀变带中，其上的磁异常与断裂带上的磁异常一样，有的为负磁异常，有的为由负磁场到正磁场的过渡（见第三章图3-3-1和图3-3-2）。

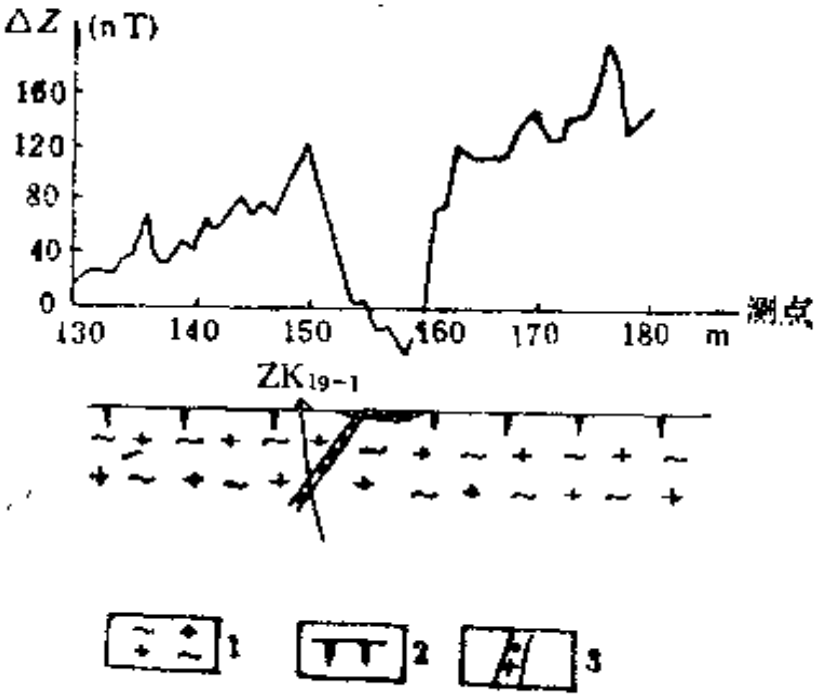


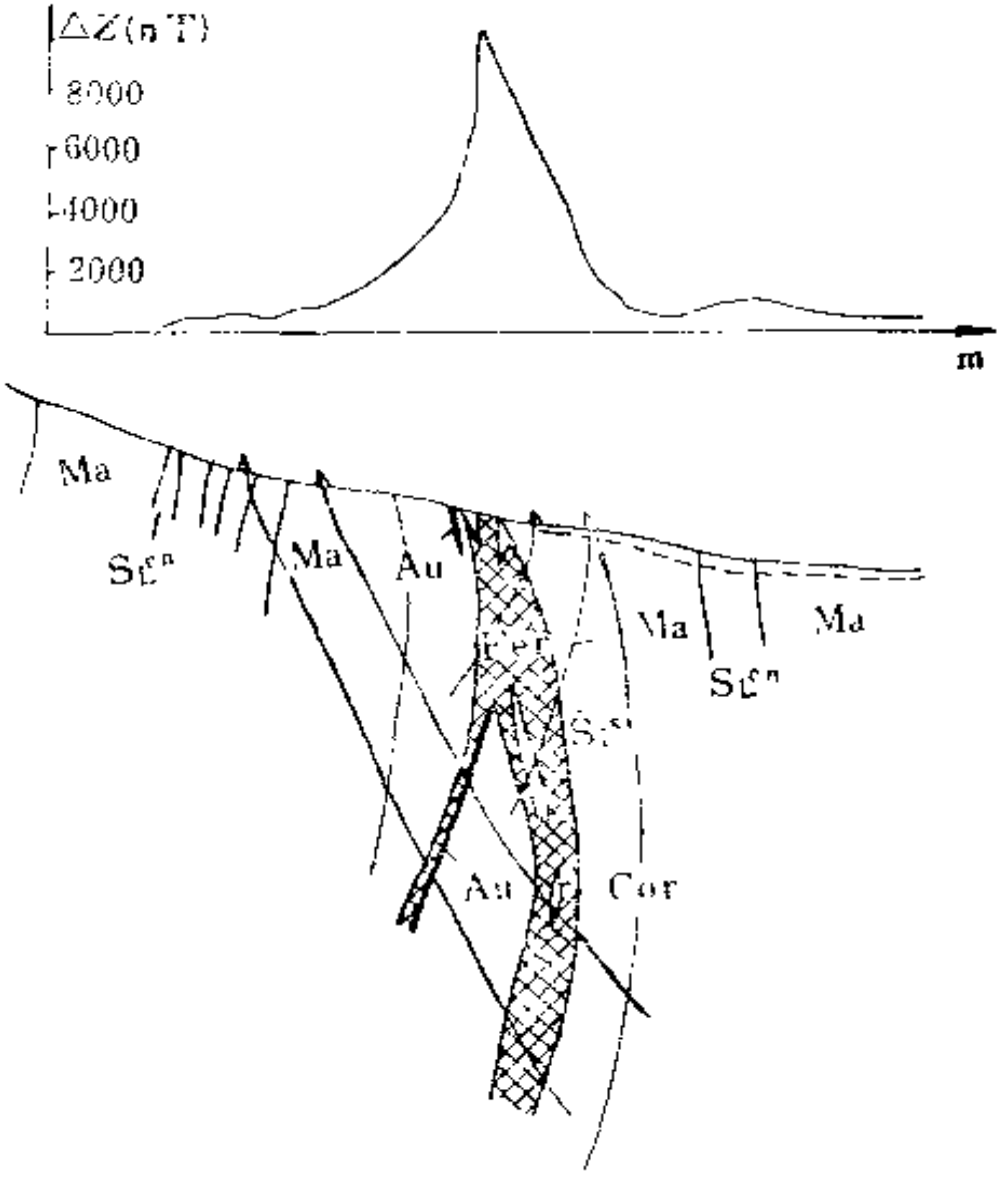
图2-2-6　胶东望儿山地区断裂破碎带上磁测剖面图（引自李宝印）
1-花岗岩；2-表土；3-破碎带

在金矿区平稳的磁场中出现高值线型异常带常是构造存在的标志。其原因是，火成岩脉沿断裂构造侵入而形成的。

（四）在含铁建造中形成某些金矿体或金矿床

这类矿床常含大量磁性矿物，具有不同程度的磁性，甚至磁性很强。通过磁测圈定磁性地质体的位置、范围，达到间接找金矿的目的。图2-2-7给出了黑龙江省东风山金矿床上一条磁测剖面曲线。这类金矿床为金、铀型金矿床，具有强磁性。金矿体产于前寒武纪变质岩中的含铁石英岩下，矿体呈层状。剖面上出现了很明显的磁异常，其最大值大于8000纳特(nT)，根

据磁异常分布范围可以准确地圈出磁铁矿层，因此也就间接地圈出了金钴矿体位置。

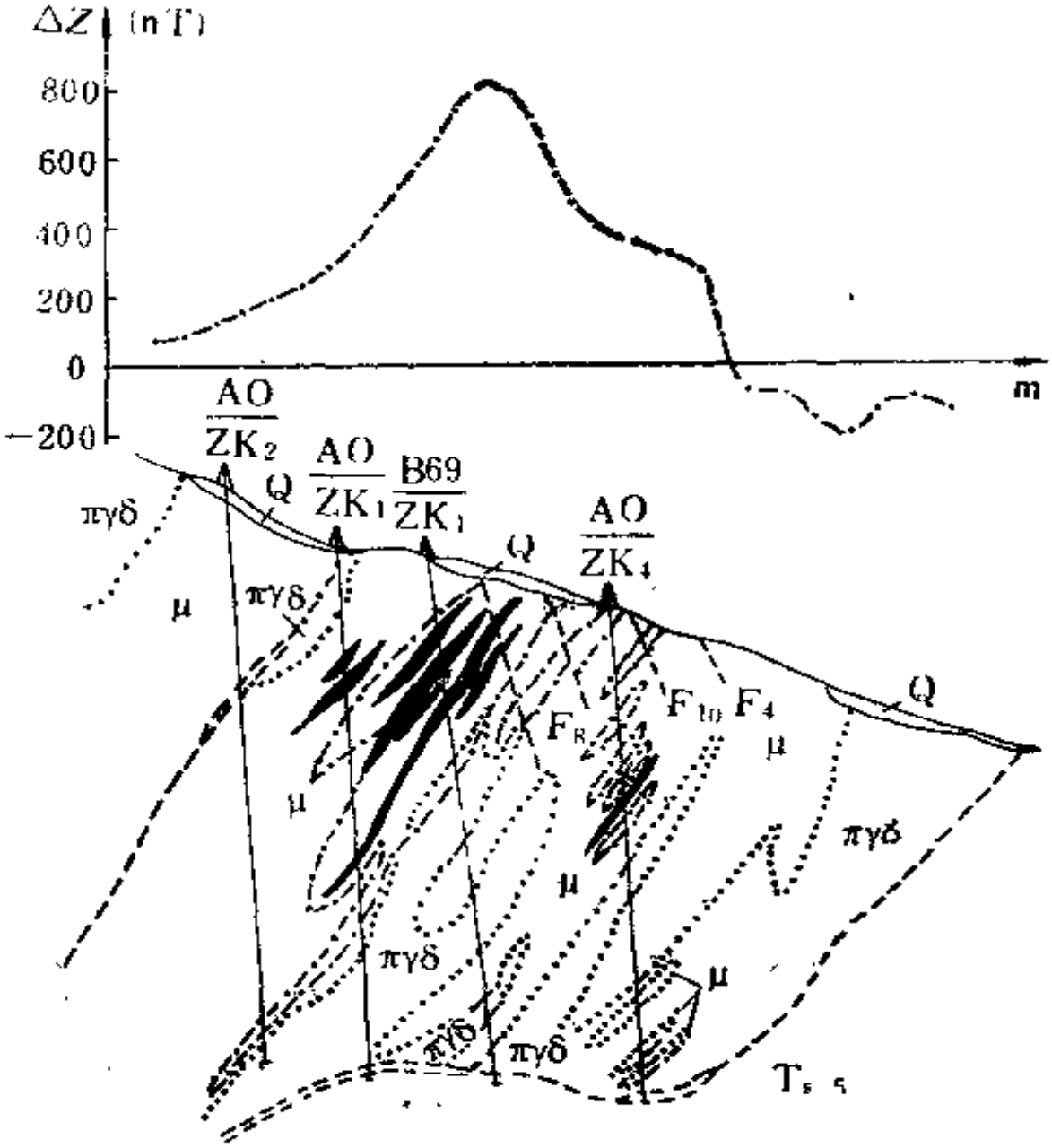


Ma 1　Sc^{n} 2　Sc^{s} 3　Au 4　Cor 5

Fe$_1$ 6

图2-2-7　黑龙江东风山金矿区20线综合剖面图
（引自冯瑞琦、张金生）

1-结晶灰岩；2-板岩；3-硅质板岩；4-金矿体；5-钴矿体；6-磁铁矿体



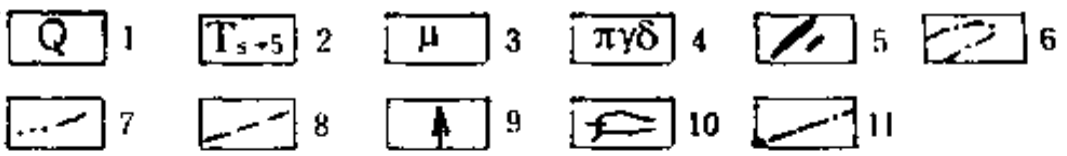


图2-2-8　青海门源松树南沟金矿区AO勘探线综合剖面图
（引自岳友君、陈其栋）

1-第四系；2-三叠系砂岩；3-细碧岩；4-斑状花岗闪长岩；5-金矿体(大于3g/t)；6-金矿化体(1～3g/t)；7-地质界线；8-断层；9-钻孔；10-坑道；11-磁法ΔZ曲线

（五）有些金矿床的形成常与某些岩体或岩体与其它岩层的接触带有关，用磁法圈出这些岩体和接触带便能缩小找金的范围。图2-2-8是青海省门源县松树南沟金矿区AO勘探线综合剖面图。该区出露的岩石大部分不具有磁性或仅为弱磁性。一般在斑状花岗闪长岩与细碧玢岩接触带上磁性较强，连续性好。在金矿体上部和上盘磁性较弱，而在金矿体的下部和下盘磁性增强。在金矿体品位较好的地段磁性强，且连续性好。一般金矿化厚度大，金矿体也比较好。相关分析计算结果表明：磁化强度J_i值与金矿体呈正相关。坑道和钻孔原生晕揭示，金与铜呈正相关，铜元素的内带是金矿体的富集地带。而铜元素晕的内带与磁性强且连续的重合地段，是该区找金的显著标志。

此外，金矿床还与某些磁性岩层、岩脉等有关，例如南非兰德金矿床，其金矿体与磁性页岩有关，通过航磁确定磁性页岩位置、走向、产状等，间接找到了韦科姆金矿田。

（六）伴生金矿床中常含有不少磁性矿物，用磁法可圈定磁性体的位置、范围等，可起到间接找伴生金矿床的目的。

综上所述，在寻找金矿床的过程中，若具有良好的地球物理前提，磁法可以解决与金矿成矿有关的多种地质问题。磁法是金矿物探中的主要方法之一。

目前，个别金矿地质工作者过分夸大了磁法在寻找金矿床中的作用，在其所编著的书中这样写到："在具有金-硫化物矿石建造的金矿床中，常可含有不同量的强磁性或磁性矿物，使磁法直接找金具有现实意义"。的确有一些金矿床与不同类型磁性体有着直接或间接关系，个别情况下，某些磁性体如火成岩脉等含金量甚至达到矿石标准，即是如此，磁法也是通过

寻找和圈定磁性体，缩小找金范围，达到间接找金矿的目的。对任何一种物探方法都应正确地评价其在金矿地质工作中的作用和地位，过分夸大或缩小物探方法的作用，都不利于物探方法的正常发挥作用。

§2.3 电法勘探在寻找金矿床工作中的效能

电法勘探是勘探地球物理学中的主要学科之一，简称为电法。它是以电磁学、电化学原理为理论基础，以地壳中岩、矿石的导电性、导磁性、激电性的差异为其地球物理前提，通过观测和研究电磁场（天然的或人工的电磁场）、激电场的空间和时间分布规律，查明地下地质构造和寻找有用矿产资源的目的。电法勘探种类繁多，目前寻找金矿床常用的主要变种方法有：电阻率法、激发极化法，在条件合适时也可使用自然电场法、充电法和电磁法等。

一、电阻率法

电阻率法是利用地下岩、矿石电阻率（导电性）的差异，通过观测和研究电场的空间分布规律，进行地质填图、查明地下地质构造和寻找各种有用矿产资源。可见，应用电阻率法解决地质问题的地球物理前提是工区中岩、矿石应具有明显的电性差异，这种差异越大，地质效果也将越好。反之，电阻率法将是无效的。

1．岩、矿石的导电性

在电法勘探中表征岩、矿石导电性好坏的参数为电阻率，用字母ρ表示，单位为欧姆·米（$\Omega\cdot m$）。电阻率ρ越小，岩、

矿石导电性越好，反之则差。

在自然界中自然金、自然铜的电阻率均很低，约为$n \times 10^{-8}$，但因含量甚少，其对岩、矿石的导电性没有什么影响。此外，石墨的电阻率也很低；因此碳质岩（矿）石也会给电法工作带来一定影响。

自然界中大多数金属矿物均属于半导体。大多数常见的金属硫化物，如黄铜矿、黄铁矿和某些氧化物，如磁铁矿等电阻率均小于1欧姆·米，具有良好的导电性。而另外一些硫化物和氧化物，如辉锑矿、铬铁矿等，其电阻率均较高。绝大多数造岩矿物，如石英、辉石、长石、云母、方解石等，其电阻率均大于10^6欧姆·米，在干燥情况下可视为绝缘体。造岩矿物均属于固体电解质。

岩、矿石的电阻率值不是一个固定值，而是在一定范围内变化的。如图2-3-1所示。由图可见，火成岩与变质岩的电阻

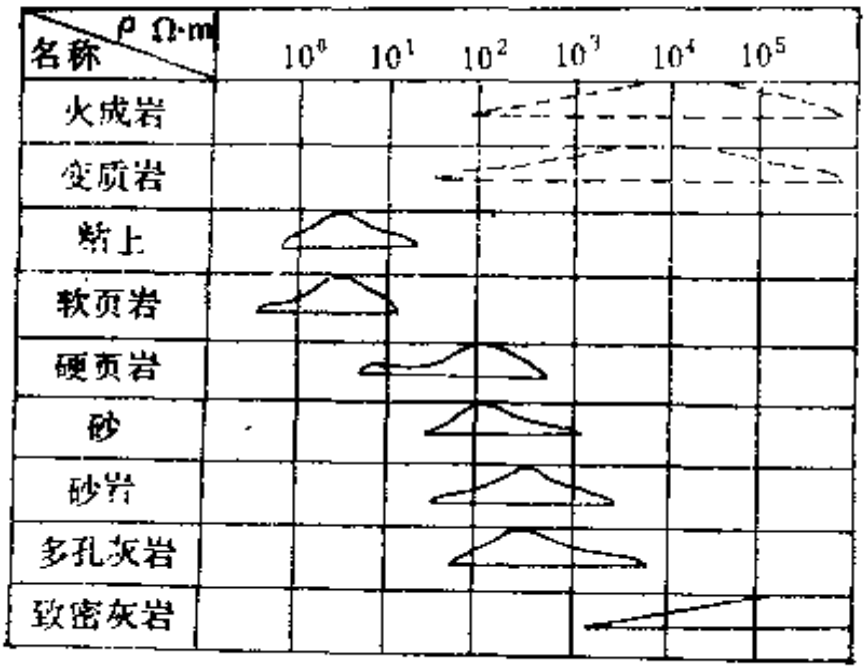


图2-3-1　几种岩石电阻率值的分布范围曲线

率值较高，其值在10^2～10^5欧姆·米范围内变化；沉积岩电阻率值一般较低，而致密灰岩的电阻率值则较高。影响岩、矿石电阻率的主要因素有：（1）岩、矿石的物质成份和结构；（2）岩、矿石孔隙度大小或含水分多少；（3）岩、矿石所处环境的温度。例如，同一种岩石由于断裂破碎而含水、泥，其电阻率值将比未断裂之前明显降低，这便是用电阻率法圈定断裂破碎带的地球物理前提。

2．电阻率法的物理实质

在均匀大地表面上布置如图2-3-2所示装置，图中E为供电电源；Ⓐ为电流表，测量供电电流强度I；A、B为供电电极；K为供电电流通断开关，控制电流的通与断；M、N为测量电极；Ⓥ为测量M、N极间电位差（ΔU）的电位计。由电源E（接通开关K）通过地面上供电电极A、B向地下输入强度为I的电流，在大地中建立起稳定电流场，地中电流分布概貌如图2-3-2所示。在地面上两测点M、N之间观测电位差ΔU，并按公式

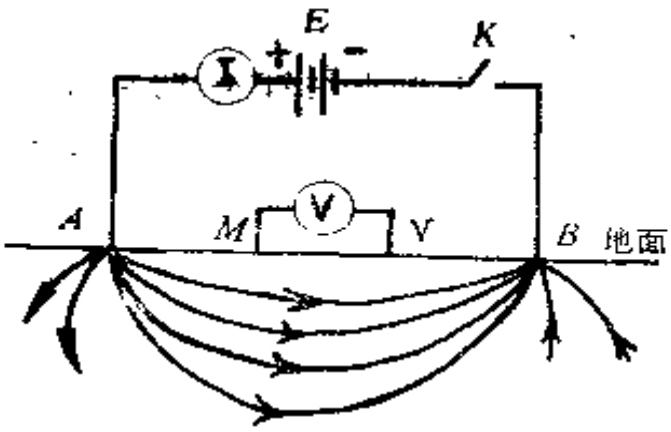


图2-3-2　均匀大地中稳定电流场分布示意图

$$\rho = K\frac{\Delta U}{I}$$

计算电阻率值。式中K为装置系数（单位为米），它与A、B、M、N四个电极的相对位置和间距有关。

前面我们曾假设大地为均匀介质，按上述公式计算的是均匀大地的真电阻率值。众所周知，大地是由不同导电性的多种岩、矿石组成。如图2-3-3，当均匀电流场中有高阻体和良导体存在时，高阻体排斥电流，使地表附近的电流密度相对均匀介质情况明显增大，M、N间电位差ΔU增大，因此按上述公式计算的电阻率比均匀介质时也增大；而均匀电流场中的低阻地质体吸引电流，使地表附近的电流密度相对均匀介质时减小，M、N间ΔU也减小，因此所得的电阻率比均匀介质时也减小。在这种情况下所测得的电阻率ρ值既不是均匀大地的电阻率值也不是某种电性不均匀体的电阻率值，而是它们共同作用的结果。因此称这样的电阻率为视电阻率，用ρ_s表示，单位仍为欧姆·米（Ωm）。视电阻率ρ_s反映了地下电性不均匀体的分布状态和电阻率的相对高低。如图2-3-3所示，低阻体上方

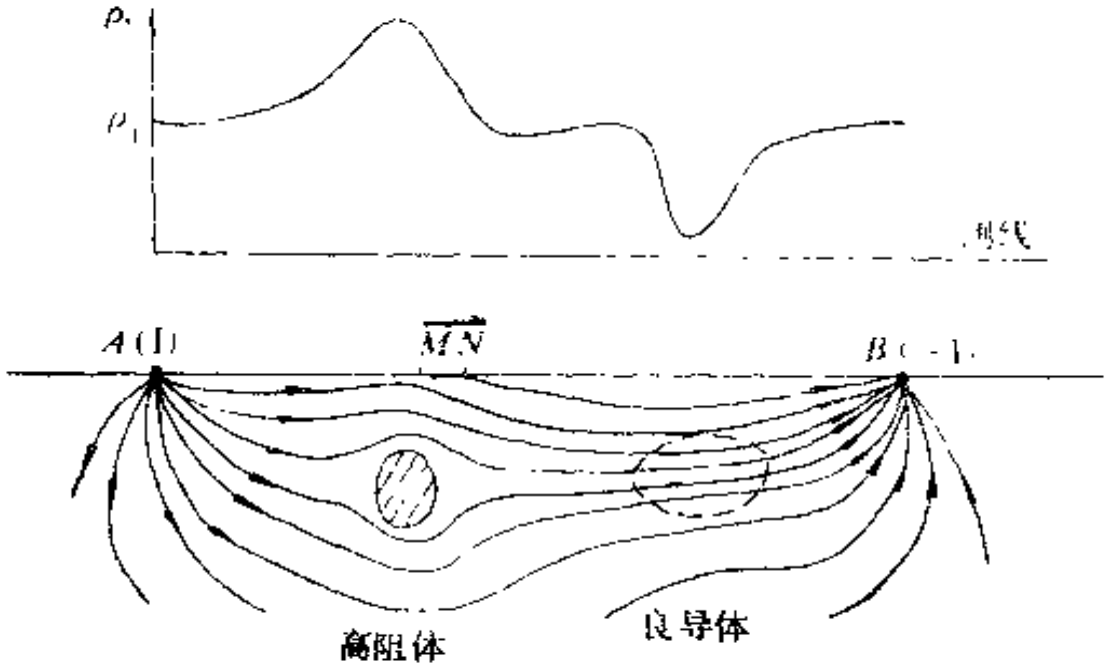


图2-3-3　非均匀介质情况下地中电流场分布及视电阻率异常曲线示意图（中梯装置）

ρ_s曲线出现一个极小值，称为极小型异常；而高阻体上方，ρ_s曲线出现一个极大值，称为极大型异常。可见，电阻率法的实质是：通过研究视电阻率ρ_s的空间分布规律，依据视电阻率异常特征判断地下是否存在不同导电性（高阻或低阻）的地质体，进而圈定其范围、走向和埋深。

3．电阻率法的分类及野外工作方法

电阻率法是一类电法勘探方法的总称，它包括多种变种方法。根据电极排列方式和工作方式可以分为：中间梯度法（简称中梯）、电剖面法（二极剖面法、三极剖面法、联合剖面法、对称四极法、偶极剖面法等）、电测深法等。通常也可将每种方法称为“装置”，例如，中间梯度法、联合剖面法，也可称为中间梯度装置、联合剖面装置。图2-3-4给出了各种方法装置

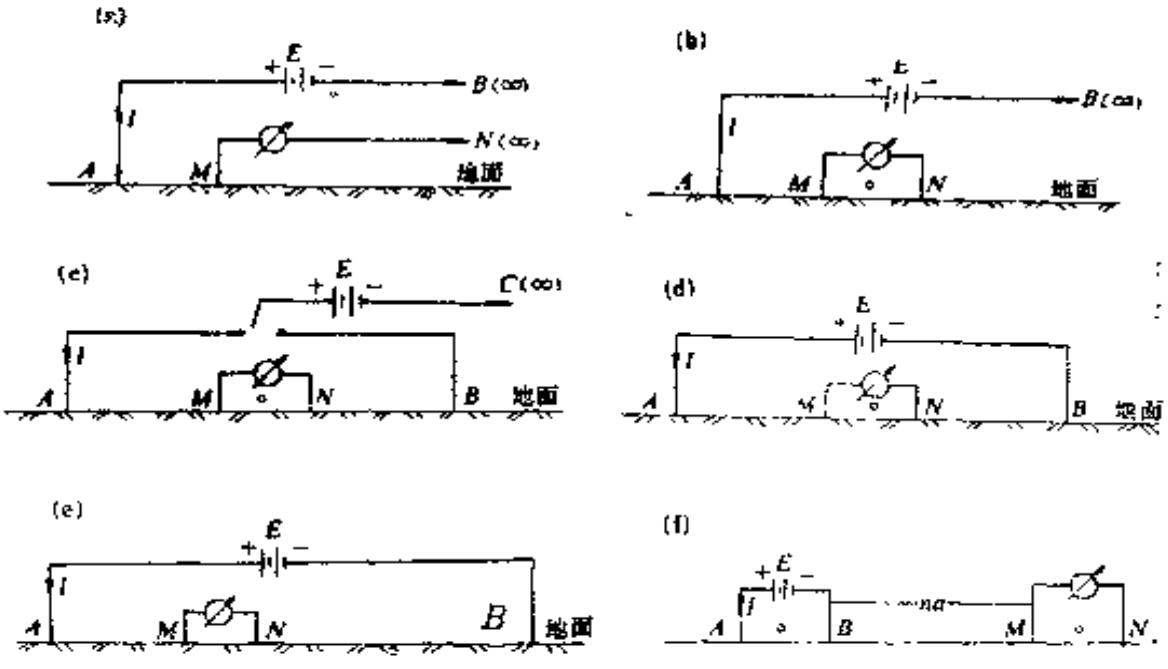


图2-3-4　电阻率法各种装置的示意图

（a）二极剖面法；　（b）三极剖面法；　（c）联合剖面法

（d）对称四极法；　（e）中间梯度法；　（f）偶极剖面法

示意图。

中间梯度法主要用来寻找和追索陡立的高阻岩脉和矿脉，如含金石英脉、伟晶岩脉、滑石菱镁片岩化带等，进行面积性填图工作，查明地质构造等。联合剖面法主要用来寻找和追索良导电陡倾矿脉、断层、破碎带、接触带等。对称四极法主要用来进行地质填图，研究覆盖层下基岩的起伏、地质构造等。电测深法主要用于层状岩层地区，解决比较平缓的不同电阻率地层的分布问题，查明地质构造；解决覆盖层下基岩深度变化、表土厚度等。其它方法在金矿床上应用较少，这里不再赘述。

4．各种地质体上不同装置的视电阻率ρ_s异常特征

电阻率法主要是依据野外观测结果整理出来的各种异常曲线和图件的推断解释来解决各种地质问题，为此，这里给大家介绍一下各种地质体上不同装置的视电阻率异常特征和分布规律。

中间梯度法：高阻直立脉状体上视电阻率ρ_s异常曲线如图2-3-5所示。显然，在脉状体顶端ρ_s出现极大型异常，异常曲线对称，ρ_s极大值与直立脉状体顶端在地表投影位置对应。可依ρ_s曲线极大值出现来判断高阻地质体的存在及其导电性；依ρ_s异常极大值位置确定脉状体顶端在地表的投影位置；依ρ_s异常曲线是对称的可判断脉状体的产状是直立的。

图2-3-6给出了内蒙赤峰红花沟金矿区含金石英脉上中梯法所测得的视电阻率曲线。该区金矿点多产于太古界变质岩中，含金石英脉的近矿围岩主要为中度混合岩化的斜长角闪岩及混合花岗岩。经物性测定含金石英脉的电阻率高达22916欧姆·米，比其它围岩高3～16倍。含金石英脉与含金蚀变带具有

明显的高阻特征，视电阻率出现明显的极大型ρ_S异常，依ρ_S异常可以清楚地判明地下有含金石英脉存在及其位置。

为了求得高阻直立薄脉状体顶端埋深h，可利用ρ_S剖面曲线的半极值点间弦长q和拐点弦切距m（图2-3-5(a)），按下面近似公式求出。

（1）q法：

$h\approx 0.5q$；

（2）m法：

$h\approx 0.6m$。

以上求h方法简单易行，但精度不高，属半定量的、近似的方法。

中梯装置对低阻直立薄脉状体无明显反映，但是对缓倾或水平良导脉状体、低阻球体和低阻水平圆柱体均有明显反映，为简单起见，这里不再赘述。

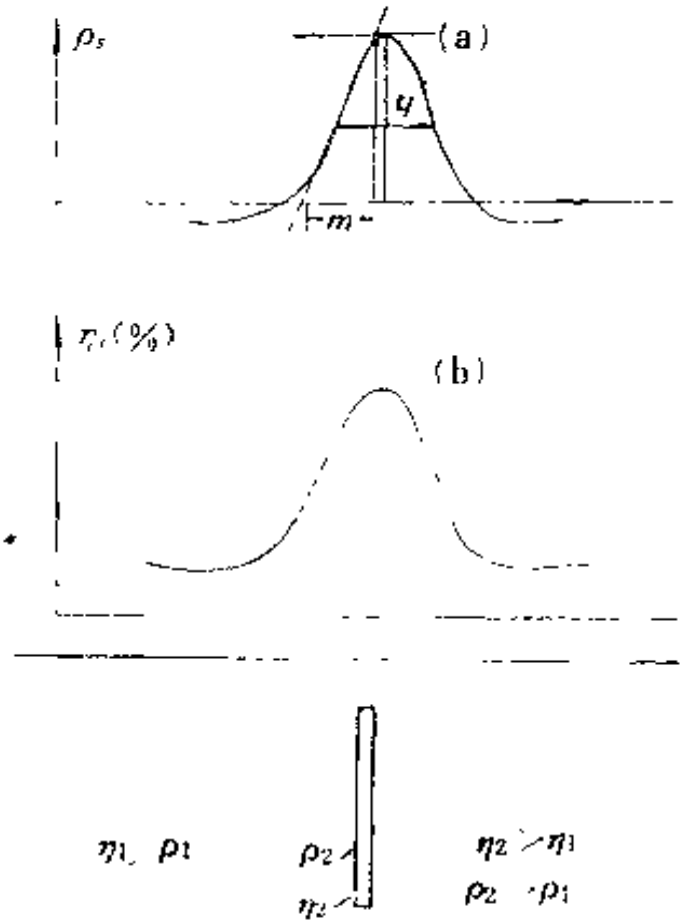


图2-3-5 在直立高阻高极化脉状体上中梯装置的视电阻率法和激发极化法异常
（a）电阻率法ρ_S异常曲线；
（b）激发极化法η_S异常曲线

联合剖面法：联合剖面法是由两个三极装置$AMN\infty$、$MNB\infty$所组成，在一条剖面上观测两条三极剖面法视电阻率曲线ρ_S^A、ρ_S^B，由ρ_S^A和ρ_S^B组成的异常曲线称为联合剖面曲线。联

合剖面法无论在低阻体上还是高阻体上，由ρ_S^A和ρ_S^B曲线组成的联合剖面ρ_S异常曲线，均大致呈“∞”字形，两条曲线在不同导电的地质体上出现交点：

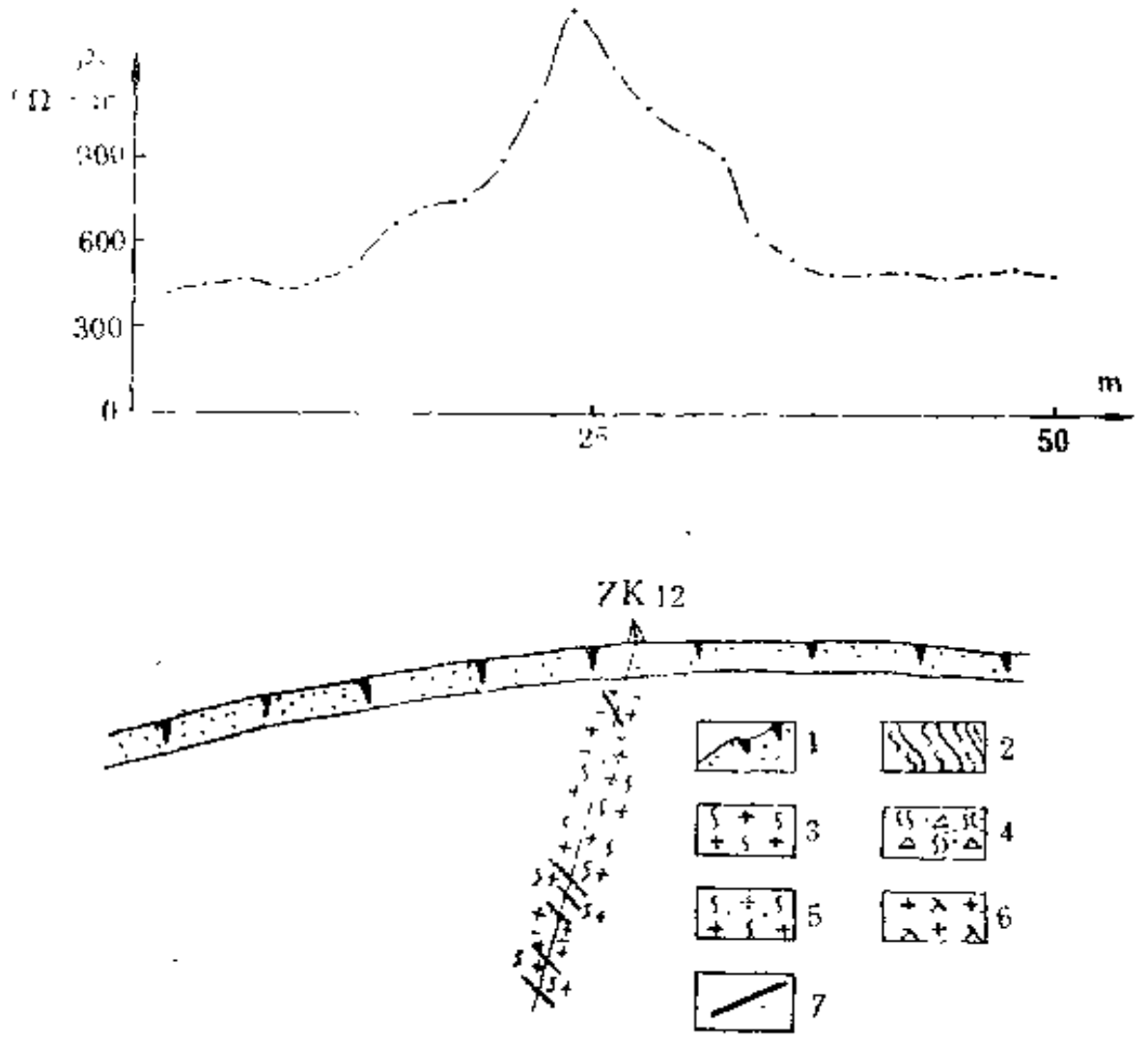


图2-3-6　内蒙赤峰红花沟金矿区Ⅶ号线视电阻率异常曲线
1-第四系；　2-斜长角闪片麻岩；　3-混合花岗岩；
4-压碎混合花岗岩；　5-含黄铁矿混合花岗岩；
6-闪长玢岩；　7-含金黄铁矿石英脉

（1）在低阻矿脉、断层、破碎带、接触带及其它形体的低阻体上，ρ_S^A、ρ_S^B曲线出现正交点，即在交点左边$\rho_S^A > \rho_S^B$，在

交点右边$\rho_S^A<\rho_S^B$。一般用符号⊕表示，图2-3-7(a)给出了低阻直立薄脉状体联合剖面装置ρ_S异常曲线。正交点位于直立脉状体顶端在地表投影处，曲线对称。可依联剖正交点判断脉状体为低阻体，可依正交点位置判断直立脉的顶端位置。

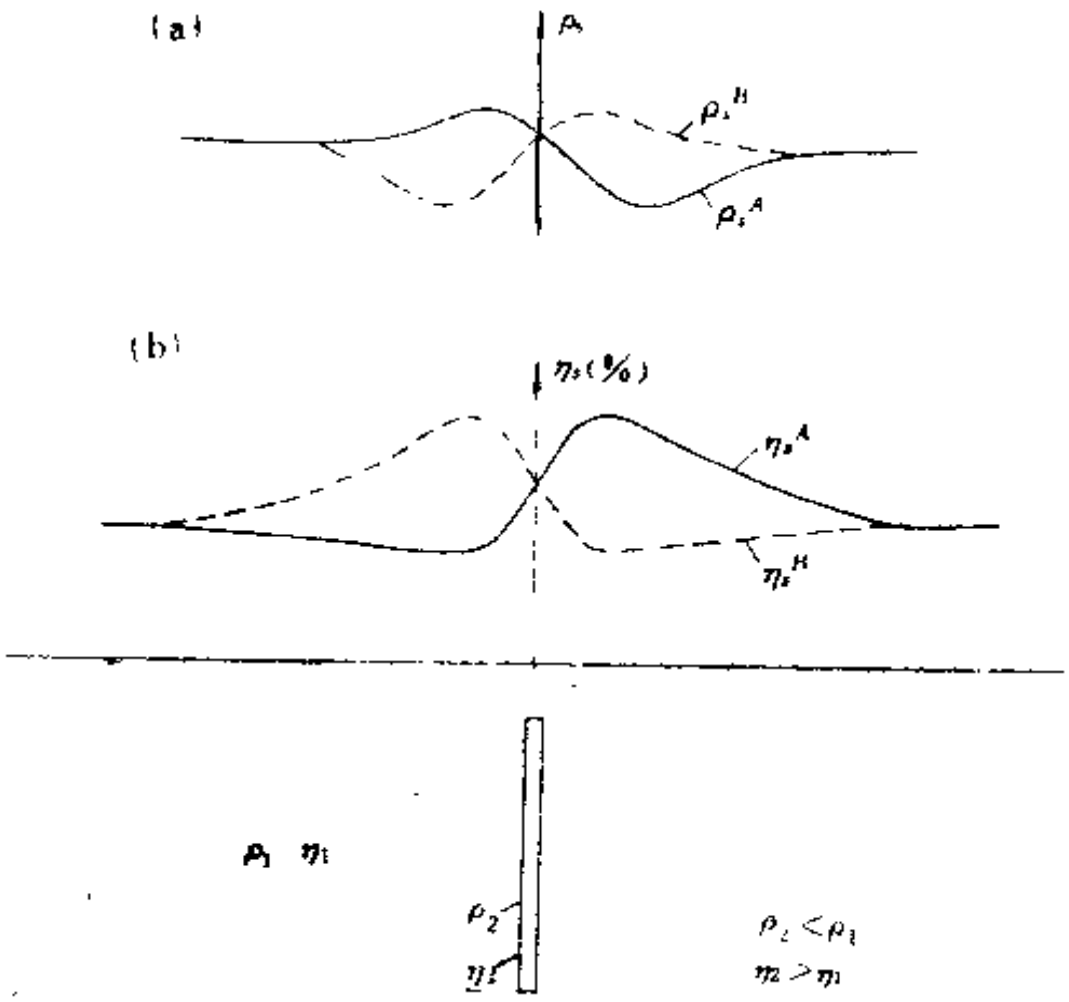


图2-3-7　在低阻直立脉状体上联剖装置ρ_S和η_s异常曲线
（a）视电阻率曲线；　（b）视极化率曲线；

第三章中图3-4-1是吉林三道岔金矿区用联合剖面法正交点⊕勾绘的多条断裂带。图3-4-2是该区4号勘探线联合剖面法ρ异常曲线，在断裂破碎带顶端处有明显的正交点。

（2）在高阻矿脉（如含金石英脉）、岩脉及其它形体高阻体上，ρ_S^A、ρ_S^B曲线出现反交点，即在交点的左边$\rho_S^A<\rho_S^B$，在交点的右边$\rho_S^A>\rho_S^B$，一般用符号⊖表示。图2-3-8给出了高阻直立薄脉上联合剖面法ρ_S异常曲线。

若脉状体倾斜时，联合剖面法ρ_S曲线变得不对称，在倾斜方向上ρ_S极小值幅值增大，正交点⊕向倾斜方向位移。极距AO大者，⊕位移距离也大(图2-3-9)。可依不同极距的⊕位移方向确定良导板状体的倾斜方向。

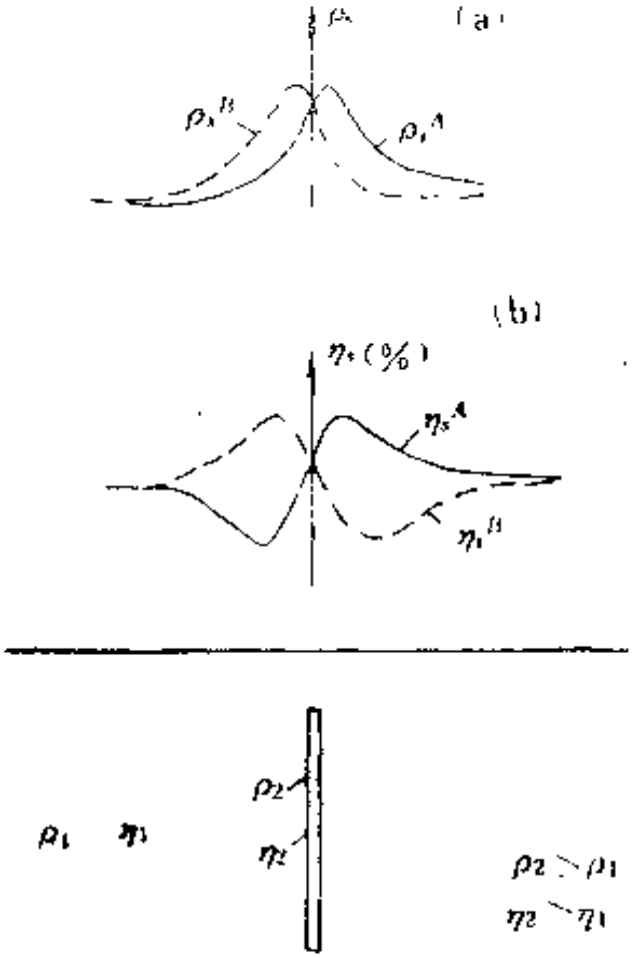


图2-3-8 在高阻直立脉状体上联合剖面装置ρ_S和η_S异常曲线
（a）视电阻率曲线；（b）视极化率曲线

图2-3-10给出了胶东地区金矿带变质岩中破碎带上不同极距的联合剖面法ρ_S异常曲线。AO为210米ρ，联合剖面异常交正点⊕相对AO为150米的正交点位置向小号点方向位移，因围岩电性均匀，故可依交点位移方向确定破碎带的倾向。

对称四极法：可用来研究覆盖层下基岩起伏、地质填图

等。例如，在山东招掖金矿带曾做此项工作，但都是根据联合剖面法ρ_s曲线整理而得。

山东物探队整理出焦家断裂上ρ_s^{AB}异常曲线，清楚地反映了焦家断裂带。山东冶金地质勘探公司物探队，在掖县西由地区根据联剖整理出对称四极的视电阻率ρ_s^{AB}曲线，依ρ_s^{AB}平面图圈出了6条断裂带和池家岩体等。

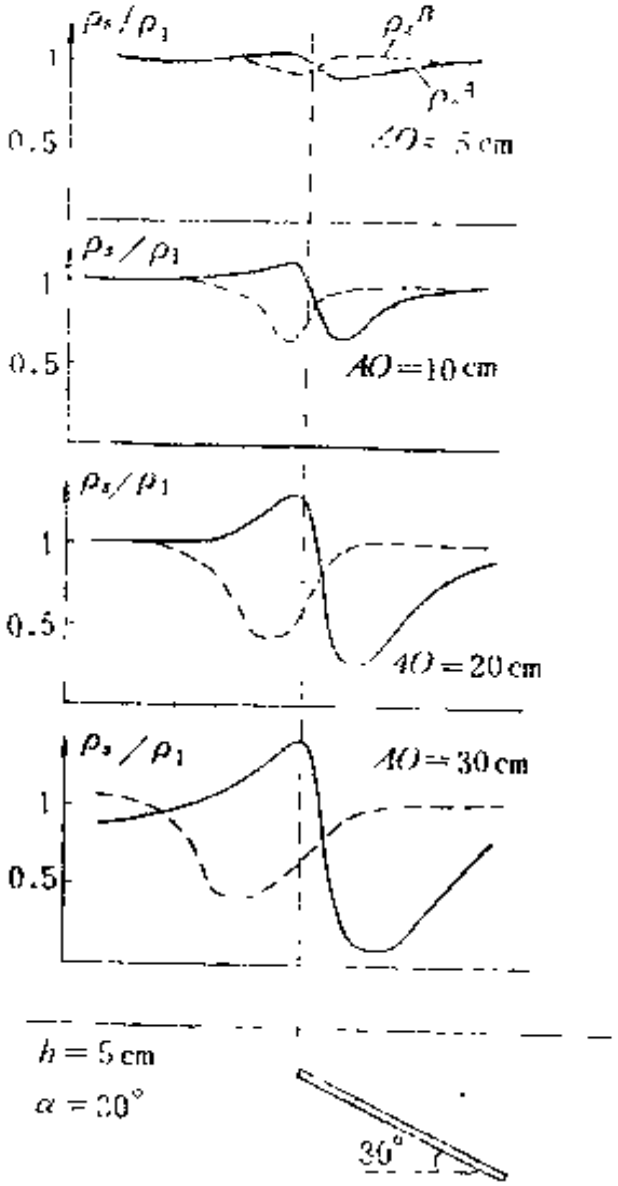


图2-3-9 良导倾斜板状体上不同极距(AO)的联合剖面ρ_s异常曲线

电测深法：电剖面法是将电极距保持固定沿一定测线观测，以了解在某一深度范围内地质情况沿水平方向的变化。电测深法则是在同一测点上逐次扩大电极距（例如$\frac{AB}{2}=3、6、\cdots\cdots$），使探测深度逐渐加大，以了解观测点处沿垂直方向由浅到深的视电阻率变化情况。电测深法也有不同装置，应用得最广的是对称四极测深法。

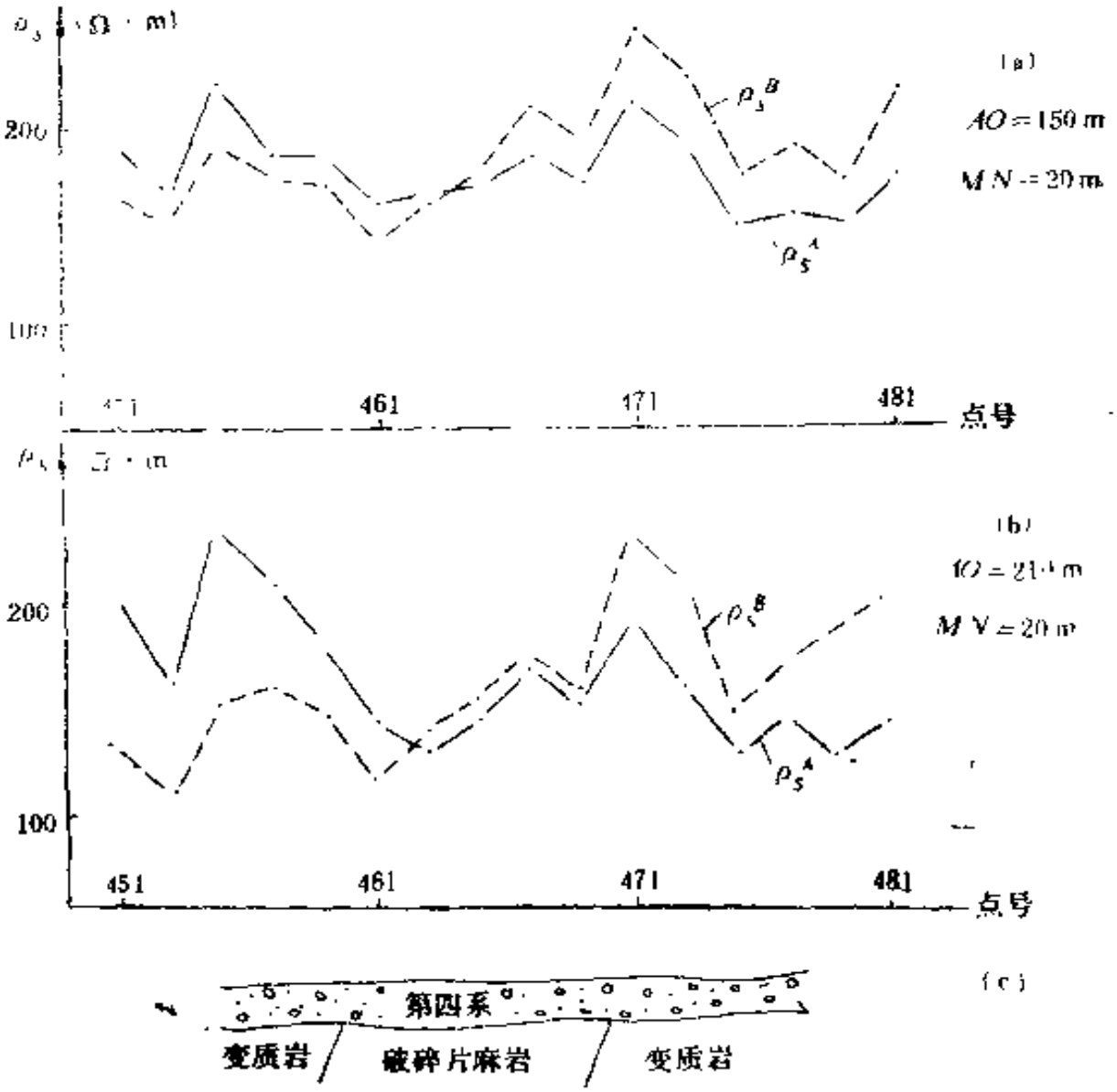


图2-3-10　胶东地区金矿带某地680线不同极距联合剖面 ρ_S异常曲线

图2-3-11给出了二层断面（$\rho_2>\rho_1$）上异常曲线。当极矩$\frac{AB}{2}$很小时，所测得的视电阻率曲线主要反映低阻覆盖层的

电性，所以ρ_S值较小。随着$\frac{AB}{2}$的增大，基岩影响逐渐明显，故ρ_s曲线逐渐上升；直到$\frac{AB}{2}$很大时，ρ_S达到渐近值，即$\rho_S \approx \rho_2$。这类电测深曲线称为G型曲线。对G型曲线可用切线法求基岩埋深，具体作法如图2-3-11所示，求出O_1点后，O_1点横坐标为第四系厚度，纵坐标为第四系电阻率值。

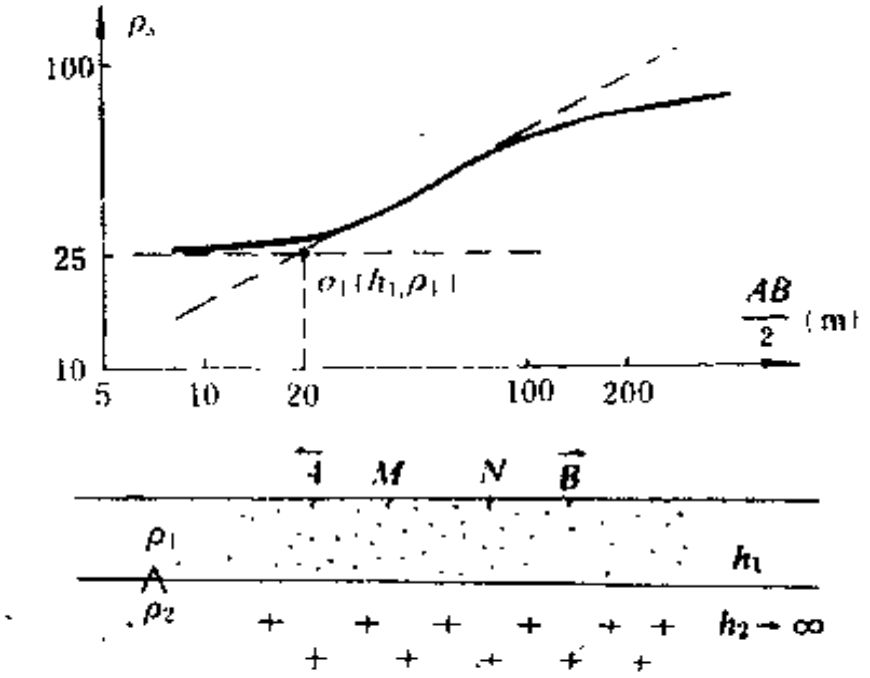


图2-3-11　二层断面上电测深异常曲线及切线法解释示意图

在金矿区中电测深装置多用于激发极化法中，求极化体的埋深。

二、激发极化法

由上述可知，电阻率法解决地质问题的地球物理前提是，

所寻找的对象与围岩间应有明显的导电性差异，否则将不会取得较好的地质效果。从金矿地质学知道，金通常与硫化矿物密切共生，硫化矿物含量较低，一般仅百分之几到百分之十几，硫化物矿化带或富集带与围岩间无明显导电性差异，电阻率法对圈定硫化物矿化带是无能为力的，既是硫化物矿化带与围岩间有明显电性差异，电阻率法可以圈出此矿化带，但是也无法判明此低阻带是断裂带引起还是硫化物矿化带引起。而激发极化法对寻找和圈定浸染状硫化物矿化带却是非常有效的。

1．激发极化法的基本原理

在自然界中，致密块状的金属矿及浸染状硫化矿床或矿化带中所含的金属矿物颗粒皆是导电的，称为电子导体。在电子导体周围的岩石空隙中常有含不同离子的溶液，在无人工建立的外电流场作用的自然状态下，在电子导体与周围溶液的分界面上，会自然地形成一个双电层（图2-3-12(a)），电子导体本身带负电荷，围岩一侧带正电荷。用人工方法在地下建立稳定电流场，称为一次场或激发场。当电流流过电子导体—溶液系统时(俗称为“激发”)，电子导体内部的电荷将重新分布，形成一个不均匀的双电层，即电子导体被极化，电流流入端电子导体堆积较多的电子，称为“阴极”，而在电流流出端电子导体堆积了较多的正电荷，称为“阳极”；在围岩一侧堆积了与阴、阳极相反的电荷（图2-3-12(b)）。当切断外电流后，堆积在界面两侧的异性电荷将通过界面本身、电子导体内部和周围岩石进行放电，在电子导体周围空间形成二次电流（图2-3-12(c)）。实际上，在供电后不久，矿体或金属颗粒与溶液分界面上就开始形成双电层，同时进行放电，并不是仅在断电后双电层才进行放电。二次电流在地面处的M、N测量电极间产

生电场和电位差，分别称为二次电场和二次电位差（ΔU_2）。二次电场或二次电位差随时间而衰减，经过几分钟后则衰减殆尽，恢复正常。一次电流（供电电流）在M、N间产生的电位差称为一次电位差（ΔU_1）。二次电位差ΔU_2与一次电位差ΔU_1之比值称为极化率。当地下为均匀介质时称为真极化率（η）；当地下为不均匀介质时，极化率是地下各种介质的综合反映，称为视极化率（η_s）。由于ΔU_2比ΔU_1小很多，故用百分数表示，即

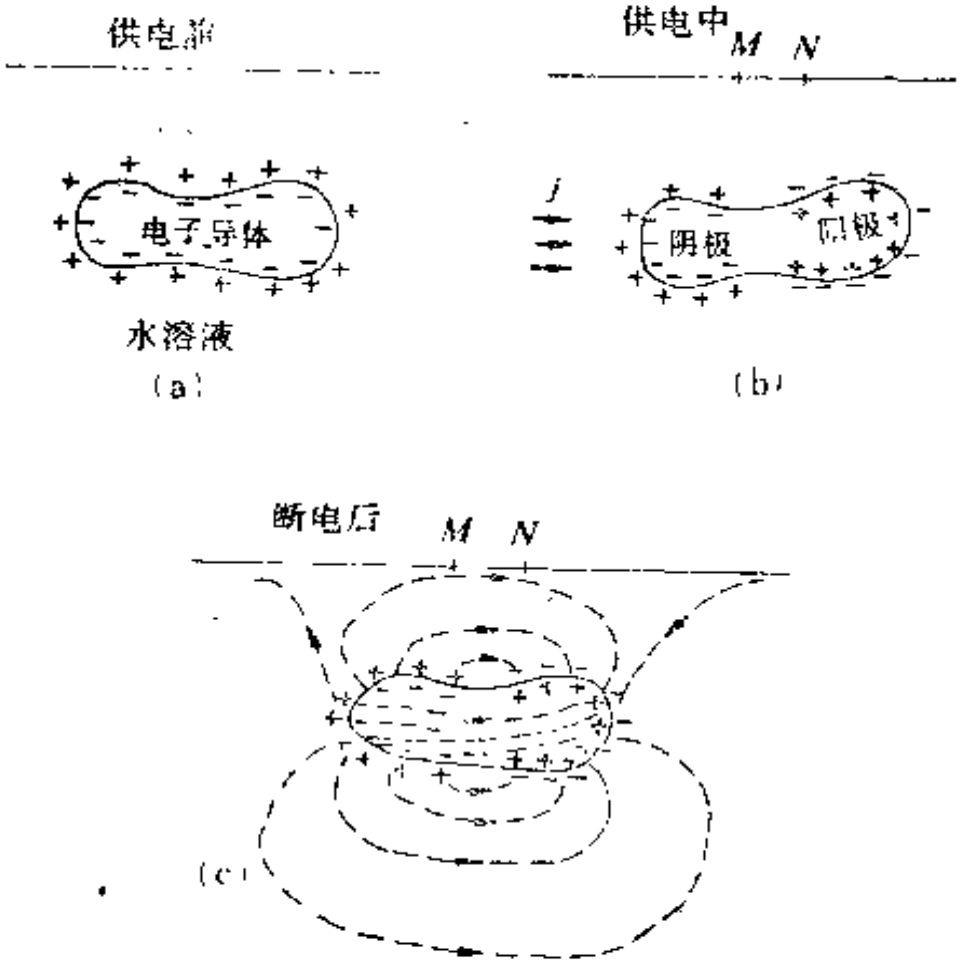


图2-3-12　电子导体的激发极化过程
(a)供电前；　(b)供电中；　(c)断电后

$$\eta_s=\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}\times 100\%$$

综上所述，电子导体在电场的激发作用下被极化，呈现出“阴极”和“阳极”，并在周围空间形成二次场（又称激电二次场），这一现象称为激发极化现象或激发极化效应。从图2-3-12可知，激发极化效应不仅可以发生在致密块状硫化矿体或石墨矿体上，而且也可以发生在细小的金属矿物颗粒周围。在地表M、N间所观察到的二次电位差是由地下所有颗粒产生的二次场的总反映，金属颗粒含量高的地段二次场强，含量低或不含电子导体的地段，二次场很小。通过这一办法可以把浸染的硫化物矿化带或矿化富集带圈出来。这一方法称为激发极化法。

不含电子导体的无矿化岩石是离子导体，它们也能产生激发极化效应，但是极化率值一般很小。这说明激发极化法野外观测结果也有一定背景，一般为百分之几。

上述表明，激发极化法实质上是以岩、矿石激电特性差异为前提，通过观测和研究视极化率η_s的空间分布规律及二次场的时间特性，达到寻找电子导体（硫化物、石墨等）的硫化物多金属矿床，圈定与金矿密切共生的硫化物矿化带及富集带的目的。此外，石墨化地层和碳质岩层会对激发极化法产生一定的干扰异常，资料解释时应注意这一问题。从金矿地质学知道，碳质有利于吸附金，有些金矿床与石墨化地层或碳质地层有着直接或间接关系，这些地层可做为找金的标志层，利用激发极化法圈定石墨化地层或碳质地层，有时可起到间接找金的作用。

2．岩、矿石的激发极化特性

表2-3-1给出了不同岩、矿石激发极化特性结果。分析表2-3-1的测定结果可知：

表2-3-1

岩、矿类型	测定数量	极化率η(%) 0.2 0.5 1 2 5 10 20 50
砂土、粘土、壤土	500	
白云岩	121	
灰岩	556	
泥质页岩、砂岩	373	
石英、岩岩、板岩	75	
玄武岩	567	
花岗岩	148	
闪长岩	93	
石英斑岩	905	
炭质页岩、炭质灰岩	155	
石英岩	23	
石墨化页岩	28	
含碳石灰岩	86	
砂卡岩	77	
浸染型黄铜矿	43	
块状黄铜矿	14	
浸染型多金属矿	136	
块状多金属矿	40	
氧化矿	10	



1-明显不含浸染状电子导体矿物的岩石； 2-含浸染状硫化物的岩石；
3-石墨化岩石； 4-浸染状硫化物； 5-块状硫化物
（图表中梯形下底边基线端点为极化率的极小值和极大值，梯形上顶基角位置是不同作者得到的极化率平均值）

（1）明显不含浸染状电子导体矿物的岩石，极化率η一般为1%～2%；

（2）含少量浸染状硫化矿物的岩石（矿化岩石），极化率一般为2%～5%；

（3）石墨化岩石及含碳质岩石，极化率变化范围较大，约为1%～15%，个别甚至更大。这类岩石极化率的大小与其含石墨、碳质多少有关；

（4）含电子导体的浸染状和块状金属矿或多金属矿矿石的极化率最高，一般为10%到百分之几十。可见，有工业价值的无论浸染状或块状硫化物的极化率与一般岩石相比有明显的差异。因此，用激发极化法寻找浸染状或块状硫化矿床，圈定硫化物矿化带或富集带等，具有良好的地球物理条件，可取得较好的地质效果。但是，应注意石墨化岩石及炭质岩石的干扰。不过，当金矿床与石墨化岩层或炭质岩层有关时，便可充分利用它们的激电特性，以达到间接找金的目的。

3．激发极化法野外工作方法及观测内容

激发极化法野外工作所用装置类型、工作方法、测网及比例尺均与电阻率法相同，仅仪器设备、工作方法和观测内容不同而已。测量电极用不极化电极；供电电流较大，一般为1到几安培，故设备笨重，工作效率低，成本高，但有其特有的优越性。

激电法在野外每个观测点上的观测内容及程序是：在供电过程中观测一次场电位差ΔU_1或总场电位差ΔU（$\Delta U=\Delta U_1+\Delta U_2$）和供电电流强度$I$；断电后观测二次场电位差$\Delta U_2$，然后按下面公式计算视极化率和视电阻率

$$\eta_s^{\circ}=\frac{\Delta U_2}{\Delta U_1}\times 100\%,\quad 或\quad \eta_s=\frac{\Delta U_2}{\Delta U}\times 100\%$$

$$\rho_s=K\frac{\Delta U_1}{I}$$

在激发极化法中主要观测和研究视极化率参数，同时还可利用视电阻率这一参数。

激发极化法的观测结果可绘成η_s剖面平面图、平面等值线图、剖面图、综合剖面图、激电测深曲线图。这些图件可用于推断解释。

4．各种极化体上不同装置的视极化率η_s的异常特征

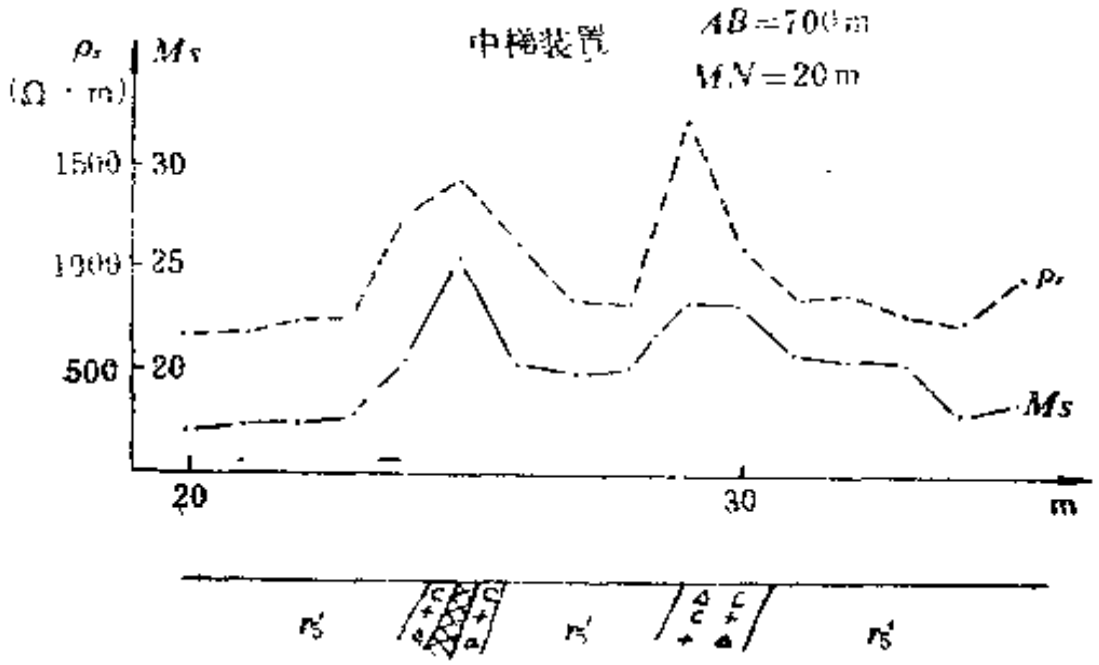
不同形状的极化体上η_s异常分布规律，可通过理论计算和模型实验获得，为简单起见，这里不再赘述，仅以示意图说明其分布规律。

中间梯度法：若所寻找的对象的极化率η_2比围岩极化率η_1高时，该地质体就称为高极化体。激发极化法实质上就是寻找高极化体。在中间梯度法中，高极化体上η_s异常均为极大型异常，见图2-3-5。η_s异常形态与高阻直立板状体上的ρ_s异常形态相似，在直立板状体顶端处η_s出现极大值，曲线形状对称。可依η_s极大型异常判断高极化体的存在；依η_s极大值位置确定高极化体顶端的位置；也可用q法和m法求极化体顶端的埋深h；依η_s平面等值线图大致确定脉状体的走向、走向长度等。

在中间梯度法中，对于直立脉状体、水平脉状体、球体、水平圆柱体等，其上η_s异常均为对称形状，而倾斜脉状体上η_s异常曲线是不对称的，倾斜方向上η_s较缓或梯度小，在反倾斜方向η_s较陡或梯度大，可依η_s异常曲线的不对称性大致判断极化体的倾向（图2-3-14）。但是，由于围岩极化不均匀、局部极

化体影响和非简单几何形体缘故，利用η_s曲线的不对称性确定倾向常常是不理想的，甚至相反。

图2-3-13给出了山东招掖金矿带上某金矿区金矿体及石英脉、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩上视充电率（也就是极化率）和视电阻率曲线。



1　2　3

图2-3-13　山东招-掖金矿带上某矿区含金石英脉断裂带上中梯装置的视充电率和视电阻率异常曲线（引自李宝印）

1-金矿体（Au品位>3g/t）；　2-花岗岩；　3-石英脉及黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩等

该区断裂带中有黄铁矿化石英脉、黄铁矿化硅化岩、黄铁绢英岩、硅化花岗质碎裂岩、绢英岩化花岗岩、黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩等。在石英脉及蚀变岩上中梯装置ρ_S曲线呈现

出极明显的两个极大型异常，反映了它们的高阻特征。由于在石英脉及蚀变岩中含有较多的硫化物，具有较强的极化特性，故而激发极化法在其上也获得了两个极大型M_s异常，说明它们都是高极化体。ρ_s与M_s异常形态相似、极大值位置吻合，说明二者反映的是同一地质体的两种物理特性。

联合剖面法：在任何形态的高极化体上联合剖面装置η_s异常均为"∞"形，其交点与同形状高阻体上视电阻率联剖交点性质相同，即高极化体上联剖装置η_s曲线为反交点⊖。见图2-3-7(b)、图2-3-8(b)。

图2-3-14给出了某金矿区激发极化法联合剖面装置η_s异常曲线。在两个极距$AO=100$、200米时η_s异常曲线出现明显的反交点，说明其下有一高极化体存在。

当脉状体倾斜时，其上η_s异常曲线不对称，不同极距的η_s异常反交点向倾斜方向位移，但不如ρ_s正交点位移那样明显（图2-3-14），η_s曲线的不对称性仍然是明显的（图2-3-15），在倾斜方向η_s极大值大于另一极大值。由于是良导板状体，所以η_s^A极大值与η_s^B极大值连线方向与良导板倾向相反。当板状体为高阻体时，两极大值连线方向与高阻板状体倾斜方向相同。也可用η_s^A、η_s^B所夹面积大小来确定，无论是高阻极化体或是低阻极化体，板状体总是向η_s^A、η_s^B夹面积大的方向倾斜。以上所讨论的判断极化体倾斜的方法都是在围岩极化率均匀、单个极化体情况下总结的规律，在野外情况下，围岩极化率不均匀及局部极化体的影响等，在确定极化体倾向时应充分考虑这些影响因素，否则将会得出错误结论。

综上所述，激发极化法不仅可以研究视极化率参数，而且也可以研究视电阻率参数。根据视极化率η_s和视电阻率ρ_s参数，

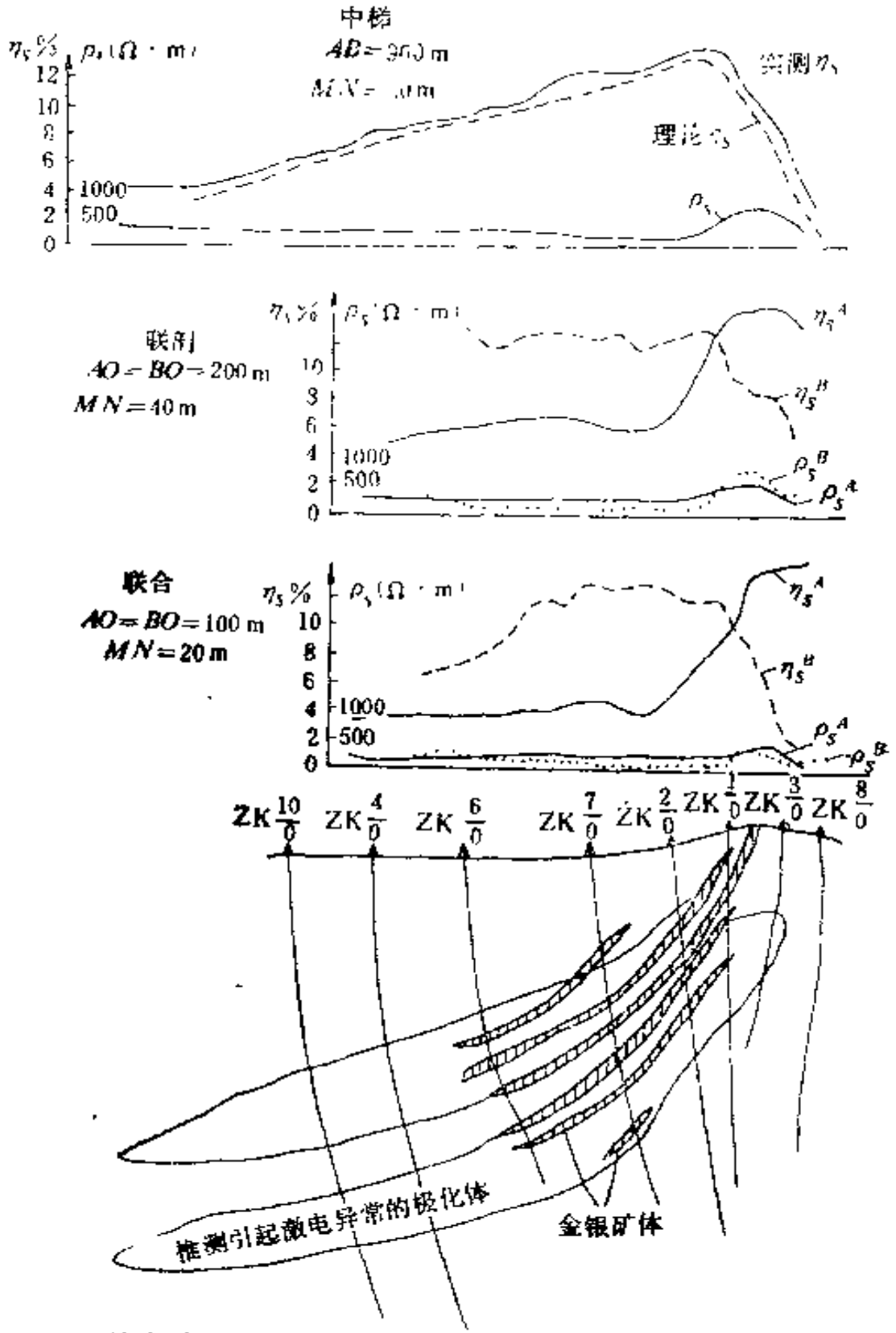


图2-3-14　某金矿区激发极化法联剖装置不同极距的η_s异常曲线

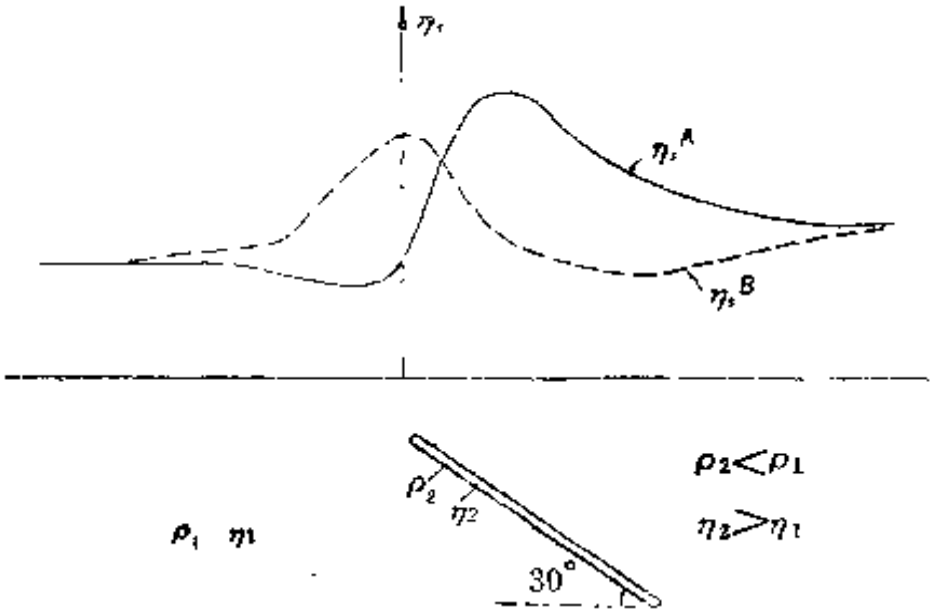


图2-3-15 在低阻倾斜脉状极化体上联合剖面装置视极化率异常曲线

表2-3-2

序号	极化体名称	中梯装置		联剖装置		地质体举例	备注
		○	η_s	ρ_s	η_s		
1	低阻高极化体	▽	∧	⊕	⊖	断裂中含Au硫化物矿化带；含Au块状、矿床	▽：极小值 ∧：极大值 ⊖：正交点 ⊖：反交点 —：无异常
2	高阻高极化体	∧	∧		⊖	蚀变化物含Au石英脉	
3	高阻低极化体	∧	—	⊖	—	硅化物含Au石英脉	
4	低阻低极化体	▽	—	⊕		不含硫化物的断层	

将极化体分为以下几类，见表2-3-2。

激电测深法：一般使用对称四极测深装置。激电测深法虽然也可以用于水平地层地区，但是，目前多用于有限极化体上（金属矿区）确定其顶端埋深。在有限极化体上，激电测深法的η_s异常曲线与电阻率法测深中的G型曲线形态相似，见图2-

3-11。可利用图2-3-11中的切线法求极化体顶端的埋深，也可直接利用η、测深曲线明显增大的转折点求极化体顶端埋深。对于脉状体而言，转折点坐标即为脉状体顶端埋深。利用这种方法所求得的埋深只能是粗略的，属于半定量解释。

三、自然电场法

自然电场法是电法勘探中应用最早的方法之一。在寻找金矿床中该方法也得到了一定应用，有人说，自然电场法在寻找金矿床中再次兴起。人们重视自然电场法不仅是因为该方法能经济快速地解决与金矿成矿有关的地质问题，而且有人认为地中的自然电流对金的沉淀起了一定作用或重要作用。我国一些金矿区的发现，自然电场法也起了一定作用。

1．自然电场法的基本原理

自然电场法的原理如图2-3-16所示。当地下有一电子导电的致密的含金硫化矿体存在，并被地下潜水面横切时，矿体处于两种不同的电化学环境：潜水面上部的矿体处于氧化环境，潜水面下部的矿体处于还原环境。矿体在长期的氧化-还原作用下，在其上下两端矿体与溶液界面上形成不均匀的双电层，不均匀的双电层通过周围围岩和矿体本身进行放电，形成电流场，此电流称为自然电流，由自然电流产生的电场称为自然电场。人们通过观测和研究自然电场的空间分布规律、解决与金矿成矿有关的地质问题及其它地质问题的方法，称为自然电场法。

自然电场法野外工作中主要是测量自然电位（测量电极为不极化电极），装置示意图见图2-3-16。M极沿测线逐点移动进行电位测量，由于矿体上端为负电荷，故在矿体上方所测得

的自然电位为负值，在矿体顶部电位曲线出现极小值（图2-3-16）。可依电位极小值来判断矿体的存在和顶端位置。一般可将自然电位观测结果绘制成剖面平面图和平面等值线图。

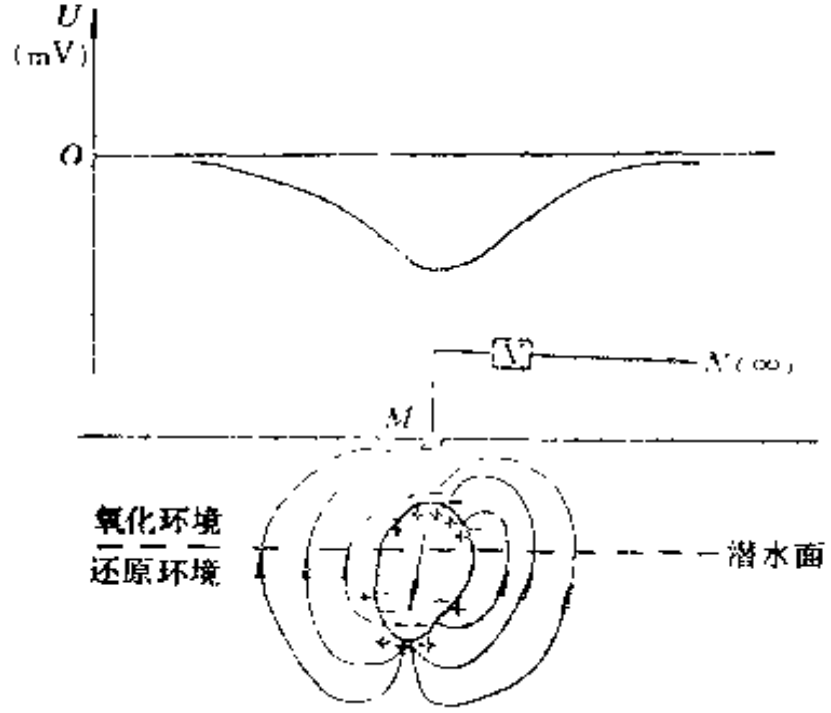


图2-3-16　自然电场法原理示意图

2．自然电场法在金矿地质工作中的效能

（1）寻找和圈定含金硫化矿床，确定其位置、范围、规模及大致埋深。

（2）圈定与金矿成矿有空间关系的某些石墨化岩层和炭质沉积岩层的位置、范围等。这类异常一般特点是：异常幅值大，变化明显，范围宽，走向长，异常走向与引起自电异常的地层走向一致。

（3）根据苏联学者对某金矿区的研究，石墨化的岩石和围岩接触就形成天然源电池，其电动势大小主要取决于这些岩

石氧化还原电位值的差别。金矿矿床石墨化经过两个阶段，在成矿早期石墨化作用与挤压带形成时出现的动力变质作用有关；第二阶段，石墨化更均，并伴随有成矿前动力和热液变质作用。于是，在成矿作用前，就形成了天然源电池，在这种电池产生的自然电流的作用下，金从热液中沉淀下来。

目前，苏联有许多研究者认为，在岩石矿液系统中，石墨和电化学活动对金的沉淀起着重要作用（H.F.秋林）。可是也有不少研究者（B.H.索洛金、B.C.什布赫和B.Д.鲍尔佐夫）认为，无论石墨含量多少，都不存在金和石墨之间的相关性。不过，赋存于石墨化岩层中的金矿床表明：影响金的沉淀不是石墨化岩石，而是电流。后者是电源产生的，电源的组成部分就是含石墨的岩石。

在普查金矿床时，在1:5万比例尺区域调查阶段，所使用的综合物探方法中就应包括自然电场法，以便划分出金矿沉淀有利地段。自电异常的边部将与这一地段有关。根据钻孔资料评价远景地段时，在钻孔调查综合方法中，也应包括自然电位法。因为金矿赋存于正负偶极子过渡区，稍高于零值等值线一边，因此用自然电场法获得的井中观测资料能校正钻孔深度，并查明金矿沉淀的有利地段。

图2-3-17给出了云南墨江金厂金矿区70线上自然电位异常曲线。矿区地层主要为三叠系和下志留系地层。区内断裂发育。岩浆岩主要是金厂岩体。该区矿床是一个多源、多期、多阶段复成改造和迭生式的金、镍层控矿床。由于镍矿上黄铁矿很富，近矿部位断裂发育，上部强氧化，下部则处于还原环境，故硫化镍矿床上常反映出100多毫伏（mV）的自电负异常。依据自电和化探异常设计了钻孔，后经验证找到了金、镍

矿体，如图2-3-17所示。金、镍矿体都产在接触带中，金矿体主要赋存在外接触带内，自电异常间接指示了金矿体的赋存部位。

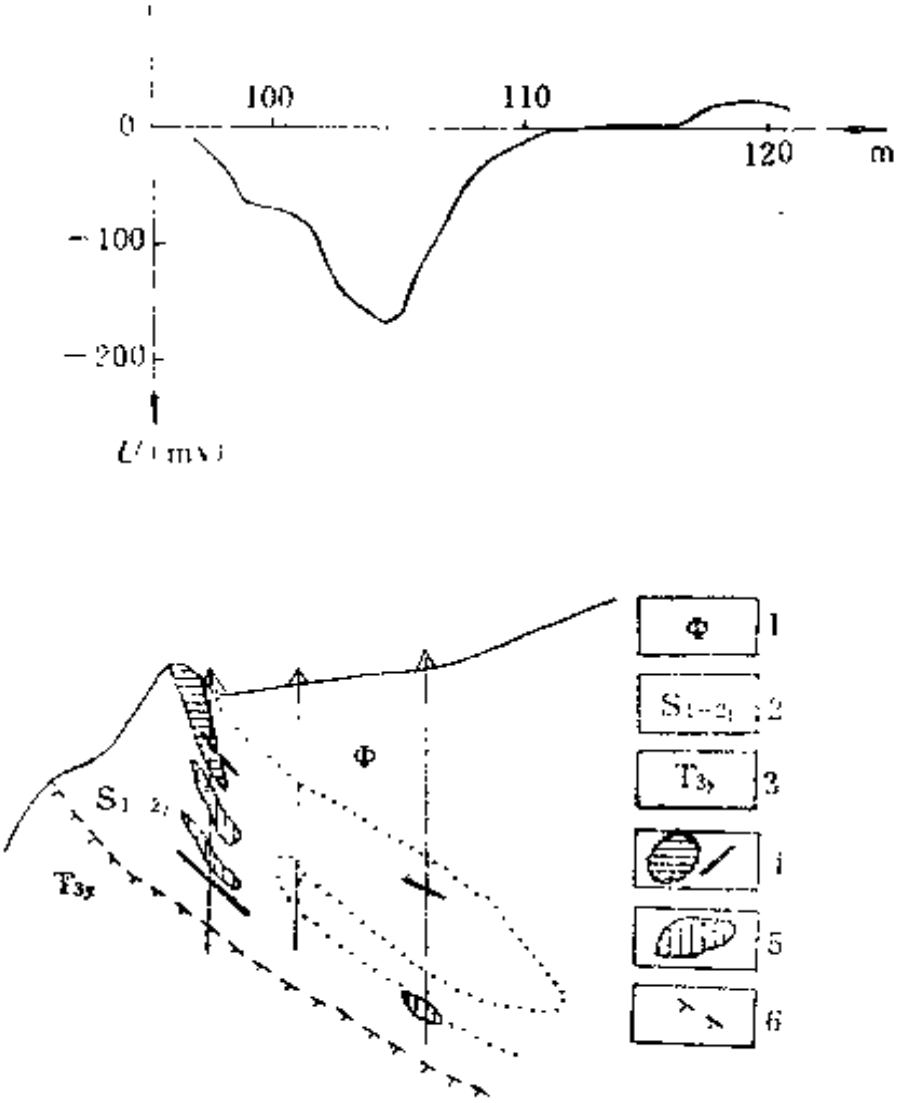


图2-3-17　云南墨江金厂矿区70线上自然电位异常曲线
（引自洪树琪）

1-岩体；　2-下志留系地层；　3-三叠系地层；
4-金矿体；　5-镍矿体；　6-接触带

自然电场法轻便、快速、经济也是一个优点。但是在推断解释中要注意区分干扰因素。

四、充电法

充电法是在金属矿详查和勘探阶段以及在水文地质、工程地质中应用较多的一种人工直流电法。本法主要研究对象是相对围岩为良导体或导电性较好的地质体或矿体。

1．充电法的基本原理

充电法的工作原理如图2-3-18所示。在天然的或人工的露头——探槽、浅井、钻孔、坑道等工程揭露的良导性金属矿体露头上，接上一个供电电极（例如A极），接供电电极处称为充电点，将另一个供电电极B安置在离矿体足够远的地方，称为无穷远极，用符号∞表示。接通供电电源后，电流经矿体流入围岩，在矿体周围空间形成人工电场。人们可通过在地表测量电极M、N间电场或M点的电位，并研究其空间分布特征，解决有关的地质问题。这种方法称为充电法。

充电法应用的条件是：

（1）矿体至少有一小部分出露地表或存在被人工揭露的露头，以便在那里对矿体进行充电。

（2）矿体必须是良导电体。

（3）矿体有一定的规模和延伸，且埋深不能太大。当矿体有一定的规模，延伸较大时充电法的地质效果较好。当矿体延伸长度小于其上顶埋深时，其在地表的充电电场与点电源场相近，因而不能利用充电资料推断矿体的形状和产状。

充电法野外工作方法分为电位法和梯度法两种。梯度测量装置示于图2-3-18；电位测量时只要N极放到无穷远处即可。充电法观测结果可绘成电位剖面平面图、电位等值线图；电位梯度剖面平面图及精测剖面图。

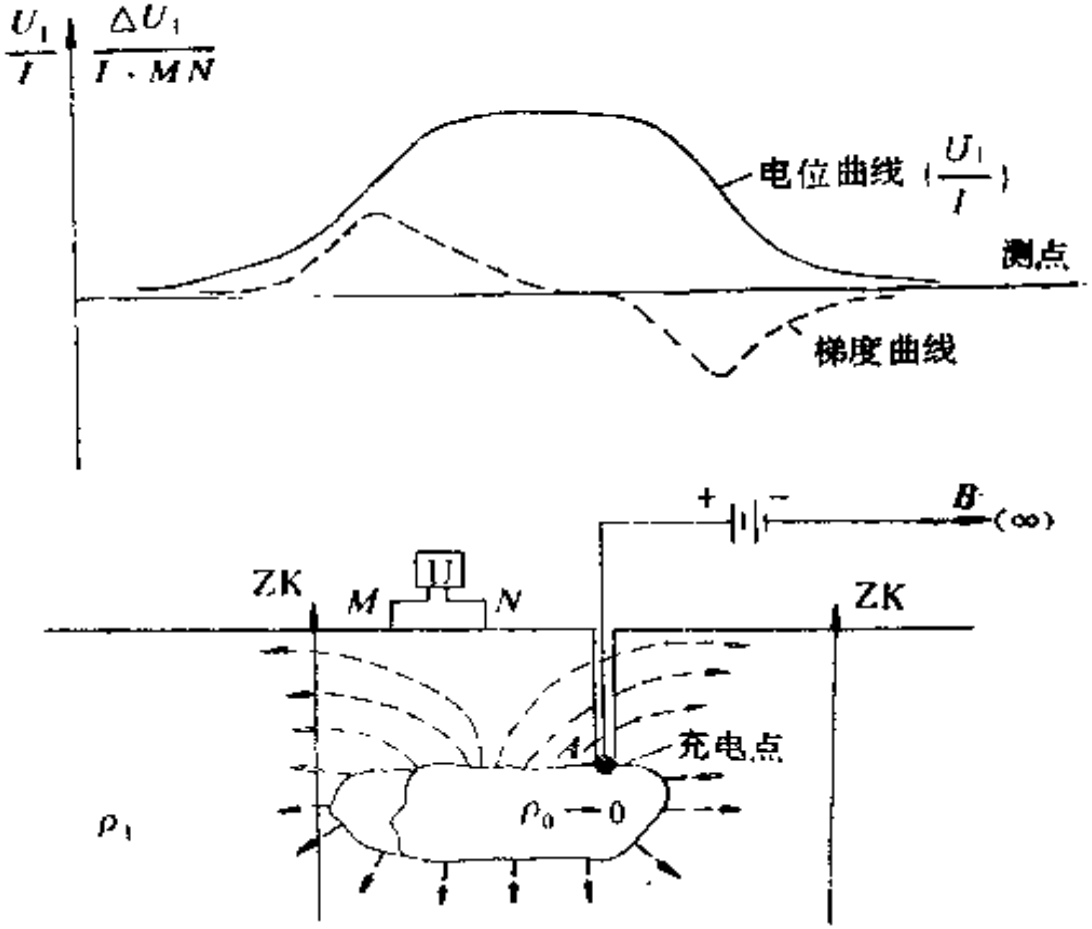


图2-3-18　充电法工作原理示意图

2. 充电法在金矿地质工作中的效能

（1）圈定含金体的范围；确定含金体的产状及埋藏深度。

（2）解决几个已知含金体间是否相连、如何连接问题。实质上就是确定含金体的空间形态及相互关系。

（3）寻找已知含金体附近（或近旁）隐伏的含金体。

关于充电法在金矿床上的应用，可参阅第七章中§7.5，充

电法在河南围山城金银矿上的应用。此外，在云南墨江金厂金矿区、陕西铁炉子金矿区、湖北大冶凤头山金矿区等都不同程度地应用了充电法，取得了一定的地质效果。

§2.4 地震勘探在寻找金矿床工作中的效能

地震勘探主要是以人工方式（例如炸药爆炸、机械震动等）在地下岩石中产生一弹性波，通过研究该弹性波遇到不同深度、不同的岩性介面时的反射和折射规律、特点以及在不同介质中的传播速度，查明地下的地质构造、解决工程地质问题及其它地质问题。地震勘探也可用于寻找金矿床，目前主要应用浅层地震法，配合地质、化探和钻探方法解决寻找砂金矿床中的有关地质问题，在寻找内生金矿床中很少应用。

地震勘探在寻找金矿床中具有以下效能：

一、利用浅层地震折射法查明基岩或河底槽、古河床底部基岩的起伏、形态，进而了解含金砂体的可能范围、厚度及规模。尽管电阻率测深法、激电测深法、磁法和重力法也能解决上述问题，但其精度均低于浅层地震法，后者结果与钻探结果十分接近。应用浅层地震法后可以减少钻探工作量，例如：美国加利福尼亚州拜哲山的砂金矿，由于使用了浅层地震等综合物探方法，节约钻探工作量约40%（详见§7.3、第四章图4-3-6）。

二、利用浅层地震法了解基岩的岩性及地质构造，研究它们是否有利于砂金矿的富集。

三、利用深地震测深所确定的莫霍面深度、变化特点、地

壳厚度及深部地质构造进行内生金矿床成矿预测。地震勘探方法解决上述问题比其它任何一种物探方法（如重力、磁法）的精度都高。但是，由于深地震测深成本高及其它条件限制，只能在局部地区进行，更不可能为了寻找金矿床而进行深地震测深。所以区域性或全国性的莫霍面深度、变化情况、地壳厚度主要依靠重力测量结果。

地震勘探在金矿地质中应用较少及本书篇幅所限，其基本原理、工作方法及资料解释此处不再介绍，有兴趣者可参阅有关教材及专著。

§2.5 核物探方法在寻找金矿床工作中的效能

在寻找金矿床的综合物探方法中，除了重力、磁法、电法和地震方法之外，核物探也是其中的重要方法。核物探方法在国内外得到了广泛应用，并取得了较好的地质效果。目前应用较多的核物探方法有：γ能谱测量、氡气测量，x萤光测量及核物探测井（或称放射性测井）。本节将简要介绍一下核物探在寻找金矿床工作中的效能。

一、核物探方法寻找金矿床的地质-地球物理前提

由金矿地质学知道，某些金矿床在形成过程中，与天然放射性元素U、Th、K等有关，例如，南非的含金、铀砾岩型金矿床中，金、铀矿化紧密共生；有些金矿床常有不同程度的钾化，如近地表的火山岩型金矿床最重要的控制标志是岩浆控制（矿床位于弱酸性的火山岩中）和交代控制（矿石位于碱性交代岩

中），冰长石化、绢云母化和水云母化的交代作用均导致钾的带入，使矿化带中钾的含量明显增加，金矿化在空间上与钾化带有密切关系，苏联的鄂霍茨克-楚科特火山带的金银矿化就是如此。岩浆侵入体的放射性元素的含量往往与围岩有较大的差异。

前面曾谈到，内生金矿床与断裂破碎带有密切关系。在断裂破碎带中放射性气态元素Ra的浓度较围岩高，可以形成明显异常；地下水的地球化学作用可以引起破碎带中某些放射性元素如U、Th等的分布发生变化。

表2-5-1给出了苏联鄂霍茨克-楚科特火山带上某些金银矿岩石中放射性元素平均含量的分布情况。表中以分式表示的含意是：分子表示在该岩石中放射性元素的平均含量值；分母表示其变化范围。

分析表2-5-1所列数据可以看出：在未蚀变的围岩－流纹岩、英安岩和斜长花岗斑岩中，钍的含量偏高，钾的含量则不高。冰长石化使岩石中钾的含量猛增，而钍的含量则减少。在矿脉中钍钾实际上都不存在。因此，该区的矿带与未蚀变围岩相比，钾的含量增高，钍、镭的含量降低。这一物性规律导致了在矿带上钾将会出现极大型异常，而钍、镭则出现极小型异常。实践表明：有时利用不同放射性元素间之比值（K/Th）或某两种元素之积与另一元素之比值（K·Th/U、K·U/Th）能更好地反映钾的交代带。

通过上述分布可以看出：在自然界中具备了用核物探方法解决与金矿成矿有关的地质问题、间接找金矿的地质-地球物理前提。在不同金矿区投入核物探工作时，都应对不同岩、矿石的放射性元素含量进行测定，以便选择投入的核物探方法。

表2-6-1　苏联某金银矿岩石中放射性元素的平均含量

岩石名称	$U \cdot 10^{-4}$, %	$Ra \cdot 10^{-4}$, %（U-当量）	$Th \cdot 10^{-4}$, %	K, %	样品数
流纹岩	5.0 4.0～6.0	2.0 1.5～2.5	12.0 11.0～13.0	2.4 2.0～2.6	16
冰长石化流纹岩 （取自蚀变岩石的近矿晕）	6.0 4.0～7.0	1.5 1.0～1.7	8.0 6.0～11.0	4.7 2.8～5.5	15
黏土化冰长石化流纹岩 （取自蚀变岩石的近矿晕）	10.0 9.0～12.0	1.5 1.0～2.5	8.0 7.0～10.0	4.3 3.0～5.0	5
冰长石 （取自矿带）	7.0 5.0～9.0	1.5 1.0～1.5	6.0 4.0～8.0	6.8 5.5～7.5	7
红锰矿—蔷薇辉石—石英脉	9.0	1.5	4.0	1.5	2
石英—方解石脉	6.0	1.5	2.0	0.5	3
斜长—花岗斑岩	6.0	2.2	8.0	2.5	3
英安岩	5.0	1.5	11.0	2.2	2

注：分子表示平均值，分母表示变化范围。

二、核物探找金矿的分支方法简介

放射性找金矿的分支方法主要有：航空或地面γ能谱测量、氡气测量、x萤光测量和放射性测井，它们都是间接找金的方法。近年来苏联又提出了一种新方法——激光萤光法，目前尚未广泛应用。这里仅介绍前几种方法。

（一）γ能谱测量：该方法是通过研究地表岩石、土壤中总量γ强度Σ，U、Th、K含量和U/Th、U/K、Th/K等参数与金矿化的相互关系，达到间接找矿的目的。由于该方法可利用的有用信息较多，因此找矿效果较明显。航空γ能谱测量，国内外已进行了较多的研究，获得了许多找金的成功经验，苏联在这方面的工作尤为突出。地面γ能谱测量国内有的单位曾做过试验工作，但因种种原因未获成功。成都地质学院利用自己研制的微机化四道γ能谱仪在一些金矿区进行了试验，首次获得成功。该仪器可在现场直接给出七个参数的七条测量曲线。

例如，在山东省胶东地区某石英脉型金矿区用上述仪器进行了试验，该金矿带位于混合花岗岩地区，矿脉受北北东向压扭性断裂带控制，其两侧发育有钾化带。γ能谱测量结果的特点是：(1)矿脉上总量γ强度降低，出现负异常；(2)钾含量在矿脉上出现明显的负异常，在矿脉两侧钾化带上出现正异常，根据正异常的宽度可粗略地推断钾化带的宽度；(3)铀含量在矿脉上增高，异常明显，峰值与背景值之比可达2.3，在矿脉两侧则出现负异常。Th含量在矿脉附近也明显偏高；(4)在矿脉上U/K和Th/K的比值异常较上述参数更明显，峰值与背景值之比可达4以上。因此，综合分析七种参数的变化规律，可以较好地确定含金石英脉，划分钾化带。

（二）氡气测量：该方法是测量地表土壤中放射性气态元素Ra的浓度，发现Ra的异常，提供控矿构造位置。常用的方法主要有α卡法和α杯法。它们具有灵敏度高、使用方便、相对其它放射性方法探测深度大等优点，适用于浮土覆盖较厚的地区，对于发现控矿构造产生的微弱放射性异常非常有利。在不同类型金矿床上的试验中，氡气测量都取得了较好的地质效果。例如，四川省物探队曾在某金矿区进行了α卡法试验，该队在化探的金异常带上布置了五条剖面，所圈出的α异常与化探的金异常范围大体一致。后经山地工程验证后，肯定了该方法的有效性。

（三）x萤光测量：该方法是通过测量金的伴生元素砷等，圈定成矿远景区。国内外在这方面已经做了许多研究工作，我国已有一些单位开展了x萤光野外测量工作，取得了一定的地质效果。

（四）放射性测井：核物探方法不仅可以在空中、地面上进行测量，而且也可以在井中进行测量，即放射性测井。它的分支方法主要有：γ能谱测井、中子γ能谱测井、中子-中子测井、中子活化测井、γ-γ测井，、x萤光测井等。通过核物探测井可以解决与金矿成矿有关的一些间接性的地质任务，如划分钻井剖面、圈定围岩蚀变带，根据金与某些伴生元素之间的关系估计金的含量。

此外，苏联曾试验过用中子法在野外露头上直接测定金的含量，其试验结果表明：当使用输出为10^{16}中子源时，在钻孔中用中子活化测金的灵敏度为0.3g/t，不过照射的时间需要六昼夜，工作效率很低。在美国、南非等国家也曾将x萤光用于直接测金。

三、核物探方法的特点及效能

核物探方法的特点是：简单、轻便、成本低、效率高，受地形、地物影响小，可以提供与金矿成矿有关的多种信息。综合分析和利用各种参数，特别是比值参数，可以减少干扰，突出有意义的异常，提高该方法的地质效果。核物探方法虽具有上述优点，但是，它只是物探方法中的一种分支方法，同样具有局限性，工作时也必须与其它物探方法、化探紧密配合，扬长避短，结合具体的地质情况，综合分析各种方法的成果，以便客观地反映所研究的地质对象。

在寻找金矿床工作中，核物探方法可以解决以下几方面的地质问题。

1．利用核物探可以寻找和圈定与金矿成矿有关的断裂破碎带及岩体。

2．普查和圈定金矿成矿的远景地段。在完成这一任务时，除了利用航空γ能谱测量之外，还可以应用地面γ能谱测量和Z荧光分析方法来确定金的伴生元素。

苏联曾在三个成矿远景区进行了1:25000和1:10000的航空γ能谱测量，发现了数十个金矿点。例如，在西西伯利亚地区用航空γ能谱测量，圈定了下元古界片岩中花岗岩外接触带的金矿脉和网状脉；在天山地区的火山岩型金银矿床上进行了航磁和航空γ能谱综合测量，通过航磁圈出了喷出岩充填的拗陷构造（反映为磁力低），利用航空γ能谱资料编制了钾的优势性函数图，反映了热液交代带的位置。

x荧光法在金矿普查中也已应用，它主要是分析研究与金矿伴生的元素砷、锑、银、亲铜元素的总量。例如，在中亚的

一个金银矿上，用10～20×100米的网度作x萤光测量，在15～25厘米的小坑内测As、Sb、Ag的含量，矿床的范围用0.005%以上的砷量圈定，取得了较好的地质效果。

3．利用核物探方法可以寻找和圈定与金矿成矿有关的钾化带和蚀变带。由冰长石化、绢云母化和水云母化的交代作用使钾的含量增加，这些矿化与金的成矿有关，所以可以通过圈定钾化带间接圈定矿化带。钾化带还是含金石英脉的主要找矿标志之一。可用γ能谱测量圈定钾化带，进而确定含金石英脉。钾化带往往发育在石英脉的两侧，其范围比石英脉宽，在山东胶东地区就是这种情况。

4．利用放射性测井划分钻井剖面，圈定和评价矿段。

近年来，苏联在不同地区、不同类型金矿床上应用了多种核物探测井方法，例如，在外贝加尔东部的金-石英-电气石-硫化矿床上应用了五种核物探测井方法，因为矿石中含有硼，所以根据中子-中子测井能清晰地圈出矿带。在绝大多数情况下，高含量的金都对应有中子-中子测井异常（<0.4相对单位），而高值异常则对应石英脉和硅化带。中子γ能谱测井根据Fe的含量划分钻井剖面，圈定矿体的可靠性比中子-中子法还要高。

根据Na^{24}，γ中子活化法可以圈出围岩蚀变（以Na的带出为特点），在个别情况下也能圈定矿体。该方法的严重缺点是生产效率太低（一个点的活化时间一小时，冷却时间10～15小时，测量时间10～30分钟）。

γ能谱测井用ССГСП-2型仪器，测量K^{40}，可依据其正异常划分矿带。

测一次散射的γ-γ测井，根据ZЭфф（有效原子序数）划分剖面是很有效的，缺点是对井壁不平很敏感。

在苏联哈萨克斯坦的金矿床上，还用γ测井划分含金石英脉和硅化带，评价带入的二氧化硅的含量。

当用通常的电测井和放射性测井都无效时，可用Z萤光法测量一系列样品的能谱，查明金与伴生元素之间的相关关系，然后，根据伴生元素异常划分含金剖面。例如，苏联乌兹别克西部某金矿区就是典型例子。该区通过Z萤光法，查明了Au与As之间的正相关关系最为直接和明显，其次是Au-Sb、Pb，而Au和Fe、Sr、Ba之间有不太明显的反相关关系。在西乌兹别克的大多数金矿上，As含量的偏高（>0.1～0.2%）都伴随有值得注意的金的富集。根据这一关系，用x萤光法测量As，依As含量能明显划分矿段，依As异常幅度和金含量间的正相关关系，可大致估计金的含量。在卡尔巴地区的金矿床上，也是以Au和As的关系为基础，进行了x萤光测井，测量两个能量范围：砷的特征K_α线（10.5keV）和井壁的散射射线（20.5keV），根据谱线比值异常划分矿段和评价金的含量。已经发现，在巴基尔契克金矿上，Z萤光测井能可靠地划分出金含量大于2g/t的矿段。谱线比值与金含量的相关系数为0.9，说明了该方法的可靠性。

这里还要指出，由于航空γ能谱方法效率高，仪器和方法都比较成熟，所以在普查金矿带、矿区和矿床，特别是在寻找火山岩型近地表金矿床时，得到了广泛应用，取得了较好的效果。但是，对于其它类型的金矿床，金与放射性元素之间的关系比较复杂，作为普查的标志，不是利用含量及其比值，而是利用含量的变化程度，矿带对应于含量变化最大的地方。

5. 利用核物探方法进行地质填图。

6. 核物探方法在分析金矿样品方面也得到了广泛应用。

第三章　物探方法寻找内生金矿床的找矿模式

在第一章中已经谈到，金矿床类型繁多，地质情况复杂，成因多样，采用单一方法或手段难以取得理想的地质效果。目前，金矿勘查处于地质、物探、化探方法综合找矿时代，故研究物探方法寻找金矿床的找矿模式很有实际意义。我国对这方面的研究工作较少，是个薄弱环节，今后应加强这方面的研究工作。

§3.1　物探方法寻找内生金矿床的总体模式

本节中讨论的找矿模式，实质上是指用物探方法寻找金矿床的工作程式或工作制式，而不是金矿床的地球物理模式。后者的难度要比前者更大。

一、依据：

拟定用物探方法寻找内生金矿床的找矿模式的主要原则是：

（一）充分考虑不同类型金矿床的地质特征、成矿规律和地球物理特征；

（二）充分考虑金矿物探的特点和物探工作规律，

1．物探方法寻找金矿床的间接性：在第一章已经谈到，在自然界中不存在用物探方法直接寻找金矿床的地质-地球物理前提。地球物理方法只能作为寻找金矿床的一种间接手段，主要是用于解决与金矿成矿有关的各种地质问题。因此，物探工作必须以地质为基础，与地质工作紧密配合。

2．物探方法解决与金矿成矿有关地质问题的宏观性：解决宏观地质问题是物探方法的优势，而对微观地质问题物探方法则无能为力。为了充分发挥物探方法的优势，扬长避短，应把注意力放在解决宏观地质问题方面。

3．物探工作的阶段性与连续性：这是由于地质任务和物探工作特点决定的。一般来说，要求物探方法在寻找金矿床的全过程中全面地、系统地、连续地开展工作。

4．物探方法的综合性：这是由于金矿床常常具有多种地质-地球物理特征和提高物探方法的地质效果，必须采用综合物探方法。

（三）充分考虑国内外利用物探方法寻找金矿床的地质效果和工作经验。

二、总体找矿模式：

根据上述原则和我们多年的研究工作，拟定了物探方法寻找内生金矿床的总体模式，其内容用下面框图表示。

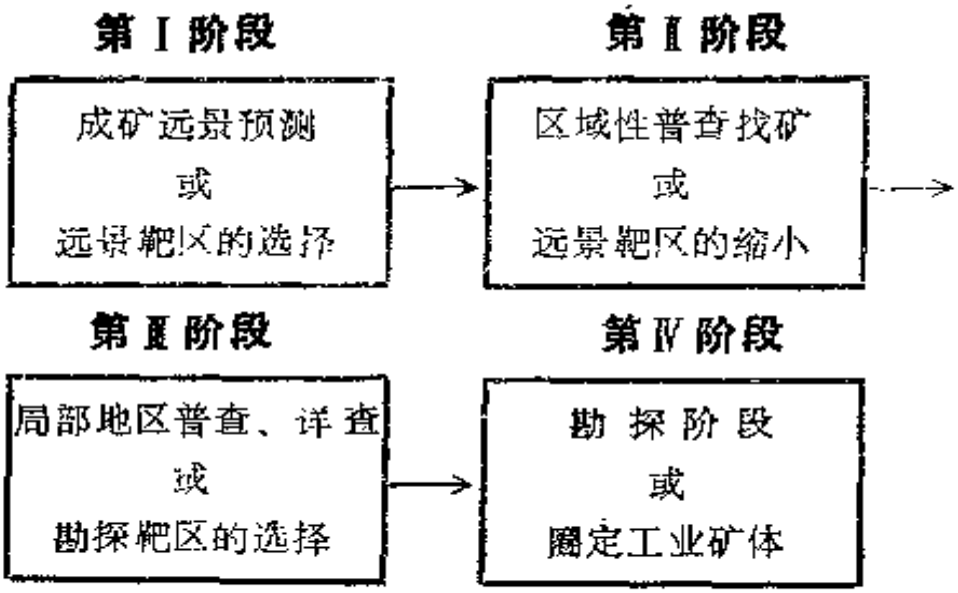


图3-1-1　物探方法寻找内生金矿床的找矿模式框图

图3-1-1给出的物探方法寻找内生金矿床找矿模式中，将物探方法寻找内生金矿床的全过程分为四个阶段：Ⅰ—金矿成矿远景预测或成矿远景靶区的选择；Ⅱ—区域性普查找矿或成矿远景靶区的缩小；Ⅲ—局部地区的普查和详查或金矿勘探靶区的选择；Ⅳ—勘探阶段或圈定工业矿体。其特点是：四个找矿阶段的划分与地质工作找矿阶段相适应，体现了物探工作以地质为基础、与地质工作紧密配合的特点；此找矿模式要求首先选择成矿的远景靶区，然后逐步缩小找矿靶区，最后达到找到金矿床的目的。它既体现了物探方法不是以直接找金为主要目的，而是从第Ⅰ阶段到第Ⅳ阶段以解决与金矿成矿有关的一系列地质问题为主，最后达到找金目的，又体现了物探工作的阶段性和连续性。在不同的找矿阶段中，需要解决的地质问题不同，故所投入的物探方法、比例尺、工作要求也各不相同。物探方法在每一个找矿阶段均能发挥作用，尤其是物探方法要在第Ⅰ阶段到第Ⅳ阶段的全过程中发挥作用，衡量物探方法在

金矿地质工作中的作用和效果，也应在找金矿的全过程中来评价。

为了进一步说明上述找矿模式中每一找矿阶段物探方法所能解决的地质任务、常用的物探方法组合，下面分四节进行详细讨论。

§3.2 金矿成矿远景预测阶段物探方法的效能

矿产勘查中要解决的首要问题是到什么地方去找矿，为此，首先要选择金矿成矿的远景靶区。这是矿产学家、地球物理学家及地球化学学家过去、现在和将来要完成的一项长期而难巨的任务。地质工作者经过近百年，特别是近四十年的努力，已经形成了不同的区域成矿分析学派，例如，地槽、地台、构造-岩浆活化区成矿分析学派；板块构造成矿分析学派；断裂构造成矿分析学派；地质力学成矿分析学派；金属省（区）成矿分析学派；建造分析成矿分析学派等。不同成矿分析学派各有特点，它们在过去和现在的成矿预测中均做出了很大贡献。物探方法在金矿成矿预测中并不从属于某一个成矿分析学派，不单纯与某一个成矿分析学派结合，而是要与每个成矿分析学派紧密配合。对于金矿成矿预测而言，无论哪个成矿分析学派都必须考虑构造、矿源层、岩浆岩等各种因素。物探方法在金矿成矿预测中可以解决以下地质问题。

一、利用地球物理方法研究预测区中莫霍面的埋探、变化特点和地壳厚度

第一章中曾谈到，地核和地幔中金的含量比较高，地壳中的金主要来自于上地幔，即金矿成矿初始物质来源的深源性。苏联学者认为，金矿带的分布与地壳的厚薄有关，例如，苏联远东南部中生代到早新生带的Sn、Au、Hg等矿化分布与地壳厚度变化有关，Sn产在地壳厚度增大的断块内，而Au则产在地壳厚度中等变异带上的断块边缘凸起部位。苏联东部一些重要金属矿带分布在莫霍面落差大的变异带上，远东火山岩带的Pb、Zn、Au等就是这种情况。

我国在某些金矿区已利用了物探资料研究深部构造与金矿化分布的关系，例如，河北、河南等省，根据物探资料建立了深部地壳结构模型，分析了它们与成矿的关系，发现主要金矿带出现在莫霍面的变异带与EW向延伸的深断裂交汇处，或EW向断裂和NE向断裂带交汇处。

二、利用物探资料研究超深断裂带、区域性深部构造、次一级构造及构造间关系

金矿地质研究者认为，世界上许多重要金矿带或矿化带的分布均受切穿地壳的超深断裂构造或区域性深大断裂带控制。区域性深大断裂反映了地壳在纵向和横向上的不均匀性，这两个方向上的不均匀性对含金带都有影响。超深断裂及后期的继承活动，使其两侧的地层厚度有明显的变化，同时，它们还是地下含金岩熔及热液的空间通道。不同规模构造断裂带的交汇处是金矿成矿的有利空间部位。

在进行远景区成矿预测中，各个成矿分析学派都十分重视构造的作用。例如，断裂构造成矿分析学派的预测方法是：首先划分出区域性主要线性构造带，确定区域性聚矿构造带，在聚矿构造带上圈出与其它构造带的立体交叉点，圈出矿田预测区。简言之，先定聚矿带，后找交叉点。以上情况表明：在金矿成矿远景预测中，掌握超深断裂带、区域性深大断裂、次一级断裂以及同规模、不同规模断裂构造间的关系资料是十分重要的。利用物探方法可以圈定超深断裂构造、区域深大断裂、次一级构造断裂带以及相互间的关系。

三、利用物探资料进行深部地质填图

进行金矿成矿预测时，不仅需要知道莫霍面的埋深（地壳厚度）、变化特点及深大断裂构造分布，而且还要知道整个测区深部的主要地层、岩体的分布范围、埋藏深度、物理性质等，这一点非常重要。通过深部地质填图可以解决测区中深部的基础地质问题。

下面举例说明物探在金矿成矿预测中的应用。

例一，苏联地球物理方法在金矿成矿预测中的应用。

苏联开展深部地球物理研究比较系统，工作规模也大，50年代即已开始。他们按区域进行地震测深，工作范围遍及全国。1964年已完成全国中等比例尺航磁测量，1977年统一成图后彩印出版。根据所获得的大量深部地球物理资料，对国内以及近海的各大地质构造单元的地壳构造和厚度进行了研究，编制了布格重力异常图、均衡重力异常图、莫霍面深度图、上地幔波速图、上地幔岩石类型分布图、地幔剩余重力异常图、磁力趋势图等。并在此基础上编制了各种成矿图件。普林格等通

过对苏联远东南部地壳底板地形图和成矿图的研究发现，该区中生代—早新生代锡、金和汞矿床、矿区的分布，取决于地壳厚度、地壳底板地形性质以及现代深部构造的一些其它特性。

苏联利用1:250万～1:50万小比例尺地球物理资料编制大区域深部构造图，它反映了地壳在纵向、横向上的不均匀性，它们对金矿带都有影响。从这一目的出发，要研究地壳与上地幔的界面（莫氏面）、玄武岩与花岗-片麻岩的界面（康氏面）的起伏特点，同时还要研究超深断裂。控制地壳中金矿带分布的主要深部因素是地幔的超深构造断裂，大构造断块边缘（地壳厚度变薄），辉长岩-闪长岩-斜长花岗岩建造的侵入带。

苏联近些年来工作经验表明：1:100万比例尺的区域地球物理资料能有效地用于成矿预测构造图的编制中。把地球物理资料(重力测量和航空磁测)与古构造图结合起来进行分析，可以对褶皱区进行地壳断块构造、发育类型的深部构造分区。根据这些研究结果所编制的图件，是确定已知金矿区和预测的新金矿区地质界线的科学依据。

图3-2-1是地壳断块构造、发育类型的深部构造分区图的一部分，其中有一个金矿区。根据地球物理资料的解释和古构造图的分析表明，该区是由许多断块所组成，这些断块具有不同的深部构造和构造环境，总体上形成一个不均匀的褶皱区。图3-2-1中给出了三种主要类型的地壳断块：内地向斜、内地背斜及过渡型断块。

内地背斜断块的特点是，内地向斜回返以前，莫霍面隆起，地壳变薄，中生代沉积岩和花岗-片麻岩层的厚度不大，为大面积的正重力异常。金矿赋存于这种断块的边缘，而断块本身很

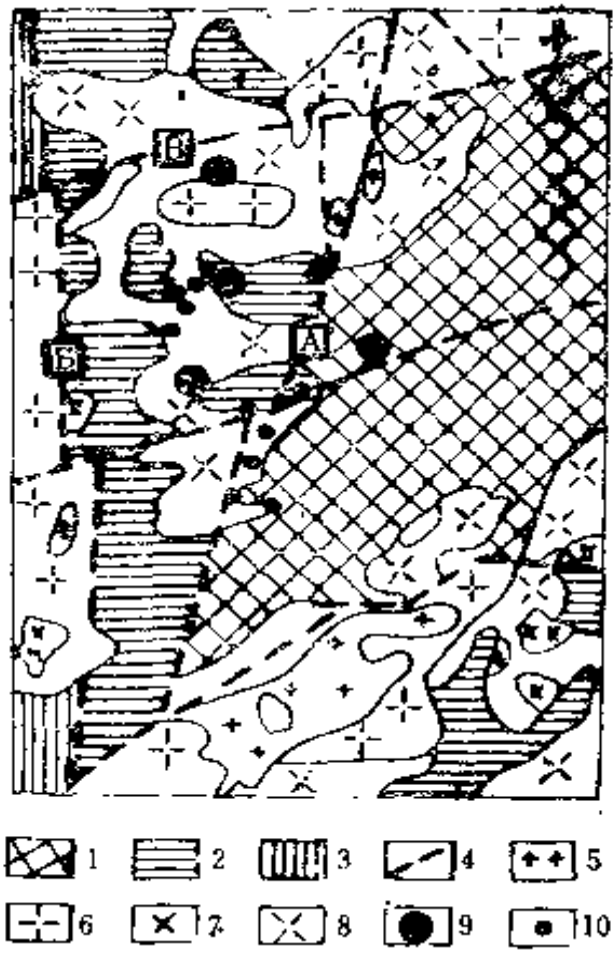


图3-2-1　苏联某金矿区深部构造分区图（根据地球物理资料）（引自А.А.Фельлман）

地壳断块的组成：1-内地背斜；2-内地背斜的外带；3-内地向斜；4-断裂破碎带；5-地表出露的花岗岩建造侵入体；6-隐伏花岗岩建造侵入体；7-出露地表的闪长岩建造侵入体；8-隐伏的闪长岩建造侵入体；9-金矿床；10-金矿化

少有金矿。

内地向斜断块是另外一套系统，在地质发展史和深部构造特点上截然不同。在内地向斜回返以前，它们是稳定的深部坳陷，有厚的沉积层，即地壳厚度很大。由于这种缘故，显示出重力低和磁力低。它们的成矿专属性为锡-钨。

对金矿的成矿预测构造最有意义的是地壳断块的第三系统，它构成内地背斜的外带。该断块在空间上位于内地背斜与内地向斜之间，此处的地壳厚度也介于二者之间。根据地质前提和地球物理资料，在这种断块中可以追索到内地向斜基底的有时规模相当大的突起。上述诸因素决定了重力场的一般值比相邻的内地背斜断块要小很多。中生—新生代的强烈侵入活动，使地壳上部有辉长-斜长花岗岩建造的层间隐伏侵入体侵入和分布。大量中性和基性成分的岩浆产物侵入这种断块的沉积层中，使地磁场值升高（甚至在某些情况下很高）。地壳中的这种断块对金矿的形成是有利的。

此外，还可根据综合地质-地球物理资料，在构造分区图上（图3-2-1）划分花岗岩和闪长岩建造的侵入体。根据局部负重力异常，有把握地划分出花岗岩建造的侵入体。由地磁场的增高可以勾绘出闪长岩建造的侵入体。金矿区大部分位于内地背斜外带（过渡带），很少在闪长岩建造的侵入体顶部。金矿区的小部分位于内地背斜断块的边部。在断块范围内存在闪长岩建造的侵入体时，才会出现这种情况。

巨大的构造障是金矿区的分界线。矿区西部起构造障作用的是花岗岩基侵入体及其东侧的南北向深断裂Б，矿区东部则是北东向深断裂A。在北部近东西向的深断裂带B起着构造障的部分作用。由此可见，金矿区的地质界线决定于上述构造障的相互分布，圈定金矿区界线时考虑了闪长岩建造的侵入体的分布情况，其中包括根据磁法资料确定的隐伏侵入体。在已有1:20万比例尺重力测量资料的地区，重力与航磁资料一起可以确定地壳断块的形态特点、侵入岩体及断裂构造，以便在金矿区范围内，确定金矿田的界线。

例二，中国东中部深部重力场特征与金矿床的分布

利用深地震测深资料研究地壳深部构造是最理想的，但是由于深地震测深成本昂贵，工作量很少。目前，研究深部构造多用重力测量，根据重力资料结合深地震测深剖面资料可计算出面积性的地壳近似厚度（莫霍面埋深），给出上地幔密度的分布特征等。本例研究者（陈继宇），曾在中国科学院地球物理所做的元氏-济南剖面和柴达木大柴旦-格尔木等剖面上，对深地震测深结果与重力测量结果进行对比，二者结果十分近似，因此可以利用重力结果研究深部构造。

我国东中部地区包括范围为：北纬28°～42°、东经104°～124°。前人已对我国区域重力场的基本特征有过不少论述，本书第二章曾分析了我国重力异常、莫霍面变化和地壳厚度变化特点，这里不再重述，仅做概要说明。

我国东中部地区有三条重力梯级带经过。中部有大型北北东向纵贯南北的重力梯级带：大兴安岭—太行山—武陵山重力梯级带，宽约50～80公里，梯度变化约为50～80毫伽，即每公里变化约1毫伽；西缘是大型的贺兰山—六盘山—龙门山梯级带，宽约50～100公里，梯度变化为50～70毫伽，每公里变化约0.8毫伽；第三条是昆仑山—阿尔金山—祁连山弧形重力梯级带，其东端与贺兰山—六盘山梯级带汇合，使这里的深部重力场特征复杂化。

通过对我国东中部重力异常场的研究和推断解释，获得了我国东中部的深部构造、莫霍面的埋深和变化特点以及我国东中部的构造单元的划分，其结果示于图3-2-2和图3-2-3。

分析图3-2-2和图3-2-3可以发现：北北东向太行山—武陵山重力梯级带将我国东中部分成东、西两个部分。该带的梯度

变化很陡，莫霍面等值线的落差约三公里左右，即东、西两侧存在一个三千米的东高西低的台阶，它明显的标志着北北东向重力梯度变异带是断块边界的反映。西部大致以近东西向的秦岭重力梯级带为界，西部又可分成南、北两个部分。北半部为一个向宝鸡、赤城成对角线方向拉长的菱型环状重力异常群包围，构成广义的伊陕地台；南半部是一个近似椭圆的环状异常，构成了广义的四川地台（见图3-2-2和图3-2-3）。南部大致以长江流域为界，又可分为南、北两部分，北半部是广义的华北莫霍面隆起区；南半部是华南莫霍面凹陷的一部分。两区间由明显的重力梯级带分界。重力梯度值由36～37公里，突然增至39～40公里，其差值约2～3公里。北半部分布着大小不等的20多个隆起、凹陷异常。

综上所述，一条北北东向大型重力梯级带、两环状异常和东半部南段（华北、华南）重力梯级带分界线，构成了该区构造格局的主要骨架（图3-2-3）。根据重力异常特征、梯度陡变以及弯曲等特征，又推断出次一级或更次一级的断裂构造位置。初步认为：北北东、北东、近南北三个方向的构造属太平洋与菲律宾板块运动时形成的，北北西、北西、近东西三个方向的构造则是印度板块作用时形成的。

从金矿成矿规律知道，金矿成矿与构造、岩浆岩、矿源层、围岩及地球化学等多种因素有关，其中构造作用是十分重要的。该区从宏观来看，内生金矿床多富存在太平洋板块与印度板块两次作用的交汇部位。从具体赋存部位来看，主要取决于莫霍面形态、深部构造条件和基底成分。

1．莫霍面形态与深部构造条件

该区金矿成矿的深部构造条件在于北北东向重力梯级带与

近东西向梯级带交汇部位。其位置是：

（1）北北东向太行山—武陵山重力梯级带与近东西向秦岭重力梯级带交汇处；

（2）北北东向太行山—武陵山重力梯级带与近东西向阴山—燕山重力梯级带交汇处；

（3）北东向富平—太岳山重力梯级带与近东西向秦岭重力梯级带交汇处；

（4）北北东向郯庐断裂与近东西向构造交汇处。

金矿床主要赋存部位的重力异常特征是，线性异常弯曲；形态完整的重力异常突然急剧收缩或膨大。这些形态变异的重力异常处正是各期地质构造运动综合作用处及最终反映。凡是产生形变的重力异常均表示存在不同方向的地质构造在此有过联合作用。正是这种深部的地质构造运动为岩浆侵入、矿液来源提供了空间条件。莫霍面变形区之所以有利于矿产的形成，其主要机理（根据翟裕生教授的观点）是：这些部位破坏程度高，常常处在引张状态，溶液运移到这里时的压力、温度会突然减低，导致溶液中金属矿物的结晶沉淀。

苏联某些学者发现，金矿床主要分布在地壳底板凸起的边缘，以及地壳底板等高线呈东东西向的地段上。我国情况也是如此。

上述有利的空间部位对金矿床的成矿是一个重要的、不可缺少的条件。但并非这种部位都赋存矿产，而是要看是否存在与金矿床有着依存关系的基底。据姜齐节、梅友松的统计证明，大部分金矿床与中基性火山岩基底区有最明显的依存关系。位于中基性火山岩基底区的有利构造部位才是金矿成矿最有利的部位。

根据该区莫霍面形态、深部构造条件和中基性火山岩的分布，对该区金矿床的预测如下。

（一）位于中基性火山岩基底之上的黄县、招远—莒县、沂南、五莲—泗县、凤阳—蚌埠区是一条长达600公里的金矿成矿带。其中有三个金矿床赋存的有利部位。它们均位于莫霍面变异（变形）带上，同时也是深部构造的不同方向断裂的交叉部位。这三个地段分别是：

1．黄县—招远金矿带。该带是已知的胶东半岛金矿带。

2．沂南—莒县—五莲一带。在此成矿带上已发现沂南金矿床，该地段绝不止此一处金矿床，如果在这一带继续开展普查找金工作，完全有可能发现新的金矿床（图3-2-2和图3-2-3）。

3．蚌埠—凤阳—泗县—五河一带。此带为覆盖区，目前工作程度很低，这一带也是寻找金矿床很有前景的地区，应引起足够重视。

（二）宝鸡—沁阳一带也是莫霍面变异带，基底成分也为中基性火山岩，构造及岩浆岩方面具备成矿条件，应予以充分重视。

§3.3 金矿床区域性普查找矿阶段物探方法的效能

金矿床成矿预测阶段物探方法所解决的地质问题都是宏观的、粗线条的，只能解决预测区中大规模、深部的地质构造的大致轮廓、大型地层、岩体的分布，由此而选择的成矿远景靶区范围往往也是很大的。区域性普查找矿工作是在已经选择的

远景靶区中进一步投入物（化）探工作，目的在于缩小找矿的远景靶区。

区域性普查找矿阶段，物探方法仍然是以解决区域性基础地质问题为主要任务。与成矿预测阶段相比较，解决问题的内容除莫霍面埋深、变化特点外大致相似，仅仅是所解决的地质问题的范围、深度、规模相对较小而已。但是，该阶段的工作要求比第一阶段更详细、更深入。例如，利用物探资料进行深部地质填图时，不仅要圈出区域性构造，而且要尽可能地圈出次一级构造及局部构造，同时还要圈出规模相对较小的岩体、地层等。着重研究不同类型、不同规模构造之间的关系；构造与不同类型、不同规模岩体、地层、矿化层之间关系；同时，要特别重视研究不同物理参数的岩体、地层与矿化层、构造间关系，这对确定矿源层、控矿构造是十分必要的。

此阶段所应用的主要物探方法仍然是重力、航磁，有些地方已进行了航电工作。具体工作程序就不一一介绍了，仅就几个问题讨论如下。

一、我国金矿带上重、磁异常的一般特征

在金矿床区域性普查找矿阶段，重、磁方法是主要的物探方法，了解金矿带上重、磁异常的分布特征对使用这类方法圈定金矿带是很重要的。

1．金矿带上重、磁异常一般特征

大型金矿带的分布往往与莫霍面的变异带、切穿地壳的超深断裂带有关，在这些地方布格重力异常则形成巨型重力异常梯级带。有重要经济价值的金矿带常在超深断裂带附近并受区域性断裂带和次一级断裂带控制，而这些断裂带上常出现不同

级别、不同规模的重力异常梯级带。由此可以得出结论性的认识：内生金矿床金矿带常常位于重力异常梯级带的附近。

根据潘勇飞同志对全国变质热液、岩浆热液、混合岩化热液及伴生型金矿床的600余个金矿床（点）航磁异常统计结果表明，在这些类型金矿床上磁异常绝大部分为低、负磁异常，这一特点具有普遍意义。

图3-3-1、图3-3-2给出了山东某金矿区40号勘探剖面和某金矿区120号勘探剖面的磁异常曲线。

下面以山东招远、玲珑金矿区和吉林夹皮沟金矿区为例，说明金矿带上重、磁异常的分布特点。

（1）山东招远、玲珑金矿床区域地球物理特征。招远、玲珑金矿区是目前我国最大的金矿区，该区金矿床有含金蚀变岩型和含金石英脉型两种类型。二者控矿因素基本相同，有时表现为空间位置的不同，但从地球物理场看它们是处于同一成矿环境，如图3-3-3所示。该矿区周围有四条重力高值带围绕，西部由掖县西南以近南北向或北北东向向北延伸，经三山岛西部海域至蓬莱西北部海中与烟台经蓬莱的北西西向重力高值带相交，南部重力高值带西起济南沿胶济铁路呈近东西向延伸至青岛，与青岛之东沿海滨呈北东向向北东延伸的重力高值带相接。在西部重力高之东是掖县和招远的重力低值区，它们与前震旦纪花岗岩（γ_2）及燕山期花岗闪长岩体（$\gamma\delta_5$）相对应，因花岗岩类的密度比前震旦纪胶东群低0.1～0.15g/cm^3。而磁场反映为区域性的负异常区，范围较重力低值区大，边界基本与重力梯级带一致。这表明：具有磁性的胶东群地层（χ=100～300×10^{-5}SI）受前震旦纪及后来的多次热力活动而造成退磁（χ=10～50×10^{-5}SI）。金矿床在空间分布上基本处

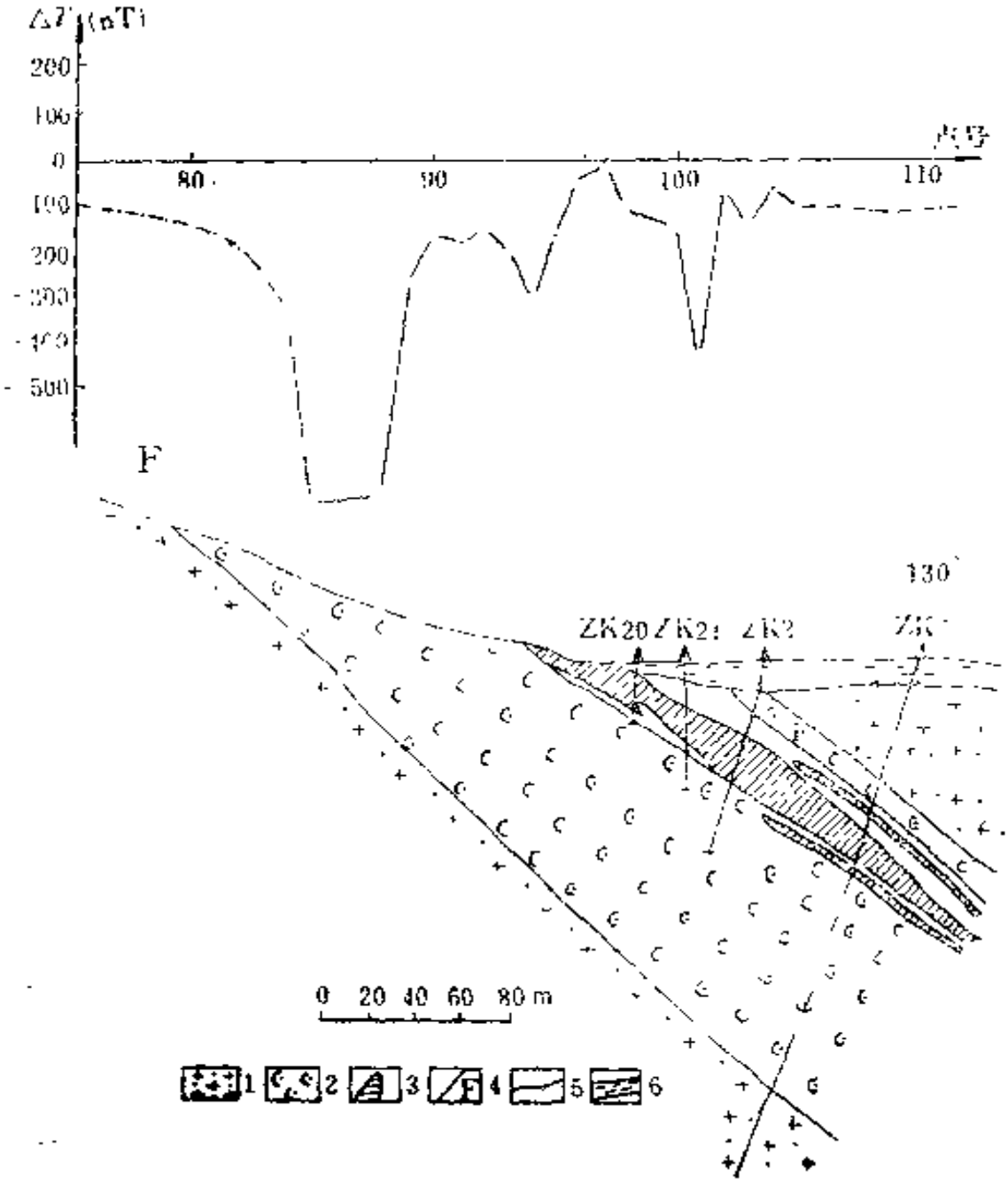


图3-3-1　山东××金矿区40号勘探剖面上地质、航磁异常剖面图

1-玲珑花岗岩；2-蚀变带；3-金矿体；4-断裂构造；5-地层界线；6-第四系沉积物

于重力异常梯级带附近和负磁异常区边缘。

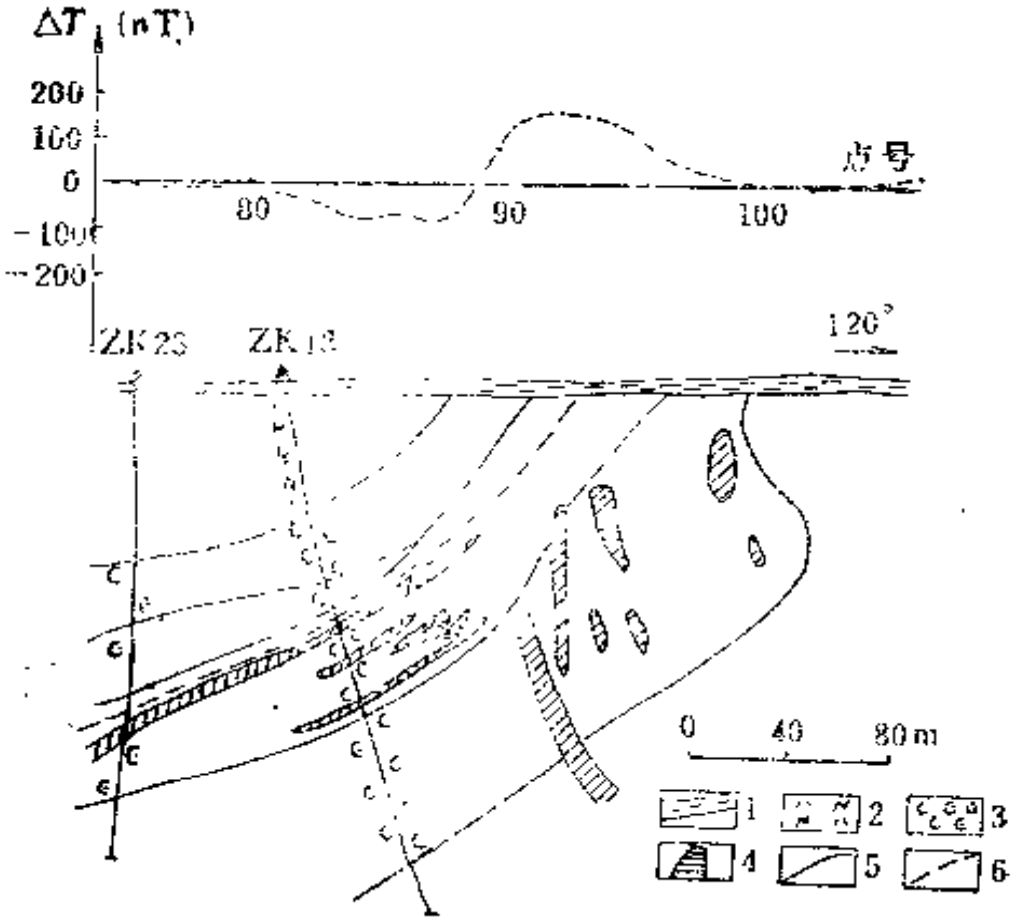


图3-3-2 山东××金矿区120号勘探线地质、磁法异常剖面图

1-第四系沉积物；2-斜长角闪岩；3-蚀变带（硅化、黄铁绢英岩化）；4-金体矿；5-地质界线；6-断裂构造

综合地质及地球物理资料表明了该区区域控矿条件是：前震旦纪胶东群地层中发生了古老的深成断裂带活动（地球物理场反映为招远—掖县西部重力梯级带和烟台—蓬莱南部的重力梯级带），沿该断裂有花岗岩(γ_2)侵入及花岗岩化作用，并使含金半度较高的胶东群片麻岩地层重熔、运移和冷凝，造成了金元素重新分配或集中。在此后(如燕山期)的地质运动中，

断裂带又重新活动，花岗闪长岩体（$\gamma\delta_5$）侵入于新活动带中，再次使胶东群地层及老花岗岩重熔，金元素又一次富集在岩浆期后残余溶液中，并沿周围断裂破碎带沉淀成矿。招掖地区形成如此大的金矿区与老地层大范围重熔有密切关系。

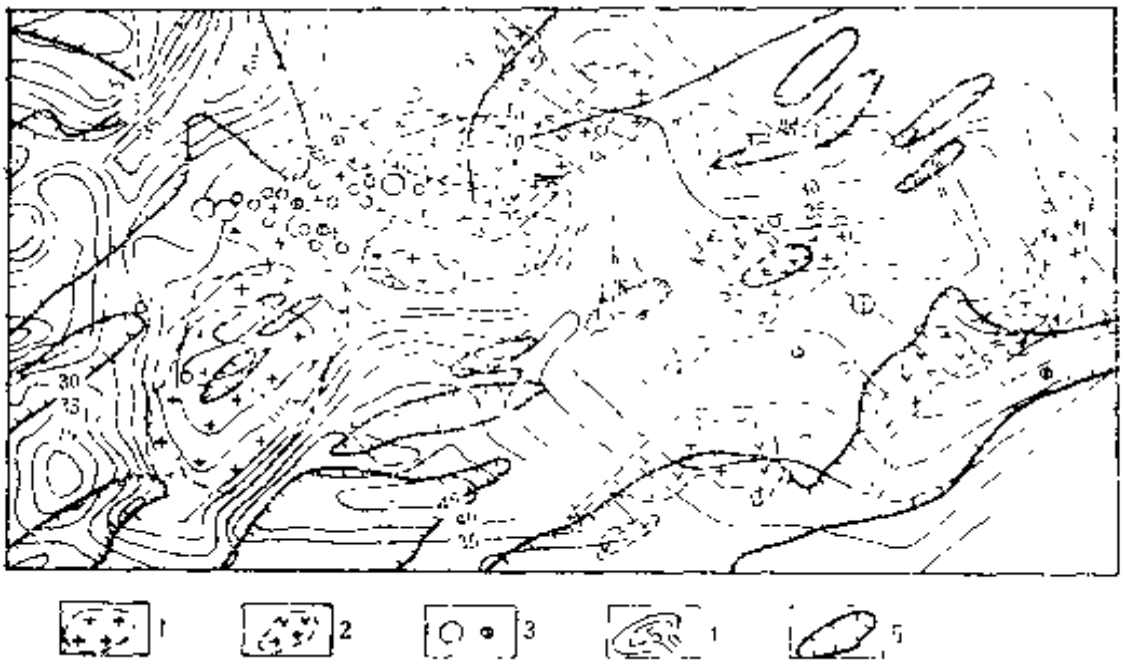


图3-3-3　山东招远、玲珑金矿带地球物理场特征（引自李治华）
1-震旦纪花岗岩；2-燕山期花岗岩及闪长花岗岩；
3-金矿床及矿点；4-重力等值线（mGal）；5-航磁正异常区

由此可见，该区形成金矿田的必要条件是：存在含金丰度高的胶东群蓬莱组地层和切割该地层的深大断裂构造及相伴生的大规模花岗岩化或花岗岩（γ_2）的侵入。而充分条件是：深断裂的长期或多期活动，新的花岗岩化或花岗岩侵入及周围次级断裂的存在。充分认识这种区域控矿条件对选择金矿成矿远景区具有较大的意义。

（2）吉林夹皮沟金矿床区域地球物理特征

吉林夹皮沟金矿是一个开采历史悠久的老矿。该矿床属大型石英脉型金矿，其区域地球物理特征与招掖地区基本相似。

夹皮沟金矿带位于老金厂重力高值区北缘的重力梯级带上，其重力变化值达30mGal。重力梯度带走向在西端为近东西向，中段（夹皮沟—老牛沟）为北西向，而东段则又近东西向。梯度带北部有一个重力低值区，详见图3-3-4。与其相伴随的是负磁异常区，靠近矿带地段还有线状北西向负磁异常极小带。由矿田所处位置与地球物理场的空间关系可推测，该重力梯级带及负磁异常带是深断裂构造的形成及后期活动所遗留的地球物理痕迹。

该区地质特征是：该区位于华北地台北部边缘，在鞍山群地层中有两组前震旦纪花岗岩或混合花岗岩侵入，其方向分别呈北东向和北西向，在矿区附近，主要为北西向。同时，还有燕山期花岗岩或岩株（γ_5）沿北西向断裂分布。与招液地区所不同的是，区域的北部广泛发育有晚古生代花岗岩（γ_4），且重力低值区范围和负磁异常范围也比招液地区小得多，可能这种场规模的大小与矿带规模有关。

此外，该区物性测定结果表明：γ_{1-2}玲珑花岗岩及花岗闪长岩及破碎、蚀变的片理化岩石磁性微弱甚至无磁性，而未蚀变的鞍山群地层磁化率达100～300×10^{-6}SI；γ_{1-2}和γ_4与鞍山群地层的密度差达0.14～0.74g/cm^3。说明前述推断的地质结论是有物性前提的。

2．金矿带上航磁异常为低、负异常的地质原因

金矿带常常位于重力梯级带附近，这一点已为人们所接受。但为什么金矿带所处部位的航磁异常常为低、负异常呢？

究其地质原因为：

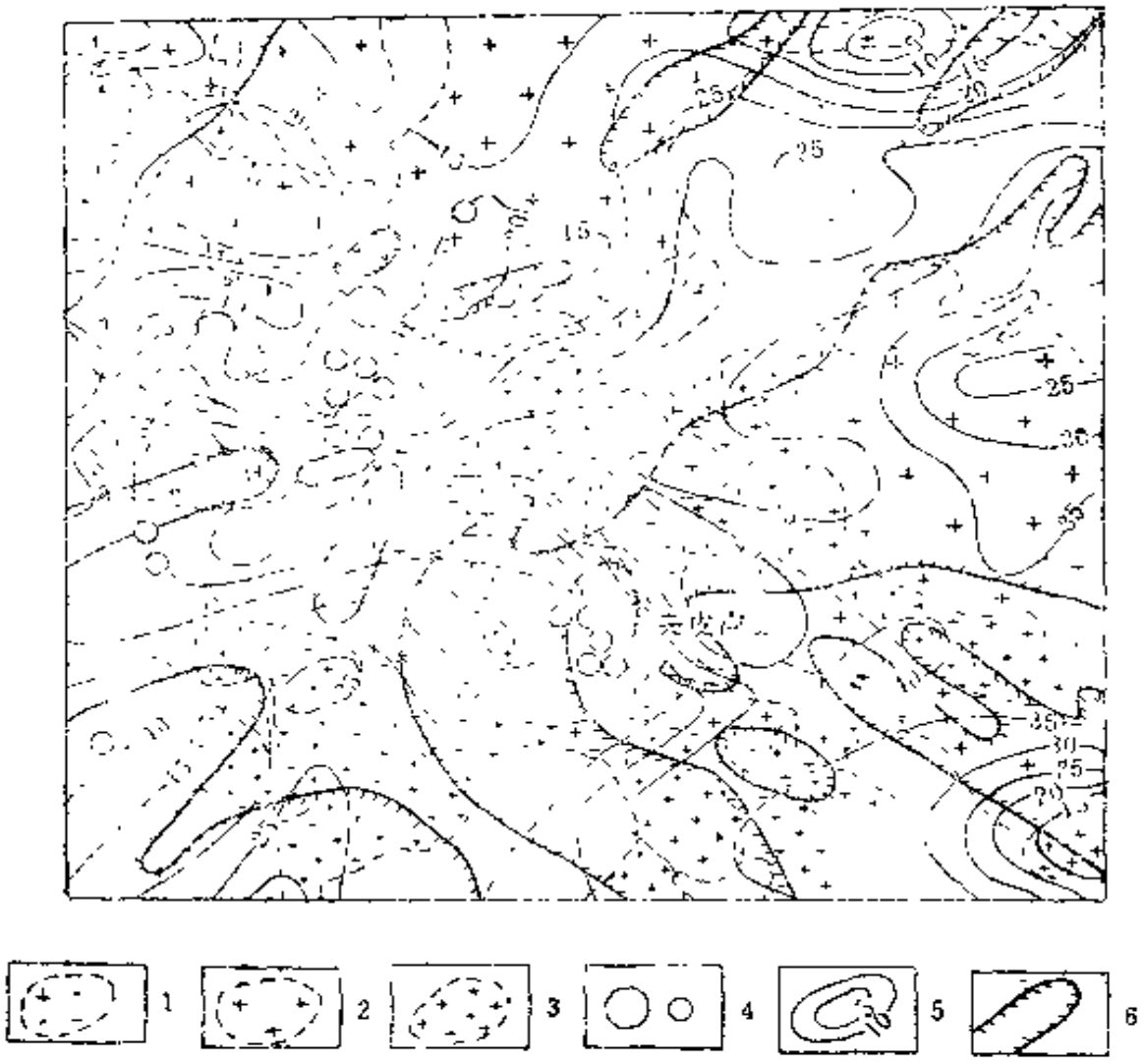


图3-3-4　吉林夹皮沟金矿带地球物理场特征（引自李治华）

1-燕山期花岗岩；2-华力西期花岗岩；3-前震旦纪花岗岩；
4-金矿床及矿点；5-重力等值线；6-航磁正异常区

（1）金矿在形成的过程中，由于酸性、中酸性岩浆侵入及强烈的热液活动，在高温高压影响下使具有磁性的古老地层产生退磁作用，使磁性减弱。例如，胶东群地层磁化率 χ 为100～300×10^{-5}SI，经花岗岩侵入使胶东群地层产生重熔作用，它

受前震旦纪及后来多次热力活动造成退磁，其磁化率明显减小，其值为 $\chi=10\sim50\times10^{-6}SI$。这是金矿带上航磁异常出现低、负异常的主要原因之一。

（2）内生金矿床95%都与不同类型、不同规模的断裂有关。岩、矿石机械断裂破碎作用，不仅能使岩石密度减小，而且能使岩石的磁化率降低和剩余磁化强度减弱，剩磁方向杂乱。

（3）蚀变带是金矿床存在的标志之一。蚀变带内的矿物组成和化学成分及相应的物理性质同未蚀变的围岩明显不同。金矿的蚀变带内往往都有硅化、碳酸岩化、绢云母化、赤铁矿化等等，硅化、碳酸岩化实质是在原来的岩石中充填了大量的SiO_2、Ca、Mg、Mn的碳酸盐，它们的磁化率为负，产生负感应磁化强度，使原来岩石的磁性减弱。

这里讨论的是金矿带上磁异常特征，不包括矿体本身（相对矿化带规模较小）磁异常和含铁建造中金矿带的磁异常特征。

二．金矿床成矿模式及异常模式

这里以华北地台为例讨论如下。

华北地台上金矿床（田）的一般成矿过程是（李志华，1987）：在前震旦纪海底喷发出来自地幔内含有丰富金元素的基性—超基性岩流与陆源碎屑物互层沉积，形成了夹有大量基性—超基性岩的前震旦纪巨厚沉积层。在五台或吕梁运动时产生了切穿地壳的深大断裂，造成了地壳压应力的脆弱带，为地幔中热流沿断裂辐射、传导创造了空间条件，同时断裂构造运动本身也产生了动力热能。两者的共同作用，使沿断裂附近的地层熔融，形成一种花岗岩浆沿断裂继续上升，在温度及压力

适宜时开始冷凝，金元素集中在偏碱性的残余岩浆和溶液中，最后在岩体顶部、边部围岩裂隙中沉淀，造成金元素的第一次富集。此后，特别是燕山期运动中，老断裂又复活，在花岗岩γ_{1-2}和片麻岩接触部的脆弱带又重复前次活动，再次重熔了老的花岗岩、片麻岩及初次富集的金而形成了新的岩浆，在温度和压力适宜的空间形成了花岗岩（γ_5）或花岗闪长岩（$\gamma\delta_5$）体或岩株。经过再次金元素富集的残余岩浆或溶液，在其周围的裂隙中生成了含金石英脉或含金蚀变破碎带，而在岩体周围的裂隙不发育时，则在岩体顶部冷却时产生的裂隙中形成金矿脉带或网脉带，即广义上的斑岩型金矿。将上述成矿模式示于图3-3-5。

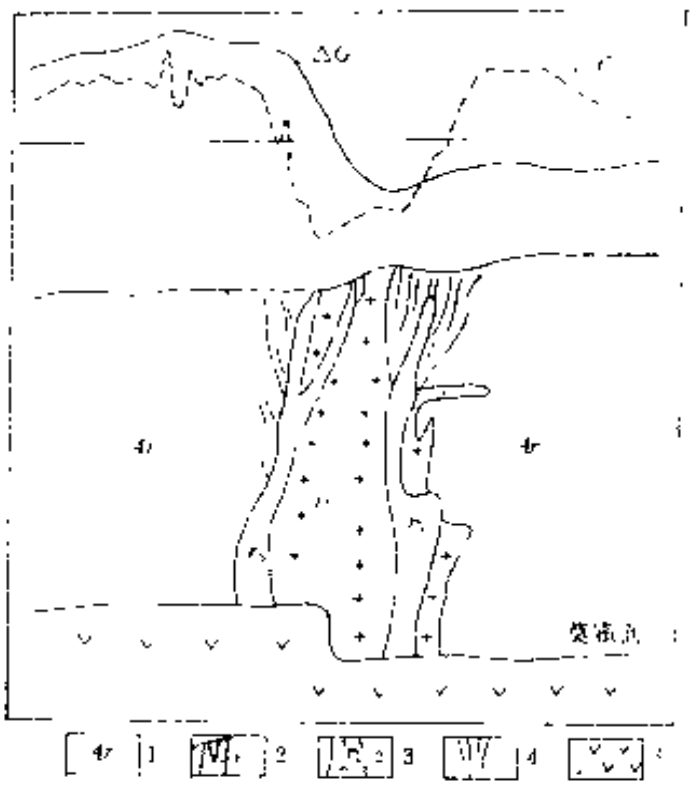


图3-3-5 华北地台金矿床成矿模式和异常模式示意图（引自李治华）

1-太古界地层；2-中生代花岗岩体；3-前震旦纪花岗岩；4-含金石英脉及脉岩；5-地幔岩石

这里还要特别指出，一些重要的金矿床区往往发育有从酸性—中性—基性的脉岩，其方向与金矿脉带呈平行或锐角相交，岩脉不同程度地含有金，这是金矿赋存的具体标志之一，是金矿床生成过程的显示。一般来说，仅有老地层和深断裂构造条件是

不够的，还要分析该断裂是否有长期的强烈活动（如不同时期的中酸性岩浆侵入活动），岩体周围的断裂构造、蚀变和岩脉的发育情况，这些条件是金矿床（田）形成的必要而充分的条件，也是综合选定成矿预测区的基本要素。

由于深部断裂构造在地表难以确认，隐伏的岩体及热力变质区也较难发现，因此，研究地球物理场的分布便成为解决这类地质问题的有效途径。上述的成矿过程所产生的结果在地球物理场中的反映是：一般深部断裂构造都有梯度大、范围宽的明显重力梯级带；深部断裂活动往往伴有强烈的热液活动，这种热液活动则使太古界具有磁性的地层发生退磁而形成负磁异常；沿深部断裂侵入的各期花岗岩体，其密度又较太古界地层低，则重力场反映为局部重力低，同时由磁性差异可知，岩体上一般反映为负磁场区；区域性热液蚀变则反映为平缓的低值负磁异常。将上述地球物理场特征模式化，示于图3-3-5上部。

图3-3-5表示的是一般理想的地球物理—地质成矿模式和异常模式，它反映了华北地台区绝大部分金矿床(田)的成矿特点及地球物理场特征。

三、华北地台金矿床的成矿规律及成矿预测

现以河北省为例加以说明。河北省北部和西部的大型、特大型及中小型金矿床和数以百计的金矿点和矿化点，都有规律地分布在四条深断裂构造带及其附近，见图3-3-6这些矿点及矿床往往围绕深部断裂附近侵入的不同时代的中酸性岩体及岩株周围分布，有时还可见中酸性岩脉，甚至基性岩脉分布。而在地球物理场中，它们又主要分布在重力梯级带上和负磁异常的边缘。

根据上述金矿成矿规律，拟定出在太古界地层广泛分布区

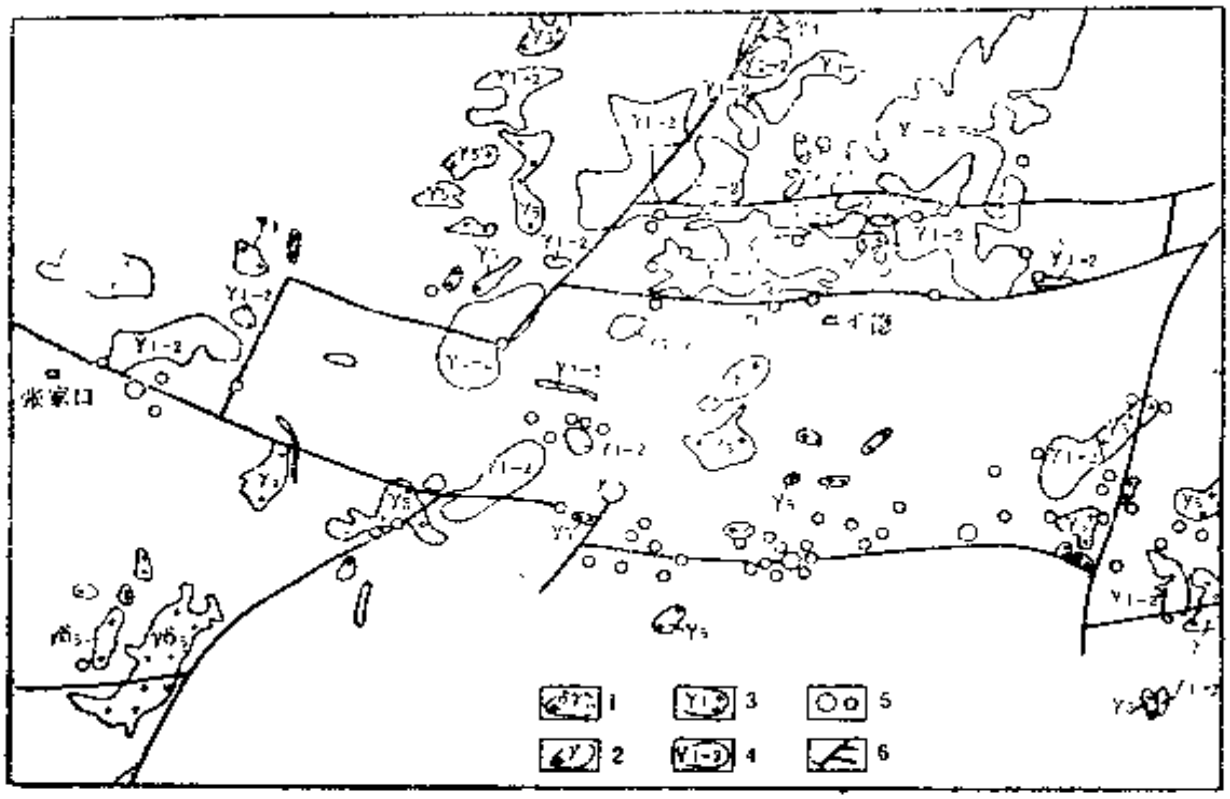


图3-3-6 金矿床（点）分布与断裂的关系（引自李治华）
1-燕山期花岗闪长岩；2-燕山期花岗岩；3-华力西期花岗岩；4-前震旦纪花岗岩；5-金矿床及矿点；6-断裂构造

用地球物理方法预测或划分金矿成矿远景区的程序是：

1．首先在区域重力(布格)异常中找出与深部断裂构造有关的重力梯级带；

2．在重力梯级带上及附近找出负磁异常区或负磁异常带；

3．在负磁异常区(带)内找出局部重力低及局部负磁异常区（带）。同时，该区(带)内不同时期侵入（尤其是燕山期）的中、酸性岩体及岩株也是划分远景区的地质标志之一。

根据以上原则和程序，将河北省划分出六个一级成矿远景区和四个二级成矿远景区。

以上讨论虽然是针对华北地台和河北省而言的，但是，这

种因地制宜总结提高的做法是值得学习和借鉴的，所总结出的经验、规律及预测程式具有普遍意义和指导作用。

在结束本节讨论之前，向大家介绍另一种区域性普查找矿方法—航空电磁法。这种方法在西方国家应用较多，我国虽然已研究多年，但实际应用较少。近几年来应用逐渐增多，如胶东地区已进行了航空电磁法飞行。在断裂带处由于岩石电阻率比周围岩石明显降低，故航空电磁法在其上出现明显的虚分量（Im）异常和实分量（Re）异常。图3-3-7给出了某金矿区上的航电和航磁的一条剖面曲线。

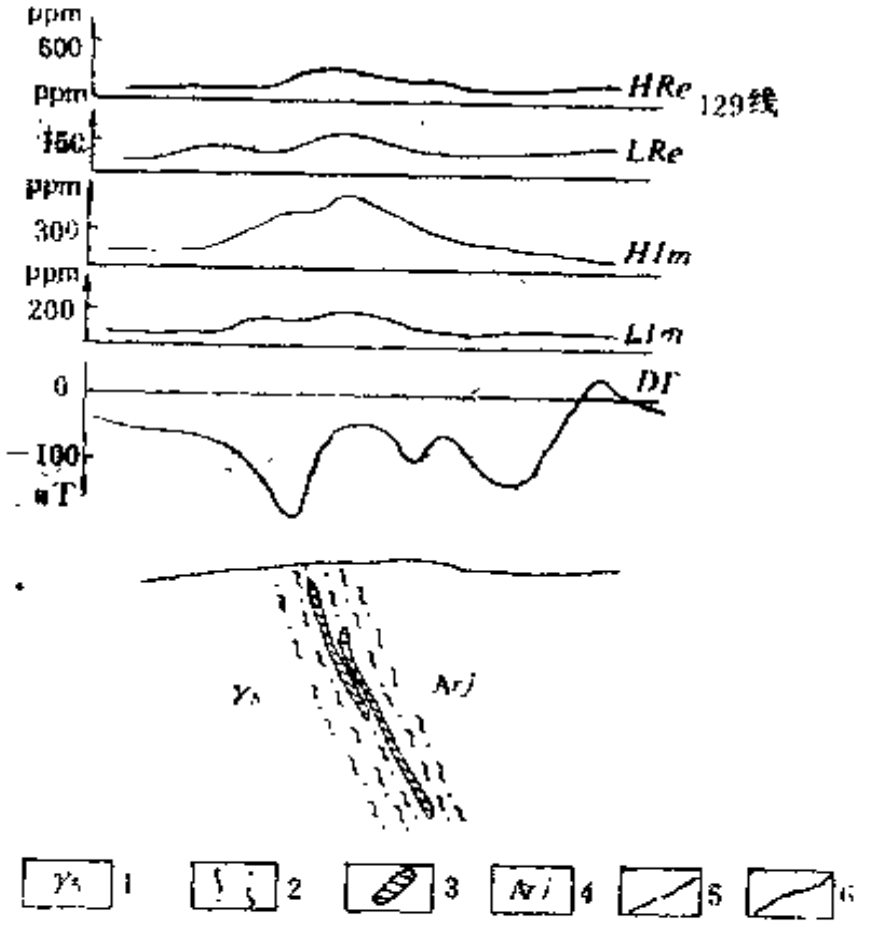


图3-3-7　××金矿航电、航磁异常图（引自潘勇飞）

1-玲珑花岗岩；2-硅化蚀变带；3-金矿体；4-胶东群；
5-断裂构造带；6-地质界线

§3.4 金矿床局部地区普查、详查找矿阶段物探方法的效能

局部地区普查、详查找矿工作是在已经缩小的靶区中进行的，通过进一步开展物探工作，解决与该阶段有关的相应地质问题，缩小找矿范围，最后选择出找矿最有希望的地段，提供地质上钻探验证，以便最终找到金矿床。

一、局部地区普查、详查阶段物探方法所能解决的地质问题

这一阶段物探工作特点已不能像前两个阶段那样，解决地质问题属于粗略轮廓、大范围的，而是在一个较小的范围内，解决与金矿床有直接或间接关系的各种地质问题，指出可能含金矿体的位置、范围、埋深和大致产状，最后圈出勘探靶区。该阶段要求物探工作要深入、细致、具体、准确，要尽可能利用综合物探方法，并与化探、地质工作紧密配合，以求提高所选勘探靶区的可靠性。

该阶段中应用的主要物探方法有：各种装置的电阻率法和激发极化法、自电、电磁法、磁法、重力、压电法和核物探。每种方法均有其本身的特点，在解决某些地质问题方面各具有其优势，要求各方法间互相配合，扬长避短，尽可能提高物探方法的地质效果。在局部地区普查、找矿阶段物探方法可解决以下几方面的问题。

（一）利用物探方法进一步查明与金矿成矿有关的各种地质构造、不同岩性和不同物理性质的接触带、裂隙带、破碎带、

部的断裂构造的交汇处（点），尤其是要重点查明第四系覆盖下的各种构造和岩性。在可能情况下研究与金矿成矿有关的构造的产状及产状变化情况，这对进一步确定矿体赋存位置是十分重要的。

例如，夹皮沟金矿区利用电阻率联合剖面法解决上述问题，取得了较好地质效果。

夹皮沟是我国著名的老矿山，后来又发现了二道沟、三道岔、板庙子等十几处新矿床。

该矿区位于天山～阴山纬向构造带东端，辉发河深断裂东南侧。区内出露地层以鞍山群为主。矿床赋存在鞍山群绿岩建造三道沟组下含铁层角闪岩相中，具层控特点。区内分布有吕梁花岗岩和华力西晚期花岗岩。矿床附近有辉绿岩、闪长玢岩和正长斑岩等脉岩。区内夹皮沟～大砬子北西向弧形挤压带及其低序次的构造控制矿床的分布。夹皮沟矿床赋存于由千糜岩、糜棱岩、绢云母石英岩、绿泥石片岩等组成的近东西向动力变质带中；二道沟矿床赋存在迭加于注入片麻岩、角闪斜长片麻岩挤压片理化带上的扭裂带中；三道岔矿床赋存于注入片麻岩、角闪斜长片麻岩的挤压片理化带与压扭断裂带的交汇部位；板庙子矿床赋存于混合质角闪斜长片麻岩、角闪斜长混合片麻岩的北西西向挤压片理化带中。矿脉又主要赋存于挤压片理化带、压扭性断裂及层间断裂等构造部位。这些断裂构造带是运用联剖方法的主要地质条件。

区内岩石由于混合岩化、挤压破碎及蚀变等作用，导致了电阻率值的变化较复杂，但是对某一区段来说，主要地质体之间具有明显的电阻率差异。脉岩的电阻率值比一般围岩高2～4倍；构造断裂带（破碎带或挤压片理化带）又比围岩的电阻

率值低1~2个级次，显然用联剖寻找断裂带具有良好的物性前提。虽然该矿区以含金石英脉为主要矿床类型，但石英脉不是完全充填断裂带的，并经多期充填，发生较多的碎裂状态，因此在断裂带上电阻率曲线仍呈低阻反映。

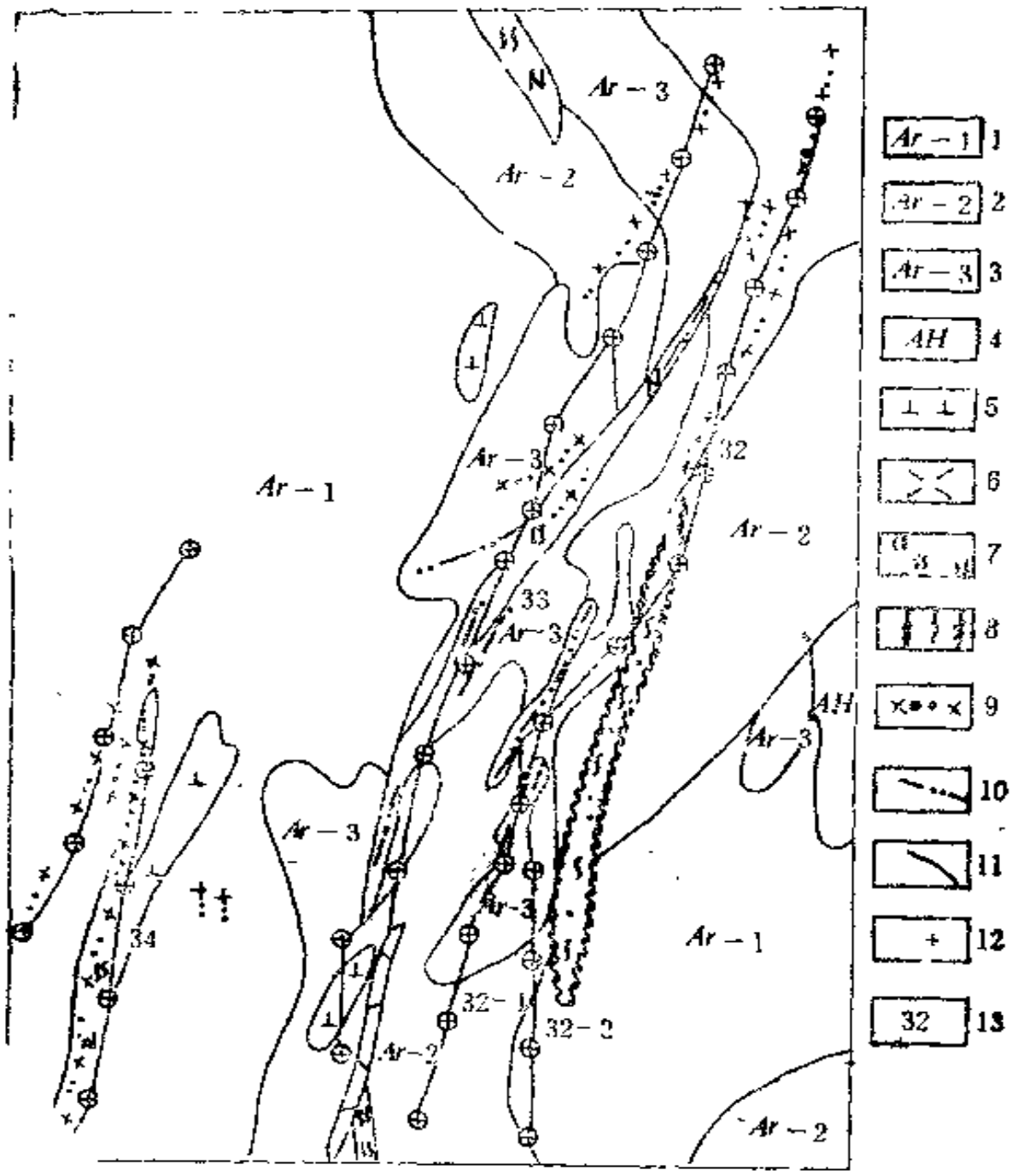
为了圈定构造断裂带，本区投入了电阻率联合剖面法的面积测量，其部分结果见图3-4-1。图中含矿构造带与联合剖面法异常轴位置吻合的很好，效果令人满意。

该区含矿构造带的联合剖面异常以不对称、正交点为基本类型，图3-4-2是三道岔4号勘探线上的联剖ρ_s异常曲线。由于该区地形复杂，加上片理化带又是一个含矿断裂，含金石英脉及脉岩赋存其内，致使联剖异常比较复杂。因此，在异常解释时，不仅要考虑交点的类型，而且还要注意局部低阻和高阻异常中的低阻部分。

联合剖面法在该区共圈定了56条联剖异常带，其中24条已被证实为由各类含矿构造引起，其余异常还需进一步综合研究，充分验证。

山东省物探队在胶东招掖金矿带上用电阻率法联剖装置扫面400平方公里，圈出了大小断裂构造17条。通过研究各条构造间的相互关系，指出了蚀变岩型金矿床成矿的大致范围和赋存空间，为招掖金矿带的发现做出了重要贡献（第七章图7-1-1）。

目前，在确定断裂构造位置和产状时，大家多用电阻率联合剖面法正交点的位置及不同极距正交点位置位移方向来确定。从理论上说，这种做法是正确的，但是，由于电阻率法受局部电性不均匀体和地形影响明显，故在电阻率联合剖面法资料解释时，一定要对原始资料做相应处理和地形改正，否则将



吉林三道沟金矿床地质、联剖综合平面图(引自吴相赫)

1-混合片麻岩；2-注入片麻岩；3-角闪斜长片麻岩；
4-斜长角闪岩；5-细粒闪长岩；6-长英岩；7-片理化带；
8-破碎带；9-含矿断裂；10-含矿石英脉；11-地质界线；
12-联剖异常轴；13-联剖异常编号

会得出错误结论。

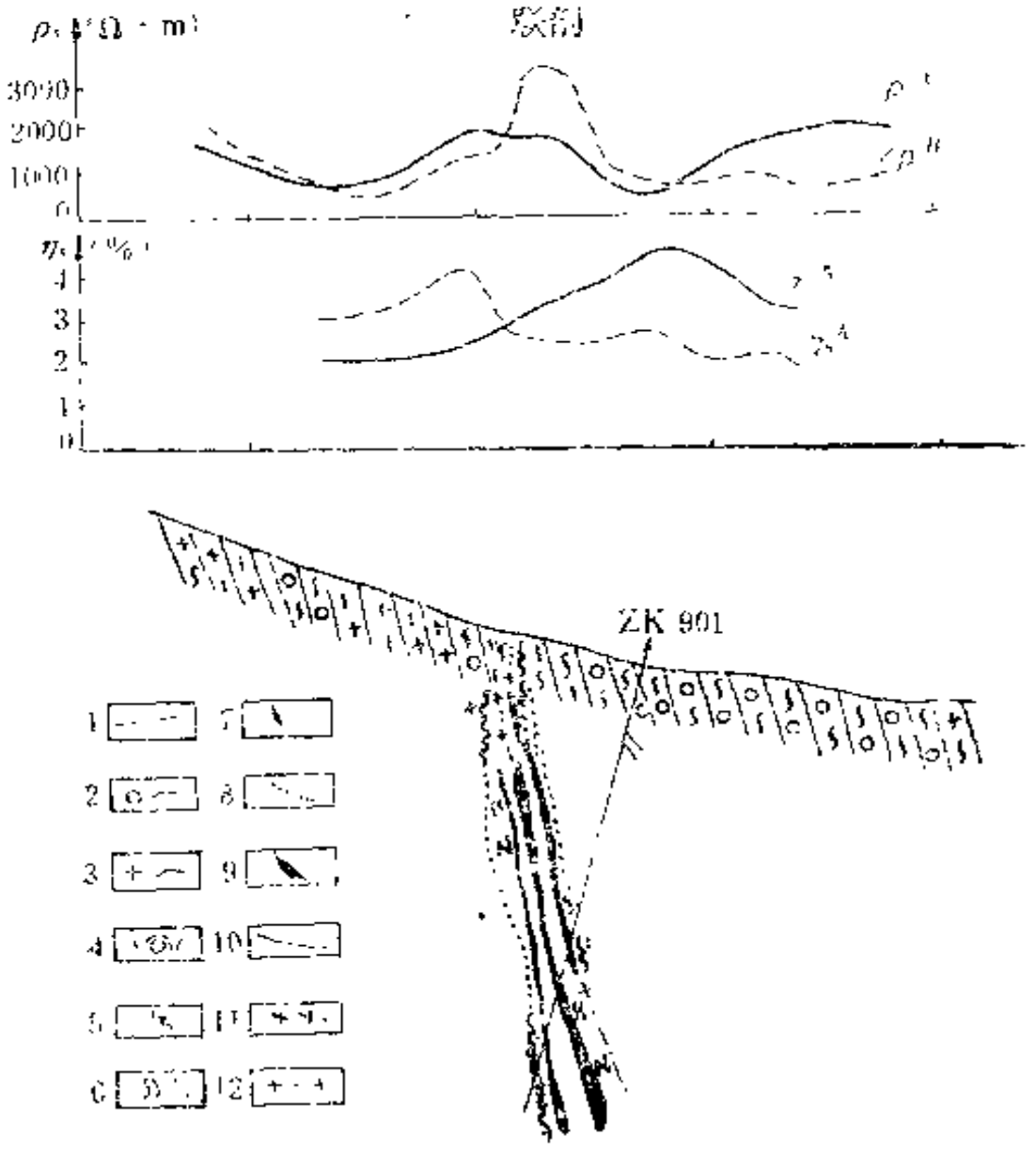


图3-4-2　三道岔4号勘探线综合剖面图（引自吴相泰

1-角闪斜长片麻岩；2-注入片麻岩；3-混合片麻岩；
4-石英正长岩；5-破碎带；6-片理化带；7-实测地质
8-推测地质界线；9-含金石英脉(大于4g/t)；
10-含金石英脉(1—4g/t)；11-石英细脉带；12-含

图3-4-3给出了河北省三家地区某金矿区F_1^7O线上不同极距的联合剖面法ρ_s异常曲线。利用小极距ρ_s正交点位置确定

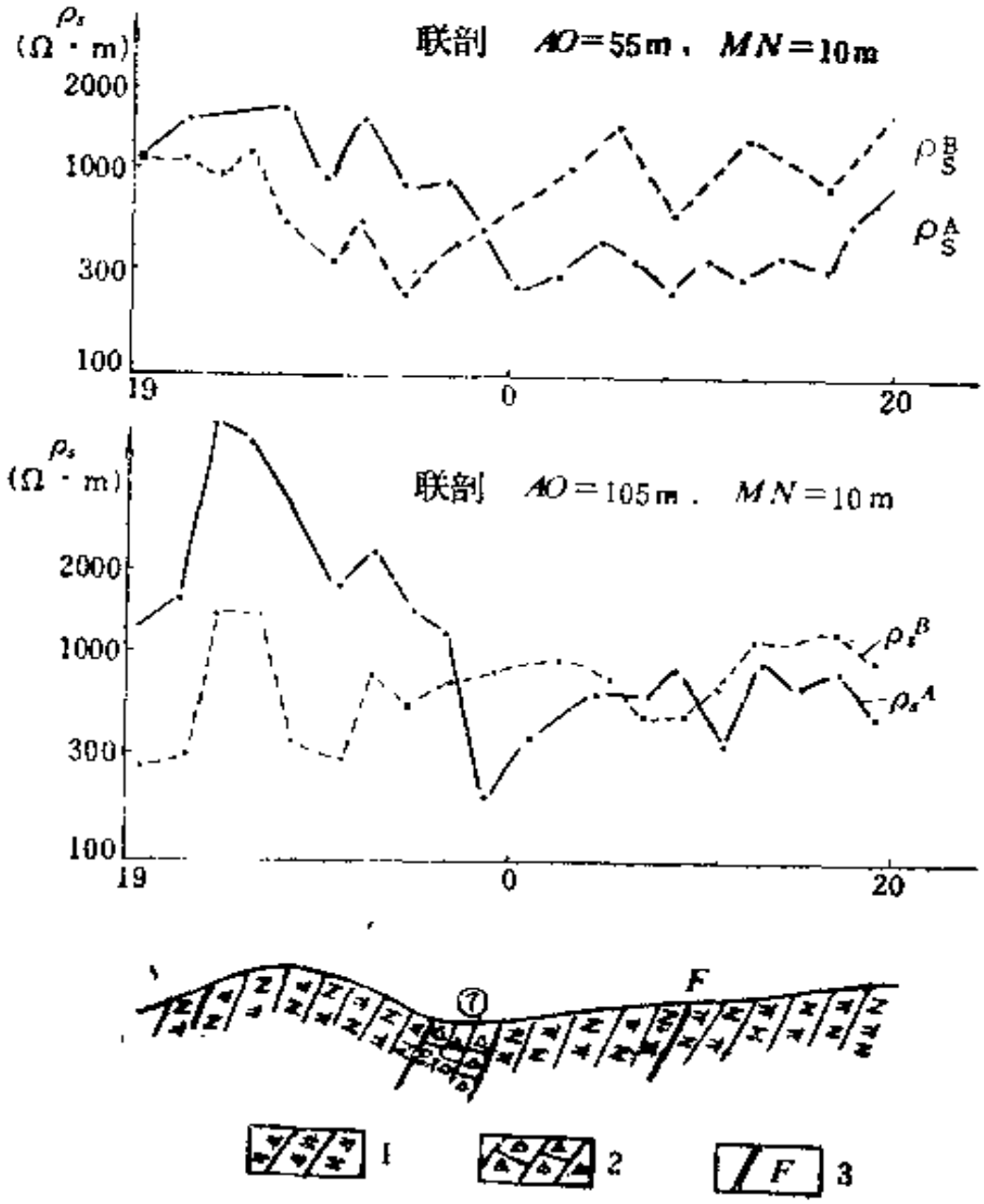


图3-4-3 河北省三家地区某金矿区F_1^7O线地质、物探剖面图
（引自许金枝）

1-黑云角闪斜长片麻岩；2-含金破碎带；3-小断层

F_1^7在地表的位置。$AO=105$米时，ρ_s正交点位置相对$AO=55$米ρ_s交点位置向小号点方向位移，依此判断F_1^7的倾向。由于该区地形起伏不大，围岩电性较均匀，故所得结果是正确的。

当地形复杂时，一般需进行地形校正。图3-4-4是三道岔

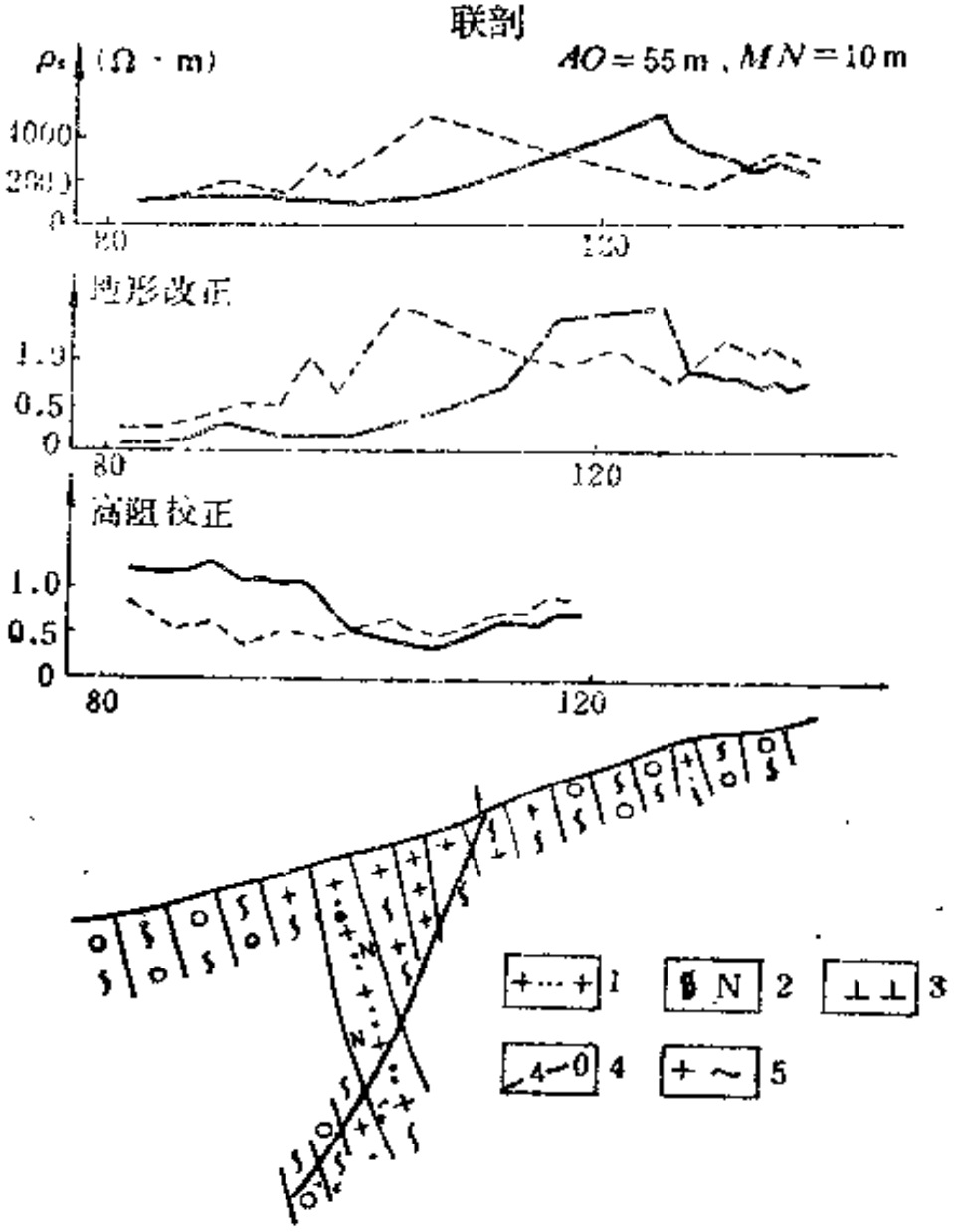


图3-4-4 三道岔北东部金矿点综合剖面图（引自吴相赫）

1-含矿断裂；2-蚀变片理化带；3-细粒闪长岩；

4-注入片麻岩；5-混合片麻岩；实线-ρ_S^A；虚线-ρ_S^B

东北部联剖ρ_s曲线受地形影响的一个实例。由图可见，经地形改正后，在128点处出现了明显的含矿断裂带的低阻正交点。经高阻校正后，在含矿断裂带上出现了低阻正交点。此例说明地形校正是很重要的。在复杂地形条件下地形校正工作量很大，有时甚至是难以实现的。在这种情况下，建议采用双频振幅电磁法进行工作。

（二）根据金矿床与硫化物共生组合关系，利用激发极化法圈定硫化物矿化带、硫化物富集地段（带）及可能的含金地质体的位置、范围、大致产状和埋深。

前面我们已介绍了山东物探队在胶东地区180平方公里面积内，圈出了17条断裂带，指出了成矿的范围和空间。根据该区金矿床除严格受构造控制外，金矿与硫化物共生，金与硫呈现出正消长关系，采用激发极化法进行全区性扫面工作，获得了一批激电异常，图3-4-5是在已圈出的17条断裂带的部分地区内发现的激电异常。根据这些激电异常圈出了硫化物矿化带和硫化物富集带，即圈定了可能含金体的位置、范围及规模，为进一步的勘探工作提供了勘探靶区。

图3-4-6给出了全国著名的焦家金矿区的激发极化法η_s平面图。这是激发极化法在电阻率法圈出的断裂带上圈出的硫化物富集地段。该异常下限为4%，以4.5%等值线圈闭的异常形态呈长条状展布，走向约NE30°，长约1700m，南窄北宽，宽约60～200m。视极化率最大值为5.84%，各测线上异常极值点的连线基本对应了矿体顶端在地表的投影位置。当中梯装置增大后，η_s曲线极大值也相应增大，说明引起异常的极化体具有一定的规模和延深。

为了确定该极化体的埋藏深度，在$\frac{1188}{904}$点做了激电测深，利用转折点法求出了极化体顶端埋深为9m。为了确定极化体的产状，在904线上做了$AO=70$m和$AO=150$m不同极距的激

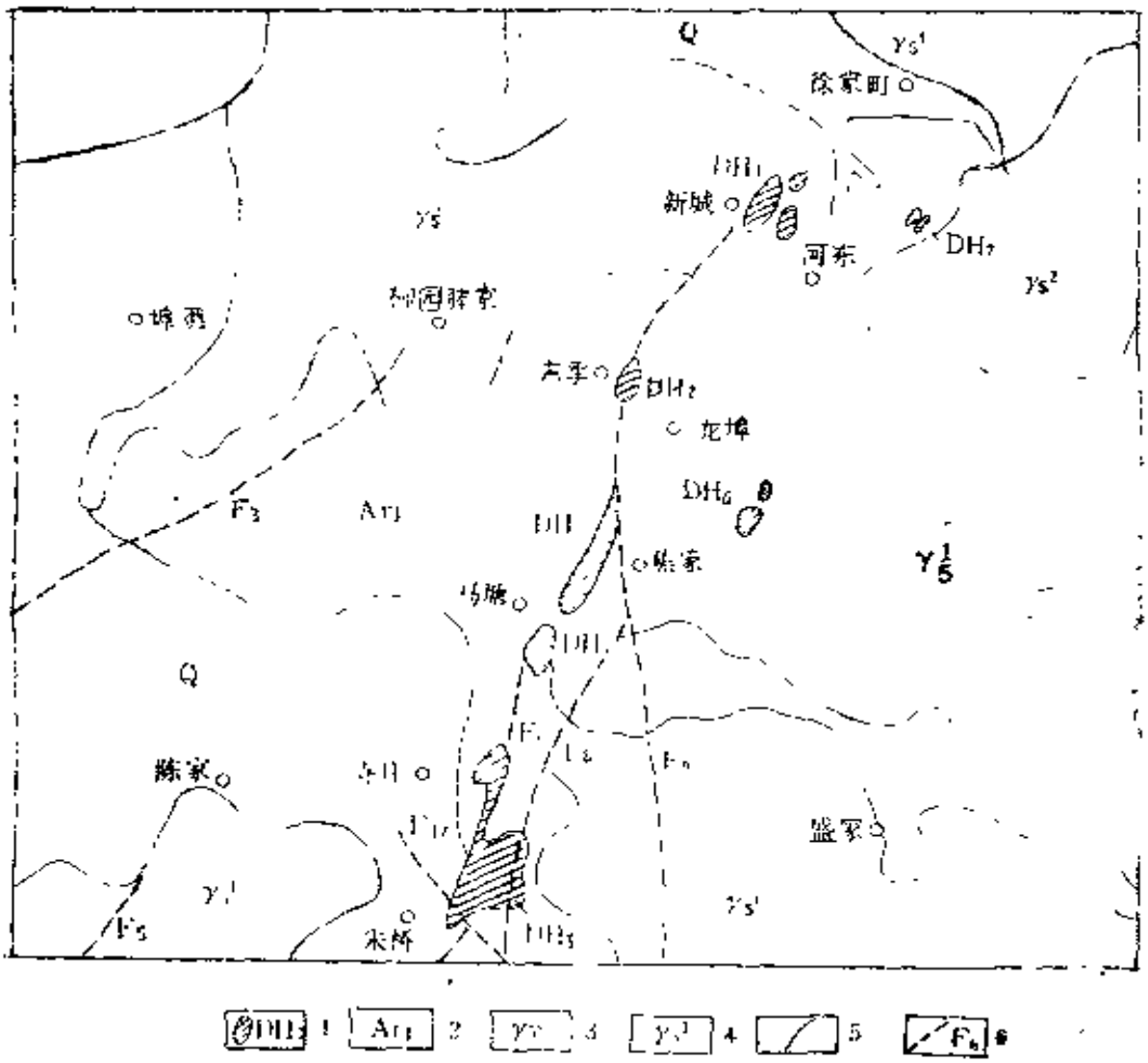
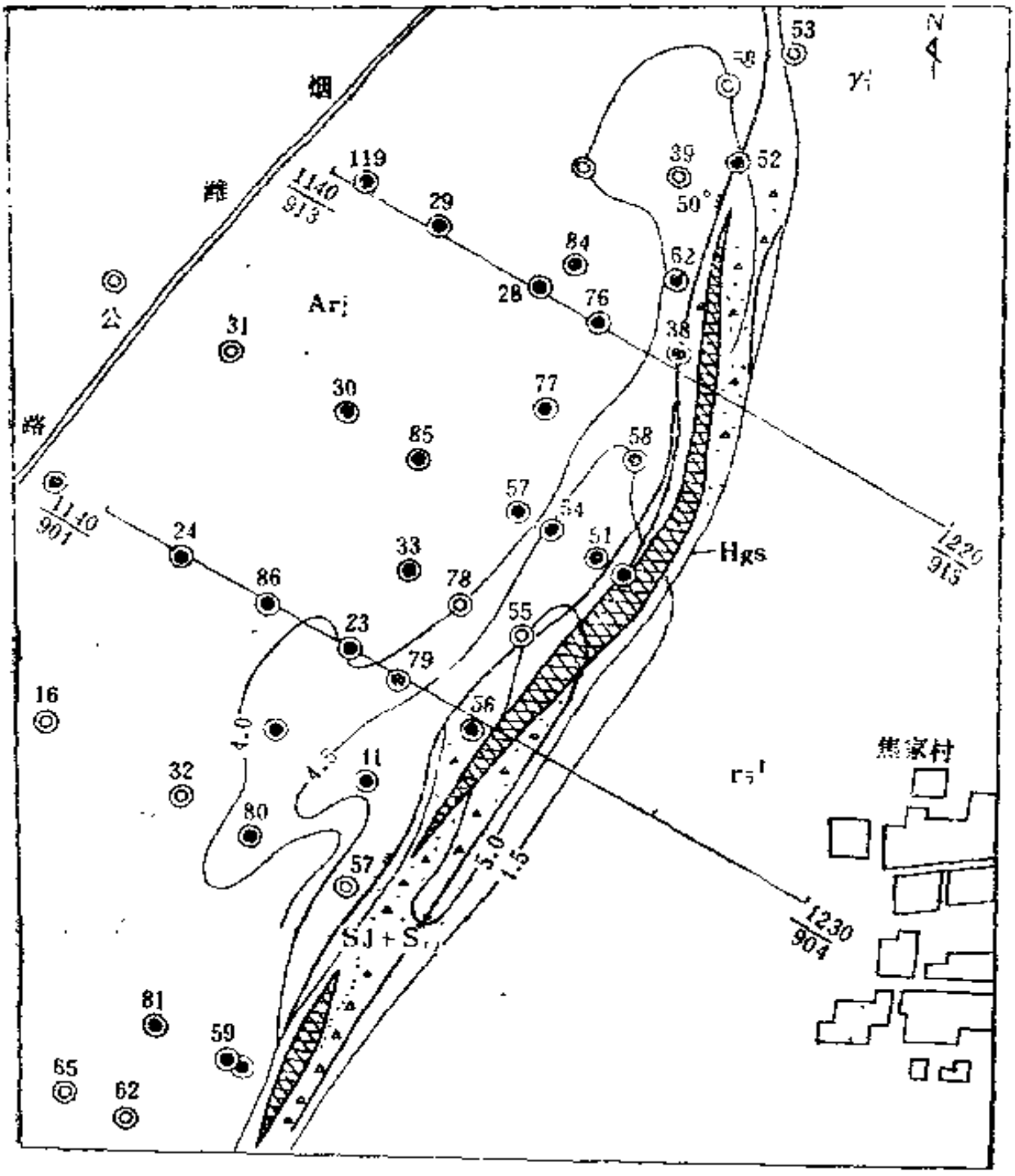


图3-4-5　焦家主干断裂带及望儿山分支断裂上部分激电异常分布示意图（引自山东物探队）

1-见矿异常及编号；2-胶东群；3-郭家岭花岗岩；4-玲珑花岗岩；5-地质界线；6-推断断裂破碎带



Arj 1 | γ_5^3 2 | 3 | SJ + Sr 4 | Hgs 5 | 6 | 7 | 8 | 9

图3-4-6 焦家金矿床地质、激电法综合平面图(引自山东物探队)
1-胶东群地层；2-玲珑花岗岩；3-压扭性断裂；
4-蚀变花岗岩；5-金矿体；6-见矿钻孔及编号；
7-η：等值线；8-典型剖面线；9-未见矿钻孔及编号

电联合剖面法测量。详见图3-4-7。其中，$AO=150m$的η，反交点相对$AO=70m$的η，反交点向小号点位移10m；η与η_s^g曲线在反交点的小号点一侧所夹面积大。根据以上两点推断：引起该激电异常的极化体倾向为NW（向小号点方向倾斜）。

山东物探队，根据物探结果圈出了焦家金矿区可能的含矿断裂和矿化物富集地段，进而确定了其范围、规模、走向、产状和埋深，提供了可供钻探验证的勘探靶区。后经钻探证实为一大型金矿床。图3-4-6中共打钻42个，见矿孔30个，占总钻孔数的70%以上，取得了满意的地质效果。

（三）进一步圈定与金矿成矿有关的岩体、地层、石英脉、其它岩脉及标志层等。

石英脉型金矿是我国主要金矿类型之一。例如，辽宁五龙金矿为一大型石英脉型金矿床。石英脉产在前震旦纪黑云母花岗片麻岩中，严格受裂断构造控制。矿脉主要充填在北北东向及北西向两组断裂中。含金石英脉往往成群成组出现，长度不一，由几十米到几百米，最长1000多米。宽度由0.2～2m不等。金的品位为n～$n\times10g/t$。含金石英脉一侧往往伴有闪长岩脉，形成一个组合岩脉或综合岩脉。围岩蚀变一般不强，蚀变类型以硅化、黄铁矿化为主，次为绢云母化、绿泥石化、高岭土化。与金伴生的金属矿物主要是黄铁矿，其次是辉铋矿、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、毒砂等。

该区投入了电阻率中间梯度法，其目的是追索已知石英脉的延伸，寻找平行已知石英脉的未知石英脉，以扩大找矿范围。如追索207号脉、213号脉北部延伸，团山子矿脉的南部延伸等都取得了满意的效果。图3-4-8给出了石英脉与闪长岩脉的组合岩脉上中间梯度法ρ_s剖面曲线。由于石英脉、闪长岩脉

紧密相连，形成组合岩脉，二者均为高阻体，组合后增大了宽度，增强了整体岩脉的高阻特性，故ρ_s异常特别明显，ρ_s异常最大值超过6000Ω·m，其位置与组合脉顶端位置吻合。

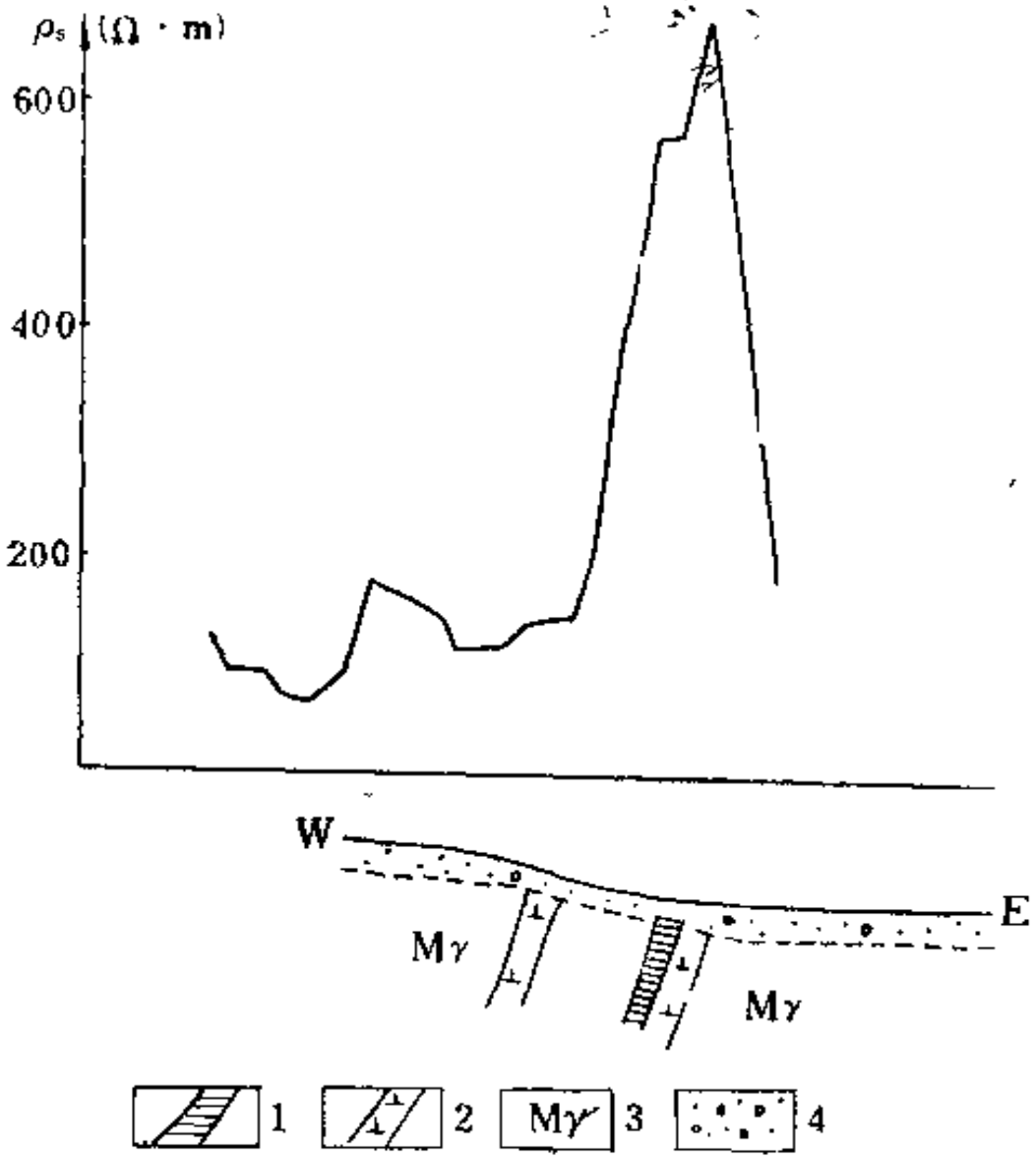


图3-4-8　石英脉、闪长岩脉组合脉上中梯ρ_s剖面图
（引自赵衍、朱熹臣）
1-石英脉；2-细粒闪长岩脉；3-黑云母花岗片麻岩

图3-4-9给出了苏联一个石英脉型金矿区用电阻率法圈定其它岩脉的实例。该矿床的特点是石英脉赋存于花岗岩类岩脉中，几乎到处都发育着典型的围岩蚀变——滑石菱镁片岩化和黄铁细晶岩化。石英脉既存在于花岗岩类岩脉中，又存在于围岩中。围岩是沉积火山杂岩和侵入杂岩体。

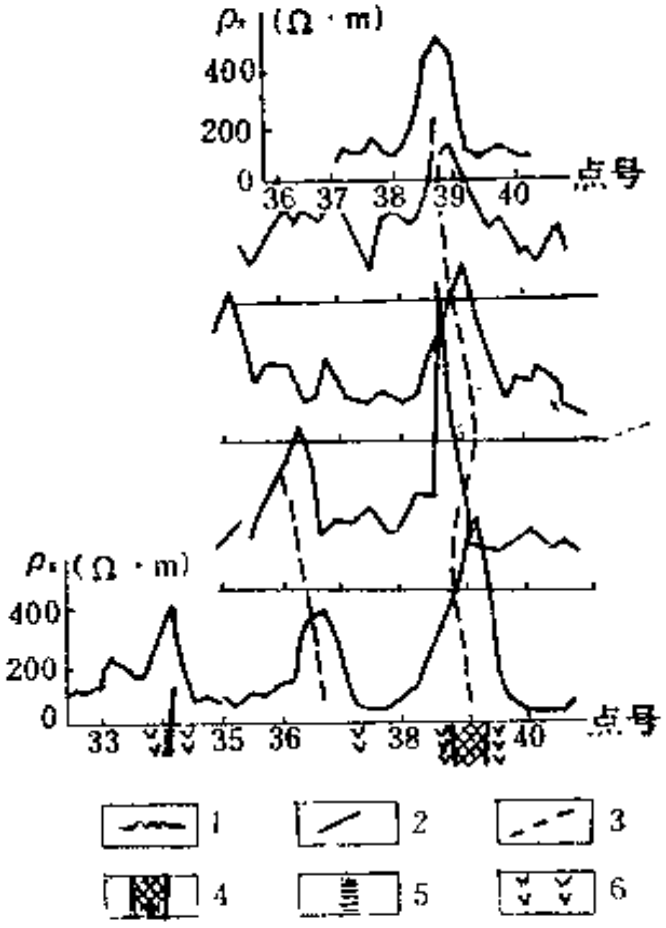


图3-4-9 花岗岩类岩脉和滑石菱镁片岩化带上中间梯度法ρ_s平面剖面图（引自А. А. Фельлман）

1-视电阻率曲线；2-滑石菱镁片岩化带上的异常轴；3-花岗岩类岩脉上的异常轴；4-花岗岩类岩脉；5-滑石菱镁片化带；6-辉绿岩

石英脉与花岗岩类岩脉有明显的联系，花岗岩类岩脉是普查（包括地球物理方法）、勘探、开采含矿段时的可靠找矿地质体，实际上花岗岩类岩脉是一种找矿的标志层。在电性方面，花岗岩类岩脉与其围岩有很大差别。花岗岩类岩脉电阻率高达1000Ω·m以上；围岩电阻率虽在不同范围内变化，但很少超过700～800 Ω·m。根据该区的地质、物性情况，电阻率中间梯度法在石英脉、滑石菱镁片岩化带和花岗岩类岩脉上出现幅值不同的ρ_s极大值，且相邻剖面上极大值是相关的。依此圈出了各类岩脉的位置、走向、范围等，起

到了间接找矿的作用。

圈定各种岩脉不仅可用电法，而且也可用磁法。图3-4-10是用磁法圈定各种岩脉的一个例子。花岗岩中有闪长岩脉和磁铁绢英岩化花岗岩脉。花岗岩磁性平稳，岩脉磁性相对围岩较高，ΔZ出现明显的正磁异常。山东招掖地区有许多基性岩脉存在，这些岩脉沿断裂构造侵入，由于岩脉磁性较强，因而形成条带状的或线型的正磁异常带。查明这些线型磁场带，不仅可以圈定断裂构造，而且有利于研究金的赋存规律。

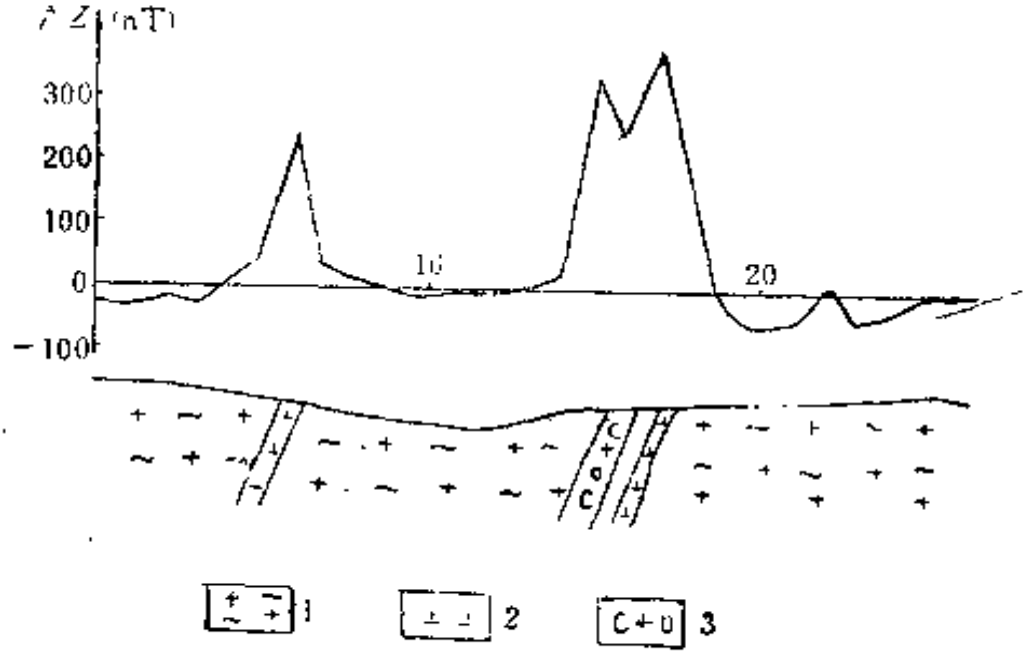


图3-4-10　山东玲珑金矿田各种岩脉上磁法异常剖面图
（引自李宝印）
1-花岗岩；2-闪长岩脉；3-磁铁绢英岩化花岗岩

（四）利用中比例尺或大比例尺进行地质填图，确定对金矿床分布有影响的岩石——岩性因素、碳质、石墨化地层、火山沉积杂岩中显示金矿化的其它岩层；圈定近矿蚀变带，如硅

化带、滑石菱镁片岩化带、黄铁细晶岩化带、高岭土化带等，这对寻找金矿床是十分重要的。

现以苏联东哈萨克斯坦卡尔宾内生金矿床为例说明如下。

卡尔宾内生金矿床按矿物组合和成矿条件分为三种类型：金-硫化物型；金-石英-硫化物型和金-石英-低硫化物型。矿床往往位于砂页岩内，岩浆岩次之。金矿赋存于含炭岩石发育地带。卡尔宾矿床和矿化赋存于自然电场异常边缘带，后者延伸数公里，宽0.2～6.5公里，强度在200～600毫伏范围内变化。

图3-4-11A表示的是金-石英-低硫化物型矿床与自然电场异常的相对位置。此矿床所在地区为中上石炭纪砂页岩和喷发岩，含金石英脉赋存于热液变质玢岩与砂页岩地层接触带附近的玢岩中。强度达250毫伏的自然电位异常与砂页岩地层分布范围一致，金矿往往就产在异常的边缘部分。

金-硫化物型矿床（图3-4-11B）位于近东西向延伸向北缓倾的大挤压带中。挤压带中的岩石发生了强烈的错动，并且部分受到硅化，含炭质岩石石墨化。在空间上强度为50毫伏的自然电位区域异常与挤压带吻合。在该异常的背景上明显地看出次一级的异常，强度达500毫伏。挤压带横切富含炭质的岩石（粉砂岩、砂岩）处，自电异常最强，而金-硫化物型的矿床仅处于次一级自电异常的边部。

金-石英-硫化物型矿床区的岩石是中石炭纪砂页岩地层和次侵入玢岩（图3-4-11C）。在砂页岩地层和玢岩接触带的热液蚀变带中有金矿化，在空间上强度达250毫伏的自然电位异常与砂页岩地层分布范围吻合。正如上面所述，金矿产于自然电位异常的边部。

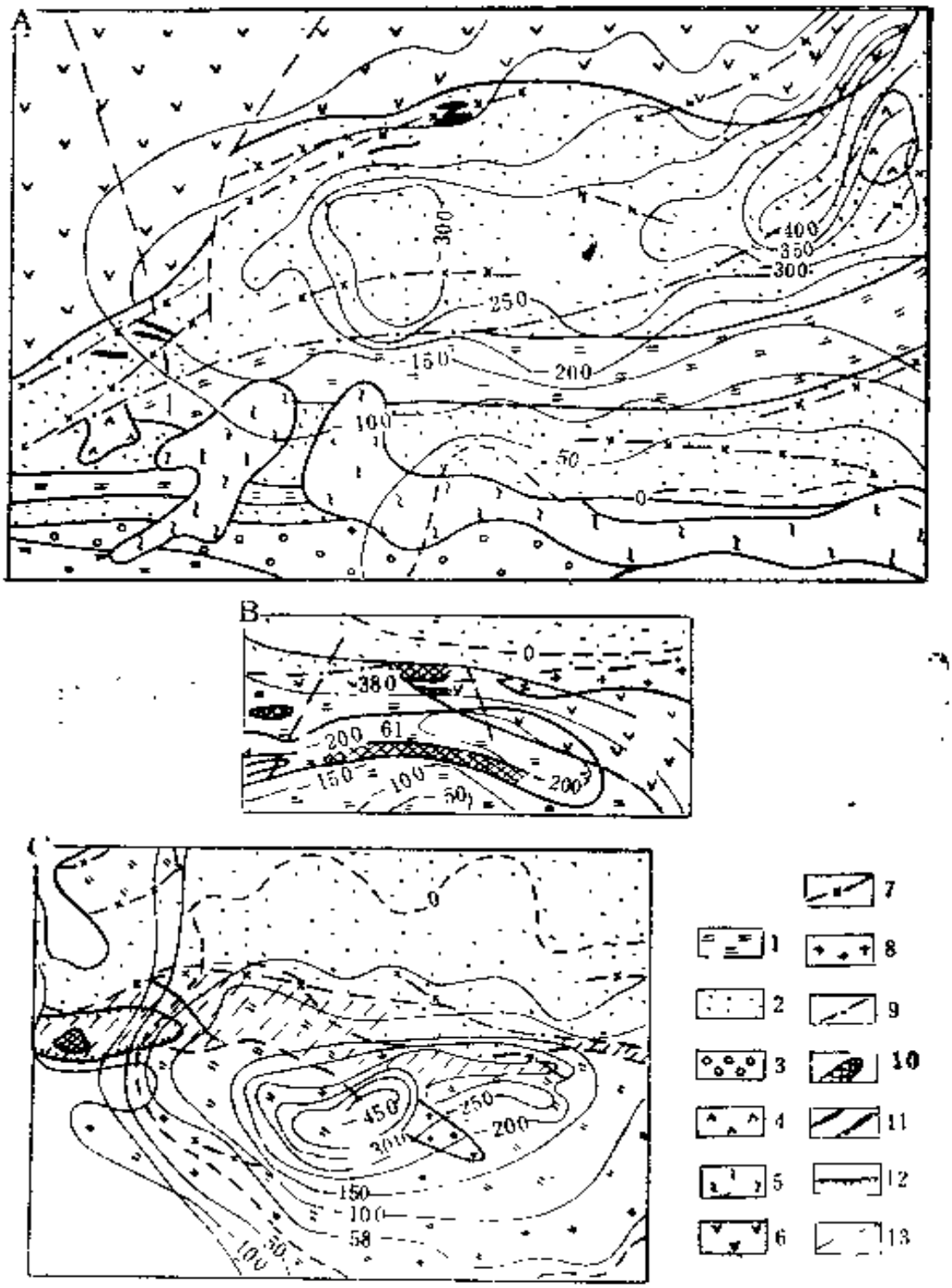


图3-4-11 金矿床与自然电场异常的相对位置(引自Борцов.В.Д等)

矿床：A—金—石英—低硫化物建造，

B—金—石英—硫化物建造

1-粉砂岩；2-砂岩；3-砾岩；4-闪长岩；5-蛇纹岩；6-玢岩；7-中性岩墙；8-花岗岩；9-断裂；10-金—硫化物建造的矿体轮廓；11-含金石英脉；12-露天采场轮廓；13-自然电场等值线

表3-4-2 金矿床地质-地球物理分类一览表

金矿床类型	地质特征	地球物理特征	物探方法组合	矿床实例	备注
含金石英脉型金矿床	该类金矿床多产于前震旦纪古老变质岩中，寒武纪二叠纪地层及花岗岩内也有产出。含金石英脉为复脉、单脉及网脉，常成群出现。矿床既受一定层位的控制，又受构造控制。含金石英脉含有不同数量的硫化物，可分为石英-贫硫化物矿石、石英-富硫化物矿石	根据含金石英脉的地质及矿物组合，地球物理特征有几种：(1)单而厚的石英脉，具有高电阻率特征；(2)石英-富硫化物型具有低阻高极化或高极化特征；(3)高阻高极化；或(4)低阻低极化(处于断裂带中的小石英脉)	根据其球物理特征，方法组合分为几组； (1)具有高阻特征者：用电阻率法、压电法； (2)具有高阻高极化、低阻高极化特征：用激发极化、电阻率法和压电法； (3)核物探； (4)地电化学提取法	浙江玻山金矿床；吉林夹皮沟金矿床	
构造蚀变岩型金矿床	该类金矿床有两大特点：(1)是该类金矿床严格受构造控制；(2)金与硫化物密切共生，金与硫大致呈正消长关系	(1)构造断裂带相对围岩为低阻； (2)含硫化物多，具有明显的激电特性； (3)矿化带上磁性较低，为低、负磁异常； (4)局部硅化强烈，呈局部高阻特征	以电阻率法、激发极化法为主，磁法为辅；地电化学提取法	山东焦家式金矿床	

硫化物型金矿床	矿床多产于火山岩系中，受地层控制，金矿赋存于硫化物之中。矿物组合为氧化物、硫化物……等。矿体形态复杂，受各种不同方向的裂隙控制，为脉状、网脉状、巢状、浸染状等	一般为低阻、高极化特征	激发极化法、电阻率法； 磁法； 核物探； 地电化学提取法	河南闾山城金矿床	
伴生金矿床	金具有亲硫、亲铁性，常常与多金属在一起形成伴生金矿床。主要伴生金矿床有斑岩铜钼矿床；硫化铜镍矿床；含铜黄铁矿型矿床；矽卡岩铜矿和矽卡岩多金属矿床	(1)具有低阻高极化特性； (2)其中一些矿床具有较强磁性； (3)一些矿床具有较大的密度	以电法、磁法为主，重力配合； 地电化学提取法	江西德兴斑岩铜矿；日本黑矿；黑龙江多宝山斑岩铜矿	
砂生矿床	砂金矿分为残积型和冲积型。后者最有价值，含金砂体在河流有利沉积部位沉淀富集成砂金矿。砂金成矿与基岩性质、成分、构造及河底槽形态有关	含金砂体与基岩有明显的电性差异；密度差异；电性差异；波速差异	浅层地震、电阻率测深、重力或磁法； 地电化学提取法	湖南隆回砂金矿	下章详细讨论

续表

金矿床类型	地质特征	地球物理特征	物探方法组合	矿床实例	备注
层控金矿床	层控金矿床包括卡林型、霍姆斯塔克型、兰德型金矿床。它们皆具有明显的层控性质，与岩性有一定关系。卡林型金矿：角砾岩化薄层状粉砂质含碳灰岩最有利成矿，受高角度逆断层控制。含硫化物5%。霍姆斯塔克型金矿产于前寒武纪含铁建造中。兰德金矿床，与沉积层位关系明显，黄铁矿化、赤铁矿化广泛发育，在空间上与磁性页岩有一定联系	(1)地层含碳，与围岩有电化特性差异； (2)断层与围岩有电性差异； (3)与围岩有磁性差异	自电或激发极化法；磁法；地电化学提取法	兰德金矿；卡林金矿；霍姆斯塔克金矿	

一般来说，含炭质地层或石墨化地层往往给自然电场法和激发极化法造成严重干扰，但是当金矿与炭质或石墨化地层有关时，这些地层便可作为找矿的标志层，圈定这些地层可起到间接找矿作用。

图3-4-9中已给出了用电法圈定含炭质片岩化带的实例，此处不再赘述。

这里还需说明两点：当金矿区内硅化强烈时，会导致局部电阻率升高，使视电阻率低阻异常中出现局部高阻异常。其次，由于硅化等影响使岩石磁性减弱，故在硅化蚀变带上磁法常常出现低、负异常。这些特点在实际工作中应予以注意。

（五）若寻找的金矿床不是单纯的金矿床，而是伴生金矿时，利用物探方法（磁法、电法和重力），可以圈定伴生金矿的范围、埋深和大致产状，为进一步的工程验证提供资料。

国内外伴生金矿床也是金的主要来源之一，我国大约有40%左右的金来自伴生金矿床，用物探方法寻找和圈定伴生金矿床是很有意义的。

伴生金矿床的特点之一是其中含有大量的硫化物矿物和氧化物矿物，使伴生金矿体与围岩有明显的物性差异。表3-4-1给出鄂东地区铁铜伴生金矿床中所含主要金属矿物的情况。此表表明，（1）伴生金矿床中常含有磁铁矿、磁黄铁矿，故与围岩间有明显的磁性差异，具备了用磁法寻找此类矿床的地球物理前提；（2）矿床中含有大量黄铁矿、黄铜矿等良导电矿物，加之矿区断裂构造的影响，使其与围岩间有明显的激电特性和导电性差异，具备了投入激电法和电阻率法的地球物理条件；（3）矿床中有密度较大的矿物存在，与围岩间存在密度差，重力勘探也是有效的。综上所述，寻找伴生金矿床常用的物探

方法有电法、磁法和重力。为简单起见，不再举例说明。

表3-4-1

矿床类型	特征伴生元素	含金品位 g/t	金储量百分比	主要金属矿物	主要矿床
Ⅰ铁矿床	Co-Ga	痕～0.0166		磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿	程潮、金山店、灵乡
Ⅱ$_1$铁铜矿床	Co-Ni-Au	0.21	13.38	磁铁矿、赤铁矿、黄铁矿、黄铜矿	铁山、下四房
Ⅱ$_2$铜铁矿床	Au-Ag-Co	0.1～1.49	60.23	黄铜矿、黄铁矿、磁铁矿、赤铁矿	铜绿山、石头咀
Ⅲ$_1$黄铜矿型铜矿	Au-Ag	0.82～1.98	10.01	黄铁矿、黄铜矿、斑铜矿、磁铁矿	牛头山、李家湾、鸡笼山
Ⅲ$_2$辉铜矿型铜矿	Ag-Au	0.5～1.68	1.87	辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、黄铁矿	叶花香、赵家湾、赤马山
Ⅲ$_3$铜钼矿床	Ag-Au-Re	0.38～0.5	14.50	黄铜矿、斑铜矿、辉钼矿、黄铁矿	丰山洞、铜山口
Ⅳ铜钨矿床	Se-Te-U	微		黄铁矿、磁黄铁矿、白钨矿、黄铜矿、辉钼矿	龙角山、阮家湾
Ⅴ硫钨矿床	Co-Au	0.1～1.10	未计算在内	黄铁矿、磁黄铁矿、黄铜矿	巷子口

（引自胡敬钠）

（六）配合地质、化探查明金矿体，追索已发现的含金地质体的走向、范围和规模等。

以上仅谈了物探方法所能解决的六方面问题，而不是全部问题。各个金矿区地质情况复杂，各不相同。在实际工作中要依工作区的具体地质情况和任务，合理选择物探方法，以便取得较好地质效果。

二、金矿床的地质-地球物理分类

金矿地质学中，按金矿床的成因类型和找矿类型进行了分

类，尽管各个地质学家分类各不相同，但是，这些分类对金矿的普查找矿工作均起了重要的指导作用。到目前为止，还没有一种用于指导金矿物探工作的分类方案，我们在此提出一种按地质-地球物理特征对金矿床进行分类的指导思想。其目的是：试图指导金矿物探的野外工作，也便于金矿地质工作者向物探人员提出合理的、物探力所能及又可取得较好地质效果的勘探任务。分类的原则是：

1．物探方法是一种间接找金的手段，主要是用于解决与金矿床成矿有关的地质问题。分类时要充分考虑这一特点；

2．分类时使物探与地质紧密结合，主要考虑金矿床的地球物理特征，同时也要考虑金矿床的地质特征。具有相同地球物理特征的金矿床，可以是不同成因和不同的地质时代；

3．同一类型金矿床物探方法需要解决的地质问题是类似的；

4．同一类型金矿床可选用同一种物探方法组合。

根据以上分类原则，我们将所有金矿床分为六类：含金石英脉型金矿床；构造蚀变岩型金矿床；硫化物型金矿床；伴生金矿床和层控金矿床。详见表3-4-2。表中除了列出金矿床类型名称外，还列出了每一类型金矿床的简要地质特征、地球物理特征及物探方法组合。在物探方法组合一栏中所列的地电化学提取法，是近年来研究的电法与化探相结合的直接找金的新方法。表中前面所列的五种类型是目前我国金矿床的主要类型。层控金矿床中包括了卡林型金矿、兰德型金矿、霍姆斯塔克型金矿等等。这几种类型金矿床在国外都是主要金矿类型（大型或特大型）。层控金矿中，有些类型在我国已有发现，但有些类型发现较少或仅是矿点。我们深信，随着金矿地质工

作的深入和发展，我国也将会在寻找新类型金矿方面有新的发现、新的突破。作为物探方法而言，也可以为在我国寻找这几种类型金矿床做出应有贡献，所以我们也把它们列入表中，以引起人们的重视。

三、各类金矿床上的物探异常特征

金矿床找矿的第Ⅲ阶段的最终目的是，选择最有成矿希望的勘探靶区。其主要依据是综合物探方法在各类金矿床上的异常反映。这里简单介绍一下各类金矿床上综合物探可能出现的物探异常。因砂金矿床放在下一章中介绍，层控金矿床工作甚少，尚须进一步研究，故这里介绍的主要是前四种金矿床上的异常特征。

前四类金矿床上综合物探异常如表3-4-3所示。

表3-4-3　各类金矿床上综合物探异常特征

方法名称	异常类型	石英脉型金矿异常特征	蚀变岩型金矿异常特征	硫化多金属矿异常特征	伴生金矿异常特征	备注
电阻率法	中梯	∧，∨，—	∨	∨ ∧ ∨	∨	∧ 极大型异常
	联剖	⊖，⊖，—	⊖	⊖ 或 —	⊖	∨ 极小型异常
激电法	中梯	—，∧，—	— ∧	∧ ∧	∧	∧ 各种极化异常
	联剖	，—	⊖	⊖	⊖	⊖ 联剖正异常
自电	电位	—，∨	∨	∨	∨	∪ 负自然电场
磁法		—			∧	～ 磁异常梯度带
重力法		∪		—	∧	／ 正异常梯度带
地电化学提取法		—，∨	∨	∨	∨	— 异常轮廓线
						∨ 有异常

为了形象地表示出各类金矿床上综合物探异常特征，用示

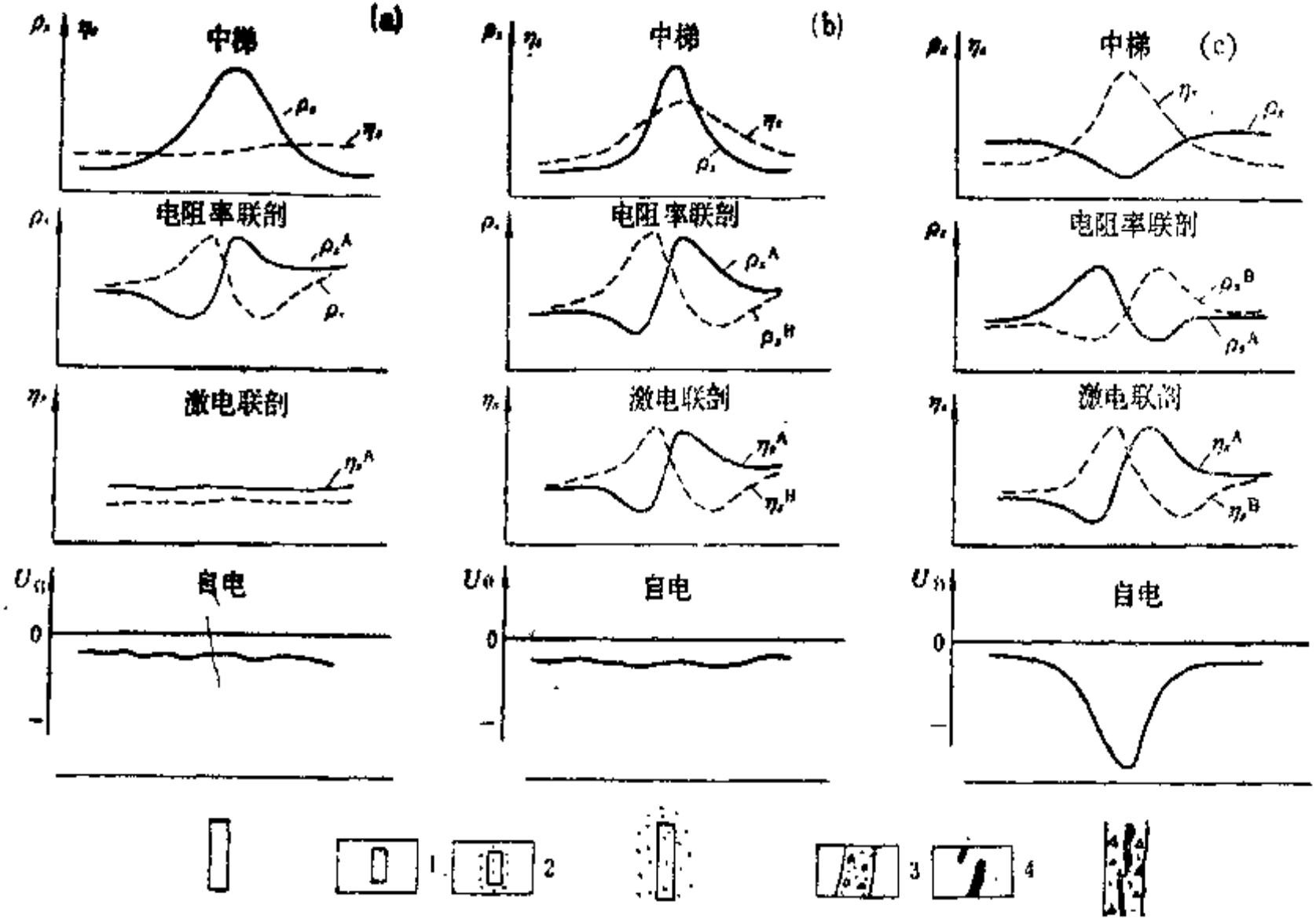


图3-4-12　含金石英脉型金矿床上综合物探示意图

(a)-高阻低极化体；　(b)-高阻高极化体；　(c)-低阻高极化体

1-厚石英脉；　2-含硫化物石英脉；　3-断裂破碎带；4-小石英脉

意性异常曲线表示在以下几个图中。

含金石英脉型金矿床综合物探异常特征如图3-4-12所示。显然，厚而完整的石英脉多为贫硫化物型，仅表示为高阻特性(图3-4-12a)。富硫化物型石英脉表现为高阻高极化体特征，多数含金(图3-4-12b)。当富硫化物型石英脉群赋存于断裂带中时，其总体上表示为低阻高极化体。实际工作中应注意这些特点。

图3-4-13给出了构造蚀变岩型金矿床上综合物探异常特征。该类金矿床的特点是：矿体赋存断裂带中，富含硫化物。在岩石断裂和热液作用过程中，岩石退磁使磁性减弱，故出现低、负磁异常。在断裂带上重力出现梯级带。

硫化物型金矿床综合物探异常特征如图3-4-14所示。当硫化物含量较少又无断裂伴生时，一般与围岩仅有激电特性差异而无明显电性差异，故表现为高极化体特征。当硫化物含量较多或有断裂伴生时，则表现为低阻高极化体特点。

伴生金矿床综合物探异常特征如图3-4-15所示。这类金矿床众所周知，不须再做什么说明。

四、勘探靶区选择的原则

进行勘探靶区选择时，一定要使物探与地质紧密结合，综合分析地质、物探资料，反复研究，仔细推敲。物探资料一定要消除各种干扰，进行必要的校正和数据处理。注意各种物探方法之间的相互配合，充分利用各种方法所提供的信息，尽可能使所选择的勘探靶区客观、准确、可靠。选定好探勘靶区后，物探人员和地质人员还应共赴现场，进行现场踏勘，共同分析所选靶区的可靠性、可行性，共同研究勘探方案的可行性和

勘探区工程布置的合理性等等。

勘探靶区选择的具体原则如下：

1．物探人员与地质人员根据综合物探异常和地质情况，共同研究选择靶区；

2．勘探靶区选择的条件和步骤：

（1）应选在物探方法已经查明的、地质上最有成矿希望的构造部位或石英脉所在处；

（2）选在有成矿希望构造部位或石英脉处硫化物矿化带或硫化物富集带（或地段）；

（3）在已圈定的硫化物矿化带或富集带中，选择地电化学提取法有金异常或金的伴生元素异常的部位。

（4）但是，仅具备上述条件还不够，还必须要求异常有一定规模。范围过小的异常区不应列为勘探靶区。具备以上四个条件的地区便是最后确定的勘探靶区。

§3.5 金矿床勘探阶段物探方法的效能

金矿床勘探阶段工作是在已经选择的勘探靶区中进行的，主要地质工作是寻找、圈定金矿体的位置、范围和规模，主要手段为钻探和山地工作。物探地面工作较少，主要是地下物探工作。在金矿床勘探阶段，因为有一些问题用地质手段不易解决，而用物探方法有时却能经济、快速地解决，所以在金矿床勘探阶段物探方法还是有用的。

在金矿床勘探阶段物探方法可以解决以下几方面地质问题。

1．利用地下物探的各种方法，寻找钻孔、浅井和坑道周围

遗漏矿体及其下部的盲矿体岩深部矿体，尽可能地扩大矿区储量。

2．利用金矿测井中的各种方法，在钻孔中划分硫化物矿化带，确定硫化矿物富集层位置，指导劈样分析；寻找钻孔中由于取芯不佳而漏失的矿层，采用井中爆破取芯，供鉴定及化验分析；说明硫化矿物富集层位的结构构造，确定倾角。

例如，山东物探队在胶东金矿带上大约在四个地区32个钻孔中进行金矿测井，共投入了六种不同方法解决上述问题，取得了较好地质效果。

图3-5-1给出了山东金矿上某钻孔中金矿测井结果。该钻孔中投入了电极电位法、激电法和微电极激发极化法。电极电位法与激电法高值曲线相互对应；电极电位与微电极激发极化高值曲线吻合很好，根据这几种方法的异常曲线特征，在钻孔中划分出三层比较明显的、有一定厚度的硫化矿物富集层。在金品位为13.53g/t的部位，电极电位曲线出现有空白区，微电极激电曲线数值高，清晰醒目，高值区较稳定。在金品位为4.75g/t部位处，电极电位及微激电反映为多层结构，说明硫化矿物分布不均匀，二次场值较低，但仍不失金品位高的特征。一般电极距的激电曲线，在此部位异常值最高，也说明了此段的硫化物呈分散状分布。相比之下，根据348.70处异常反映，估计金的品位不应太低，很可能是钻探取芯有选择性磨损使之贫化之故。

3．根据钻孔、浅井、坑道中打到的矿体孤立露头或天然露头，追索和圈定含金地质体的范围、规模、埋深及与其它含金地质体的相互关系。

4．当含金地质体是良导体时，可利用充电法研究和确定钻

孔、浅井和坑道中揭露的各个含金地质体在空间的形态、连接和圈定问题以及工程间所揭露的含金地质体间是否相连等等，为客观地圈定含金地质体空间分布形态提供依据。这项工作对扩大储量和求出可靠储量是十分重要的，也是金矿地质工作者十分关注的问题。

图3-5-2给出了苏联某富硫化物建造金矿床上交流充电法的工作结果。

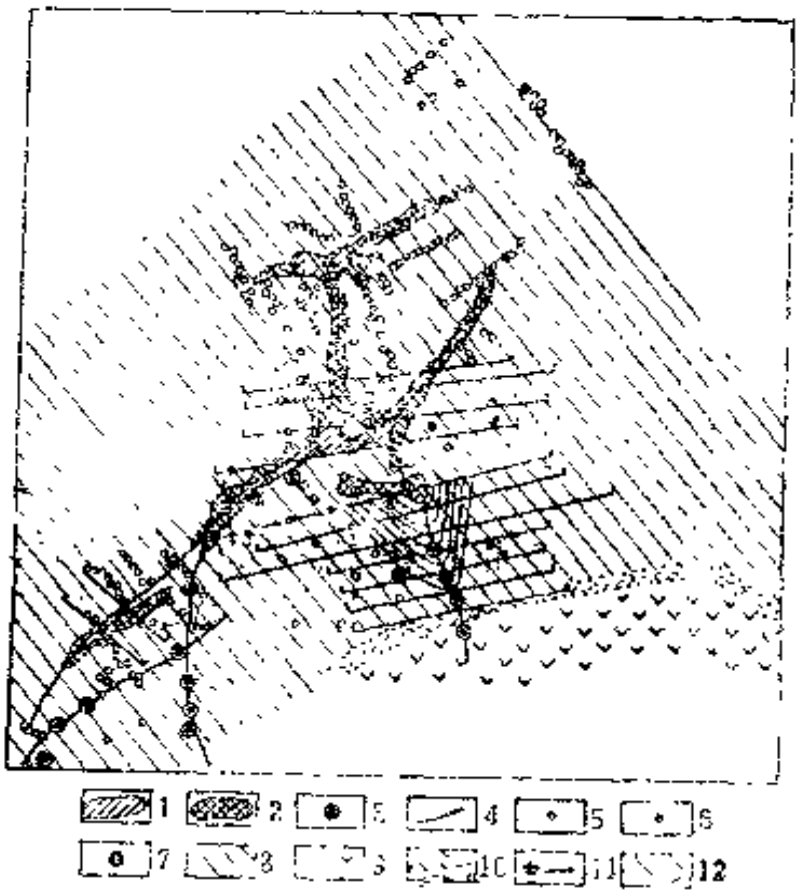


图3-5-2　苏联某金矿床上交流充电法工作结果(引自А. А. Фельдман)

1-已开采矿体轮廓；2-根据充电法资料勘探的矿体轮廓；
3-充电点；4-异常轴；5-无矿勘探钻孔；6-有矿勘探钻孔；
7-根据充电法资料确定的有矿钻孔；8-灰岩和白云岩；
9-正长岩；10-砂卡岩；11-充电法观测剖面；12-充电体磁场等值线

该矿床的矿体分布在寒武纪沉积岩中，赋存于因断裂破碎带而使褶皱构造变得复杂的那些部位。

金-硫化物矿体为陡倾斜的脉状体和交代的水平矿层，矿脉延伸很大，穿过所有岩石，空间上伸展到岩脉的接触面和断层裂隙。矿体赋存于层状侵入体中，形态复杂，呈多层状。矿层的延伸及其形态决定于构造破坏的形状和大小。

沉积岩电阻率在几十至10^4 Ω·m之间变化，主要由沉积岩不同的孔隙度和含水度所致。原生矿石的电阻率从十分之几至1 Ω·m，随氧化程度的不同，电阻率介于几十至几百 Ω·m。侵入体与围岩的区别是磁化率值比较高。因此，在详细填图时应用电剖面法和磁法来查明、追索构造破碎带和侵入岩。

为了追索和圈定山地工程揭露的矿体，最初有效地使用了直流充电法。在开采过程中山地工程查明的矿体形态与实测异常特点对比表明，根据电位梯度零值轴的方向能可靠地确定矿体走向。根据等位线的形状可以判定矿体的大小。但由于矿床的许多地段被碎石覆盖，电极不能很好地接地，只能在有限的地段应用直流充电法。因此，在本区投入了交流充电法。

进行低频交流充电法时，把供电导线接在开采坑道和钻孔揭露的矿体上，沿剖面测量充电体的磁场分量，其中线距40m，点距10m。整理野外观测资料时，要考虑地下人工导体场的影响，进行地形改正等，根据物探资料可以近似地求得矿体的埋深，定出异常轴在地面上的投影，并且标出钻孔的点位。图3-5-2上已标出异常轴和坑道验证的异常。由工作经验得出结论：所使用的观测方法和解释手段能够确定矿体轴的位置，其精度不低于矿体埋深的10%。以后的山地工程证实了线状矿体的存在，这些矿体的走向与异常轴方向一致。

根据充电法资料，校正了开采和勘探坑道的方向，并且改变了勘探方法。新的勘探方法是：将钻探与交流充电法结合起来，减少了钻探工作量。由此得出结论：交流充电法是详查和勘探中、高硫化物建造的金矿床的主要方法。直流充电法是我国应用较多的方法之一，例如，河南围山城金银矿在解决矿体连接问题方面取得较好效果。此外，湖北凤头山金矿床、陕西铁炉子金矿区等金矿区也都应用直流充电法，取得了一定地质效果。

5．在勘探区第四系覆盖部分进行大比例尺填图，详细查明勘探工程布置中所需要了解的第四系覆盖下不同岩性地层的分布、断裂破碎带、不同岩性接触带的规模、走向等。

6．若勘探的不是单金矿床而是伴生金矿床时，在勘探区的某些地段或勘探剖面上，利用综合物探方法做精测剖面，然后进行理论计算、数据处理和定量解释。详细勾绘出含金地质体的形态、范围、含金体间的关系、产状和埋深等，进一步指导勘探工程的布置和寻找盲矿体。

图3-5-3给出了湖北省大冶陈子山金矿区0勘探线定量计算剖面图。以前曾在该区找过磁铁矿，后找斑岩铜矿，1981年后开始找金。该区金矿床为一单金矿床，其中含有大量金属矿物，因此激发极化法在该区取得了较好的地质效果，图3-5-3为该矿区0勘探线上一条精测剖面。定量解释中利用了电磁类比选择法求得极化体的断面形状为多层薄板状体。有的已为钻孔所验证。可见，在勘探阶段利用定量解释，提供含金体的空间形态、分布、相互关系、埋深等，对指导工程布置、寻找盲矿体是很有意义的。应该说明，利用电磁类比法解释时应注意其应用条件，否则会有较大误差。磁法和重力也可进行这样的定量

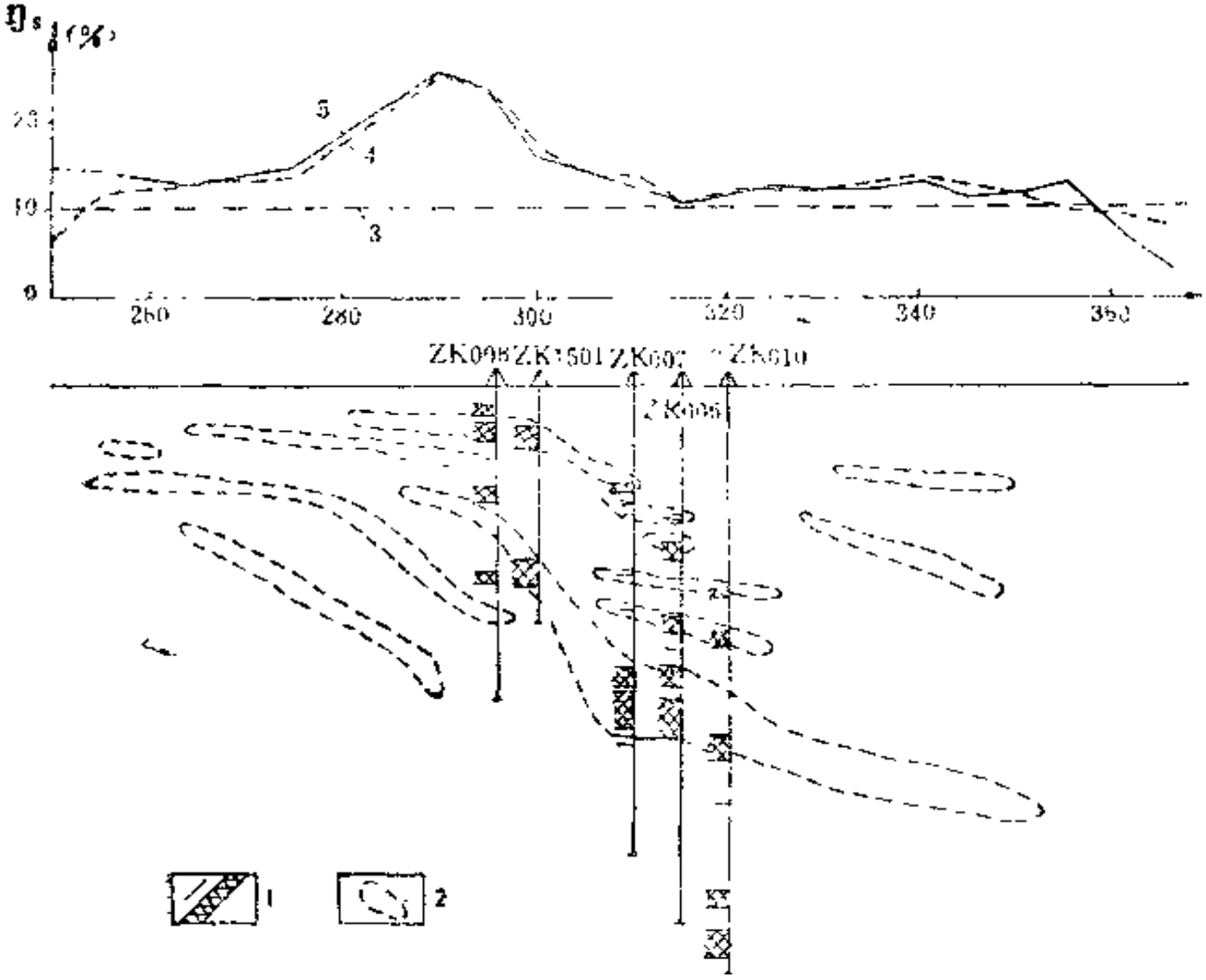


图3-5-3　湖北省大冶陈子山金矿区定量解释结果
（引自周亚特、李辉文、何建明）

1-验证见含金黄铁矿化体；2-推断极化体；3-η_1异常背景值；4-理论计算的η_s曲线；5-实测η_s曲线

解释，其效果将比电法理想。

7．在已找到浅部矿体情况下，可以利用区域性地球物理资料研究勘探区的深部地质构造，进一步寻找深部金矿床。例如，日本菱刈金矿床的发现就是在已开采的浅部金矿区投入了

航空电磁法和重力方法，解决矿区深部构造，并与相邻已知区进行对比，经过钻探验证，发现深部大金矿，储量达120吨。为了简单起见，这里不再列出实际曲线，在后面的应用实例中将做详细介绍。

综上所述，物探方法在勘探阶段能解决以上七方面地质问题，但并非每个金矿区都需要一一进行，而要根据勘探区的地质情况和需要，投入一定物探工作量，这样才能经济、快速和有效果。

§3.6 苏联对物探工作阶段性的划分

苏联在寻找金矿床的过程中，很早就应用了物探方法。但其基本方向只在最近十年才完全肯定下来，其中方法的综合性大地扩大了。目前找金所用的方法有重力法、地震法、电、压电法、磁法和放射性测量等。为了提高原生金矿床上物探方法的地质效果，应该扩大物探工作量，遵循矿区研究的阶段性和采用最有效的综合方法。为此目的，苏联的金矿物探工作者将金矿区物探工作找分为四个阶段：构造-地质填图；金矿田构造研究；详细普查；初步和详细勘探。在总结方法试验的基础上，为每一个工作阶段拟出一套综合方法，详见表3-6-1。利用这套综合方法能更可靠地、更肯定地解决划分远景区和远景地段的任务，能更准确地发现和追索矿带，并能根据钻孔研究剖面和在钻孔及坑道间进行普查找矿。

从表3-6-1可以看出，苏联对金矿区的物探工作也分为四个阶段，每个阶段的地质任务明确，物探方法组合合理。表中所列的物探工作并非是寻找金矿床全过程中的全部物探工作，它

表3-6-1

金矿区名称	构造-地质填图		金矿田构造研究		详细普查		初步和详细勘探	
	地质任务	物探方法	地质任务	物探方法	地质任务	物探方法	地质任务	物探方法
鄂霍次克—楚科奇火山岩带	断裂带、热液蚀变岩带和次火山岩体填图，火山岩划分，圈出远景区	1:20万重力测量；1:5万航空伽玛能谱测量，配合1:5万和1:2.5万航磁和甚低频电磁法；沿远景构造各垂直剖面进行地震勘探；地面物探工作	研究构造破碎带；划分杂岩；查明矿化带	1:2.5万～1:1万综合地面物探工作（磁测、伽玛能谱测量甚低频电磁法）和化探（伴生元素的岩石化学测量。在有相应的地质－地球物理依据时，综合方法可包括1:5万重力测量和电阻率法	普查和追索石英脉、化带及其它可能与金矿有关的地质单元	1:1万～1:2千综合物探和化探工作，包括磁测、电测（甚低频电磁法，各种剖面法，激电压）、压电法和光谱金量测量，综合方法的选择以具体条件定而	对矿点和矿床从地表进行研究。按钻孔研究剖面，普查钻孔间和坑道间的矿体、沿走向追索矿体	压电法，光谱金量测量，交流充电法，无线电波透视法，综合测井（电测井，放射性测井）

东后贝加尔达拉松型	查明和追索断裂，岩浆杂岩和喷发沉积杂岩的填图，圈出远景地段	1:20万重力测量，1:5万～1:2,5万航磁测量，配合航空伽玛能谱测量和航空电测。地面物探工作	研究矿田深部构造，控矿小侵入体和局部构造破碎带的填图，查明热液蚀变岩带和地段（黄铁细晶岩），查明矿化带	1:5万重力测量，1:2,5万～1:1万地面磁测，1:2,5万伴生元素的岩石地球化学测量，1:2,5万～1:1千电测（自然电位，偶极电测剖面）	普查和追索含金硫化矿脉	1:1万和更大比例尺的电测（自然电位，激电法），1:1万～1:5千地面磁测，1:1万和更大比例尺的伴生元素岩石地球化学测量	从地面详细研究矿点和矿床，按钻孔研究剖面，沿走向查明和追索金-硫化矿脉，普查钻孔间和坑道间矿体	激电法，充电法，孔中物探方法（无线电波透视法，电性对比法，孔中激电法），综合测井（电测井，放射性测井）
巴列伊型	充填凹陷构造的晚中生代火山沉积岩层发育区的填图，追索断裂，查明和研究盆地。测定结晶基底的埋深	1:20万～1:5万重力测量，1:5万航磁测量，沿各垂直剖面的地震勘探，电测（电测剖面法，电测深法）	研究构造破碎带，划分杂岩体。查明热液蚀变岩石并填图，确定结晶基底的埋深	电测（电剖面法，电测深法，1:2,5万高精度重力测量，激电法，面积性地震勘探	硅化带详细填图	电测剖面法，压电法，超长波电台方位对比法，详细重力测量	按钻孔研究剖面，普查钻孔间和坑道间矿体	地下方案的压电法，无线电波透视法，电阻对比，电测井

续表

金矿区名称	构造-地质填图		金矿田构造研究		详细普查		初步和详细勘探	
	地质任务	物探方法	地质任务	物探方法	地质任务	物探方法	地质任务	物探方法
中阿尔丹	查明和研究断裂带，侵入杂岩和喷发杂岩的填图和划分，圈出远景地段	1:20万重力测量，1：5万～1：2.5万航磁测量。重点进行航空伽玛能谱测量和航空电法测量。地面物探工作	A.库拉纳矿型。侏罗纪后的正长斑岩岩株和岩墙、构造破碎带和岩浆作用发育区的填图	1：5万重力测量，1:2.5万～1：1万地面磁测，1:2.5万～1：1万偶极剖面测量，电测深	查明含金岩浆	1：1万地眼伽玛测量，1:1万～1：5千能谱测量		
			B.列别金型。查明和追索构造破碎带，研究褶皱构造，石墨化片岩和裂隙带的填图，划出矿化带	1：2.5万～1:1万综合地面物探工作，包括磁测，电测自电，偶极电剖面，激电）、伽玛能谱测量	角砾岩化带和矿化带填图，查明和追索矿体	1:1万和更大比例尺的电测（偶极电测剖面、自电、激电、交流充电法）	从地面详细研究矿点和矿床。按钻孔研究剖面，划出矿段，对比剖面和普查钻孔间及坑道间的矿体，追索由坑道和钻孔已揭露的矿体	交流充电法，无线电波透视法，电性对比法，综合测井（电测井，放射性测井）

（引自苏联M.И.Киселев）

相当于我们前面提出的找金矿的第Ⅱ阶段到第Ⅳ阶段的工作，缺少了研究莫霍面深度和深部构造以及划分出成矿远景区这一部分工作。尽管如此，在金矿区工作时仍有重要参考价值和指导意义。

第四章　物探方法寻找砂金矿床的找矿模式

从世界采金历史来看，一些重要金矿的开发都是先从开采砂金开始的。此类金矿床特点是产出浅、易找、易采、易选、投资少而收效快，因此自古以来一直是金的重要来源。世界上已采出的砂金超过3万吨，各种年代的砂金型矿床占世界产金量的10～20%。特别是现代砂金矿是金的主要来源。目前苏联一半左右的金产量来自砂金；我国金矿储量中砂金约占10%左右。可见寻找砂金矿也是当前找金的主要方向之一。在寻找砂金矿床中除用地质手段和化探之外，物探方法也是寻找砂金的综合方法中必不可少的手段。本章对物探方法寻找砂金矿的找矿模式进行探讨。

§4.1　砂金矿床的形成和富集规律

一、砂金矿床的形成

原生金矿床或含金地层由于地质营力作用破坏，外力搬运、分选、沉积，在一定条件下富集成有经济价值的砂金矿床。原生金矿床的规模越大，含金岩石的出露面积越大，提供金的物质也就越多，形成砂金矿的可能性也越大。例如，东北大兴安岭北部中生代拗陷区的冲积砂金矿床中的金粒，来自

海西隆起区的含金石英脉矿床中。

构造运动可引起沉积间断，形成不整合面，其上可接受砂砾的沉积，为古砂金矿和含金砾岩型矿床提供空间场所。新构造运动不仅可导致古金矿床上升到不同的高度，为现代河流砂金矿床提供金的物质来源，而且造成各地夷平面的高度差别，导致河谷地貌上不同级别阶地、冲积扇、河漫滩的形成。地壳上升时期是砂金矿床的富集时期。因为地壳的上升，有利于风化作用的进行，也有利于水流对含金物质的侵蚀、搬运，从而使金粒在有利的地形中不断得到富集。

砂金矿床种类较多，其中主要类型是残积砂金矿床和冲积砂金矿床，后者经济价值更大一些。

残积砂金矿是由原生金矿或含金地质体的表生疏松含金风化物残留在原地或位移不大而形成的，俗称本山金。残积砂金矿在很多地区与冲积砂金矿关系密切，可做为冲积砂金矿的来源。

冲积砂金矿是原生金矿或含金地质体经风化作用和流水冲刷作用，金从中解离出来，金及含金的碎屑物可被河流流水搬运到合适的地段，经机械沉积分异而形成的砂金矿床。原生金矿或含金地质体的残积物、坡积物、洪积物都是冲积砂金矿床的重要物质来源。砂金产量主要来自冲积砂矿，因此该类矿床是砂金矿床的重要类型。

冲积砂金矿床通常产在河道中。它的形成不仅与河水流速有关，而且与河流的一定发育阶段相适应。因此，冲积砂金矿床通常受河流地貌所控制。根据砂矿赋存部位的特点，冲积砂矿可分为河床砂矿、河谷砂矿、漫滩砂矿、岩溶砂矿和阶地砂矿等（图4-1-1）。

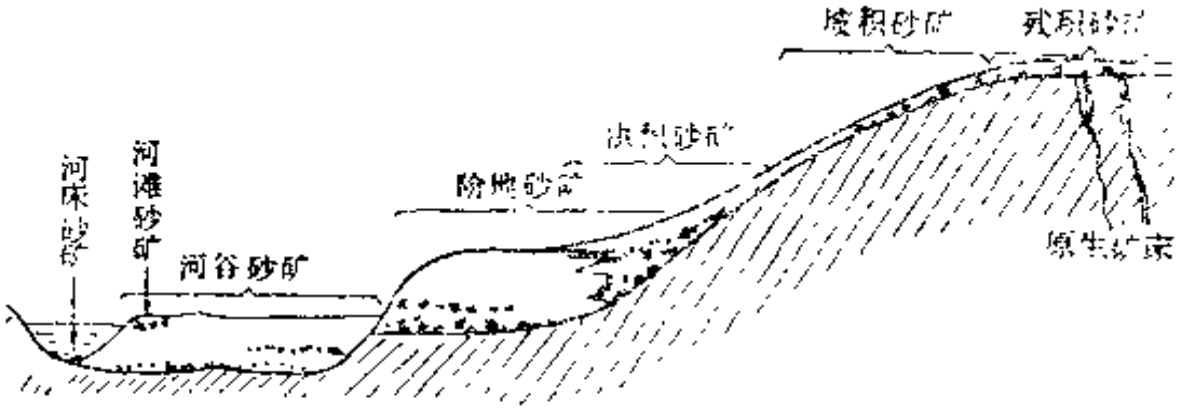


图4-1-1　各类和各亚类砂矿在河谷横剖面中的分布示意图

（引自矿床地质学）

流水作用和水系地貌是形成砂金富集的主要因素。在河流发育初期以下蚀作用为主，继而侧蚀作用加强。在河流的壮年期，由于河谷的展宽作用和沉积作用加强，从河床砂矿可相继发展成为河谷砂矿、漫滩砂矿和阶地砂矿。可见，冲积砂矿的形成也是河流地貌的形成和不断改造的过程。冲积砂矿的另一特点是，它是在流水作用下的机械沉积分异产物，因此，具有明显的层理，详见图4-1-2。通常自上而下可分为如下几层：

土壤层：富含腐植质和植物残积物；

泥沙层：砂、粘土和有机质的沉积物；

砂砾石层：由砂、砾组成，其中有时含有砂金等重砂物；

含金砾石层：主要由砾石组成，含少量砂，为主要的含金层；

底岩：为河道的基底，在底岩的裂隙或凹穴中可有砂金充填。

底岩有原生底岩和假底岩之分。原生底岩系由河谷底部的

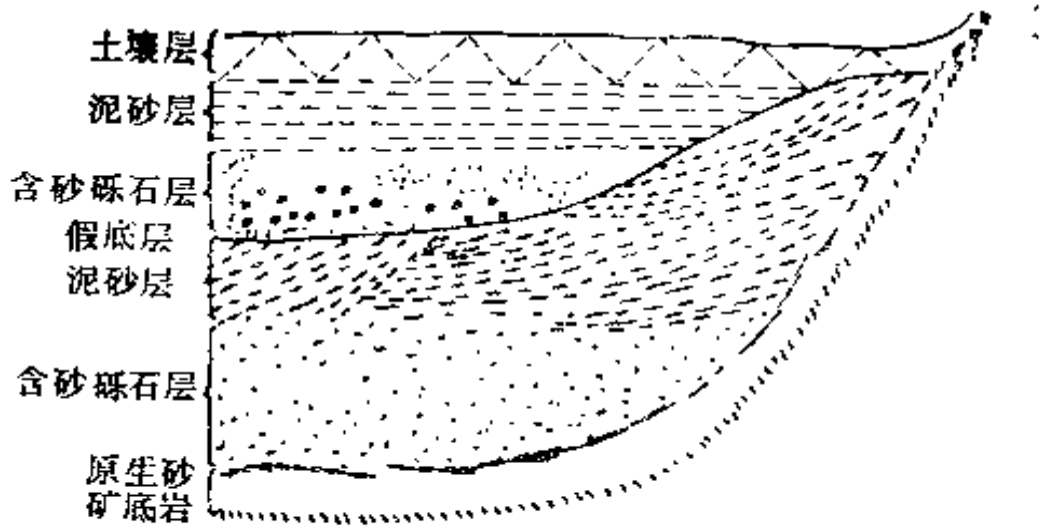


图4-1-2　冲积砂矿横剖面结构示意图(引自矿床地质学)

基岩组成。假底岩是复式砂矿上部砂矿的底位，假底岩一般多由粘土组成。冲积砂矿通常赋存在原生底岩或假底岩之上或出现在距离底岩不高的部位上。因此，底岩的性质、构造对冲积砂矿的形成有着重要作用。

二、砂金矿床的富集规律

这里主要介绍冲积砂金矿的富集规律。

从砂金分布规律来看，砂金经常富集在河流中的局部部位，此局部部位为砂金富集地段，这是寻找砂金矿的主要目标。砂金富集地段分布在以下部位：

（一）砂金一般多富集在冲积的下部或底部。砂金在流水搬运过程中，可形成自然筛选作用，由于自然金比重大，金粒通常沿砂砾孔隙之间下沉，而富集在砂砾层下部或底部形成砂金矿层。一般来说，它们富存在河床基岩底岩面上几十厘米到2m不等的砂砾层中，尤其在基岩面上，常常形成富矿层(图4-1-3)。此外，在含金砂砾层中赋存有含粘土质泥层，当自然金粒下沉时

到具有粘性致密的泥层时，就被阻挡沉积在泥层之上，形成砂金矿层。一般该粘土质层称为“假底层”或“假底”。作为“假底板”的除含粘土质泥层外，常有铁锰质层。在湖南这种铁锰质假底板比粘土质泥层“假底板”为多，且含金性较好。

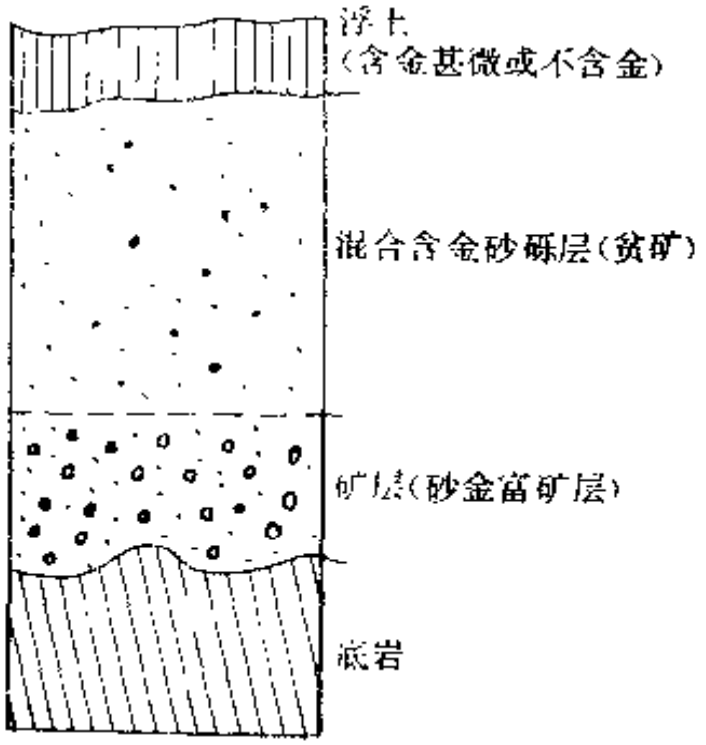


图4-1-3　砂金富集在砂砾层底部（引自张成喜）

（二）河流砂金矿的形成与河水流速密切相关。河流上游水流流速大，下游水流流速小，都不利于砂金富集成矿，只有河流的中游和中上游区段有利于形成砂金矿床。

（三）在河曲内侧易使砂金富集成矿。由于在河曲内侧形成砂滩，所以砂金在该处沙滩内富集，形成条带砂金矿床。

（四）河流的“开门”和“关门”地段有利于砂金的富集。河面由窄变宽处谓之“开门山”地形。在“开门山”地段由于河面骤然变宽，流速减小，由上游带来的泥砂、砾石、

砂金等就沉积于河面变宽处，形成沙洲。在沙洲上游的一端有利于砂金的沉积，砂砾石较大，金粒较粗且富。与上述相反，在河谷一侧或两侧有低山丘陵凸出伸向河谷，二山紧聚使河谷变窄形成峡谷，一般称之为“关门山”地形。当河流流到“关门山”地段河面由宽变窄，流速顿时减小，砂砾石等碎屑物则沉积在峡谷指向上游的一端，构成沙洲，而金粒就在沙洲靠近下游峡谷一端富集，下沉到砾石层的底部（图4-1-4）。

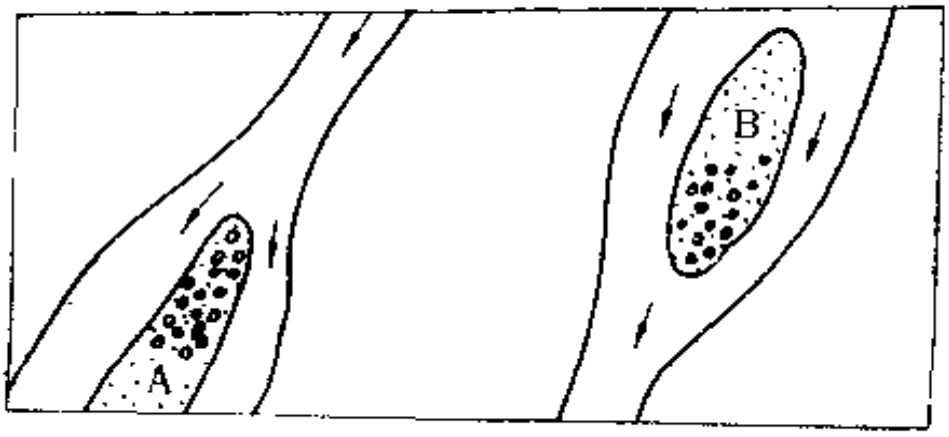


图4-1-4 宽谷式地形砂金富集部位 （引自张成喜）
A-开门金；B-关门金

（五）河流“迎门山”地段有利于砂金的富集。在支流和主流汇合的下方或河流的迎面有低山丘陵，阻挡水流前进，在河流急拐弯处，使水流速度变缓，有利于砂砾及砂金沉积，这种流水地貌称为“迎门山”地形，这种流水地段有利砂金富集形成砂金矿床。

（六）在流水流至峡谷弯曲地段，由于流水一时被峡谷阻挡，流水向凹岸冲蚀，易产生旋水作用，可使砂金富集成矿。

（七）支流与主流汇合有利于砂金的富集，当支流注入主流时，由于流速减小，支流携带的泥砂和砂金等，则沉积在主

支汇合的近侧下方形成砂滩富集砂金矿。

（八）河谷底岩对砂金的富集有着一定程度上的控制作用。底岩的性质和构造与砂金的关系更为密切。从黎盛斯的资料可明显地看出这种关系：湖南第四纪砂金的底板岩，约有48%属于冷家溪群或板溪群的板岩、千枚岩及变质岩；约有40%属于白垩纪及第三纪紫红色砂、砾岩及页岩；约有10%属于上古生代石灰岩及白云岩；仅2%属于酸—中性岩浆岩。对于滞留金粒最有利的岩性是其风化表面具有微形岩溶地貌的石灰岩，较有利于砂金富集的底岩岩性是紫色页岩、砂岩和砾岩所组成的间层和互层。在砂金的研究和找矿工作中，河谷底岩是不可忽视的地质因素之一。

底岩按其裂隙发育程度及其破碎程度可划分为三层：上层：裂隙发育，称为“易碎岩石”；中层：裂隙度较小，难以破碎，称为“难碎的岩石”；下层：裂隙度很小，称为“致密的岩石”。底岩按其表面结构可分为光滑的、凸凹不平的和肋状的三种。

底岩的某些特性有促使砂金富集的作用。其富集特点有：

1．底岩裂隙可使砂金富集。当砂金形成后，分布在河谷底岩上的砾石层中的金粒可渗入到底岩裂隙中，形成砂金富集部位。金渗到砂岩宽裂隙的深度较大，可达1.5m。在粉砂岩和页岩中多属窄裂隙，金的渗入深度通常在30～40cm上下。在一般情况下，裂隙上部10～50cm处，含金量最高。

2．底岩性质对砂金的富集有着很大的影响。根据湖南省砂金底岩统计来看，板岩、千枚岩、变质砂岩及紫红色砂、砾岩和页岩等，其中尤以紫红色页岩、砂岩和砾岩所组成的间层或互层为最佳底岩。而石灰岩、白云岩及中酸性岩浆岩为底岩时，

其含金性较劣。

3．底岩的结构对砂金的富集起到直接控制作用。

例如，岩墙或坚硬岩石具有耐风化和侵蚀的能力，当其走向与流水流向直交或斜交时，突出成“板梁”。流水带来的泥砂金粒等通常极易沉积在“板梁”的两侧；在灰岩地区底岩被流水溶解形成凸凹地形，在凹洞内易富集砂金成囊状，称为“鸡窝金”；页岩及片理发育的岩石，尤其是其解理、裂隙发育的情况下，对砂金的富集有着重要的影响。

三、河谷砂金伴生矿物组合特征

在河谷冲积砂金矿床中，金与砂砾总是相伴而富集。由于金的比重大，致使与砂金伴生的矿物和砾石也必然是重砂矿物和较重的砾石。常与砂金伴生的矿物诸如磁铁矿、钛铁矿、石榴子石等。例如，黑龙江九里庄—嘉荫河砂金矿，与其伴生的主要重矿物有：磁铁矿、石榴子石、黄铁矿、白铁矿、赤铁矿、褐铁矿……等。当磁铁矿含量相对较多时，含金砂体具有一定磁性。

§4.2 砂金矿区的地球物理特征

地球物理方法是寻找金矿床的一种间接手段，主要是解决与砂金矿有关成矿的地质问题。这里讨论的砂金矿区的地球物理特征是指含金砂体和其下部、周围的基岩的地球物理特征。对砂金矿床而言，积累的物性资料较少，只能粗略讨论和简单分析。应当说明，砂金矿实际上是由含金砂体和基岩组成，以往教材和实际工作中关于第四系与基岩组成的地电断面的物性规律也适用于砂金矿区。本节中虽然引用的实际物性数据较少，

但所述规律对寻找砂金矿的物探工作仍有指导意义。

一、砂金矿床的地质-地球物理模型

砂金矿体总的特点是沿河谷呈带状分布，河谷砂金赋存在河流中上游河床或河漫滩底部砂砾层或卵砾石层中。因此，砂金矿体的形状和规模一般受河谷地貌和底岩的起伏形态所控制。砂金富集特征在剖面上是上贫下富，在平面上则因河曲地貌及支流的汇入影响，致使矿体多呈分枝、复合、局部膨大的不规则带状分布于现代河床两侧的河谷阶地上。

以上所说的是有经济价值的砂金矿体的形态和分布，对物探方法而言，将整个砂体作为一层，基岩作为一层，砂金矿区总体上可以看作为一个二层地质-地球物理断面，如图4-2-1所示。图中所列的地质-地球物理模型是一种理想化的模型，实际上，砂金矿区的地表都不是很平整的，常有河谷、阶地等，第四系的厚度也各处不一，底岩的岩性、构造、形态各异。但根据砂体和底岩的物理性质可将其视为两层断面。

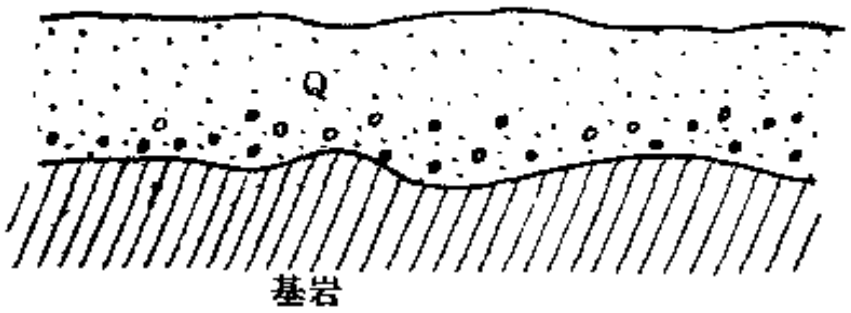


图4-2-1 砂金矿区地质-地球物理模型示意图

二、砂金矿区的地球物理特征

从图4-2-1中给出的砂金矿区地质-地球物理模型可以看，

砂金矿区主要为第四纪或古代疏松沉积物与基岩两大类物相所组成。由于疏松沉积物在物质成分、结构构造、岩性、含水性、地质时代和经历方面都与基岩不同，因此整体疏松层与基岩在物理性质方面存在一定的或明显的差别。国内外的实际工作成果证明了二者物性差别的客观性。下面给出某地的第四系和基岩的电阻率ρ、极化率η、密度σ和波速度V的一组数据。这些数据表明，在该区投入电阻率法、重力、地震和激电法可以取得较好的地质效果。

表4-2-1

岩石名称	电阻率(Ω·m)	极化率(%)	密度(g/cm³)	波速(m/s)
第四系	$\rho_1=500$	$\eta_1=0.1\sim1$	$\sigma_1=2\sim2.5$	$V_1=354.8$
基　岩	$\rho_2=1000\sim5000$	$\eta_2=2\sim3$	$\sigma_2=4.08$	$V_2=1500$

（引自潘勇飞）

表4-2-2给出了美国拜哲山地区砂金矿床上用地震剖面确定的四个层位的速度值。地震方法之所以能在该区取得理想的地质效果，是因为那里具有投入地震方法的良好地球物理前提。

表4-2-2

层序	岩　性	平均速度 (m/s)	速度范围 (m/s)	厚　度 (m)
1	疏松砂砾	487.68	432.82～609.6	9.14
2	压实砂砾	1798.32	1524～2194.56	12.19
3	胶结蓝色砾石	2621.28	2285.6～3048	24.38
4	基　岩	4739.64	3962.4～5181.6	—

在寻找砂金矿床方面，浅层地震法有一定的优势，因此在选择工作方法时应注意这一点。

最后还应说明一点，有些砂金矿区常含有磁性矿物，当磁铁矿含量较多而形成磁性矿物富集时，可用磁法圈定磁性矿物富集带达到间接寻找砂金矿的目的。例如，美国怀俄明州提敦县提敦国家森林区砂金矿就属这种情况。该区利用磁法成功地圈出了磁性矿物富集带。土样磁化率测定有助于区分地表磁性矿物富集引起的磁异常与深部富集引起的磁异常。可见，在寻找砂金矿床方面，只要具备一定的地质-地球物理前提，磁法也同样是有用的。

§4.3 物探方法寻找砂金矿的效能

砂金矿床种类繁多，其中经济价值最大是冲积砂金矿床。这里着重介绍物探方法在寻找冲积砂金矿床过程中的效能。根据砂金矿的成矿条件和富集规律，我们将寻找砂金矿的全过程分为以下五个阶段，见图4-3-1。

砂金矿床的形成必须具有物质来源和搬运这些物质的外力。因此，在砂金矿床远景靶区选择时必须考虑以下条件：有原生金矿或含金地质体及矿源层；区内水系发育。根据以上条件所确定的砂金矿靶区往往是相当大的区域，要寻找到有经济价值的砂金矿床，必须在成矿远景靶区开展相应的地质、化探和少量物探工作，以便进一步缩小找砂金矿床的靶区。寻找砂金矿床的第Ⅱ阶段工作便是在已经缩小的靶区中圈定含金砂体的范围、厚度和规模。在第Ⅳ阶段，通过钻探和分析，确定砂矿体的位置、埋深、范围和规模。从寻找砂金矿床而言，完成第Ⅳ

阶段的工作，就算完成了找矿任务，但是就整个找金矿工作而言，工作并未结束，还应根据已找到的砂金矿追根求源，寻找原生金矿床。当然也可算作寻找原生金矿床的开始阶段。

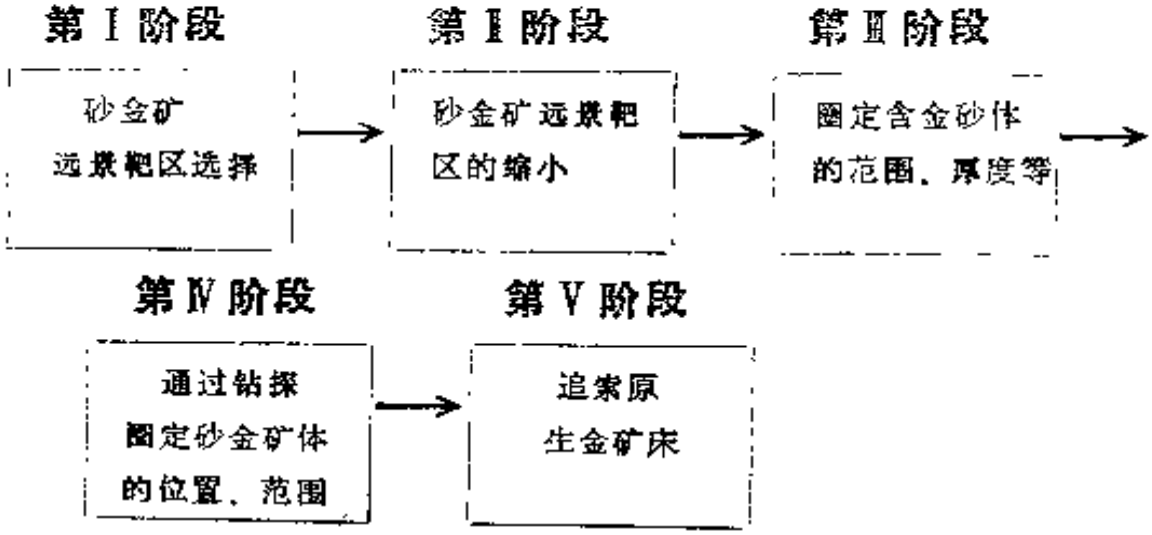


图4-3-1 寻找砂金矿床工作阶段性的划分

根据寻找砂金矿床的阶段性和砂金矿区地球物理特征，物探工作的重点应放在第Ⅲ阶段，而第Ⅱ、Ⅳ阶段物探工作很少。在寻找砂金矿床的过程中，物探方法具有如下效能。

一、在寻找砂金矿的第Ⅱ阶段，可利用小极距地电化学提取法，确定可能成矿的含金砂体的大致位置和范围。关于地电化学提取法详细情况另章介绍。应该说明，在第Ⅱ阶段中用水沉积物和重砂法更为经济、有效。

二、在寻找砂金矿的第Ⅲ阶段中，物探方法可以充分发挥作用，解决与砂金矿成矿有关的各种地质问题。例如，用物探方法可解决基岩埋深、基岩起伏、河底槽形态、规模等。

1. 确定含金砂砾岩层走向和基岩起伏

例如，黑龙江桦南某砂金矿区，该区砂金赋存于第四系底部，底岩为第三纪砂砾岩。最初是在采煤竖井中发现砂金的，后

经砂钻探寻发现几孔有金。但是，矿体走向及赋存规律不清，进一步砂钻施工无法布置。地质上曾误认为体矿呈东西走向。为了研究矿体的真正走向，于1982年做了近3km²200×200m²网度的视电阻率测深，并对其结果进行了定量解释，勾绘了底岩的等深线，确定了底岩的埋深。根据底岩的等深线走向，推断砂金矿的走向不是东西向，而是北东-南西向（图4-3-2）。后来被工程证验所证明。1983年又在此基础上做了网度为200×

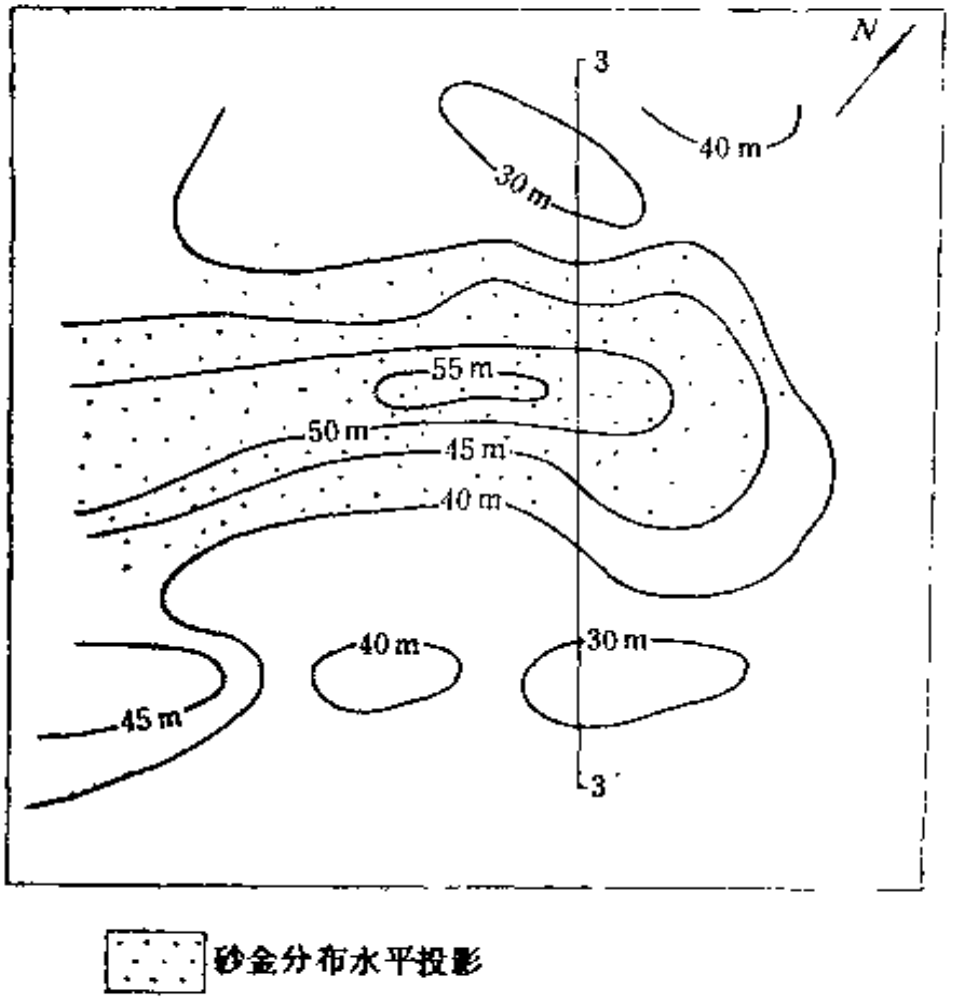


图4-3-2 黑龙江省桦南县某砂金矿区等深线图（引自潘勇飞）

200～200×400m²的电测深面积13.9km²，继续追索和圈定砂金矿体的范围，扩大矿区远景，最后获得6t金储量。

该区还根据电测深曲线绘出了3—3′剖面上的断面等值线图和依此推断的地质剖面，详见图4-3-3。

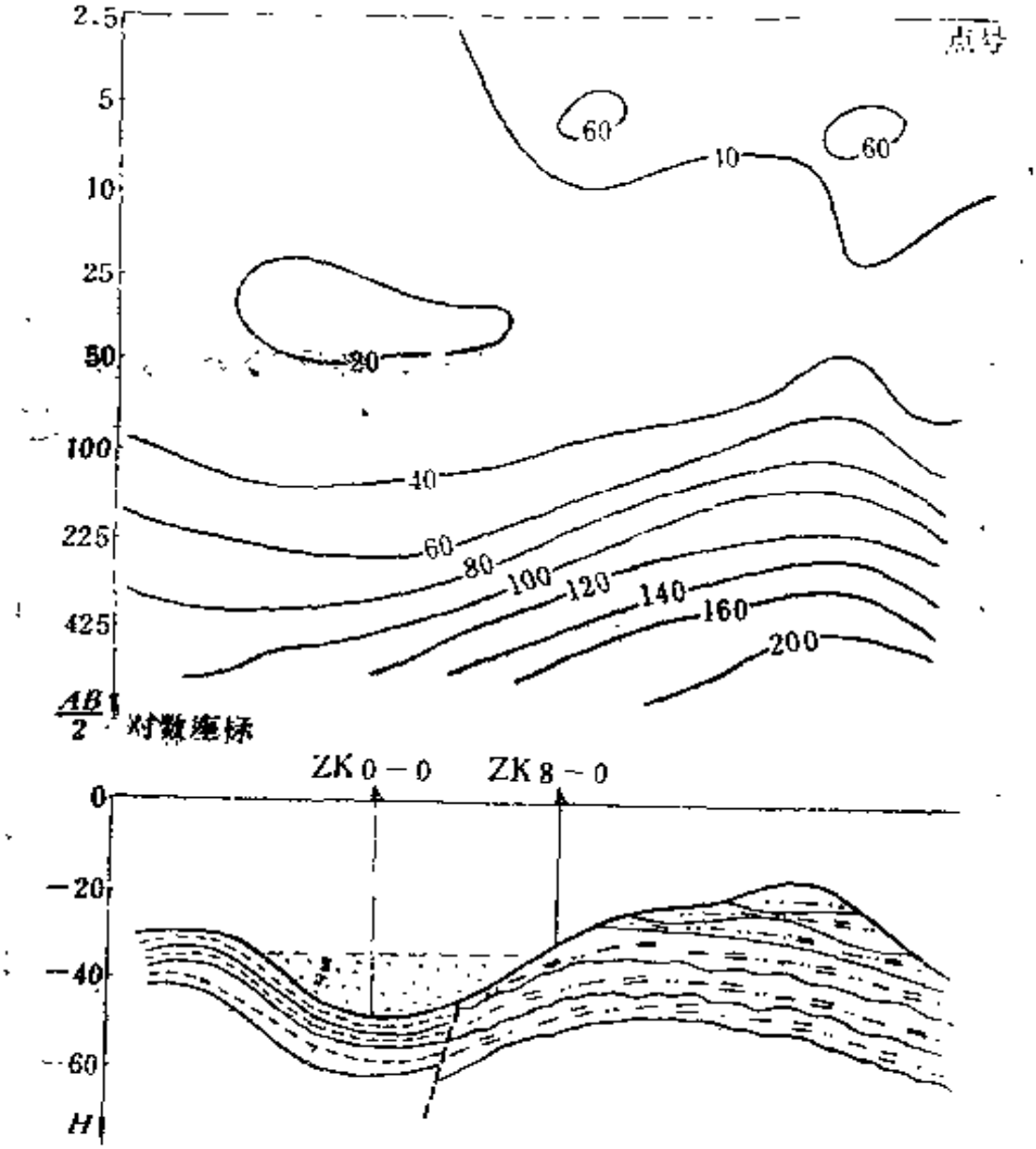


图4-3-3　3－3′剖面上ρ_s断面等值线图和推断的地质剖面(引自潘勇飞)

求基岩埋深或基岩起伏时，也可用纵向电导这个参数。

2．研究基岩面溶蚀情况及其起伏

例如，湖南隆回某地砂金矿是以山间洼地中的冲积砂金矿为主，此外还有古河床高阶地中的冲积砂矿和基岩溶洞及地下暗河中的冲积砂矿。砂金矿的基底是中泥盆系灰岩、白云质灰岩、页岩和砂岩等，岩溶较发育。

该区完成了0.05km²面积的激电测深和电阻率测深，还做了电剖面法。根据物探工作结果，绘制了该区的基岩等深线（图4-3-4）和电剖面曲线图（图4-3-5）。

工作结果表明，该溶岩盆地中基底存在有四条不同规模溶沟或冲刷沟，沟内第四系厚度一般可达5～90m，最厚为102m，平均厚度为44.5m。从解释结果可以看出：该区砂金矿埋藏深，第四系厚度大，但地貌条件对砂金富集有利，并具有一定规模。

该区电阻率测深曲线的类型一般为KH型，但也有AA型曲线，推断它们分别是基岩上第四系内有水和无水的反映。在确定基岩埋深时，一般激电测深确定的基岩深度总比电阻率测深求出的基岩深度小，可能是基岩上部风化残积层影响的缘故。

从图4-3-5可以看出，在基岩埋藏较深的地段（即第四系厚度大），电剖面法ρ_s和η_s曲线平稳，而在基岩埋藏较小或基岩出露地段，ρ_s和η_s曲线数值高，起伏变化较大。因此，可利用电剖面法扫面，圈定出第四系较厚的范围，从而间接指示出砂金矿可能分布范围。

3．确定河底槽的形态、砂体厚度和规模

解决这一问题的实质是，求出河底槽中各点砂体的厚度，进而描绘出河底槽的形态和规模。

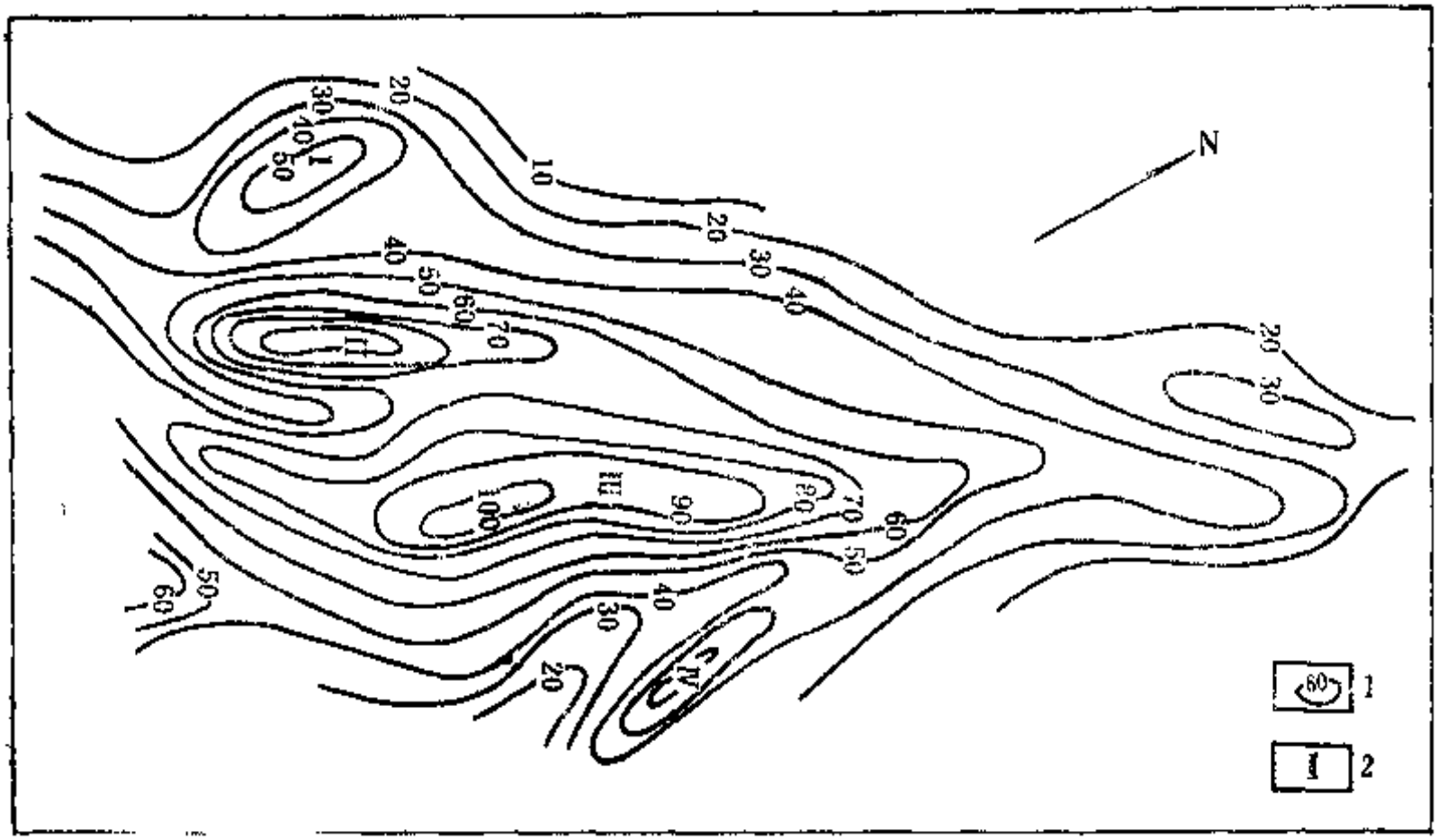


图4-3-4　湖南隆回某地砂金矿区基岩等深线图（引自潘勇飞）

1-基岩等深线；2-基底冲沟及编号

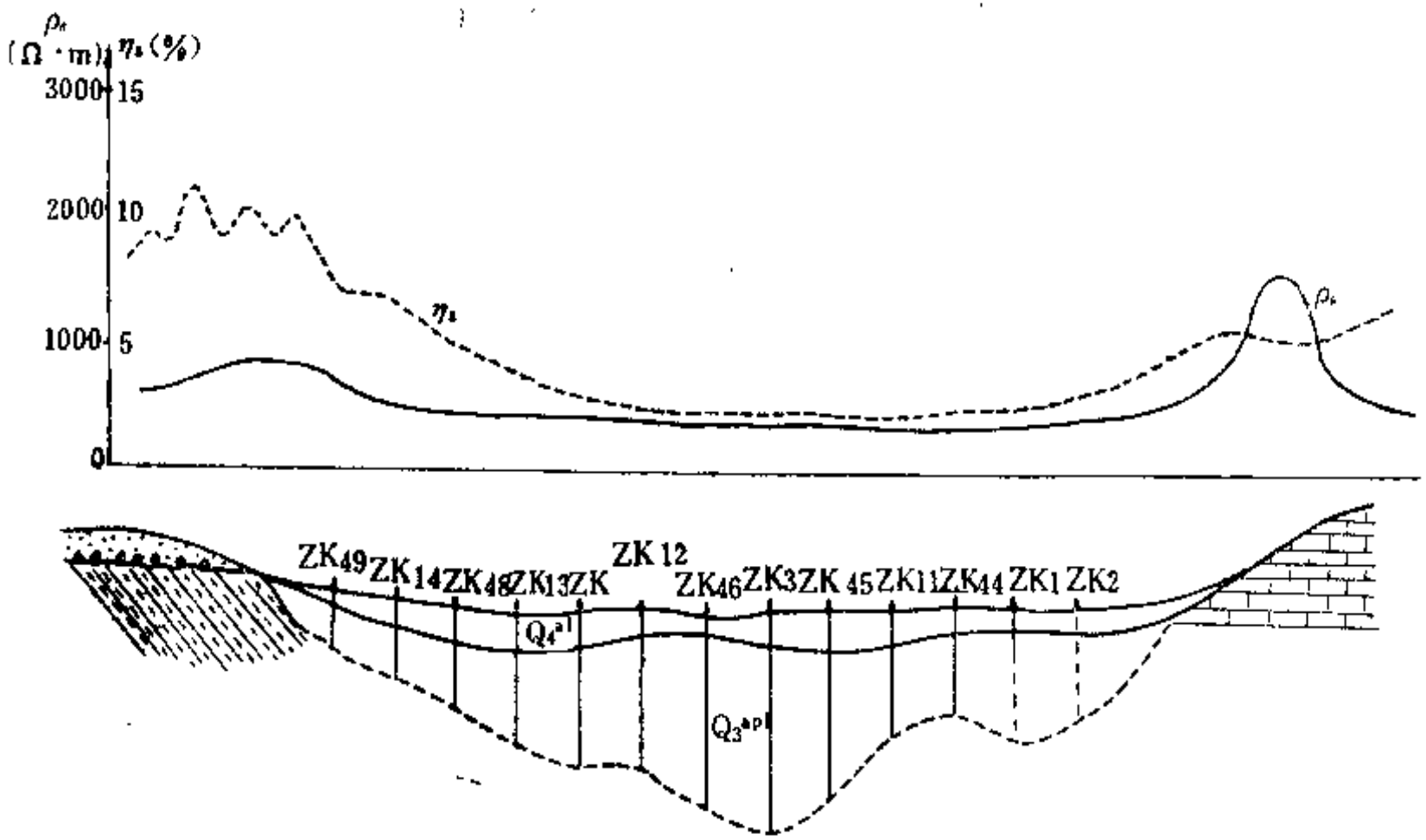


图4-3-5　湖南隆回某地砂金矿区地质、电法综合剖面图
（引自潘勇飞）

求取砂体厚度或基岩埋深，主要方法有电阻率测深法、重力勘探和浅层地震法。前面已举例说明用电阻率测深法求砂体厚度和基岩起伏的地质效果，这里将举例说明重力勘探和浅层地震法在这方面的应用。

由于基岩与疏松层之间存在剩余密度，具备了用重力勘探求疏松层厚度的地球物理前提。苏联在这方面的应用相对较多，并取得了较好的地质效果和经验。苏联各地疏松层与基岩间剩余密度在0.2～0.7g/cm^{3}范围内变化。在西西伯利亚砂金矿床上，根据许多地段上重力测量和地貌工作结果，估算了疏松层厚度，划分出不同深度的阶地，指导了钻探工作的方向。以后的钻探结果表明，由地球物理资料确定的第四纪沉积物厚度与钻探结果非常吻合。

确定疏松层厚度除了用电法、重力外，浅层地震应用也较普遍，其精度比前两种方法要高。图4-3-6给出了四川某地用浅层地震确定基岩深度例子。基岩为混合花岗岩，与疏松层间有明显的波速差。对比浅层地震和钻探深度可以看出，二者形态基本相同，所确定的深度十分接近，其相关系数接近于1。这说明浅层地震法确定的基岩深度是相当准确的。

实际资料证明，地震解释的基岩深度略大于实钻深度，但二者反映的基岩形态相同。这一结果说明地震波反映的深度界面是基岩的新鲜界面，而钻探打到的是基岩的风化残积界面，其差值也反映了风化层的厚度。

用浅层地震法和电阻率测深法确定第四系覆盖层厚度的精度问题一直为人们所关心，因为它涉及到在实际工作中对两种方法的选择问题。为了说明二者的精度，在某地的同一地质剖面上，对31个物理点用以上两种方法进行了第四系下基岩深度的

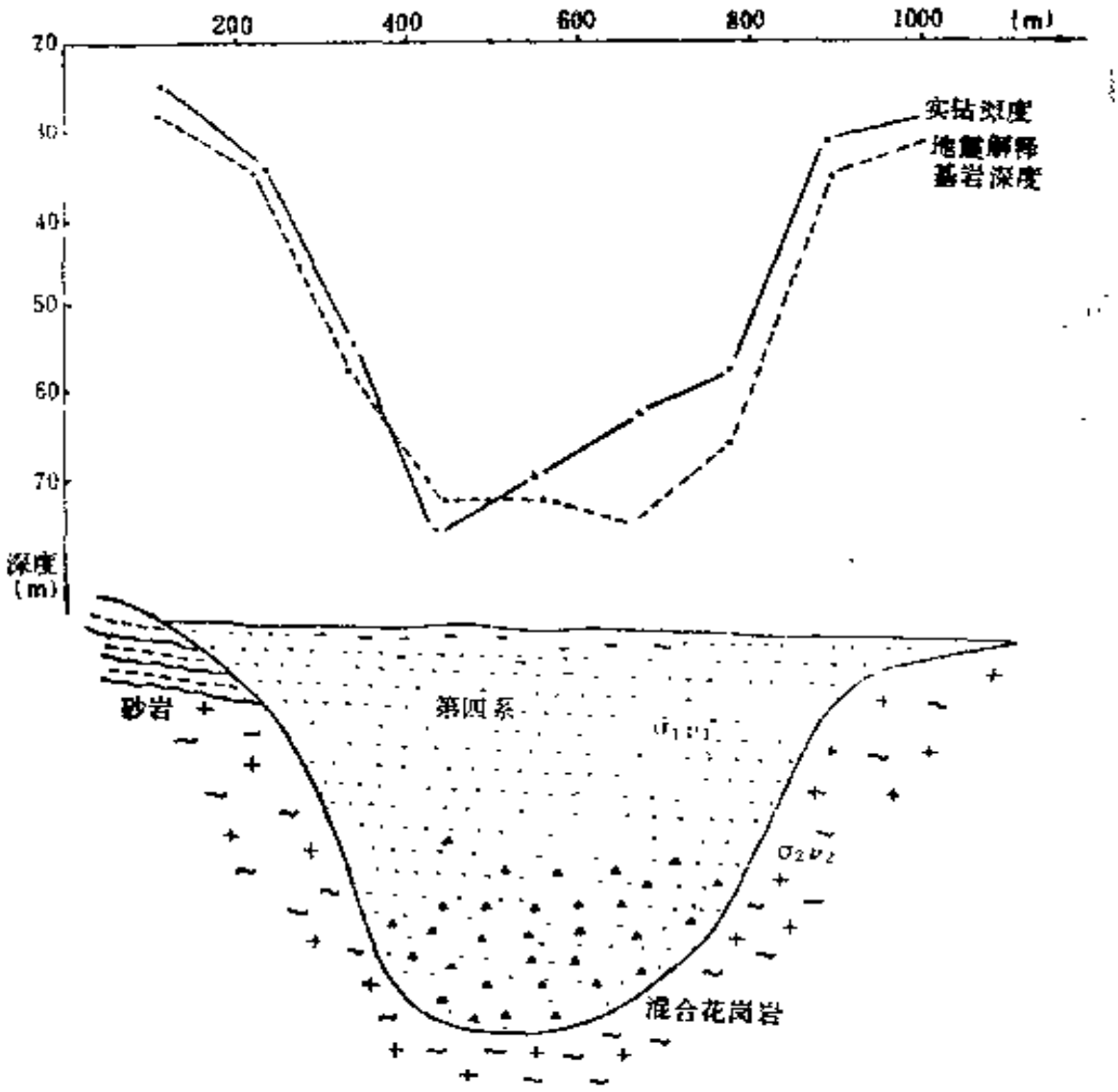


图4-3-6　四川某地砂金矿区浅层地震确定的基岩深度与实钻深度对比
（引自潘勇飞）

测量。测量结果二者的深度曲线吻合良好，详见图4-3-7。可见浅层地震（折射波法）和电测深方法都是行之有效的确定疏松层厚度或基岩埋藏深度的方法。不过，根据钻探验证资料和数据分析说明，浅层地震所求出的基岩埋深要比电测深确定的埋深更准确和稳定。

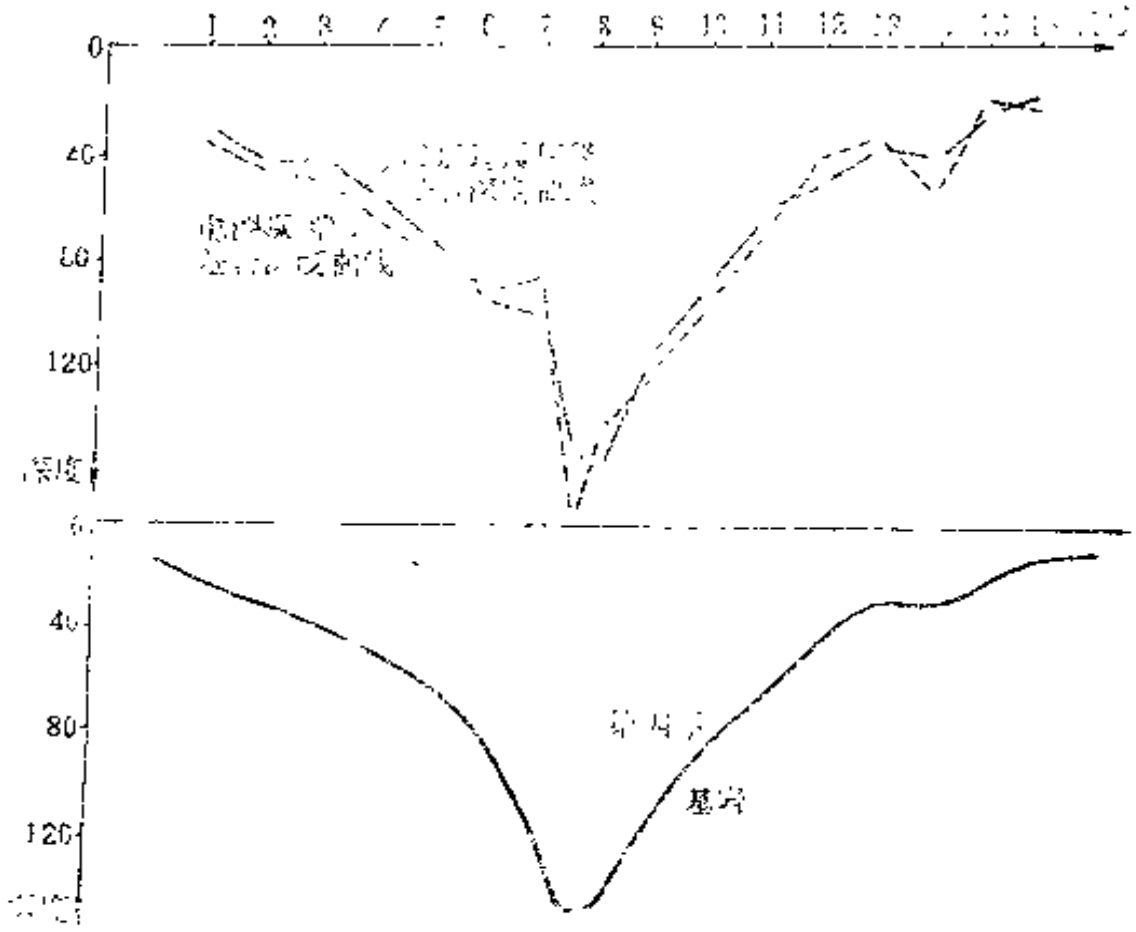


图4-3-7　浅层地震、电测深解释基岩深度对比及推断地质剖面图
（引自潘勇飞）

4．利用物探方法寻找和圈定古河道的位置和范围

一般来说，寻找古河道可用电剖面法、电测深法。当古河道砂砾层有磁铁矿伴生时，也可用磁法来圈定古河道的位置和范围。例如，美国怀俄明州提敦县提敦国家森林区砂金矿就是这种情况。该区古河道砂砾层中有一些磁性矿物富集。在提敦国家森林区化探圈定的已知含金砂矿地区作了磁法和电阻率法测量。该区的底岩为一套晚白垩纪黑尔贝尔（Harebell）地层，即砂岩、砾岩、粘土岩和页岩，厚度超过1219.2m。

在特平（Turpin）牧场地区，先做了四条(T、M、A、B)磁测剖面，发现磁性矿物主要位于布法罗（Buffalo）河现代沉积砂砾中。后又做了十七条近南北向磁测剖面。将磁测数据勾绘成等值线，见图4-3-8。分析图4-3-8可以看出，磁场等值线有效地圈出了磁性矿物的富集带。在河北岸沿剖面磁力高与磁力低的地段采了27个土样测定其磁化率。其结果表明，与河岸一致的磁场等值线与现代磁铁矿沉积有关。河岸45.72m以外地段，样品磁化率与实测磁场强度无关，说明磁场变化是由深部磁源所引起。

在特平牧场地区布置了两个垂向电测深点(VES—1和VES—2），其位置如图4-3-8所示。电测深曲线、推断地电断面及相应岩性示于图4-3-9。

对VES—1测深点的解释表明，根据河流砂砾中含水量的不同及其粘土与其它细粒物质含量的差异，可将河流的沉积层分为三层性质不同的电性层，自上而下电阻率逐渐减小。基岩表面（第四层）的埋深为82.3m(270ft)。由于该区没有足够的水井配合电阻率资料解释，因此第四层就只能被推断为黑尔贝尔地层。测深点VES—2所反映最上层的地电特征与VES—1有明显差异。VES—2所处地表平坦，是古湖床。地表层可视为粉砂层，根据测深资料推断厚度为45.7m(150ft)的砂。基岩（黑尔贝尔地层）的顶部埋深为53.3m（175ft）。其上为厚45.7m（150ft）的砂、粘土及砾石所覆盖。此盖层与VES—1的砂、粘土和砾石的电阻率类似。

对特平牧场地区各种资料的综合分析表明，大量磁性矿物赋存在现代河道附近的古河道砾石中。土壤样品尤其有助于区分现代磁铁矿沉积引起的异常和深部磁铁矿富集引起的磁异

常。VES—1测深曲线说明，在主河道附近基岩的埋深为82.3（270ft）。如果解释数据符合实际，则该区金矿物富集部位无法用现有采金船进行开采。

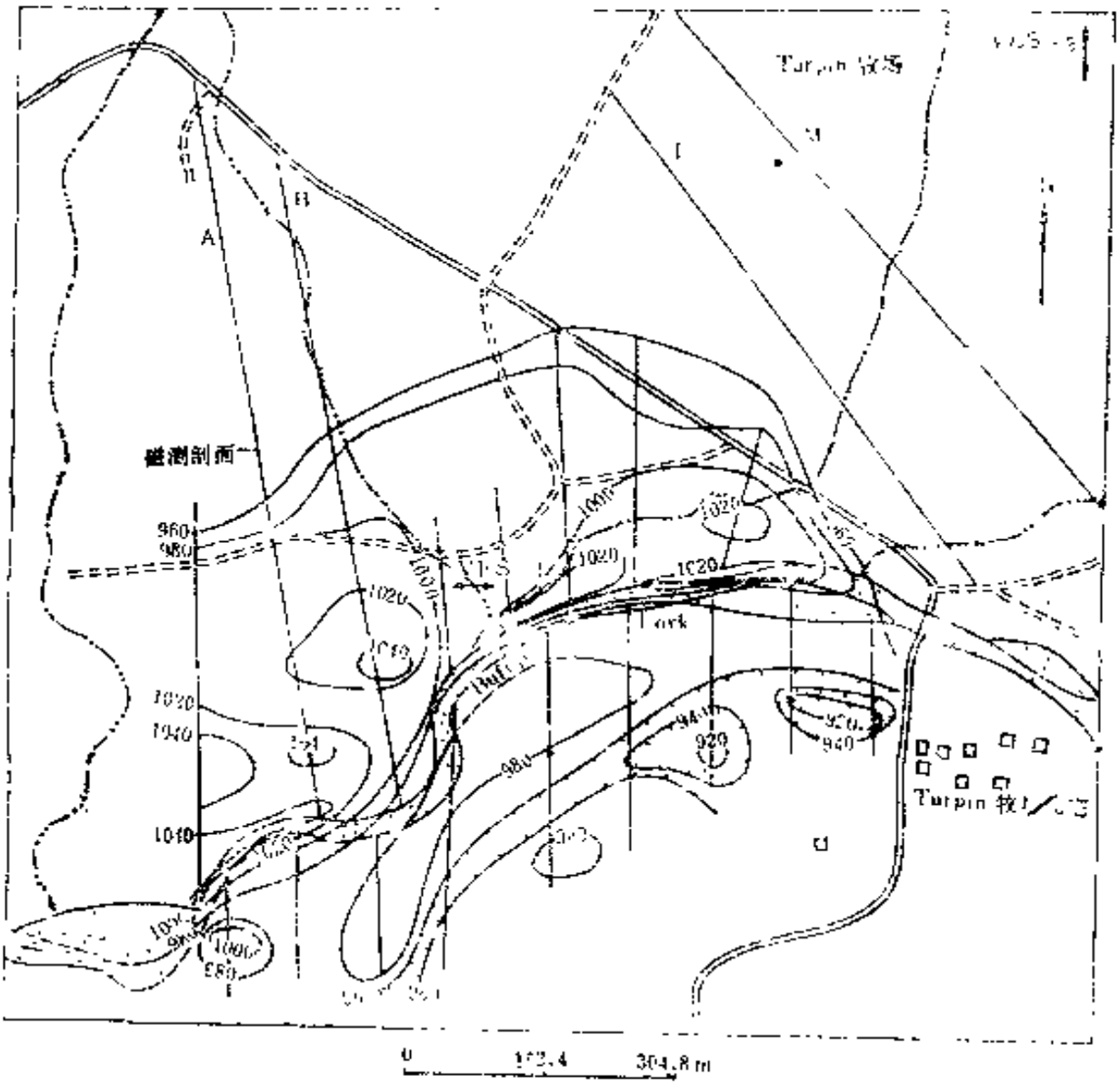


图4-3-8　特平牧场勘探区磁测剖面分布及总磁场等值线图
（引自L. A. Anderson）

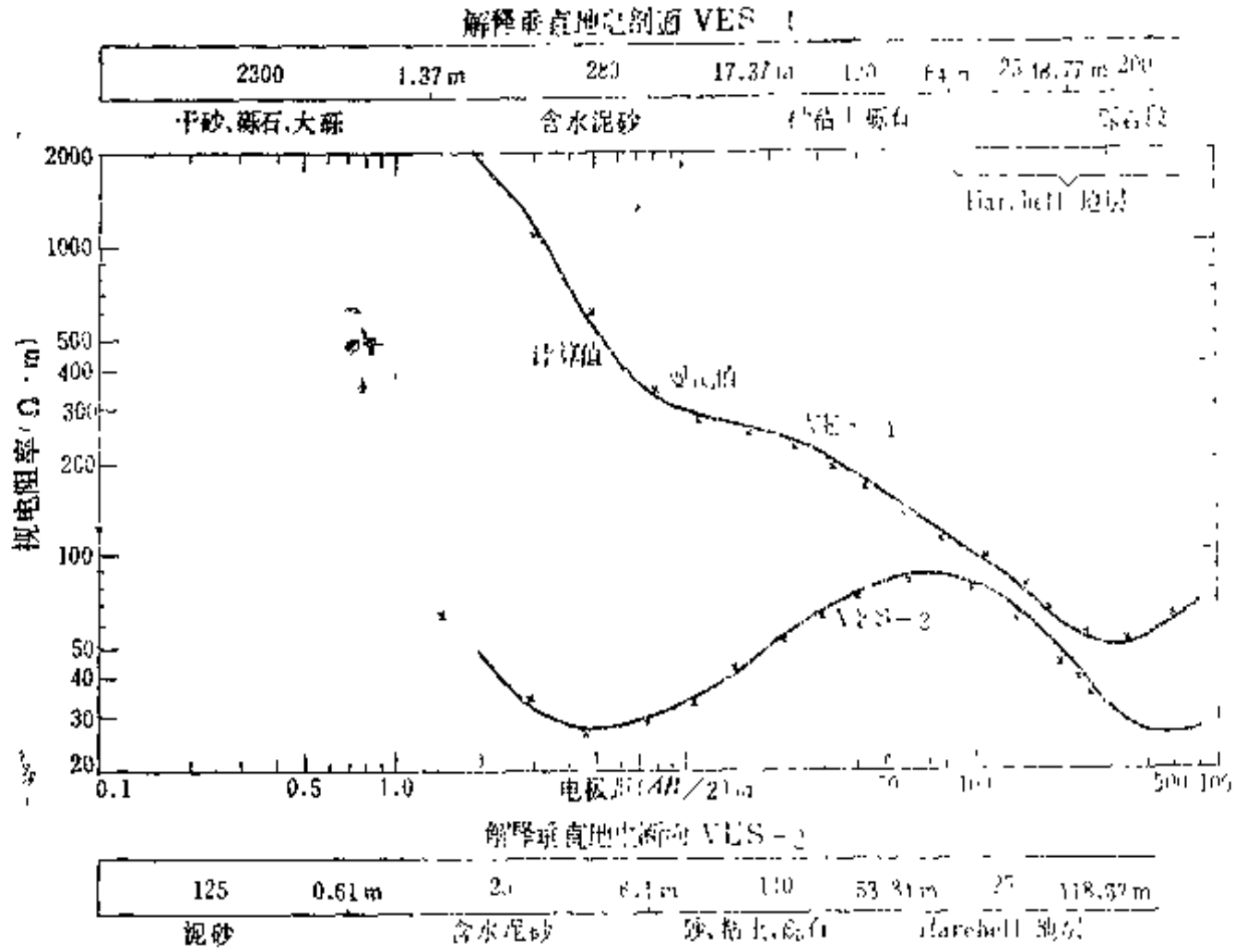


图4-3-9　特平牧场勘探区垂直电测深曲线、柱状图及岩性（引自L. A. Anderson）

三、利用物探方法可以研究河底基岩中的地质构造、岩性及地层等，了解它们与金矿富集的关系。例如，金往往富集于砾岩层的底部，因此它与比重较大的暗黑色含铁镁的砾岩或含铁锈水的砾岩有关；河底部的金常富集于较软的粘土、页岩和砂岩、泥岩构成的凹陷地槽谷处……等。

四、在已圈定的有希望地区外围继续开展物探及小极距地电化学提取法工作，扩大含金砂体的范围和增加储量以及发现新的含金砂体。

五、根据已发现的砂金矿床，沿水系向上游追根求源，寻找可能存在的原生金矿床。

前面已经讨论了在寻找砂金矿床时物探方法的效能，但是寻找砂金矿床也必须依靠综合手段，即地质、物探和化探紧密配合，扬长避短，才能取得较好的找矿效果。

第五章　地、物、化探综合方法在寻找金矿床中的效能

众所周知，地质、地球物理、地球化学是地学中的三大支柱。以往，三种方法紧密配合为解决一些重大的基础地质问题、深部地质问题和找矿问题做出了重大贡献。我们相信，在寻找金矿床的工作中，只要三种方法紧密配合，扬长避短，就可以大大加速金矿地质工作的进程，缩短找矿工作周期，提高寻找金矿的找矿效果和经济效益。

§5.1　概　　况

我国的物探工作开始于解放前，化探工作开始于50年代初，1953年初开始成立一些专门的化探机构和野外队的化探组。和苏联情况相似，我国最初的化探工作也是在物探队中进行的，两种方法密切配合。随着化探事业的发展，地质效果越来越明显，化探队伍不断扩大，全国各地化探队相应成立，这就进一步促进了化探事业的发展。但是也随之带来一定的问题，即物探与化探方法分别独立进行工作，彼此配合不如以前紧密，仅有的联系是互相利用资料，甚至连这一点也很难做到。这势必给工作带来不利影响。

1975年以来，在我国逐渐掀起了群众性找金热潮，例如，地质系统、冶金系统、有色金属系统、武警部队及区县都积极

从事找金的地质工作。物探、化探方法的应用愈来愈多，物化探工作如何有机地紧密配合，已成为提高寻找金矿床地质效果的重要问题。目前我国一些重要金矿床的发现，物化探方法都起了一定作用或重要作用，有的重要金矿床的发现化探起了重要作用，有的则是物探起了重要作用。总之，物探、化探是当前综合信息找矿中必不可少的重要方法。

物探、化探相互配合情况也与我国过去找矿的历史状况有关，1975年以前，主要是寻找铁矿和多金属矿等，根据所寻找的地质目标曾进行了不同程度的物化探工作。1975年以后，国家要求大力寻找金矿床时，人们根据以往工作获得的地质情况，在一些已经找到或未找到铁、多金属矿区或工区基础上开展找金工作，以前作过物探工作的，现在需要做化探的就补做化探工作；以前做过化探工作的，现在需要做物探的就补做物探工作；个别情况为重新开展物化探工作。

例如，黑龙江老柞山金矿床的发现就是如此。1979年以前，主要在该区寻找铁矿，对找金工作未予重视。1979年以后，在采砂金的井底部发现有含金属矿物的矿化破碎带，其中主要矿物是方铅矿和闪锌矿，进而又发现该带中的矿物有磁性。1979年9月后开展了物化探面积工作，磁法、化探均有异常。化探异常(铜)揭露后发现铜矿。1980年中又进一步开展1:5万的地、物、化工作(11.4km²)。自电、次生晕砷均有异常，经揭露发现多个金铜矿体。至此，有名的老柞山金矿床就被陆续揭露出来了。又如，湖北大冶陈子山金矿床，1966～1976年，在该区施工钻孔10个，验证磁异常，寻找磁铁矿；1977～1981年为寻找斑岩铜矿阶段：该阶段施工钻孔15个验证激电、化探异常，未见工业矿体，仅见分散矿化；1981年底转入找

金：依1:20万分散流提供信息，经取样分析，发现铁帽、硅质岩带普遍含金。1982年5月开始钻探，最后发现了该金矿床。

1984年潘勇飞同志提出了物、化探工作相互配合的五套工作程序：其一是，同时开展中比例尺、同网度的综合物探工作和化探面积工作；其二是，先开展中比例尺、同网度的综合物探方法，然后在异常范围内进行次生晕测量；其三是，先开展中比例尺次生晕普查，在次生晕异常范围内开展大比例尺综合物探工作；其四是，在地质条件不清情况下，先开展分散流法确定靶区，然后利用上述任一套程序在靶区中进行工作；其五是，在控矿断裂带上，先开展电阻率联合剖面法和磁法，圈定断裂带，在此基础上，再开展激电法和自然电场法测量，最后进行化探工作。

以上物化探工作配合的五套工作程序，虽然对金矿物、化探工作者有一定参考价值，但它仅是寻找金矿床中的中间环节物、化探的互相配合，而不是在寻找金矿床的全过程中物、化探方法的配合。

本章中将要讨论的是在寻找金矿床的全过程中物、化探的相互配合，而且还要考虑到物、化探与地质紧密配合。

§5.2 合理利用地、物、化综合方法是当前寻找金矿床的有效途径

从金矿地质学中知道，不同类型金矿床产生在不同地质环境中，它们都与深部、区域、局部构造断裂带、矿源层、各种岩体、地层等有着不同的关系。因此，若要寻找个矿床就必须解决与金

矿成矿有关的各种各样的地质问题，研究成矿元素及与成矿元素共生的伴生元素的分布规律、富集特点、与各种地质构造间的关系。在解决与成矿有关的地质问题过程中，除了地质手段之外，物探、化探是解决这些问题的主要的、必不可少的手段。若没有地质工作，就不能了解金矿的形成条件和环境，也就不知道有哪些地质问题需要解决，物探、化探方法尽管有解决各种地质问题的能力，但也无用武之地，即便是开展物化探工作，也是盲目的，不会取得好的地质效果。这充分说明，物化探工作不能脱离地质工作，必须与地质工作紧密配合，以地质工作为基础。反过来，地质工作也不能脱离物化探工作，目前地表出露的金矿体和浅部赋存的金矿体愈来愈少，人们不得不把找金的注意力集中到寻找深部隐伏金矿床，在这种情况下，单纯依靠地质手段难以适应当前寻找金矿床的新形势，也无法实现寻找深部隐伏金矿床的战略目标。只有物探、化探方法才能解决用地质手段无法解决的与成矿有关的深部问题、基础地质问题、覆盖区地质构造问题以及成矿元素、伴生元素的分布规律。离开物化探工作，单纯地质手段对上述地质问题将束手无策。因此，我们认为：在从寻找金矿床开始，直到获得工业储量金的全过程中，必须以地质工作为基础，地质、地球物理、地球化学方法紧密结合，物、化探方法合理综合，发挥各种方法的优势和特点，综合分析和研究各种方法提供的信息，才能达到最后找到金矿的目的。

一、化探寻找金矿床的优势和局限性

分析技术的不断提高，促使化探找金工作的迅速发展。目前化探在找金工作中应用广泛，效果明显，受到了金矿地质工

作者的普遍重视。在寻找金矿床的过程中，化探的优势及所能解决的地质问题如下。

1．化探找金的直接性—以金找金：由于分析技术的提高，人们可以直接分析化探样品中的痕量金，使化探摆脱了间接找金的被动局面，实现了化探直接找金的愿望，大大提高了化探找金的作用、地位和地质效果，开拓了化探的应用前景。相对物探而言，直接找金是化探的主要优势。

2．伴生元素找金的间接性—以伴生元素找金：众所周知，金常常与一些元素(Ag、Hg、As、Cu、Pb、Zn、Bi、W、Mo等)密切共生，故在寻找金矿床时，除了分析金之外，同时要分析和研究与金矿密切共生的伴生元素。以伴生元素的分布规律寻找金矿床，是一种间接找金的办法。目前，在化探找金的过程中，同时分析和研究金元素和伴生元素的分布规律，实际上是将直接找金与间接找金密切结合起来，充分利用直接找矿信息和间接找矿信息，以提高找金矿的地质效果。

3．根据原生晕异常或次生晕异常查明金矿床的剥蚀程度：在金矿床形成的同时或后期，矿体周围空间直至土壤中形成矿化晕，在矿体前缘、矿体中、矿尾，各种元素的组合是不同的，具有明显的分带性。根据矿化晕垂直分带性可以判断矿体的剥蚀程度，即现有矿体是矿体的上部还是下部或尾部。

4．依据矿化晕的垂直分带性寻找深部盲矿体。

5．研究金矿床的成因及成矿的条件、环境等。

化探找金矿虽有其优势，但也存在局限性，主要局限性有：

1．尽管化探虽能直接找金，但不易解决深部基础地质问题、深部构造、局部构造及各种构造间的相互关系，也不能确定含金体的形状、产状、倾向、埋深等。

2. 化探找矿有时受自然条件的影响很大（例如，第四纪覆盖很厚的地区等），并不是任何地区都能顺利开展化探工作。

二、物探寻找金矿床的优势和局限性

本书前几章已较全面、系统地阐述了物探方法寻找金矿床的优势和局限性，简言之，物探方法寻找金矿床的主要局限性是，物探不是直接找金的方法，而是一种间接找金的方法。其优势是，它主要用来解决从远景靶区选择、区域普查找矿、勘探靶区的选择、勘探阶段与金矿成矿有关的各种地质问题，尤其是在解决深部的地质构造及含金地质体的形状、规模、产状及埋深等问题效果更好。与化探方法相比较，化探找金的优势正是物探方法寻找金矿床的劣势之处；化探找金的劣势处正是物探方法寻找金矿床的优势。可见，物探与化探方法在寻找金矿床方面各有其特点和优缺点，只有物探与化探两种方法紧密配合，合理使用，才能扬长避短，发挥各种方法的特长，提高物化探方法寻找金矿床的地质效果。物探与化探方法紧密配合是当前寻找深部隐伏金矿床的需要，也是这两种方法本身的特点所决定的。

§5.3 地质、物探、化探综合方法寻找内生金矿床的找矿模式

在第三章中我们讨论了物探方法寻找金矿床的找矿模式，那是单一方法间接找金的找矿模式，因而其局限性较大。目前在寻找金矿床的过程中，物 化探工作互相配合，同期进行，

或先后进行，因此有必要研究出地质、物探、化探综合方法寻找金矿床的找矿模式，确切一点说，是寻找金矿床的工作程序。

本节中所提出的综合地质、物、化探方法寻找金矿的找矿模式的指导思想是：以地质工作作为寻找金矿床的基础或主导，物探与化探方法作为地质工作的“左膀”“右臂”，密切配合，地质、物探、化探方法，发挥各种方法的优势，取长补短，使其真正成为寻找金矿床的综合信息找矿的主要方法。根据这一指导思想，我们建立了地质、物探、化探综合方法寻找金矿床的找矿模式，见图5-3-1。这一“模式”使“综合方法”贯穿于寻找金矿床的全过程，即从远景靶区的选择到矿区的勘探，直至找到有工业价值的金矿体，同时也体现了寻找金矿床工作的阶段性及寻找金矿的直接性。

一、金矿成矿远景预测阶段

在此阶段中，首先根据1:20万～1:50万区域地质调查结果，综合各种类型金矿床的成矿条件和环境，提出可能的成矿远景区。根据1:20万～1:100万地球物理资料，划分出莫霍面变异带、地壳厚度中等地区或深大断裂交汇处。在物探划分出的有利构造部位，有区域性金元素异常，或有与金共生的伴生元素异常，或金与伴生元素均有。这些部位便是要选择的金矿成矿远景靶区。

二、金矿成矿远景区的缩小

前一阶段确定的金矿成矿远景区的面积往往是很大的。为了缩小找金矿的靶区，应在远景区中进一步开展地质、物探、化

探工作，例如，开展1:5万～1:10万的区域地质普查工作；1:5万～1:10万区域性重、磁测量以及化探分散流或次生晕工作。综合分析地、物、化信息，就可在成矿远景区中选择出供进一步工作的找矿靶区。

三、勘探靶区的选择

此阶段是找金工作的关键一步，要求各项工作都要深入细致，反复推敲，选准靶区。在已缩小的靶区中进一步开展局部地区的地质普查、综合物探详查以及地球化学详查工作。在此阶段，由物探工作圈出与成矿有关的次级构造破碎带及构造交汇部位，圈出不同岩性接触带（如火成岩与沉积岩接触带等）；圈出与金共生的硫化物矿化带、矿化富集地段及蚀变带；圈出与金矿有关的石英脉或石英脉群、火成岩脉、其它标志层（如与金有关的石墨化、碳质地层等）、含铁建造地层；确定可能含金体的大致范围、规模、走向、产状及埋深。若在物探异常区有明显的局部金异常和伴生元素异常，表明这一地段下面有含金硫化物地质体、或含金石英脉、或含金的含铁建造地层，这些地段可选作勘探靶区。

四、勘探阶段

此阶段主要为地质工作和钻探、山地工作。例如，物、化探详查可为勘探设计提供有益资料，有条件的情况下，地下物探协助圈定矿体的形态和几个矿体间的连接问题等。化探可以进一步寻找深部盲矿体，扩大矿区储量等。物、化探协助寻找探矿工程间有遗漏的矿体或盲矿体等。

由上述分析可见，物探、化探是寻找金矿床中必不可少的两

种主要方法，它们可用于寻找金矿床的全过程中，在不同的找矿阶段可以解决不同的地质问题。

§5.4 地质、物探、化探综合方法寻找砂金矿床的找矿模式

众所周知，砂金矿床形成的条件和环境与内生金矿床截然不同，因此，地、物、化综合方法寻找砂金矿床的找矿模式与图5-3-1所示的“模式”既有类似之处，也有不同之点。

图5-4-1给出了地、物、化综合方法寻找砂金矿床的找矿模式。可以看出该“模式”具有以下特点。

1．在寻找砂金矿床时，应用的主要方法是地质和化探，物探方法应用相对较少，仅在确定含金砂体的范围、厚度等阶段，解决与砂金成矿和富集有关的地质问题，而在前两个阶段和钻探阶段，物探方法难以发挥作用。

2．寻找砂金矿床的地质工作，以调查和研究第四纪地质为主要内容，这与图5-3-1中所示“模式”有所不同。化探以分散流为其主要工作方法，这与§5.3中所示的“模式”也有不同。寻找砂金矿床的“模式”相对简单一点。

3．寻找砂金矿床时，应用的物探方法主要有：浅层地震法、电阻率测深法，有时也用电剖面法、磁法和重力。

第六章　寻找金矿床的物探新方法

在寻找金矿床的过程中，人们除了应用常规的物探方法之外，为了取得更好的地质效果，人们正在积极进行研究找金的新方法，或者说是由不同找矿方法间的相互结合而形成各种找金矿的新手段。例如，地电化学提取法就是化探与电法勘探相结合的一种直接找金的新方法等。这些新方法具有常规物探方法不具备的优点，能解决常规物探方法不易解决的一些地质问题。为了提高我国金矿物探的水平和地质效果，应积极引进、研究、推广新方法和新技术。本章中将介绍几种新方法供大家参考。

§6.1　压电勘探法

一、概述

物理学家皮里·居理和矿物学家杰克·居里兄弟二人，在1880年首先研究和发现了晶体的压电效应，同时指出了压电效应是晶体物质在机械形变下的电极化现象。此后许多科学家和研究人员进一步研究了矿物和岩石在不同条件下的压电性，对一系列的理论问题和实际问题进行了研究。本世纪50年代至80年代，苏联陆续研制出了不同型号的压电法仪器，这些仪器已用于生产，取得了一定的地质效果和经济效益，并获得专利权

（专利号为174380）。

欧美一些国家也相继对压电法在理论上进行研究和生产实践，但效果不如苏联明显。

我国地质矿产部地质科学研究院矿床所对压电法进行了理论和实验研究，试制了仪器，取得明显进展。目前正处在进一步的研究之中。

压电法是勘探金属矿床的一种有效方法。苏联在远东地区，用1:5千比例尺勘探某云母伟晶岩，用ДОЭФ-2M仪器进行压电法系统测量，由于减少了坑探和钻探工作，一年节省4.8万卢布。在马克兰某伟晶岩矿区，同时应用了压电法和X射线透视法，该地质队的报告中认为，使用一台仪器一年可节省41万卢布。在苏联DOKYT矿床，物探队根据压电法资料提出了211项有关验证建议，经矿山坑道和钻探验证结果仅有5%有误。有误的主要原因是岩脉形态不规则，因而使验证失误。

目前压电法主要用于具有明显压电性的矿种和矿床，即用于伟晶岩型、石英脉型矿床，如金、钨、锡、钼、稀有和稀土等矿种。压电法信号小，要求仪器精度高。压电法的装备相当于一个小型地震队和电法队的装备，在进行炸药爆炸激震之后，同时进行电位测量和多道地震记录。工作效率低，成本高。

二、压电法的基本原理

1．基本概念

压电性：某些矿物晶体在机械的压力和张力作用的影响下，因变形效应而呈现荷电性质，称为压电性。

压电效应：矿物晶体在机械力压缩时发生正电荷的部位，在伸张时就发生负电荷，在机械地一压一张的相互不断作用

下，就可以产生一个交变电场，这种效应称为压电效应（图6-1-1）。

电致伸缩：将具有压电性的矿物晶体放在一个交变电场中，它就会产生一伸一缩的机械振动，这种效应称为电致伸缩。当交变场的频率与压电性矿物晶体本身机械振动的频率一致时，就会产生特别强烈的共振现象。

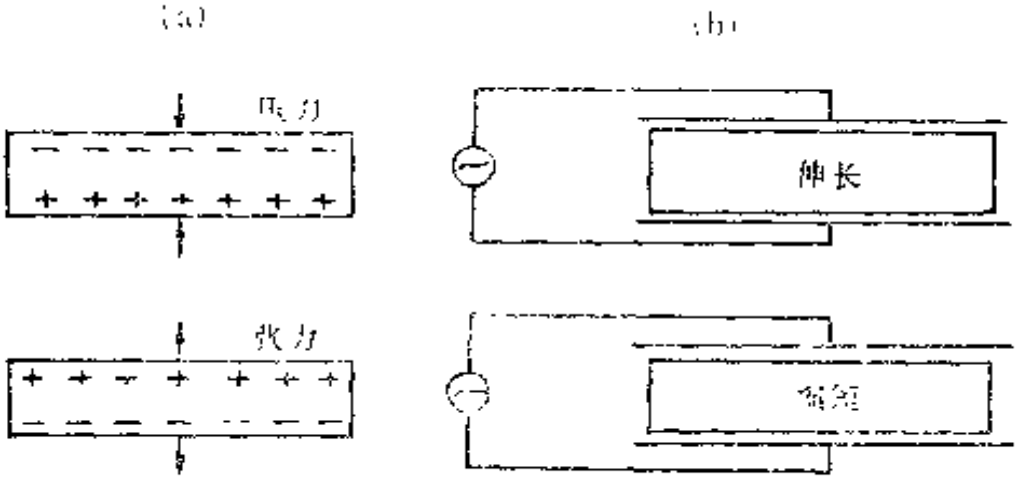


图6-1-1　压电效应和电致伸缩效应示意图

(a)压电效应；　(b)电致伸缩

2．压电勘探法的基本原理

苏联等国学者研究结果表明：矿物的压电性只发生在无对称中心，具有极性轴（晶体中不能借助于对称要素的作用而使其两端相互重复的轴）的各晶类的矿物中，即自然界中只有部分矿物具有压电性，例如α-石英、电气石、钠沸石、方硼石等。压电效应除了用于现代技术中（例如电子技术）之外，还可用于地质勘探。压电勘探法正是压电效应在地质勘探中的应用。

压电勘探法，是以地壳中岩、矿石的压电性差异为地球物理前提，用人工方法产生一个弹性波，引起具有压电性矿物晶体体积形变而产生电荷化现象，在地表或地下接收、记录和研究压电性矿物晶体所产生的压电场和地震波的分布规律，以达到寻找和圈定与压电性矿物伴生的有经济价值的稀有金属矿床，这种方法称为压电勘探法或压电法。

目前，压电法中的弹性波多采用炸药震源。当用雷管引爆炸药包后，药包附近的岩石因炸药爆炸而破碎、挤压，形成一个实际空穴。在实际空穴外围还有一系列裂缝的塑性及非线性形变带，此带与实际空穴总称为等效空穴。

等效空穴边缘的质点，在爆炸脉冲的挤压下偏离了自己的平衡位置。脉冲过去后，这些质点将大致经历一个迅速衰减的阻尼弹动过程，很快回到其平衡位置。这就是原始的地震子波。爆弹脉冲引起的等效空穴边缘处介质的阻尼振动，将沿地震射线传向四面八方，形成地震弹性波。

由于爆炸主要产生纵波，又称p波。它以体积形变（即拉伸与挤压形变）在介质中传递。该波的传播方向和质点振动的方向一致（图6-1-2）。在纵波经过的扰动带内，会间隔地出现膨胀（稀疏）带和压缩（稠密）带，故纵波有时也叫疏密波或压缩波。用地震纵波激震具有压电性的矿物，就会使压电矿物受到压、伸力的重复作用而产生压电效应。

α-石英晶体无对称中心，具有极性轴，故有明显的压电性。α-石英晶体属三方晶系（D_3^4—$P3_121$ 或 D_3^6—$P3_221$；$a=0.4913$nm、$b=0.5405$nm；$z=3$）。石英是许多岩石的成岩矿物，含有石英的岩石在地壳中占显要地位；石英与金、钨、锡、钼和稀有元素矿床以及水晶、云母和萤石等矿产的关系十

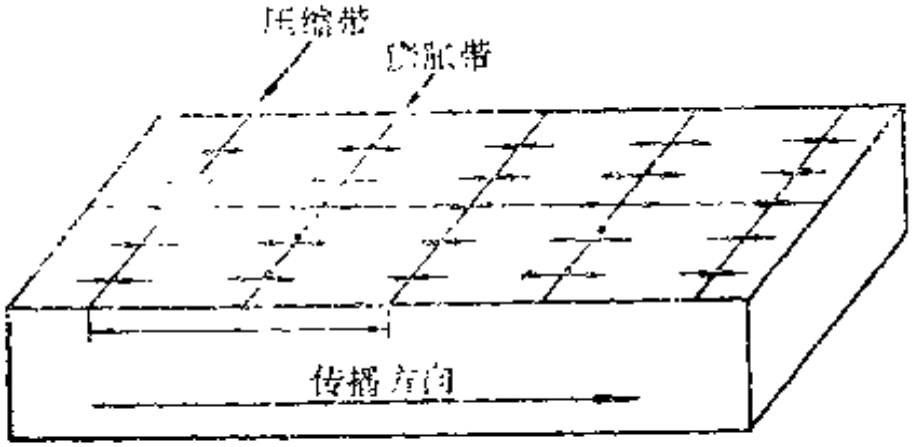


图6-1-2　地震纵波的传播情况

分密切。例如，石英脉型金矿床是我国金矿床中最常见的一种典型金矿床，它分布广、数量多，形态各异（大脉、网脉、细脉、复脉等），赋存条件也较复杂，是目前我国寻找的主要金矿类型之一。作为物探方法而言，对贫硫化物含金石英细脉或小脉一直效果不好，甚至无能为力。研究石英的压电效应，对寻找贫硫化物含金石英脉金矿床是很有意义的。

当地震纵波沿a-石英x轴压电后，在其相对的两个界面上出现符号相反的电荷（图6-1-1），界面上的面电荷密度与作用在压电矿物上的外力成正比，即

$$q=d\cdot F$$

式中q——面电荷密度；F——作用于矿物晶体上的外加应力；d——比例系数，又称压电模数。上式表明，外加应力越强，压电矿物晶体表面产生的面电荷密度就越大，压电效应越明显，反之则弱。上式既所谓居理第一定律。

在上式中，当$F=1$时，上式变为

$$q = d$$

即压电模数为单位外加应力作用下的面电荷密度，它主要取决于晶体本身结构和压电性质。d是个张量，在不同方向上压电模数的分量不同。d在有理化SI单位制中的单位为库伦/牛顿，在CGS单位制中为静电单位/达因。

在寻找含金石英脉金矿床时，压电模数d与石英脉中金含量有什么关系呢？图6-1-3和图6-1-4给出了苏联某硫化物石英脉型金矿床上石英压电模数与含金量的关系。为了确定不同时代石英的压电模数，沿矿体走向和倾向每隔50～100m采集定

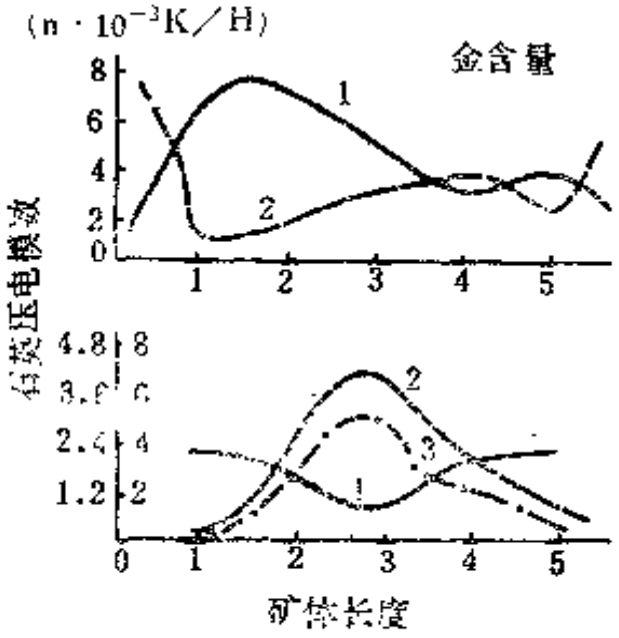


图6-1-3 在某硫化物石英脉型金矿床岩墙（Ⅰ）和岩脉（Ⅱ）上沿矿体走向的参数变化
1-矿石中金的含量；2-压电模数；3-厚度

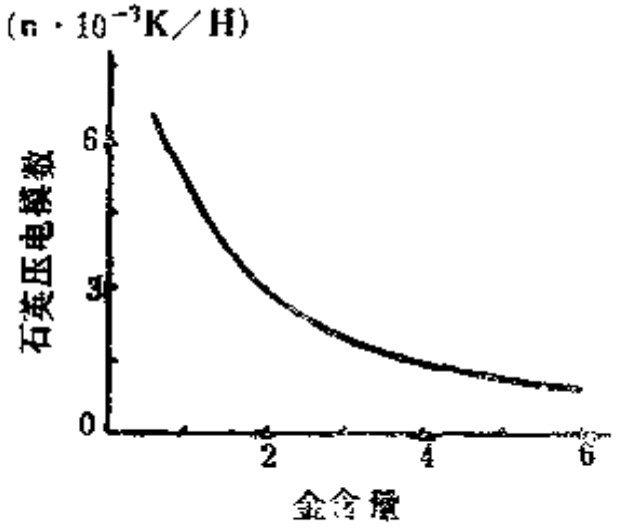


图6-1-4 岩墙型矿床上石英的压电模数与矿石中含金量的相关性

向标本，然后做成边长为3cm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。经计算其数值为6.6×10^{-13}C/N。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$1\times10^{-13}\sim7.2\times10^{-13}$C/N。

分析图6-1-3可见，石英压电模数与矿石中金的含量具有相反的关系，即石英压电模数小处金含量高，d大处金含量反而低。从图6-1-4中更清楚地表明了这一点，随金含量的增加d逐渐减小。通过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预测评价，并可以帮助确定钻孔穿过的石英脉是否含矿。

压电法可分为地面和地下（井中和坑道中）两类。当α-石英类岩、矿石在地震纵波的激发下产生交变电场和地震波时，人们便可在地表、地下（井中或坑道中）记录压电场讯号和地震讯号，并将这些记录结果整理成相应图件进行解释。压电法的资料解释，主要是利用压电讯号和地震讯号的运动学和动力学特征。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讯号的幅值、波形、频率和持续时间。

在解释地面测量的压电法资料时，主要利用压电讯号和地震讯号的动力学特征，即将从压电图上计算得到的压电讯号与地震讯号的振幅比作为纵坐标，将爆破点与电极之间距离为横坐标而绘制成图，也可直接利用压电场的振幅（$Apef$）做图。根据几条剖面上的曲线可以确定出压电体的大致位置。在解释井中和坑道中测量的资料时，主要利用一种较直观的方法，即以炮点为中心，弹性波速度与压电讯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。

3．压电勘探法在寻找金矿床中的效能

（1）压电法的野外工作

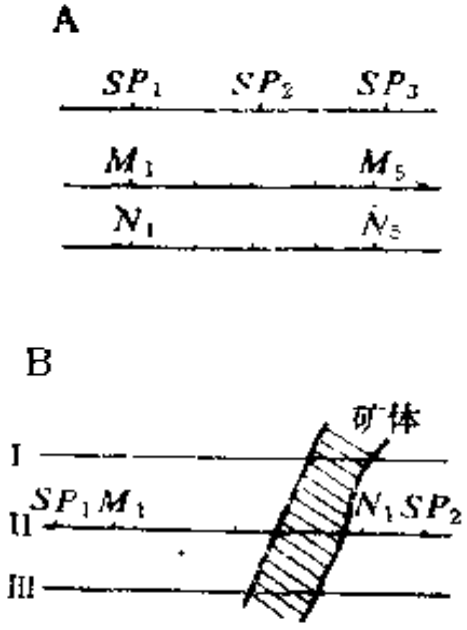


图6-1-5 压电法地面测量示意图
A—交叉爆破测量；
B—同线爆破测量；
C—圆周爆破测量；
SP—爆破点；
MN—电压测量点

地面测量的排列方式有交叉爆破测量、同线爆破测量和圆周爆破测量（图6-1-5）。进行野外测量时，分析使用电极和检波器来接收压电讯号和地震讯号。压电法震源主要是采用炸药。

压电法使用的仪器有60年代研制的8СЭФ-2M型车载地面和坑道仪器，目前仍在使用；70年代研制的石英-1型测站仪，用于地面和钻孔测量，是目前常用的一种压电法测量仪器；80年代研制的12道的地面、地下、井中多用的ИСЭЛ-12型压电仪。这种仪器的优点是频率范围较宽，抗干扰能力强，有利于在弱压电性矿床上进行工作。

（2）压电法所能解决的地质问题

地面测量所能解决的地质问题：

i．寻找压电性矿体；

ii．追索已发现的压电体并圈定其边界；

iii. 区分由其它物化探方法圈出的异常；

iv. 对不同的压电性岩石进行填图。

井中、坑道中压电测量所能解决的地质问题：

i. 寻找井旁、井间、坑道周围、坑道间的压电体；

ii. 正确评价和圈定钻孔打到的压电体，并确定其产状要素；

iii. 圈定石英脉、伟晶岩脉和其它压电体的边界；

iv. 评价其它物化探方法发现的异常。

（3）应用实例

压电法可应用于普查、勘探及开采阶段。下面介绍几个实例。

图6-1-6给出了卡累利阿地区压电效应的幅值曲线。含有

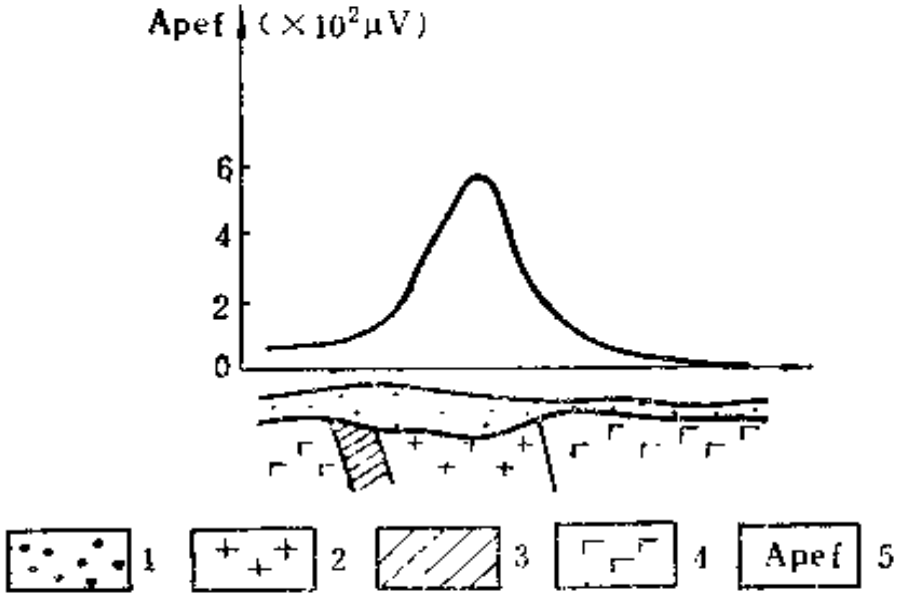


图6-1-6 卡里利阿压电效应幅值曲线

1-第四系；2-石英伟晶岩；3-闪石化基性岩；

4-二长基性岩； 5-压电场幅值

石英条带的伟晶岩脉长达数百米，宽3～5m左右，向下延深30余米，第四纪覆盖厚30m左右。爆破点到矿体距离25m，炸药重1kg，最大偏移距离约105m。在该处研究证实地面测量和地下成果一致。由图6-1-6可见，在石英伟晶岩脉上，记录到了强度达750μV的压电场的幅值，背景值小于100μV。此结果清楚地反映了石英伟晶岩的存在，可依压电场幅值极大值坐标确定脉的顶端位置。该试验证实了压电异常强度与地质体厚度、围岩性质和石英核等有关。

图6-1-7和图6-1-8分别给出了苏联某矿区压电场的幅值曲线$Apef$和压电场幅值$Apef$与地震信号幅值Asf比值曲线($Apef/Asf$)。由图6-1-7和图6-1-8可以看出，无论是压电场的幅值曲线，还是$Apef/Asf$比值曲线，在石英伟晶岩脉上均出现非常明显的极大型异常，其位置与脉状体顶端吻合。若在几条剖面上绘制此类曲线，能圈定出压电矿体位置的大致范围。确定压电体位置时，经常绘制以下三种曲线：动态曲线、自动记录的时距曲线以及后方交绘法曲线。

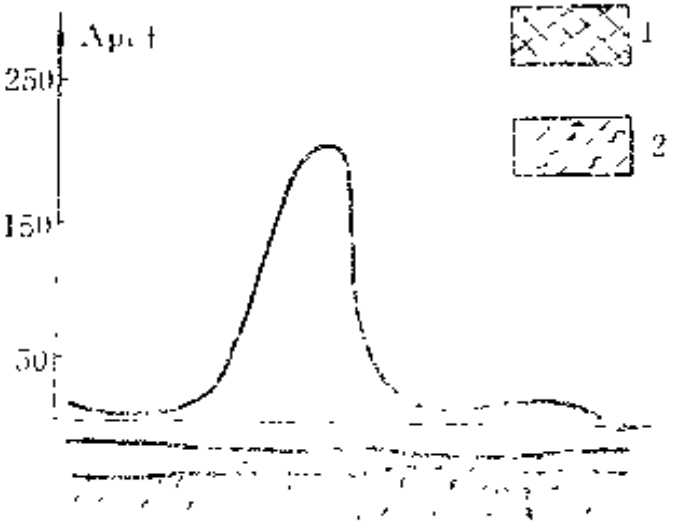


图6-1-7　苏联某矿区压电场幅值曲线$Apef$示意图

1-阳起石片岩；2-黑云母片岩；其它符号同图6-1-6

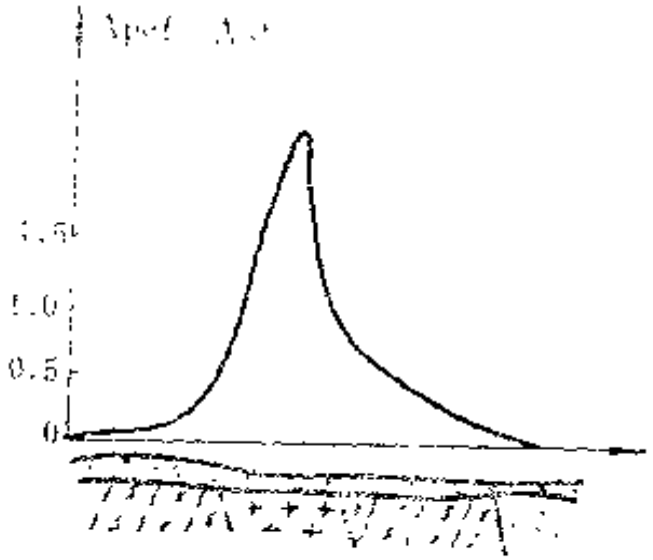


图6-1-8　苏联某矿区$Apef/Asf$比值曲线示意图

图例同图6-1-6、图6-1-7

§6.2　地电化学提取法

地电化学提取法是电法勘探与化探相结合而形成的一种直接找金的新方法。近年来，我国一些生产单位已将该方法用于直接找金的生产实践中，并取得了一定的地质效果。但是，目前对该方法的效能尚缺乏统一认识。这里简单介绍一下该方法的基本原理，讨论一些有关问题。

一、地电化学提取法的提出及概况

众所周知，地球物理勘探方法都是基于研究某一物理参数在人工或天然场作用下引起的物理场的变化。同一地质体可以引起不同性质的物理场变化；不同成分和矿物组合的各种地质体也可引起同一物理参数的物理场变化。虽然能根据这些物理

场的变化或异常寻找和圈定特定条件下地质体的位置、范围、规模、产状及埋深等，但是这些异常与地质体的物质成分、元素组合没有直接的、明确的关系，即根据物理场的变化不能直接判断异常源的物质成分和元素组合。

化探样品是通过在地表土壤中取样（次生晕）和在地表露头、钻孔、坑道、探槽等工程揭露的基岩露头处取样（原生晕），在对这些样品进行化学和其它方法的分析基础上，绘制出各种元素的异常分布图，然后通过深入分析和研究化探异常，解决部分基础地质、找矿、矿床评价及预测等问题。化探是一种轻便、快速的直接找金的方法，但是在某些地区（如覆盖较厚的地区）化探找金矿受到限制。若能将化探与物探方法相互结合，充分发挥两种方法的优势，将会得到令人满意的效果。

60年代末至70年代初苏联列宁格勒的研究人员Ю.С.雷斯等人提出了“部分提取离子法”，并对该方法进行了理论研究和野外试验研究，取得了较好的找矿效果。1973年Ю.С.雷斯和И.С.戈德堡发表了第一篇有关该方法的论文，详细介绍了它的理论原理、野外方法技术及实际成果。B.M.Shmakin以“用于地球化学勘查的稳流电场部分提取金属法”为题，向西方国家和发展中国家介绍了这种方法。

1980年以来，我国南京地质学校费锡铨同志对该方法进行了研究和野外试验工作，得到了地质矿产部的大力支持。近年来我国已有一些单位对该方法进行试验研究和生产，取得了一定的找矿效果。核工业部沈阳地质研究所研制了恒流控制仪及元素接收器，并申请了专利。由于该套设备价格昂贵，购买者不多，目前应用尚不广泛。据了解，地质矿产部物探化探研究所研制了大功率恒流仪，1986年通过鉴定。中国地质大学（武汉）物探

系魏新发等同志研制了中小功率恒流仪。目前恒流仪野外使用不多，主要还是靠人工方法改善接地条件，这给地电化学提取法带来一定影响。

目前，我国开展的地电化学提取法主要是次生晕方式，多用于评价物探异常和直接寻找金矿床。此外，在“六五”期间，物探化探研究所还研究了水电化学法，实际上是将地电化学提取法用于水中进行提取。

地电化学提取法在我国研究应用时间不长，还有许多理论问题、方法技术问题以及提取结果的利用问题需要解决。我们相信，随着科研工作和野外试验研究的深入开展，地电化学提取法将会日趋完善。该方法是在电法和化探基础上，吸收了两种方法的优点形成的，它具有两种方法的部分优点，也有不足之处，故该方法与化探不能互相代替，而应互相配合，在适合每种方法的地区发挥各自的优势，形成多样化的找矿手段。

二、地电化学提取法的基本原理

（一）矿晕模型

从矿产地质学知道，一般金属矿，尤其是热液型金属矿和金矿床，在其形成的同时，会在其周围空间直至地表形成一个范围较大的矿化晕(图6-2-1)，其分布范围与矿床形成时的温度、地质构造、物理化学环境等因素有关。对金矿床而言，高温热液型金矿床能形成完整的、范围较大的矿化晕，并具有分带性；中低温热液型金矿床的矿化晕范围较窄，无明显的分带性。在矿体和矿化晕的不同部位，如在矿体头部、中部和尾部，与金矿床有关的各种元素的组合是不同的。矿化晕中的金元素，有的是以金分子形式赋存于岩石和土壤之中，有的则是

由于各种原因被溶解而以离子形式赋存于岩石和土壤之中，离子形式的金与分子形式的金共存于同一矿化晕空间中。可见，矿化晕实际上是由金的分子晕和离子晕组成的混合晕。地电化学提取法仅提取离子晕中的金离子。

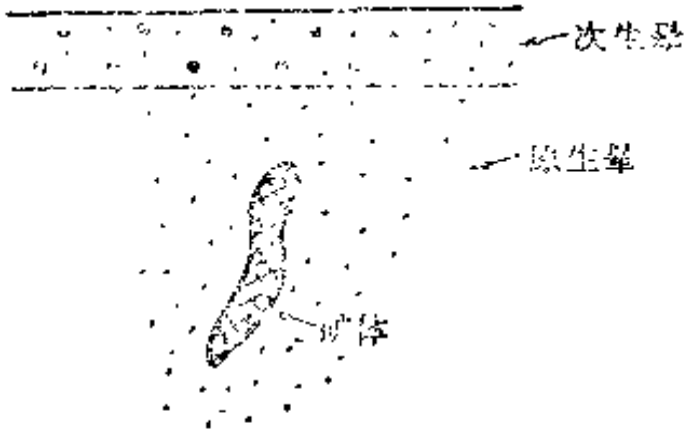


图6-2-1　矿化晕模型示意图

（二）地电化学提取法的提取系统

在上述矿化晕模型上进行激发极化法或电阻率法时，将会获得明显的物探异常，这些异常仅反应异常源的导电性和激电性，而不能反映异常源的物质成分，更不能反映异常源是否含金。为了评价异常源是否含金，可在η_s、ρ_s异常区进行地电化学提取法，具体装置布置如图6-2-2所示。

在需要进行地电化学提取的各点处，埋设石墨棒电极，这些石墨棒电极称为提取电极。将所有提取电极并联后与电源负极连接，∞极与电源正极连接。提取电极、导线、∞极和大地组成回路，接通电源便可进行电提取工作。我们将图6-2-2所示的系统称为电提取系统，或称为多极电提取系统。

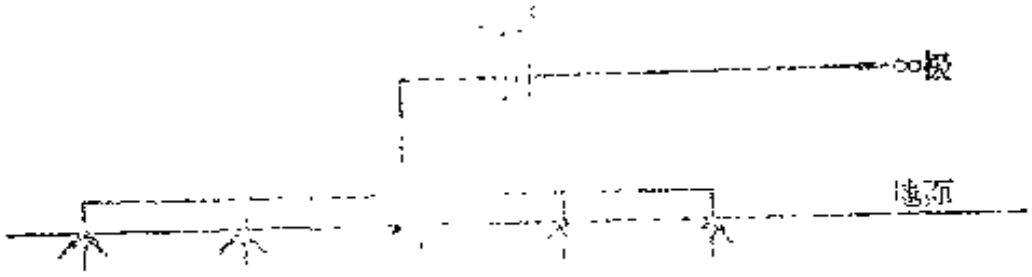


图6-2-2　多极电提取系统示意图

水中电提取法采用的是单极电提取系统，如图6-2-3所示。该系统的特点是提取电极与另一供电电极间距很小（一般为1

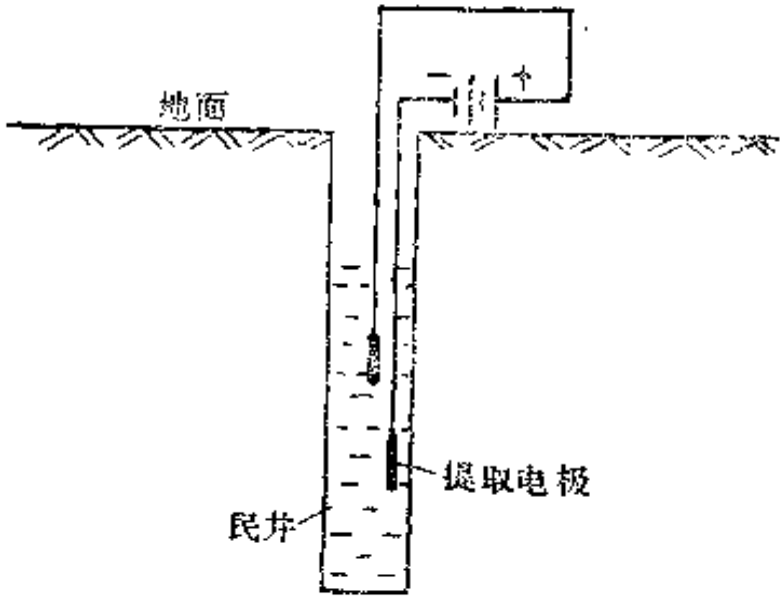


图6-2-3　单极电提取系统示意图

～2m），二者共置于同一民井（或塘、河、泉）中。这一系统主要用于区域性普查找矿，也可用于评价物探异常。

（三）地电化学提取法的提取过程

在图6-2-1所示的矿化晕模型上，布置如图6-2-2所示的多极电提取系统，然后，接通电源，这时大地中便建立起一个稳

定电流场。金的正离子和金的络合物正离子在电场作用下向提取电极方向（电源负极）移动，移至电极上的金离子及金的络合物离子将在电极上析出。我们将供电过程称为提取过程，这一过程往往需要几十小时，甚至更长。供电电流称为提取电流，每个提取电极上通过的提取电流为几十毫安或更大。

地电化学提取法在提取过程中，不仅可提取金离子，而且可提取与金共生的其它各种元素，如Cu、Pb、Zn等离子。除了金矿床之外，对于其它能形成离子晕并能被提取的多金属矿床、铀矿等均可应用该方法。

可见，在提取过程中，地电化学提取法利用了电法的特点，即在地中建立稳定电流场，在这种电流场的作用下，离子发生运动，并在提取电极上浓集，提高了方法的灵敏度。同时，该方法还利用了化探特点，即将电极上提取的元素取下进行化学及其它方法的分析。分析方法与化探方法完全相同，这里不再赘述。

（四）提取结果的图示

所提取样品的分析结果可用各种图件表示，例如，地电化学提取时量曲线（有的文章译为时距曲线）、剖面曲线、平剖曲线及平面等值线图等。

三、地电化学提取法的有关理论问题

地电化学提取法的基本理论苏联研究较多，其它国家研究较少。我国近几年虽已应用该方法进行找金工作，但理论研究较少。这里仅介绍该方法基本理论中的几个问题，供大家参考。

（一）时量曲线与研究对象的成分和结构的关系

为了研究地电化学提取量与所研究对象的成分间的关系，可在图6-2-1所示矿化异常区上，按一定间隔布置元素接收器，然后进行电提取工作。经过一定时间后，从元素接收器中抽出一定体积溶液，分析其中所提取元素的种类和数量。按照上述方法间隔进行，直至供电结束。绘制出提取量m与提取时间t的关系曲线，这种关系曲线称为时量曲线（m-t曲线）（图6-2-4）.

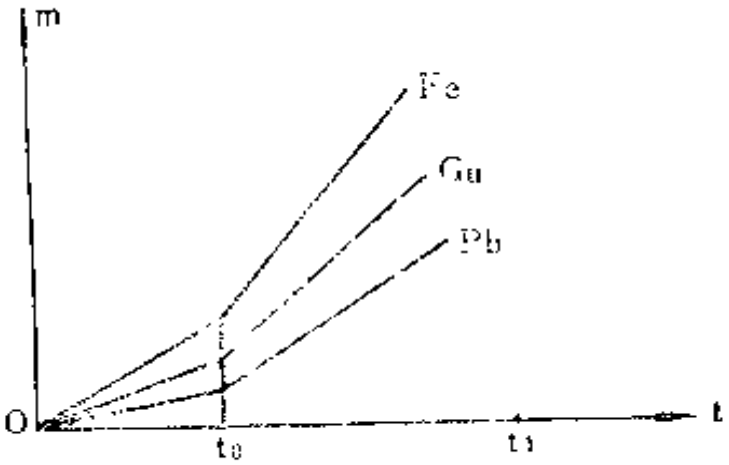


图6-2-4　地电化学提取法时量曲线示意图

时量曲线通常是由2～3个线段组成的。不同元素的时量曲线形态相似，但量值各不相同。时量曲线的每一线段都代表着围岩中一种元素的富集形式。第一段（0～t_0）提取时间短，提取量（m）小，主要提取土壤中的各种离子，故该线段靠近时间轴，斜率系数小（$\partial m/\partial t$小）。第二段（或二段和三段）（t_0～t_1或t_0～t_1～t_2）由于提取时间长，故各元素的相应提取量也增大，故第二段相对第一段数值增大，斜率也增大（斜率除与提取时间长短有关外，还与其它多种因素有关），它对应着从原生晕和矿体中提取的元素。地电化学提取

法中记录时量曲线第一段～第二、三段的工作程式称为基本方式。

地电化学提取法基本方式的主要特点是，它不仅提取了次生晕中的有关元素，而且还提取了深部原生晕和矿体中的有关元素，在有利条件下有可能估计矿体埋深。这种工作方式很麻烦，供电时间需要很长，工作不便，成本高，其地质效果并非提倡者所说的那样理想。看来以提取次生晕中各元素为主要目标的次生晕方式是可取的，这种方式经济、快速、简便。目前我国开展的地电化学提取法多采用次生晕方式。

（二）大地中离子迁移速度及影响因素

地壳中离子迁移速度是地电化学提取法基础理论问题之一。离子在溶液中的迁移速度，化学研究者已经进行了较多的研究，但离子在地壳中的迁移速度却研究得很少，许多问题尚未解决。对地电化学提取法而言，应着重研究含水多孔介质中和致密岩石中离子迁移速度。这一问题比研究离子在溶液中迁移速度要复杂得多。

通常，用离子活动性来衡量离子在介质中迁移速度的快慢。活动性，即在单位电场强度作用下离子的运动速度，或者说，当电场强度为1V/cm时，在固定时间内离子迁移距离长者活动性强，反之则弱。

离子活动性可按下述原理测量：根据时量曲线第二分支出现的时间t_0和由富集区到提取点的距离l测定离子运动速度V，同时测定离子运动段上的电场强度E。这种测定方法可在室内进行，电场为均匀场，即E为常数，这时离子活动性μ等于：

$$\mu = V/E = \frac{l}{Et_0}$$

或 $$\mu = \frac{j}{j\rho t_0}$$

式中 $E = j\rho$；j为电流密度；ρ为岩石电阻率。

在非均匀电场中μ的表达式较上式复杂，这是因为当围岩均匀时电场强度E随距离的平方而衰减（$E = \frac{I\rho}{2\pi} \cdot \frac{1}{R^2}$）。通常要争取测定离子在均匀场中的活动性。表6-2-1是按上述方法测定的结果。

分析表6-2-1中测定结果可见，离子活动性与离子的种类和岩石成分关系不大，主要取决于岩石的含水量、孔隙度和水

表6-2-1 在样品和小岩块中离子的活动性

岩石名称	离子	外来电解质的含量 n	含水量（%）	孔隙度（%）	活动性 $cm^2/(V \cdot h)$
花岗砂	Cu^{2+}	0.01	38	—	0.37
花岗砂	Cu^{2+}	0.1	28	—	0.35
花岗砂	Cu^{2+}	1.0	27.5	—	1.36
花岗砂	Cu^{2+}	1.0	35	—	1.65
花岗岩	Cu^{2+}	0.2	9	～20	0.24
次生石英岩	Zn^{2+}	0.05	6	～20	0.28
石灰岩(中亚)	Cu^{2+}	0.1	0.2	<10	0.02
石灰岩	Cu^{2+}	0.1	0.2	<10	0.02
石灰岩(列宁格勒地区)	Cu^{2+}	0.01	20	—	1.10
泥质灰岩	Cu^{2+}	0.01	29	—	1.20
砂岩(芬兰湾)	Cu^{2+}	0.01	29	—	4.50
砂岩(科拉半岛)	Zn^{2+}	0.01	25	—	1.50
黏土	Zn^{2+}	0.01	30	—	1.20
砂	H^+	0.1	19	—	11.00
砂	H^+	0.1	19	—	36.00

（引自IO.C.留斯等）

的矿化度。含水量、孔隙度和水的矿化度越高，离子的活动性也越强，反之则弱。但是上述诸因素中每一种究竟对离子的活动性起多大作用以及能否根据它们预测活动性值，迄今尚无定论，有待进一步研究。

为了了解在大岩块中离子的活动性，苏联的研究者们用上述方法在金属矿床上和无矿地段进行了野外试验研究。在矿头器测量场地之间的岩块中建立准均匀电场，每昼夜对元素接收和采一次样，并测定Pb、Zn、Cu、Fe和其它元素的数量。实验时间为300～500h。图6-2-5给出了苏联鲁得内依阿尔泰某地段上所获得的时量曲线。在该地段上，陡倾矿体产在玢岩与熔

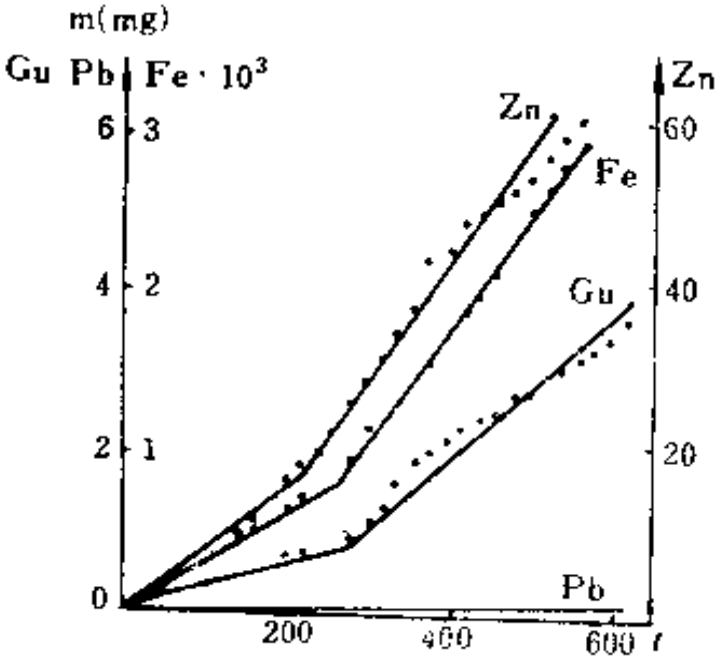


图6-2-5　苏联鲁得内依阿尔泰地区某地段上的时量曲线
（引自IO. C. 雷斯等）

岩角砾岩和钠长斑岩凝灰岩的接触带上，矿头深30m，覆盖层厚5～6m。矿化成分以Zn、Cu和Fe为主，Pb次之。图6-2-5表明：在矿床上时量曲线具有两个分支，那些在矿体成分中数量

较大的元素才会在时量曲线上有第二分支，而数量较少的元素则没有（如Pb元素）。

各种研究结果表明：离子在天然产状岩石中的活动性超出了电化学研究者在水溶液中测出的活动性值[1.5～2cm²/(V·h)]，说明电动力学现象、水的循环和其它因素在离子的实际运动中发挥明显的作用，这些因素本身并非都有电学性质，但都是在电流的影响下由于复杂的相互作用而产生的。可以确信，在天然岩石中，离子活动性的变化范围很大，由十分之几到几十（$cm^2/V\cdot h$），并且可能还要大些。关于离子迁移速度及影响因素问题的研究尚欠深入，尤其是离子活动性在找矿工作中的作用需进一步探讨。

（三）地电化学提取法的探测深度问题

地电化学提取法的探测深度问题是地质、物化探工作者十分关心的。探测深度是个复杂问题，它与离子迁移速度、电场结构及强度、提取时间、地质构造、物理化学环境等多种因素有关，不能简单地说地电化学提取法的探测深度是多少米。但是，有的物探工作者过分夸大了该方法的探测深度，声称该方法能探测400m深的矿床。显然，这种说法是不妥的，也是缺乏理论根据的。为了使大家对该方法的探测深度有一正确了解，我们根据不同研究者给出的电场强度为1V/cm时的离子迁移速度，计算出不同提取时间（10h、100h、1000h）离子迁移的距离（表6-2-2）。计算时假设各种条件都是理想的。

由表6-2-2可见，当电场强度一定时，提取时间愈长，离子迁移距离愈长，探测深度愈大，反之则小。目前我国各单位开展此项工作时，提取时间一般为72h，在此条件下离子迁移的距离仅几十厘米到几米，最大距离也不超过十几米。若将提取

表6-2-2　不同提取时间离子迁移的距离

介　　质	离子迁移速度(cm/h)	提取10h离子迁移距离(m)	提取100h离子迁移距离(m)	提取1000h离子迁移距离(m)
溶　液	2.0	0.2	2	20.0
花岗岩	0.24	0.024	0.24	2.4
次生石英岩	0.28	0.023	0.28	2.8
石灰岩(中亚)	0.02	0.002	0.02	0.2
石灰岩(列宁格勒地区)	1.1	0.11	1.10	11.0
砂岩(芬兰湾)	4.5	0.45	4.5	45.0
砂岩(科拉半岛)	1.5	0.15	1.5	15.0
粘土	1.2	0.12	1.2	12.0
砂	11.0	1.1	11.0	110.0
含矿地段(野外)	15.4	1.54	15.4	154.0
含矿地段(野外)	23.1	2.31	23.1	231.0

时间增加到1000h（相当41昼夜），离子迁移距离也仅几米到几十米，最大迁移距离也只有200多米，若考虑其它各种因素，离子迁移距离也远达不到200m。根据这些结果认为：地电化学提取法主要是以次生晕和浅部原生晕为提取对象，不可能直接获得400m处矿体的离子。地电化学提取法的仪器设备连续工作41昼夜，也是不可能的。该方法与激电法类似，都是直接寻找浅部矿化晕（也包含浅部矿体）异常，根据浅部矿化晕异常间接寻找深部矿体。其不同特点是，地电化学提取法可直接研究矿化晕的物质成分，而激电法却做不到这一点。

（四）电场强度、分布对提取结果的影响

电场是地下离子迁移的驱动力，电场强弱和分布对提取结果有很大影响。一般来说，电场强度愈大，离子迁移也愈快，反之则慢。地下电场的强弱除与供电电压高低有关外，还与地下介质的导电性、地质构造、覆盖层厚度及导电性等各种因素

有关。一般来说，地下岩石的导电性是不均匀的，有的岩、矿石电阻率高，有的则低，因此其中的电场强度也各不相同。从宏观上看，提取电极附近电场强度最强，离子的迁移速度也最快，在提取电极附近以外的空间，由于电场强度较小所以迁移速度也就较小；在地下空间中电场强度大的区域离子迁移快，电场强度小的区域迁移慢。可见，离子在地下迁移并非是均速运动，而是非均速迁移。迁移速度受多种因素影响。

覆盖层对电场的分布影响很大，覆盖层厚度越大，其导电性越好，对电场分布影响越大，甚至所有电流全部沿覆盖层流动，这时地电化学提取法只能提取覆盖层中的次生晕，无法提取其下的原生晕，更谈不上提取矿体中的离子。其探测深度仅限覆盖层。

此外，地中断裂破碎带、水平高阻层、直立高阻层、岩石致密程度、极距大小等等对电场的分布都有明显影响，为简单起见，这里不再赘述。

四、野外工作方法与技术

由于地电化学提取法是电法与化探相结合的一种找矿方法，故其野外工作方法与技术也兼有两种方法野外工作的特点。

（一）地电化学提取法的野外工作制式

1．次生晕方式：以次生晕为提取对象，主要利用时量曲线的第一段。提取时间相对要短一些。

2．基本方式：以次生晕和原生晕为提取对象，主要利用时量曲线的第一、二段。供电时间较长，工作麻烦一些。

3．测井方式：以钻孔中井壁原生晕为提取对象。

4．水中电提取方式：以水域中的离子为提取对象。一般采用小极距（1～2m）进行提取。

以上四种工作制式中，前三种常采用多极电提取系统；水中电提取方式采用单极电提取系统。目前我国各单位多用次生晕方式和水中电提取方式。

（二）场源结构形式

1．多极场源：这种场源一般布置几个到几十个提取点，具体布置如图6-2-2所示。提取电极或元素接收器间距为10～20m。在提取电极附近电场分布是不均匀的，离开一定距离后到无穷远电极间范围内电场是近似均匀的或准均匀的。提取电极与无穷远电极间距愈大，对提取深部离子愈有利，反之不利。在多极场源情况下，在装置中部离子受准均匀电场作用，在提取电极附近离子的迁移则受不均匀场作用。此种场源多用于评价物探异常和在小范围内直接寻找金矿床，通常可采用次生晕方式、基本方式和测井方式。

2．单极场源：该种场源多用于水中电提取工作，极距较小，一般为1～2m。此种场源的电场分布很不均匀。主要用于水域电提取工作，也可用于评价物探异常。

（三）基本方式的野外工作方式与技术

1．元素接收器的结构：提取金属离子主要取决于阴极上电化学作用的特点。氢氧离子及一系列负离子由阴极附近空间移出对金属的积累不利。为了保证金属的积累，必须避免OH^-的形成，而且在积累地带不要有与所提取的组分形成难溶化合物的负离子。为此，在提取时可采用专用的元素接收器。它是用有机玻璃容器，配钽金属棒和羊皮制多孔隔膜。用不含所提取元素的多孔陶瓷材料作成的元素接收器也是适用的。溶液以硝酸为

宜，提取铜和镍时硫酸和其它酸也可应用。容器中的酸可确保中和出现的氢氧离子，NO_3的反向运移不会妨碍金属离子的到达和积累。酸溶液由二次蒸馏水和提纯酸制备，以消除技术性污染，溶液的pH要保持在1～2范围内。根据所通电流大小的不同，元素接收器的大小和结构也可不同。

2．基本方式的工作过程和技术要求

（1）确定需进行地电化学提取的剖面、面积和提取点位。一般提取点间距为10～20m，特殊需要提取点间距也可小于10m或大于20m。

（2）在提取点上布置多极电提取系统，埋设元素接收器。尽可能避免表层干扰影响和减小接地电阻，必要时可浇水。要求通过各个元素接收器的电流大小相同，为此，在地电化学提取系统的供电回路中接入电源恒流仪，以保证通过每个元素接收器的电流相同。

（3）供电提取：在设备及客观条件允许情况下，供电电流尽可能大些。在提取的全过程中保证每个提取电极畅通完好。

（4）每隔若干小时，从元素接收器中提取一定体积溶液进行分析。提取间隔、次数与总提取时间长短有关，提取次数以能作出时量曲线第二段为宜。

（5）供电结束：对所得结果进行分析，并以时量曲线形式表示出来。

（6）对所得结果进行解释。

（四）次生晕方式野外工作过程与技术要求

次生晕方式野外工作过程与基本方式大体相似，主要差别在于不需要进行中间取样；既可用元素接收器，也可用较纯的碳棒（光谱分析用的碳棒）；提取时间较短，电流也可小点。相

对基本方式而言，次生晕方式的优点是快速、经济、简单。

（五）测井方式的野外工作过程与技术要求

测井方式主要是记录时基曲线的第二段。大致工作步骤与前两种工作方式大体相似，差别在于：元素接收器是沿钻孔井壁布置。由于元素接收器与矿体接触或离得很近，故提取时间大大缩短。

（六）水中地电化学提取法工作过程与技术

此种工作方式主要用于水域中的电提取工作，例如民井、水塘、河流等。供电电极间距较小，一般1～2m，负极——提取电极在下面（图6-2-3）。提取电极可用碳棒，也可用碳棒与泡沫塑料组成。供电电源3～4.5V。提取时间一周左右。然后对提取样品进行分析、图示和推断解释。

五、应用实例

苏联对地电化学提取法不仅进行了理论研究，而且进行了较多的野外试验研究，在化探未发现异常的地段获得了明显的异常，反映了矿体的存在。近几年来，我国一些单位也进行了试验研究，取得了一定的地质效果。

（一）苏联雅库特某金矿区试验结果

该区金矿化赋存于灰岩中，其上覆盖有约20m的泥质沉积，矿体顶部埋深40m左右。金属量测量取样未发现矿体。在此地段上进行了地电化学提取法。图6-2-6给出了地电化学提取法在该地段的试验结果。在矿体上（10～15点间）金量出现双峰异常，最大值达0.18μg，背景值仅0.03～0.05μg，清楚地反映了含金体的存在。该例说明了在化探无异常地段，地电化学提取法能获得明显异常，显示了本方法的优越性。

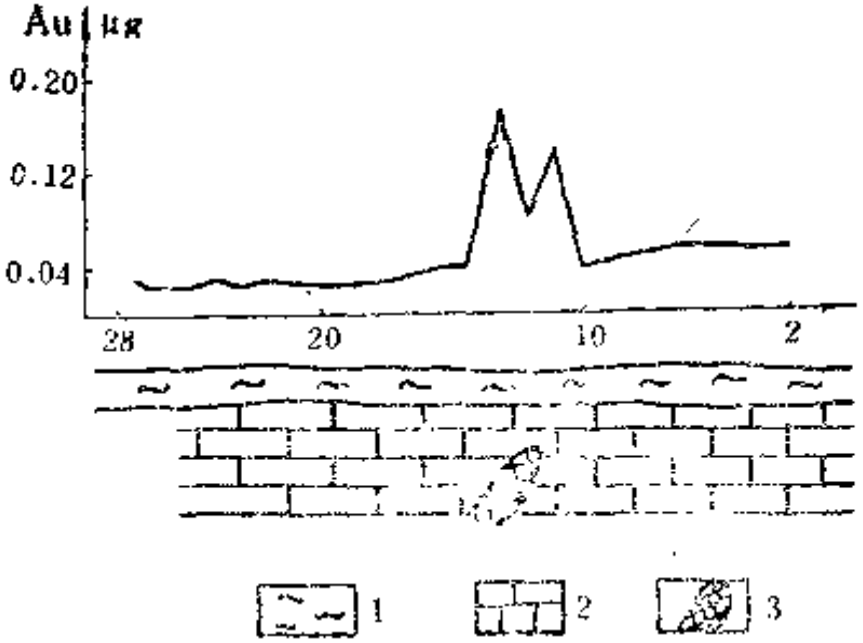


图6-2-6　苏联某金矿区地电化学提取法试验结果
（引自IO. C. 雷斯等）
1-疏松沉积；2-碳酸盐岩；3-金-硫化物矿体

§6.3　接触式直接找金法

近几年来，随着分析技术的不断提高，人们已经可以直接分析样品中的痕量金，使化探实现了以金找金的愿望，化探是采用野外取样室内分析的方式进行直接找金的。本节将介绍一种矛式探金仪。当在野外使用仪器的高灵敏度探头与细微金颗粒（0.05mm）接触时，这种仪器便会产生一种异常讯号，利用这种讯号可达到直接找金的目的。这种方法称为接触式直接找金法。

一、接触式直接找金法的基本原理

随着采金事业的发展，人们越来越需要一种仪器协助他们在短时间内发现理想的金矿点，以便用各种淘洗设备淘金。矛式探金仪是一种为了寻找黄金而专门设计的电子探测仪器，正是解决这一问题的理想仪器。

矛式探金仪是采用两种不同金属相接触，电势差不同的原理，经过十几年努力而试制成功的。该仪器有一个高灵敏度的探头，将其插入土壤、砂床、水下沉积层中，若探头与微细金颗粒（0.05mm）接触，由于金颗粒与探头的物质(硬质合金)不同，产生了不同的电势差，此电势差作为一种电讯号输入仪器，经过仪器相应线路放大、触发，产生不同颜色的光电信号和不同声调，找金者通过观察信号灯的颜色和不同声调来判别地下是否有金。

矛式探金仪操作简单，使用方便，灵活机动。这种仪器可以被淘金者带到任何地方去找金，但从此仪器的特点来看，主要适用于河流、河床、水下寻找砂金，也可用于土壤中找金工作。它不需要按比例尺、测网进行工作，淘金者认为那些部位有希望就在那里找，找到就淘，无金便走，所以在西方国家矛式探金仪只是做为找金的辅助手段。

作为接触式直接找金方法而言，为了寻找大型含金砂体，可按相应比例尺或路线进行探测，工作方法可灵活机动，在有希望的地方随时加密探测。其结果可以绘成相应的金的平面等值线图，以此圈定含金砂体的范围。

二、矛式探金仪的组成及结构

矛式探金仪由控制箱、探测管和延长管、传感探头几部分组成。

（一）控制部分

控制箱是矛式探金仪的主体部分，它包括仪器的电子线路、面板上的控制旋纽与各色指示灯以及机箱等（图6-3-1）。

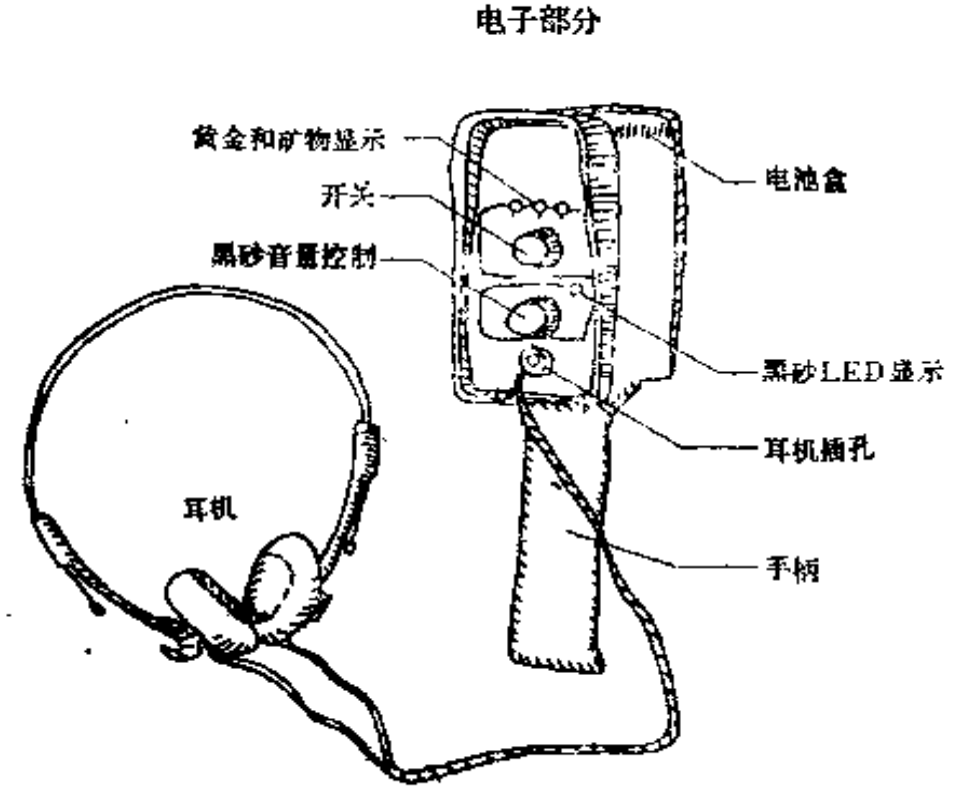


图6-3-1　矛式探金仪的控制部分外貌

控制箱（机箱）：是用铝板冲压成型的，表面进行了氧化处理，因此它防雨、防尘、防震和不怕泥水，可以承受任何气候条件变化。控制箱（包括电池）重量为1.3kg。

矛式探金仪的电子线路不详。据了解，输入控制箱的信号，根据其大小被分成四个等级，控制箱中有四个不同的探测电路信号。

在控制箱面板的正面有四个发光二极管（LED）、两个调节旋纽和一个耳机插孔。发光二极管具有绿、红、橙和黄不同的颜色。每个发光二极管都与相应的一个探测电路相连接。当探测器被触发时，发光二极管燃亮，闪光时间约为2S。

此外，探测电路还能发出声响指示信号，每个探测电路所发出的声响信号不同。

面板上调节旋纽：面板上有两个调节旋纽：

黑砂音量控制旋纽（下部旋纽）：由于某种原因你不想听到黑铁砂探测器的声响信号。只需调节此旋纽即可。这种调节仅对绿色信号探测电路（黑砂）起作用。

开关及选择旋纽（面板中部旋纽）：此旋纽有五个位置：

位置1："TEST"（检查）；

位置2："OFF"（关），旋纽在此位置时整个仪器都被关闭；

位置3：旋纽在此位置时，所有探测器都处于工作状态；

位置4：所有的探测器都处于工作状态，仅把红色探测器发出的声音信号切断了，但是还可以听到黄、橙和绿色探测器发出的声音信号；

位置5：从红色到橙色探测器发出的声音信号被切断，但是还可听到黄色传感器的声音信号（图6-3-2）。

在工作过程中切断从红色或红、橙色探测器所发出的声音的原因在于：当在进行找金的工作过程中，遇到了某一地域，它蕴藏着异乎寻常的大量含多金属较高的矿石，这些矿石必然

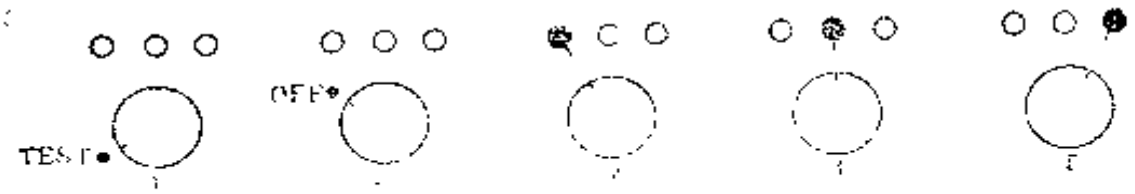


图6-3-2　控制面板上各旋纽的指示位置及作用

1-位置1；2-位置2；3-位置3；4-位置4；5-位置5

引起红色或橙色探测器的反应。在这种情况下可以选择仅仅听到黄色和橙色探测器的反应，将旋纽放在3、4或5。至于哪个位置上更合适，则取决于找金者的需要和兴趣。但是，在一般情况下将旋纽置于位置3上。

（二）探测管和延长管

探测管是用不锈钢管制成的，其长1.2m，直径为15mm，管的尾部都有一个连接装置，把管子安装在仪器上。接头直径为18mm，可以用一只手把管子拧到仪器箱上或者拧下来。

延长管是用特殊铝合金制成的，长1.2m，直径15mm。延长管可以连接在测量管和仪器箱之间，可以连接多根延长管子，以增加或适应各种自然环境。但是，整个探测管超过6m（5根管）时，使用起来很不方便，而且信号将有所变化，例如，本来应是黄色信号，实际上反应的是橙色信号。如果接了许多管子，触发橙色信号灯的反应值比正常情况下更高一些(图6-3-3）。

（三）传感探头

传感探头是用硬质合金制成的，安置在探测管的顶端。它可从黄金、矿物和黑砂中获取各种信号。传感探头质地坚硬，可承受探测中的压力，又可防止探测管顶端进水（图6-3-3）。

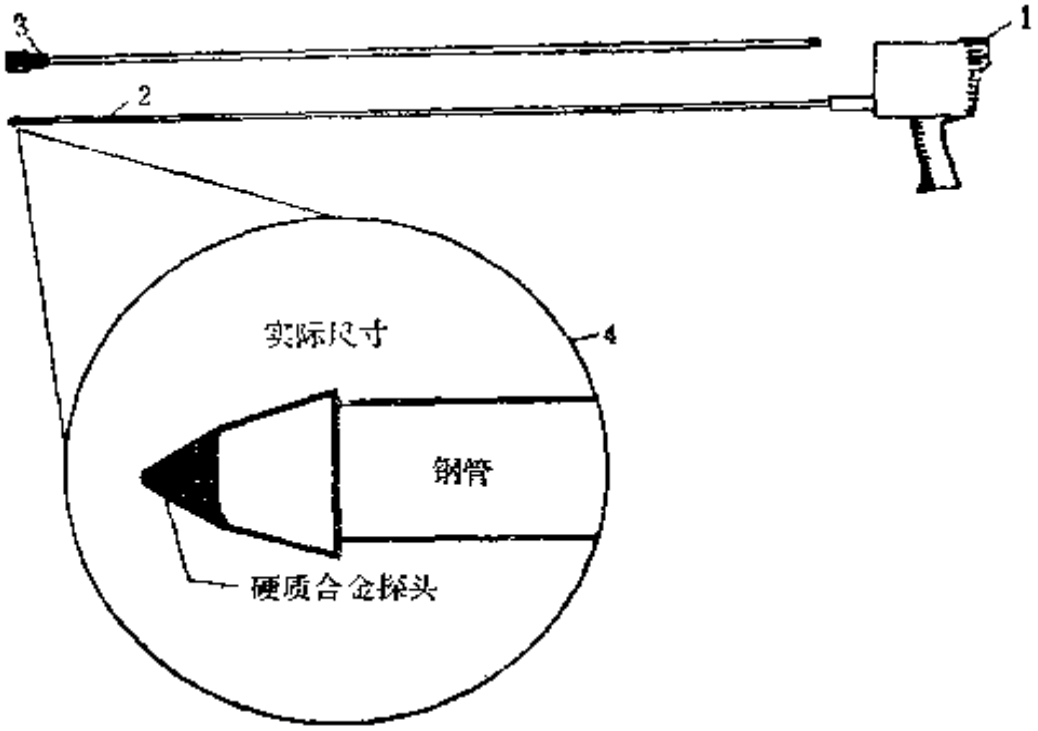


图6-3-3 探测管、延长管和传感探头

1-控制箱；2-带有探头的测量管；3-延长管；4-传感探头及大小

仪器电源为普通的9V积层电池，装在控制箱中。

三、信号说明

矛式探金仪可以探测到的黄金的最小粒度是50μm，即5/1000mm或0.05mm、300目。一般认为每吨沉积物中必须含有1g以上的黄金才有开采的价值。如果像一粒小米大小的重一克的天然金块分割到粒度为0.05mm，那么它将被分成400万粒，实际上这是根本不可能作到的，每一个这样小的颗粒是不可能用肉眼看得见，但是用该仪器却可以探测到。

前面已经谈到，输入控制箱的信号根据其值高低被分成四个等级，并用四种颜色信号灯表示出来。对矛式探金仪的探测结果的解释，实际上就是对四种不同颜色信号的识别。为了便

于大家参考，我们将四种颜色信号的灵敏度、分辨力、反映的矿物成分均列于表6-3-1。

表6-3-1

信号颜色	信号灵敏度	信号分辨力	反映的矿物成分	旋纽位置3		旋纽位置4		旋纽位置5	
				工作	声响	工作	声响	工作	声响
黄色	较低敏感度	高	黄金或白金	工作	声响	工作	声响	工作	声响
橙色	中等敏感度	中等	金属含量高的矿石→黄金均有反映	工作	声响	工作	声响	工作	切断
红色	高敏感度	稍低	金属含量低的矿石→黄金均有反映	工作	声响	工作	切断	工作	切断
绿色	极敏感	最差	黑铁砂→黄金均有反映	工作	声响	工作	声响	工作	声响

普通的砂不能给出任何信号，即普通砂不会产生任何信号，只有黑铁砂、含金属的矿石和黄金才能引起不同颜色的信号。由表6-3-1可见：从绿色到黄色，其灵敏度由高到低，分辨力由最差到最高。只有黄金和白金才能引起黄色信号；红、绿色信号都是低含量金属矿石、黑铁砂所引起；出现橙色信号时，应多几处探测，寻找其附近是否可能有金。

四、注意事项

1．矛式探金仪不宜连接过多的延长管，若延长管接得太长，除了工作不便之外，它会使黄色信号变为橙色信号，漏掉了砂金矿。

2．将传感探头插入沉积物时，只能用一只手的力量，另一只手可以扶住管子，并起导向作用。若所用力量超过一只手的

力量，会使信号颜色发生变化，例如，本来应该是红色的指示信号，由于用力过大，很容易变成橙色或者是黄色信号，使找金者判断失误。

3．在正常情况下，在每次碰到矿砂正好延续一秒多钟后发出声音信号。在个别情况下，砂金或其它矿砂可能会附着在传感探头上，从而使探金仪一直发出声音和信号。此时必须马上抽出探测管，并用一块干布将传感探头擦干净。如果这样还不能使声音停止，就将旋纽旋至最左端的检查位置上，在这个位置上最长停5s即可。因为一般1s钟或稍长一点时间就可以使污染失效，然后，再将旋纽复位到原来的位置上。应该特别注意的是：当旋纽位于检验（TEST）位置时，探头必须离开地面，并且保持干燥。

4．矛式探金仪的测量和分析方法是以电化学现象为基础的，对电化学现象有影响的地方地质效果不佳。在没有被人们触及的地方，探金仪的使用效果最好。

5.在仪器的电子线路中安装了一个低电压报警装置。当电池电压不足时，它就发出“滴”的声音（或是一个恒定不变的音调），应该换新电池（此时旧电池还可工作几小时）。

6．探金仪是针对自然矿物设计的，任何已处理过的金属都将导致错误的信号。

7．野外找金时，既要到有可能堆积砂金的有利地方找金，也要考虑是否适合矛式探金仪工作条件。为了使大家正确使用探金仪，正常开展野外找金工作，这里给出几张探金仪野外工作图，供大家参考。

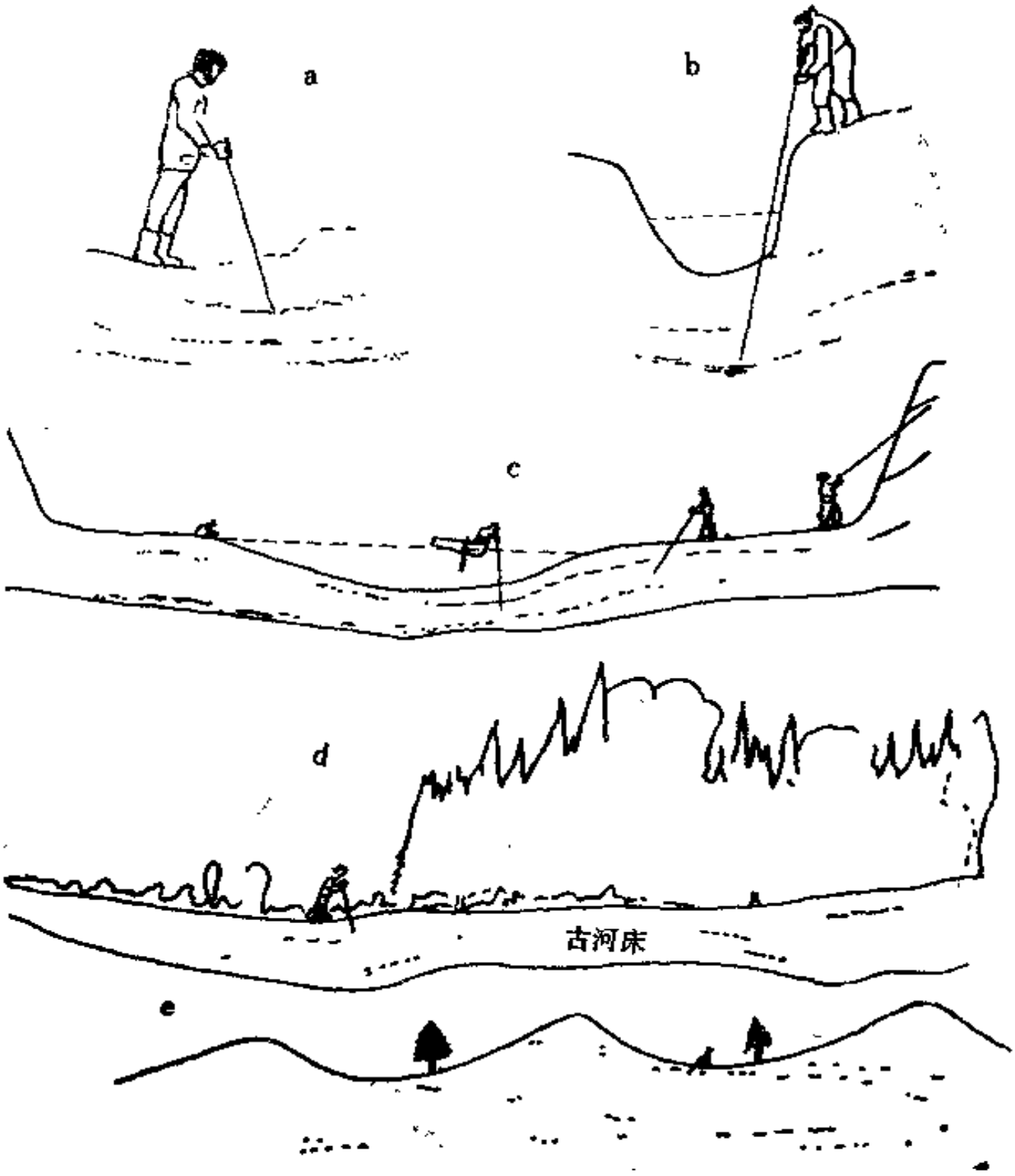


图6-3-4　矛式探金仪野外工作示意图

a--一般只需用一根探测管；b-根据需要可用几根延长管；
c-可在河底、河床及河侧探测；d-寻找古河床；
e-在陆地上探测

第七章　金矿物探的应用实例

近几十年来，金矿物探在国内外得到较多应用，并取得了一定的地质效果，引起了人们重视，为了进一步说明物探方法的效能，本章引用一些找矿实例，供大家参考。

近十年来，我国的金矿物探已得到了广泛应用，不仅在局部地区的普查找矿阶段做了大量工作，而且也重视了通过研究莫霍面埋深、深部构造进行成矿预测和勘探阶段的物探工作。例如，陈继宇发表的《我国东中部深部重力场特征与金矿床的分布》和李治华发表的《华北地台地球物理场、深部构造和金矿床》就是代表作。他们都是通过研究大区域的重磁场特征，进而研究地壳深部构造以及深部构造与金矿分布的关系，达到成矿远景预测的最终目的。此外，也有人曾对华南地区区域重磁场特征、深部构造进行研究，并预测该区的成矿远景区。总之，利用小比例尺地球物理资料研究深部构造和成矿预测已经引起了人们的重视，但是，这一找矿阶段在我国仍然是个薄弱环节，今后还应加强这一阶段的研究工作和实践工作。目前，我国的金矿物探工作绝大部分集中在第Ⅲ找矿阶段。

§7.1　山东招掖金矿带物探方法应用的地质效果

山东招掖金矿带是我国著名的金矿成矿带之一。该区金

矿资源丰富，成矿地质条件好，是普查找矿的重要远景区。在该区有不少单位进行了长期的、大面积的物化探工作，例如，山东地矿局物探队、山东地矿局地质队所属物探分队和山东冶金地质勘探公司物探队以及各地研究单位、院校等均做了许多工作。仅就山东省地矿局物探队来说，自1960年以来，一直承担金矿物化探配合地质六队的地质普查勘探。在胶东半岛完成了1:5万航磁；1:2:5万第二代航磁航放（由航测总队和物化探研究所承担）；1:10万区域重力测量；地面物化探面积性普、详查工作有1:5万电阻率联剖法；1:5万～2万磁法与激电法；1:5万水系沉积物测量；1:1万～2万土壤测量、壤中气汞量测量和岩石测量、检查验证物探异常的取样钻孔千余个的岩石测量等，发现了大批物化探异常。又如核工业部委托地矿部物、化探研究所在胶东地区进行了航空电磁法测量等等。本实例综合了各系统、各单位的物化探工作。

一、地质概况

山东招掖金矿带位于沂沭断裂带的东侧，胶西地盾西缘，栖霞复背斜的北翼，受东西向阜山背斜控制。金矿床受新华夏系北东向压扭性断裂与东西向构造复合的控制。金矿带内地层简单，临渤海的平原区第四系广泛分布，厚度约几米至30余米。其下部地层主要为上太古界至下元古界胶东群地层，该地层是一套中—深成变质岩系，岩性为黑云母斜长片麻岩夹斜长角闪岩、条带状黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩等。地层走向北东，倾向北西，倾角10°～35°，个别达60°左右。岩石受不同程度的混合岩化作用。胶东群下部为遂家组，是金矿带的主要地层。分布于玲珑花岗岩体的周边地区。胶东群中部民山组、

上部富阳组与金矿关系不大，不再详述。

本区与金矿床形成密切相关的岩浆岩主要有印支期玲珑黑云母花岗岩及燕山早期郭家岭似斑状花岗闪长岩。玲珑花岗岩呈大岩基产出，展布形式明显受东西向和北东向构造双重控制。岩体边部外倾，与胶东群变质岩呈交代接触、断层接触及和谐的过渡接触关系。该岩体总面积约3000km^2，为一混合花岗岩体。郭家岭岩体呈北东向展布，多以岩基或岩株形式侵入胶东群和玲珑花岗岩体中，总面积约为500km^2。

区内构造以断裂为主，其中又以晚三迭纪—侏罗纪生成的北东向断裂构造与金矿的形成关系最为密切。自西向东分别为：三山岛断裂带、黄县-掖县弧形断裂带、招远-平度断裂带。这些断裂构造对金矿床的展布形式均起控制作用。黄县-掖县弧形断裂带的南段，即朱桥—徐家疃之间称为焦家断裂带，其长约13km，宽约800～1200m，平均走向北东40°，倾向北西，倾角26°～30°，局部较陡处达70°以上。该带系由焦家主干断裂及其派生的次一级分支断裂组成。在平面上望儿山分支断裂带与焦家主干断裂构成向北东交汇的“入”字型构造。全国著名的焦家金矿就在此带上。矿体赋存于沿断裂带走向和倾向转弯宽大的部位。

本区金矿有两种类型，即石英脉和蚀变岩型。石英脉型金矿主要分布在玲珑矿田及望儿山金矿的浅部。含金石英脉走向一般为北东30°～80°，倾向北西，倾角50°～90°，形态较为复杂，主要呈透镜状及脉状产出。石英脉型金矿又分为含金黄铁矿石英脉型及含金多金属石英脉型。金的品位一般为3—20g/t，最高可达620g/t。矿石构造以致密块状和侵染状为主，其次有脉状、网脉状等。围岩蚀变主要为硅化、钾化、绢云母化、黄铁

矿化，其次为碳酸盐化、高岭土化及绿泥石化。前三者表现强烈并与矿化关系密切。

蚀变岩型金矿是本区的主要金矿类型。它受北东向压扭性主干断裂及其次级断裂控制。该类金矿床属中温热液裂隙充填交代矿床，具有矿化连续、集中，产状稳定，规模大等特点。此类矿床有明显侧伏规律，矿脉向南东倾斜者则向北东侧伏，向北西倾斜者则向南西侧伏，侧伏角35°～45°。蚀变带一般中心为强硅化带，向西侧则依次为绢英岩化带，钾化带，呈渐变过渡关系，但不同矿床有所差别。金矿体一般赋存于靠近断裂面的下盘，受强硅化、黄铁绢英岩及黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩控制。金矿化主要与硅化作用及绢云母化作用有关，其次与钾化、碳酸盐化、绿泥石化、高岭土化等有关。矿石中金属矿物主要有银金矿、自然金、黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、磁黄铁矿等。金的含量以黄铁矿硅质碎裂岩及网脉状绢英岩化花岗质碎裂岩含量最高，绢英岩化碎裂状花岗岩次之。矿石构造以脉状、网脉状、细脉侵染状为主，其次为角砾状、斑点状、细脉状等。例如，焦家和新城金矿床，矿床与断裂产状基本一致，矿体呈脉状、复脉状的“斜卧矿柱”，长300～1200m，平均厚度3～9m，最大厚度近30m。斜深达900m。矿石结构以脉状和细脉侵染状为主，角砾状、斑点状次之。金品位变化与矿物组合的复杂程度有密切关系，当伴生有黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等多金属硫化物时，金品位增高。

综上所述，蚀变岩型金矿床主要赋存于断裂带中，其次是与硫化物密切共生。

二、地球物理概况

本区曾进行多年的物探工作，各系统均测定了各种岩、矿石的物理性质(电阻率、极化率、磁性和密度)，这些测定数据已列入第一章表1-3-3、1-3-4和表1-3-5中。这里仅简要介绍其特点。

(一)导电性

本区导电性有如下规律：

1．本区电阻率大致可分为高电阻率、中等电阻率和低电阻率三类。高电阻率岩石有：石英脉、玲珑花岗岩、郭家岭花岗闪长岩，电阻率值大于1500 Ω·m。低电阻率岩石有：斜长角闪岩、煌斑岩、黄土等，其电阻率值小于350 Ω·m。其它各种蚀变岩石、矿石的电阻率属于中等电阻率，其值为600～1300 Ω·m。

2．玲珑花岗岩、郭家岭花岗岩等高阻岩石，由于其本身岩性不均匀性，故电阻率变化范围较大，如玲珑花岗岩最高值达8810Ω·m，最低仅179 Ω·m。这种不均匀性反映在视电阻率曲线上呈锯跳跃，且跳跃幅值较大。低电阻率岩石离散程度较小，齿状电性相对变化不大，视电阻率值一般小于200 Ω·m。因此，可以利用这一电性特征进行填图，以划分岩石和岩性界线。经受断裂破碎的岩石，电阻率明显下降，这就为电阻率法在本区圈定断裂破碎的碎带提供了必要的电性依据。岩石的蚀变和矿化程度对电阻率影响较大，在含矿蚀变带中硅化、绢英岩化程度较高时，ρ_s曲线上反映的低阻带中呈现局部高阻，特别是具有工业价值的矿体，电阻率相对于低阻破碎带一般均有明显的升高。例如焦家、新城金矿富矿体电阻率可达5230 Ω·m以上，平均电阻率在1120Ω·m以上。

（二）激电特征

1．各类岩石极化率均较低，比较稳定，平均极化率都小于5%。花岗岩类岩石极化率比变质岩类略高些。岩石经蚀变后，其极化率一般均有不同程度的升高，这主要取决于其中金属硫化物发育的程度，当硫化物较富集时，极化率可达百分之十几。

2．各类矿石极化率的高低与其中黄铁矿含量关系密切。黄铁矿含量大时，η值高，硫化矿物含量与金的品位大致呈正消长关系。这就给在本区圈定硫化矿物富集带间接找金提供了有利的前提。在一定的地质条件下，高极化率异常见矿的可能性较大。

本区氧化矿石极化率较低，有时可与围岩极化率相近，故该区激电异常主要反映与原生金矿床密切伴生的硫化物矿化带或富集带。

（三）磁性特征

本区各类岩、矿石，其磁化率值均小于$10000\times4\pi\times10^{-6}$SI（表1-3-4）。岩石的磁性强弱与岩石中所含铁磁性矿物多少有关。胶东群变质岩磁化率变化范围较大，其值在微弱～$9600\times4\pi\times10^{-6}$SI。这种不均匀性使Za曲线表现出杂乱的磁性特征，正负磁场值变化幅度较大，突变点多。

花岗岩类岩石磁化率低而稳定，一般在微弱～$440\times4\pi\times10^{-6}$SI，个别地段磁性较高，如焦家郭家岭花岗岩磁化率为$1820\times4\pi\times10^{-6}$SI。本区多数地段花岗岩分布区对应低而稳定的磁场特征。

岩石经破碎蚀变和退磁使磁化率大大降低，与围岩磁化率有较大的差异，因而呈条带状低值或负值磁场带，是断裂带的反映特征。

（四）密度特征

从表1-3-5可见，花岗岩平均密度值为2.61g/cm³；变质岩平均密度为2.76g/cm³，二者存在0.15g/cm³的密度差异。当这两种岩性接触时，从花岗岩到变质岩产生一个从重力低到重力高的梯度带。岩石经破碎蚀变，密度降低，在重力剖面曲线上表现为一个低重力异常。金矿石的密度介于变质岩和花岗岩密度之间，且差异不大，因此布格重力异常对矿体反映信息是微弱的。

三、物探方法的地质效果

前面已经谈到，蚀变岩型金矿床有两个特点，一是金矿床分布严格受构造控制；二是金矿体与硫化物密切共生，金与硫大致呈正消长关系。在胶东大面积覆盖地区，若能寻找和圈定断裂带位置和硫化物矿化带或富集带，实际上起到了间接找金矿的作用。物探方法在胶东地区较好的完成了上述两项地质任务，取得了较好的地质效果。

（一）利用物探方法圈定断裂破碎带的地质效果

利用电法、磁法、重力均可圈定断裂破碎带，并且均取得了一定地质效果。

1．利用电阻率联合剖面法圈定断裂带的地质效果

山东物探大队利用联合剖面法对焦家金矿区及其周围约400km²面积内，进行了系统的面积性普查，共圈出了断裂破碎带17条，其编号分别为F_1、F_2、F_3……F_{17}，详见图7-1-1。

由图7-1-1可见，联合剖面法所发现的17条断裂破碎带主要分布在测区中部及北东部分，仅有规模较小的孤立断裂F_{15}、F_{16}分布在测区西南角处。断裂破碎带的走向基本是北东向，仅F_{17}为北西走向，F_9、F_4接近南北走向，F_{14}近东西

向。在所发现的17条断裂破碎带中，以F_7和F_{10}规模较大。有人认为，F_7与F_8为同一断裂破碎带，即主干断裂，也有人认为，二者并非同一个断裂带，而是被F_{17}所错开。由于在测区北东部分的焦家、城子、寺庄一带断裂密集，纵横交错，出现了多处构造交汇处或构造复合部位。在地质上该区处于玲珑花岗岩与古老的胶东群的接触带上，故该区是成矿的有利部位。

联合剖面法异常特征随所处地质条件的不同而有明显差异。将全区联合剖面异常分布特征或分布规律分为以下几类：

（1）花岗岩体内断裂破碎带上联合剖面曲线特征

图7-1-2给出了该区512线上的联合剖面曲线。该破碎带位于焦家主干断裂东侧并与其平行的望儿山分支断裂带，该剖面（512线）位于上杨家—城子附近（F_8断裂）。地表为第四系所覆盖，冲沟中及丘岭顶部可见到花岗岩露头。由于花岗岩局部破碎而含水、泥，电阻率明显降低，故联合剖面曲线有连续明显的低阻正交点反映。因断裂带处于同一岩性的高阻地层中，故呈现出良导倾斜厚板状体的低阻正交点特征。低阻正交点两侧ρ_s曲线视电阻率值较高（$\rho_s>1000\Omega\cdot m$），呈锯齿状跳跃，幅度较大，清晰地反映了花岗岩的电性特征，这一条处于花岗岩内部的断裂带，已被后来的地质工作证实是主要的成矿带。在这条断裂破碎带上找到了望儿山、河东金矿床。

属花岗岩体内的断裂破碎带除了F_8之外，还有F_6、F_{15}、F_{16}、F_{17}及F_6、F_7的北半部。

（2）变质岩地层中的断裂破碎带上联合剖面异常曲线特征

图7-1-3给出了变质岩地层中破碎带上联合剖面异常曲线的分布规律。此类破碎带大都分布在烟潍公路以西。此地段第

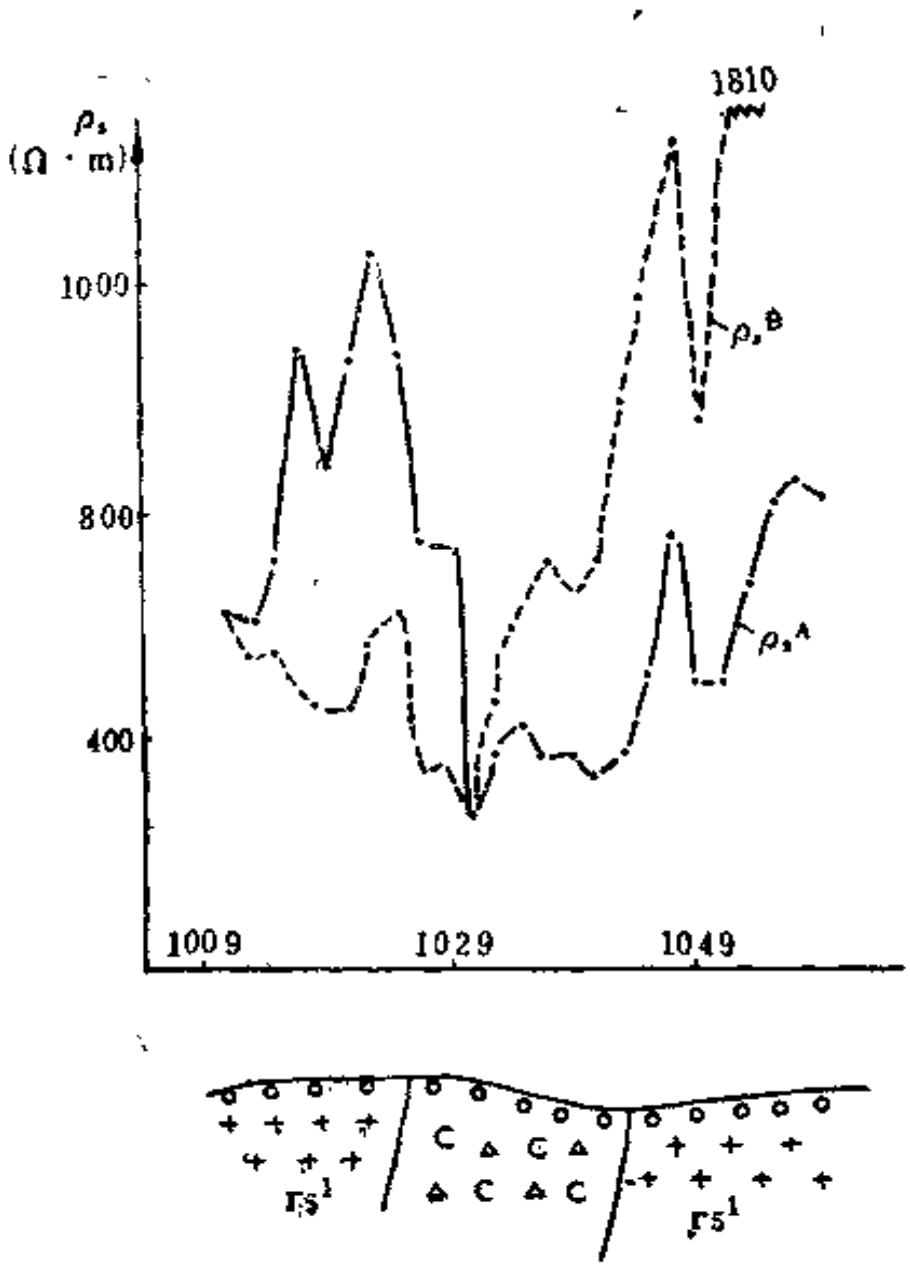
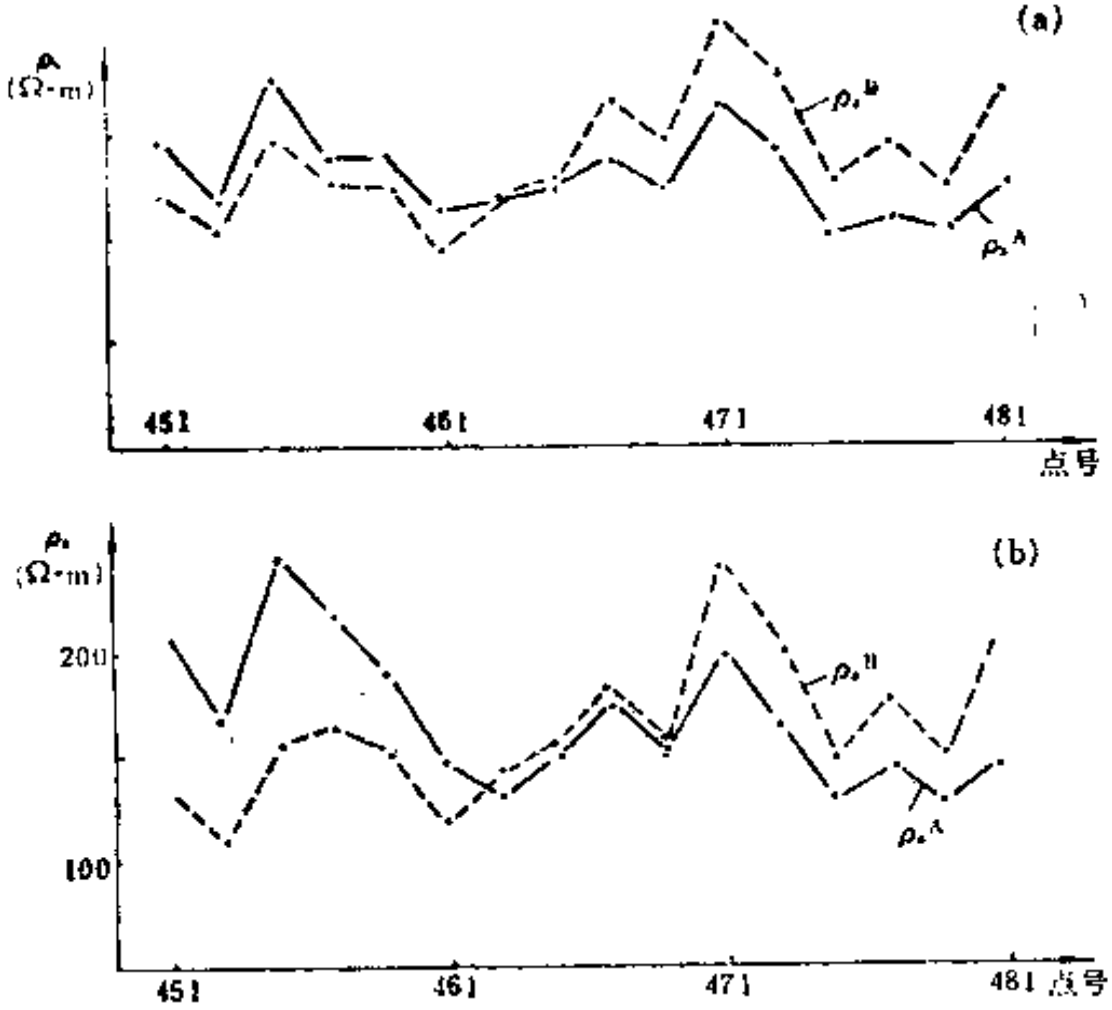


图7-1-2　山东胶东地区郭家岭花岗岩体内断裂破碎带上联合剖面法异常曲线（512线）（引自于智详、肖霏岳）

AO=225m，MN=50m


(a)
ρ_s
(Ω·m)
$\rho_s^{\#}$
ρ_s^{A}
451
461
471
481
点号
(b)
ρ_s
(Ω·m)
200
100
$\rho_s^{\#}$
ρ_s^{A}
451
461
471
481 点号

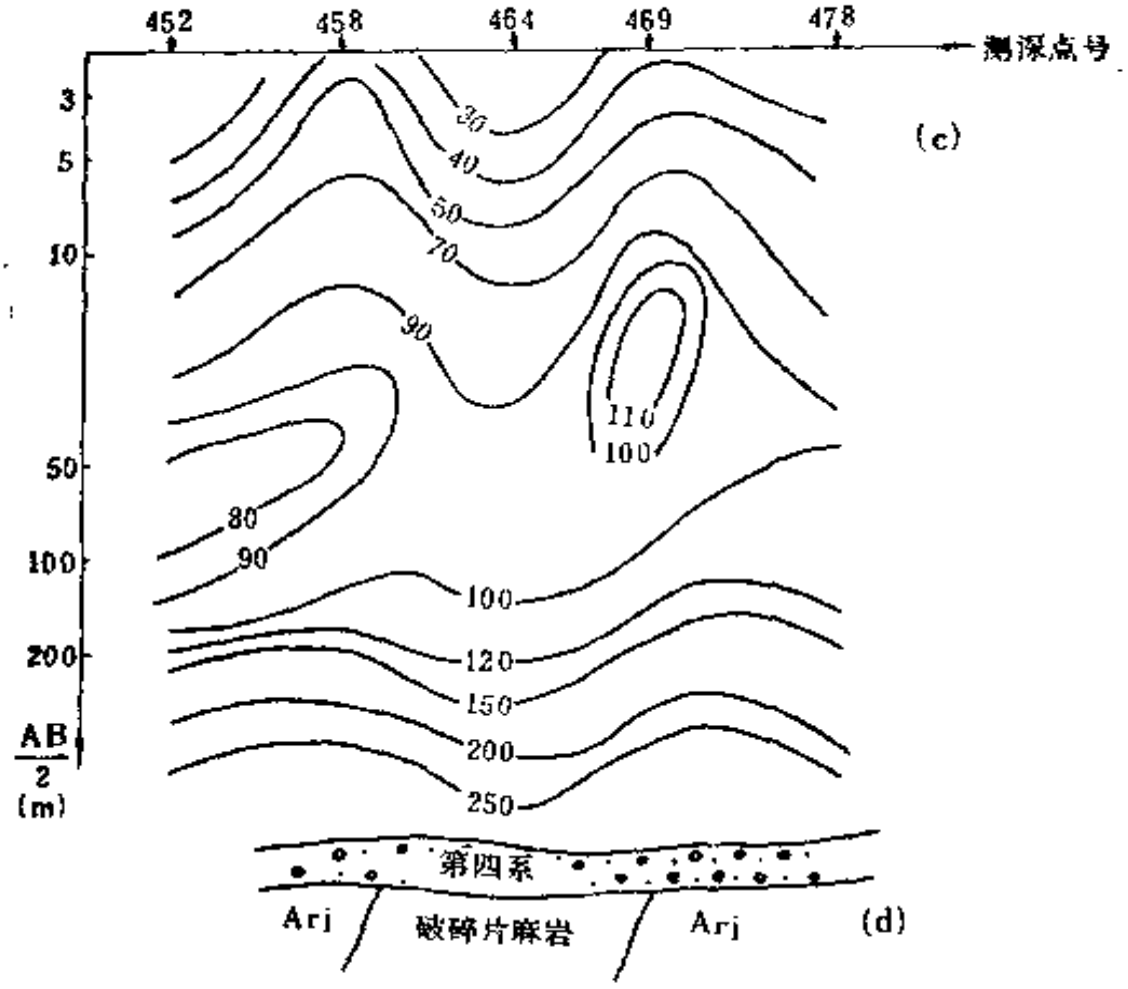


图7-1-3 山东胶东地区变质岩中断裂破碎带上联合剖面法和电测深异常曲线分布特征（引自于智详、肖靠岳）

(a)—AO=150m，MN=20m；(b)—AO=210m，MN=20m；

(c)— ρs断面等值线图1：4000；(d)—地电断面

四系覆盖较厚，一般达20～40m，再加上变质岩地层形成时间较早，受风化程度较深，风化层厚度可达10～30m。由于上述原因使联剖曲线分离较差，虽有低阻正交点出现，但没有花岗岩内部断裂带上的低阻正交点那么明显。因此，应用联合剖面法在本区此类地层中圈定断裂构造时应特别注意。此外，在该测线上采用了两种极距（AO=150m、AO=210m）进行观测。AO=210m时的低阻正交点相对小极距AO=150m的低阻正交点向小号点方向位移，由于此区地形平坦，胶东群、第四系电性均匀，无其它电性体伴生，故可依不同极距交点的位移判断断裂破碎带倾向，即断裂带向小号方向倾斜。

为了进一步研究变质岩地层中断裂破碎带的客观存在，在该剖面上还做了电测深工作，并绘制了ρ_s断面等值线图（图7-1-3（c））。由图可见，在461点和469点间有一低阻带，与联合剖面法异常对应。后来在464点布钻验证，在25m以下见到破碎片麻岩，证实了断裂破碎带的存在，其中含有丰富的地下水。

（3）在花岗岩与变质岩地层接触带处的断裂破碎带上联剖异常的分布特征

焦家主干断裂带位于花岗岩与变质岩接触带附近。对应于接触带，联剖ρ_s曲线反映为明显的陡坎（图7-1-4）。小号点一侧ρ_s值低，一般为200Ω·m，曲线变化比较平缓。大号点一侧ρ_s^A曲线呈阶梯状急剧上升，曲线呈锯齿状跳跃，幅值变化大，ρ_s值一般在1000Ω·m以上，局部可达几千欧姆·米，ρ_s^A与ρ_s^B分离较大。小号点与大号点上的ρ_s曲线变化，清晰地反映了变质岩与花岗岩分布地段的电性特征。以上工作是在1967年做的，利用联剖曲线圈定了焦家主干断裂带。目前已探明和正在开采

的几个特大型或大型金矿床，如焦家、新城、马塘等多处金矿体都赋存在这一断裂带上。

综上所述，将本区联合剖面法圈定断裂带所依据的地球物理标志简述如下：

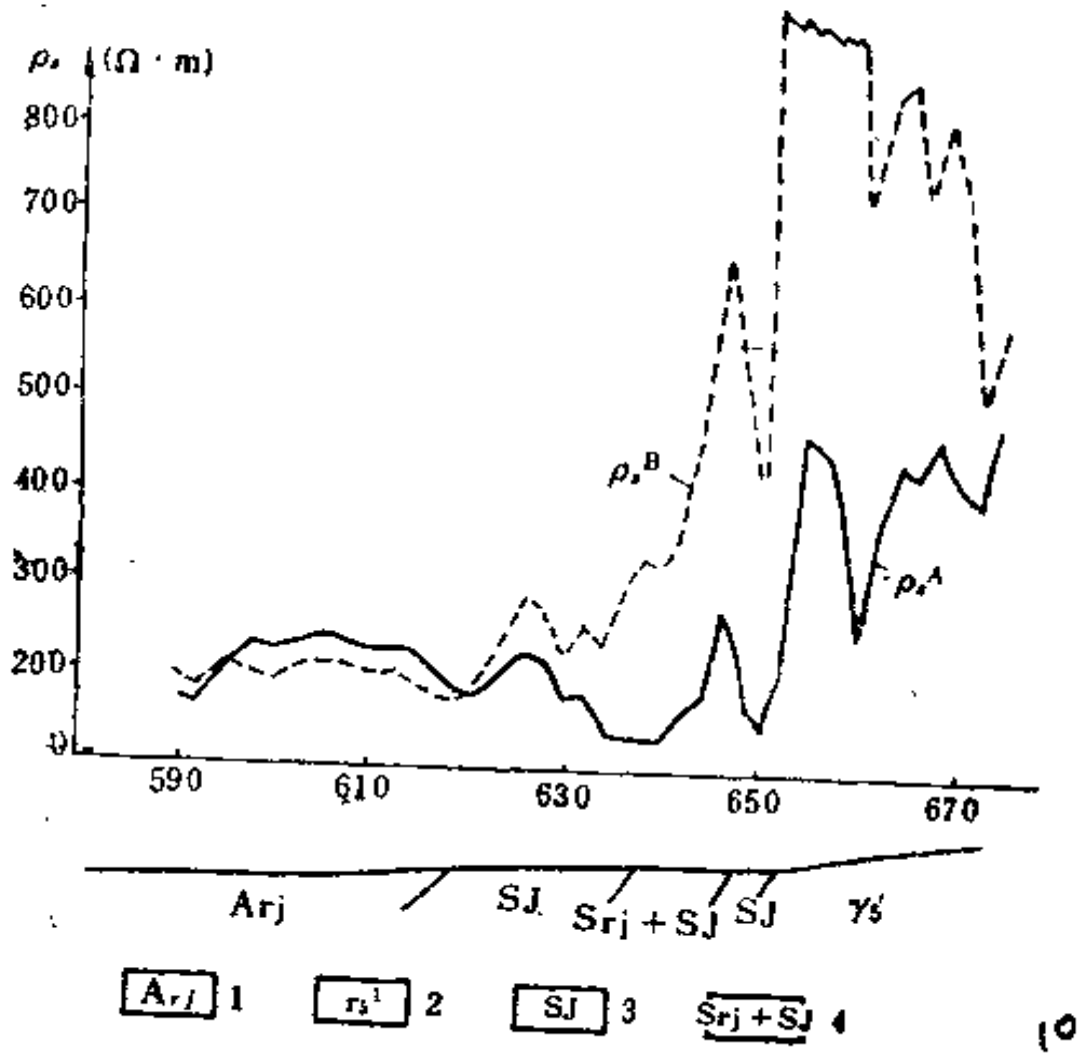


图7-1-4　山东胶东地区花岗岩与变质岩接触断裂破碎带上联合剖面异常曲线分布特征（引自于智详、肖鹏岳）

1-胶东群地层；2-玲珑花岗岩；3-破碎带；
4-蚀变破碎带；$AO=170m$，$MN=20m$

i. ρ_S^A与ρ_S^B曲线具有明显的低阻正交点或正交点带，这是构造存在的一般标志之一。

ii. ρ_S^A与ρ_S^B曲线也具有低阻正交点，但由于电性不均匀性的影响或平行断裂构造的影响，使交点产生位移，曲线分离程度比第一种情况差。这种交点带仍然是构造存在的标志之一。

iii. ρ_S^A与ρ_S^B曲线一边异常普遍高起，一边异常值不高而曲线平稳，ρ_S^A、ρ_S^B异常平稳向异常增高的过渡带处也是构造存在的标志之一。

iv. 当断裂带硅化、绢英岩化等蚀变作用增强时，断裂破碎带的电性也将随之发生变化。一般来说蚀变增强时高阻特征将增加，但这种蚀变只是局部的，只要极距选择合适，联剖仍将出现正交点。不过，在同一条剖面上可能出现一种矛盾现象：联剖ρ_S异常为低阻正交点，而中梯装置ρ，则出现极大型高阻异常，图7-1-5给出的焦家Ⅰ号电法综合剖面图便属这种情况。

2. 利用磁法圈定断裂破碎带的地质效果

本区除了利用电阻率法圈定断裂破碎带之外，磁法也是完成此项地质任务的主要方法之一。不仅可以进行地面磁测，而且可以快速地进行大面积航空磁测。利用航磁资料圈定区域性大断裂构造和局部断裂构造分布有一定优越性。利用磁法在本区圈定断裂带的主要依据是下述的磁场分布规律。

（1）两种磁场的过渡带或磁场梯度带是构造存在的标志之一。

图7-1-6是焦家断裂带磁测结果的一部分。显然，图7-1-6中的磁场具有两种不同性质，图中西部为平稳的负磁场，ΔZ

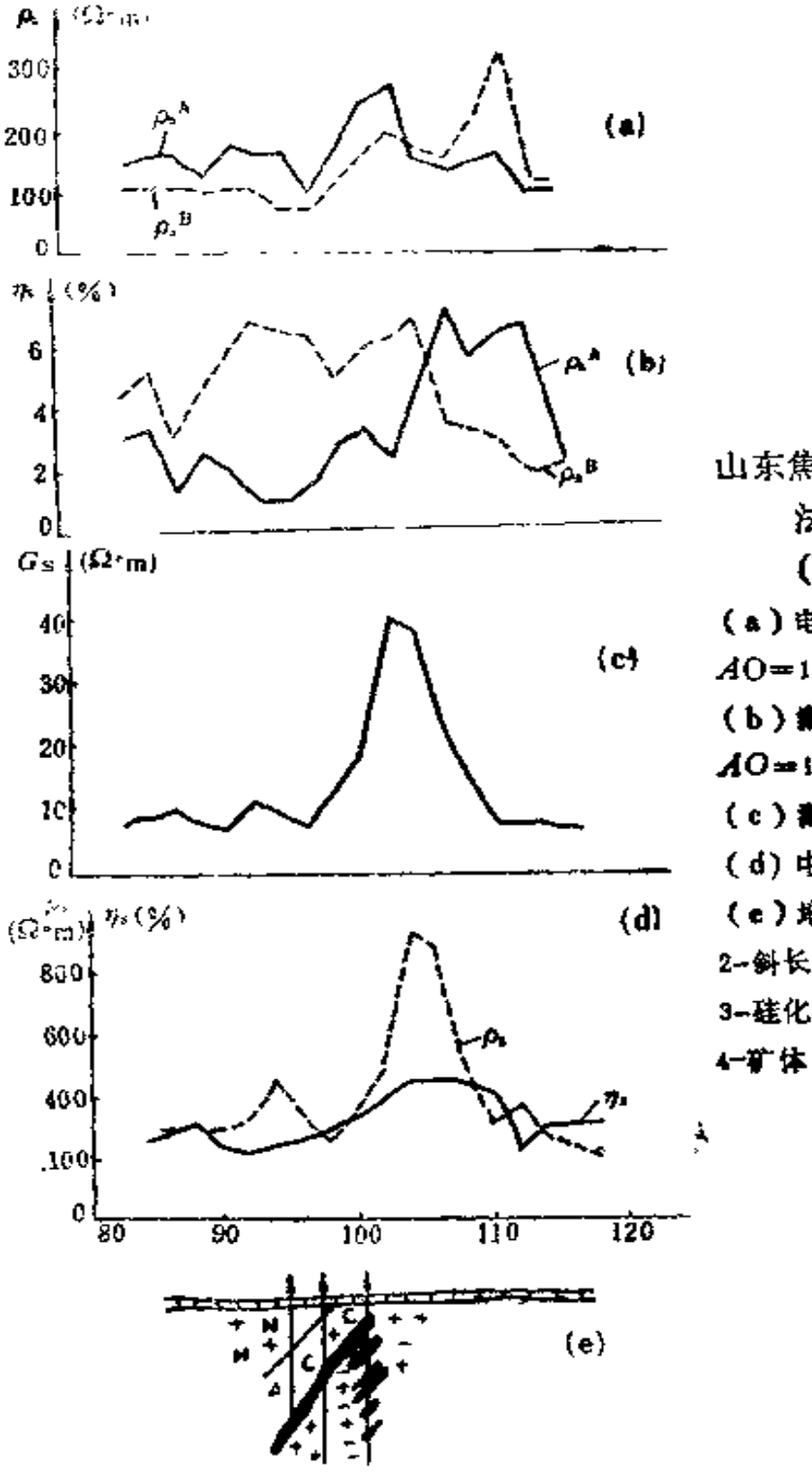


图7-1-5
山东焦家金矿区Ⅰ号电法综合剖面图
（引自李宝印）

（a）电阻率联剖，
$AO=150m$，$MN=20m$；
（b）激电联剖，
$AO=150m$，$MN=20m$；
（c）激电率(中梯装置)；
（d）中梯装置ρs、ηs曲线；
（e）地电断面；1-表土；
2-斜长角闪岩；
3-硅化绢云母化花岗岩；
4-矿体

值为－50～－100nT，自北向南磁场逐渐变弱。图中东部为锯齿状变化的磁场，东北部是以正负磁场兼有的锯齿状变化的磁场，其场值在－20～250nT间变化。东南部磁场较弱，其值在－150～50nT间变化。焦家断裂带则从磁场过渡带或梯度带中通过。

（2）磁场高值带沿走向突然消失，代之以低值或负值磁场区，磁场截断处是构造存在的标志之一。这在胶东地区一些断裂构造处常有出现。

（3）在普遍高起的磁场中突然出现脉冲型低值或负值线型磁场带，这是构造存在的又一标志。

图7-1-7是胶东望儿山174线综合剖面图。从图7-1-7可以明显看出，ΔZ异常具有在磁场普遍高起中的低值或负值脉冲磁场带的特征。该处推测为一断裂构造。后来，ZK19-1孔验证了此推测。该区磁场普遍高起是由有磁性的玲珑花岗岩所引起的，当岩体出现断裂破碎时，岩体的磁性将明显减小，故出现图7-1-7中的磁场分布特征。

（4）在强度不大的平稳磁场中出现低缓的低值或负值磁场带。

图7-1-8是灵山拉格庄Ⅱ线磁测剖面图。从该图中可以看出，在黄铁绢英岩化蚀变带中出现了明显的低缓低值或负值磁异常。该处岩体磁性不强，岩体破碎蚀变后磁性减小，因而出现图中所示现象。

（5）在平稳的磁场中出现高值的线型正磁场带。

在图3-4-10中曾引用了玲珑金矿用某地物探综合剖面图。在闪长岩脉出现明显的高值正磁异常。这是由于岩脉沿断裂构造侵入，由于其磁性较强，故而形成条带状的或线型的正磁异

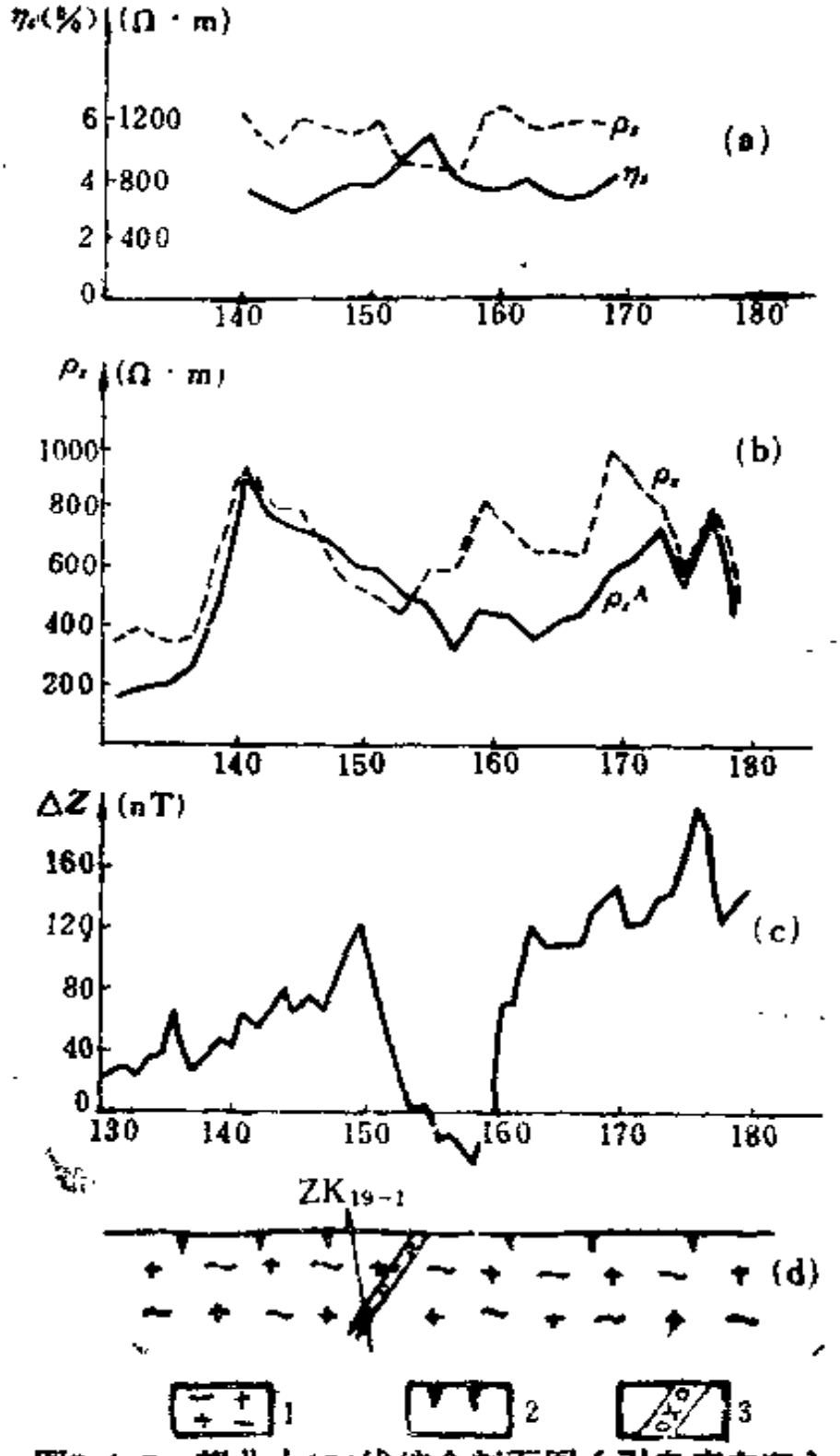


图7-1-7 望儿山174线综合剖面图（引自李宝印）

（a）中梯：AB=500m，MN=20m；

（b）联合剖面ρ_s曲线，AO=130m，MN=20m，

（c）磁法：1-花岗岩；2-表土；3-破碎带

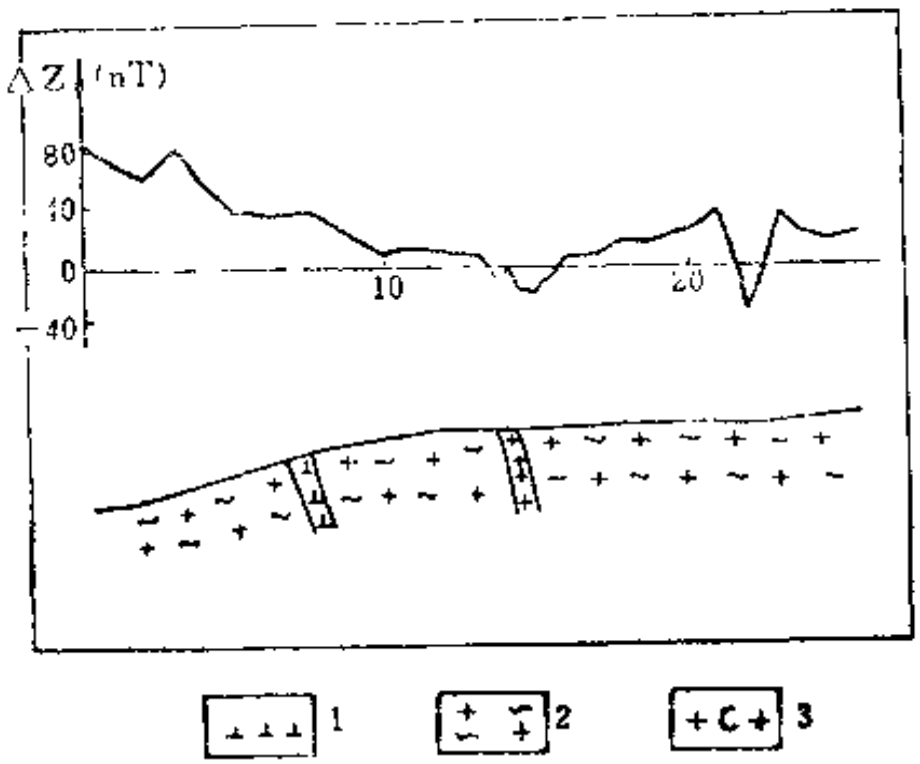


图7-1-8　灵山拉格庄Ⅱ线磁测剖面图（引自李宝印）

1-闪长玢岩脉；2-花岗岩；3-黄铁矿化绢英岩

常带。

（6）磁铁绢英岩化花岗岩引起的高值正磁场带，亦是研究本区断裂破碎带及蚀变带的标志之一。图3-4-10中磁铁绢英岩化花岗岩上产生了明显的磁法正异常。根据磁异常不仅可以圈定断裂带，而且可以提供某些找矿标志。

在胶东地区各系统、各单位均进行了大面积磁测，例如，山东省冶金地质勘探公司物探队在该区做了八百多平方公里的磁法普、详查工作，圈出了断裂带、破碎带、蚀变带及岩脉带等信息近百条。已有若干条得到证实，这就为本区的普查找矿工作提供了构造依据。当然用磁法解决上述地质问题是有前提的，但也不是所有的断裂带、破碎带、蚀变带都可以被圈定出来。例如，有的岩脉和围岩之间的磁性差异不大或断裂破碎带的破碎蚀变强度不大，造成的磁性降低不明显等因素，都可能圈定不出来。另外，实践表明，野外磁测的精度高，点距密，是用磁法研究这类地质问题的必要条件之一。

3．利用重力圈定断裂破碎带的地质效果

图7-1-9给出了招—掖金矿带布格重力异常图。分析图7-1-9可以看出，焦家断裂带的东南部重力值低，向北西重力值逐渐增高，其值从2毫伽增至三山岛附近18毫伽，说明焦家金矿带位于区域重力异常的梯级带上。南部重力低为花岗岩的反映，往北逐渐倾没于胶东群地层之下。三山岛—仓上断裂带的北西侧为重力低（图7-1-9），向南东方向重力值逐渐增高，其值从14毫伽增至20mGal，表明三山岛—仓上矿带同样处在一个重力梯级带上。其北西侧重力低为花岗岩的反映，南东侧重力高为胶东群变质岩的反映。

图7-1-10是焦家主干断裂带剩余重力差值异常图。显然，焦家断裂带也处于重力梯级带上。

本区利用各种物探方法圈定出区域性断裂构造、局部断裂构造和次级构造的范围、走向以及构造间的相互关系，实际上圈出了金矿赋存的空间部位和成矿的有利构造部位，为进一步寻找金矿床打下了基础。

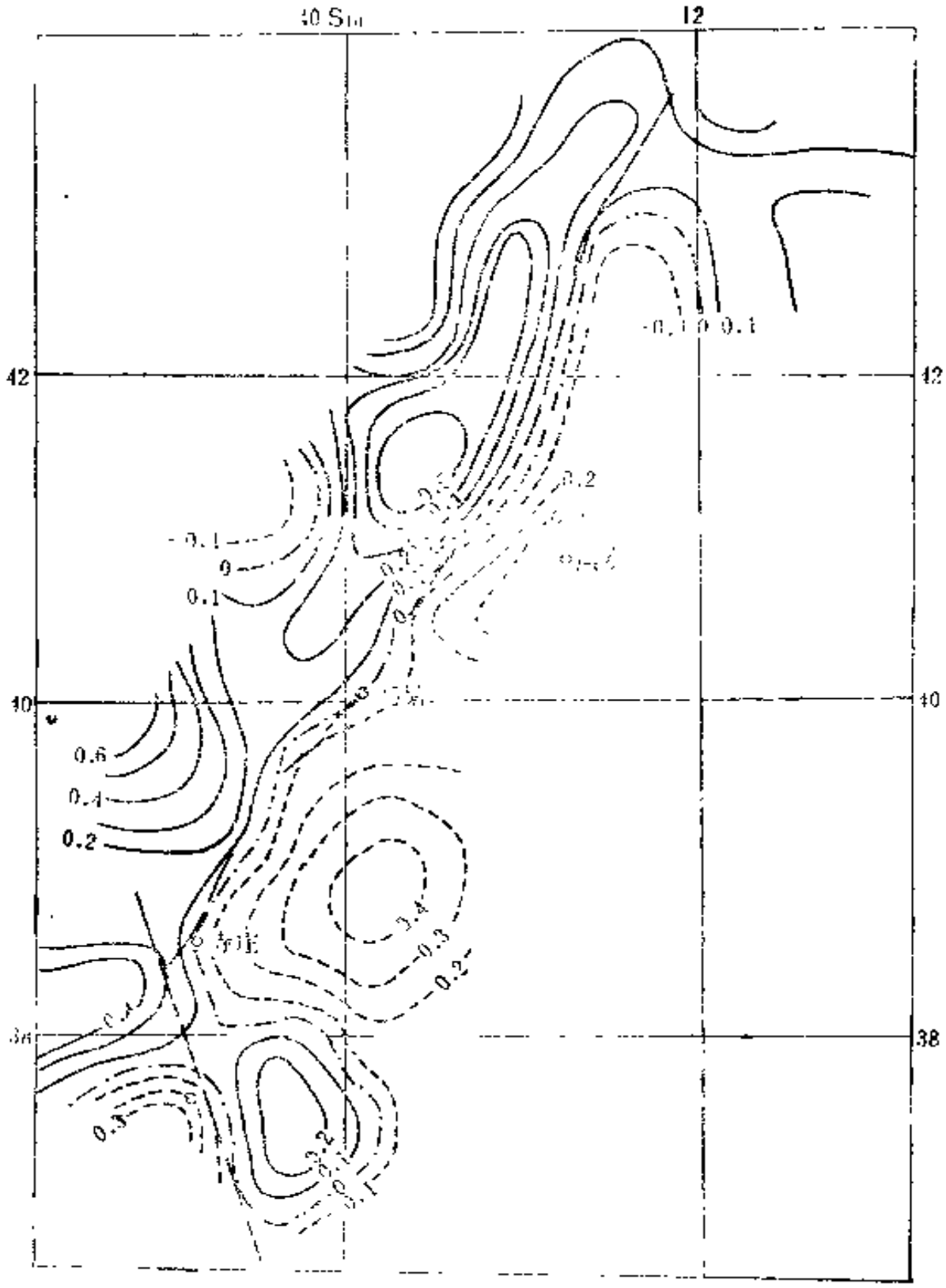


图7-1-10　焦家主干断裂带重力剩余差值异常示意图(引自山东物探队)

（二）利用物探方法圈定硫化物矿化带和富集地段

上面已经介绍了利用物探方法在该区圈出了不同规模、不同类型的构造带及其相互关系，指出了矿液活动通道和矿床赋存的空间，缩小了找金矿的靶区。但是，并不是断裂构造带中任何部位都有金矿床存在，根据该区金矿成矿规律，有经济价值的金矿床与硫化矿物密切共生，一般来说，金矿与硫化物呈正相关关系（见图1-3-1），在断裂中硫化物富集的地段是金矿成矿最有希望的地段。因此，激发极化法是本区普查找矿的主要方法之一，其主要任务是查明和圈定与金矿赋存直接有关的金属硫化物富集带。这是寻找金矿床的重要一步，通过这一步工作可以选择勘探靶区。

该区自60年代以来，山东省地矿局物探队、山东省冶金地质勘探公司物探队、核工业部、院校及科研单位均在该区投入了大面积的激电工作，其中以山东省地矿局物探队投入工作量最大。这些单位的工作结果表明，在招掖金矿带内视极化率（η_s）正常背景值（η_{s_0}）低而平稳，一般为3%～3.5%，根据激电法有关背景值上限或异常下限公式计算结果，异常下限为4%左右。在第四系覆盖区，背景值有所下降。一般4%以上可认为是异常。η_s异常峰值一般在5%～6%，很少超过10%（非矿异常除外），属于低缓激电异常，在资料解释中应注意这一规律。

图7-1-1中用联合剖面法(ρ_s)圈出了17条断裂破碎带，在此基础上，为了圈出硫化物矿化带和富集地段，在该区又投入了中梯激电法，取得了较好的地质效果。前面第三章中图3-4-5-是在该区西北部断裂构造密集及交汇处所获得的7个见矿激电异常的分布示意图。异常编号为DH_1、DH_2……DH_7。

其中DH_1—DH_6异常分布在电阻率法圈定的F_6、F_8、F_9断裂破碎带上，呈线性串珠状分布。根据7个见矿异常中梯装置η_S曲线（AB=600m，MN=20m）统计，各见矿异常视极化率最大值分别为：望儿山异常16.3%、新城异常4.8%、焦家异常5.29%、马塘异常5.38%、河东异常4.85%、东季异常4.87%、寺庄异常4.68%。当AB由600m增大到1000m时，η_s极大值幅值明显增大，例如，焦家异常极大值由5.29%增大到8.4%；新城区有希望的激异常由4.8%增大到6.6%。尽管如此，胶东地电异常仍属低缓的异常。

在前面第三章中曾给出焦家金矿床904线综合剖面图（图3-4-7）和地质物探综合平面图（图3-4-6）。焦家激电异常下限为4.0%，以4.5%等值线圈闭的异常形状呈长条形展布，走向约NE30°，长约1700m，宽约60～200m。η_s异常极值点连线，与矿体顶端在地表投影位置基本吻合（图3-4-6）。由图3-4-7可见，在焦家金矿床上，中梯装置η_s为极大型异常，联剖η_s曲线有反交，二者互相对应。视电阻率（中梯）在η_s极大值处出现局部高阻异常，这是强蚀变的反映结果，这一现象也是找矿的重要标志。后来在该异常区进行钻探验证，仅打钻42个，其中见矿孔30个（图3-4-6），发现了全国有名的焦家金矿床，是目前我国最大的金矿床。

图7-1-11和图7-1-12分别是新城金矿床区激电、地质综合平面图和990线综合剖面图。从图7-1-11可见，新城异常以4%等值线圈闭的平面异常似长条形，长约600m，宽约200m，走向NE30°左右。异常南北有两个峰值，均位于焦家主干断裂带上。在图7-1-12上η_s同样具有明显的异常，而ρ_s不是呈现局部高阻异常，而是呈台阶状。该区经后来钻探验证为一大型

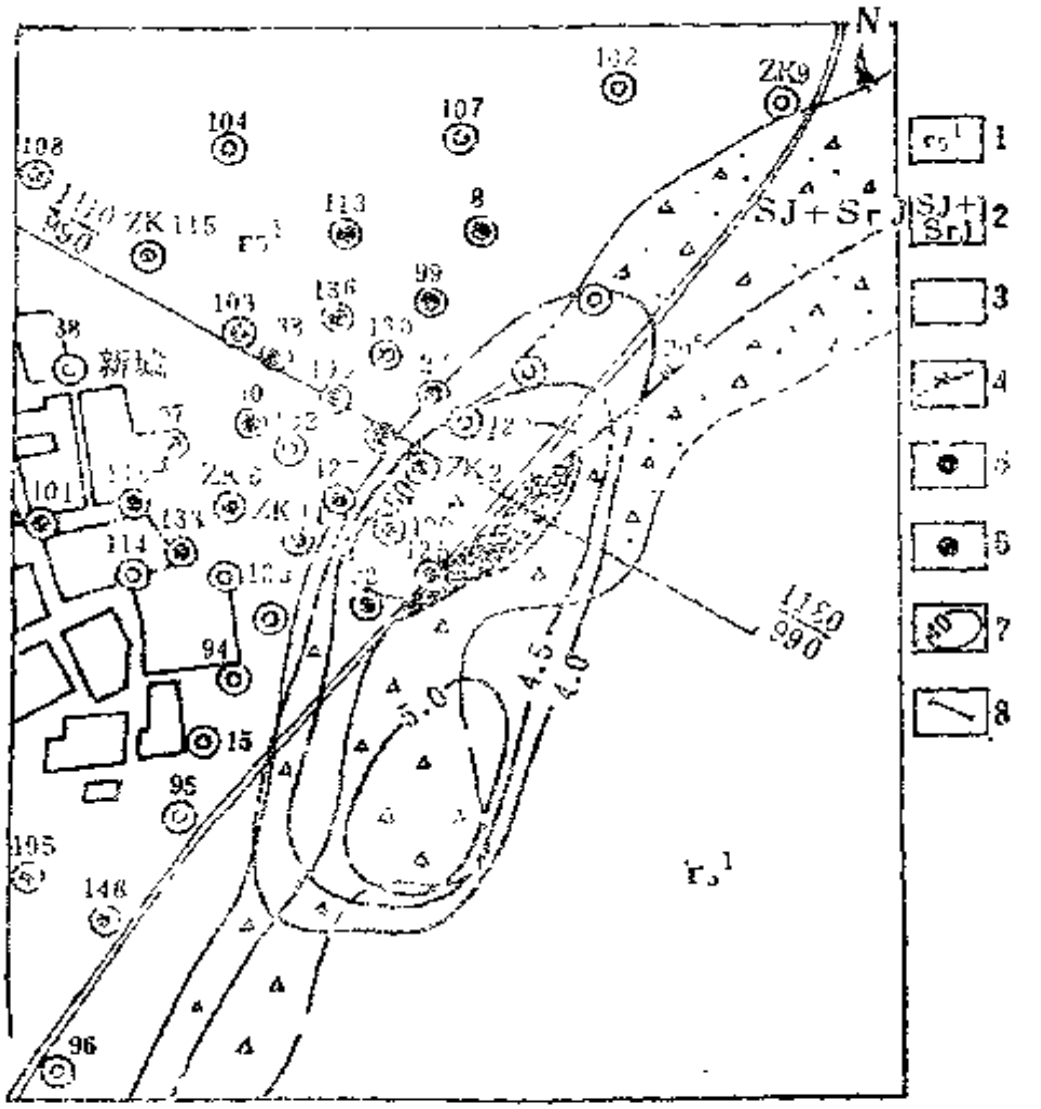


图7-1-11　新城金矿区激电、地质综合平面图（引自山东物探队）

1-黑云母花岗岩；2-蚀变花岗岩；3-金矿体；4-压扭性断裂；
5-未见矿钻孔；6-见矿钻孔；7-激电异常；8-典型剖面

金矿床，目前正在开采。

综上所述，激发极化法在普查焦家式金矿床效果较好。例如，山东物探队自1967—1987年，在胶东共圈出激电异常上百处，新城、焦家、河东、河西、龙埠、马塘、寺庄等金矿就是

根据激电异常经钻探验证发现的金矿床。经近几年钻探验证的46个激电异常，其中有24处异常为含金硫化矿物富集带所引起，地质效果良好。

本区引起激电异常的极化体除了含金硫化矿物富集体之外，还有其它一些干扰因素所致，例如，地下水管、电缆纵横交错；含水破碎带、与金矿化无关的黄铁矿化、含铁磁性矿物的黑云母片岩等所引起，给激电法资料解释带来一定困难。山东冶金地质勘探公司物探队李宝印同志根据他们工作结果将激电非矿异常分为五类，加上其它干扰共有以下几类：

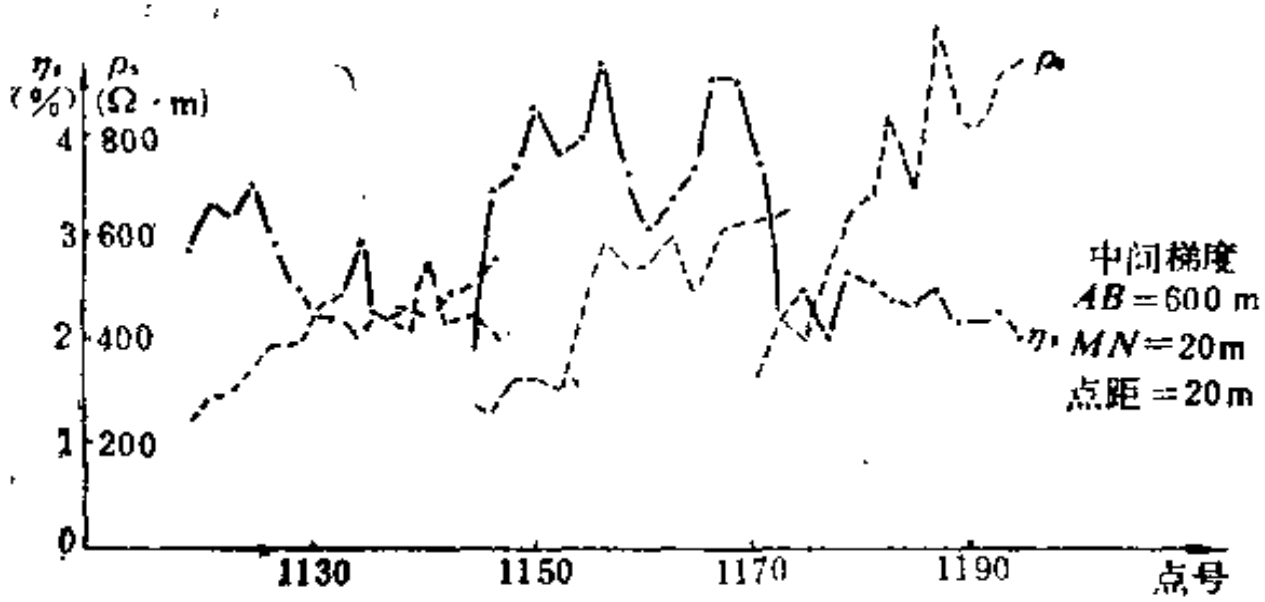
1．异常特征与矿异常相似，但是中梯没有ρ_S局部高阻显示，即无明显的硅化及绢英岩化等蚀变现象；化探无明显异常。认为这类异常是由断裂带中的黄铁矿化所引起(图7-1-7)。后来打钻见到了破碎带及黄铁矿化、红化及高岭土化。

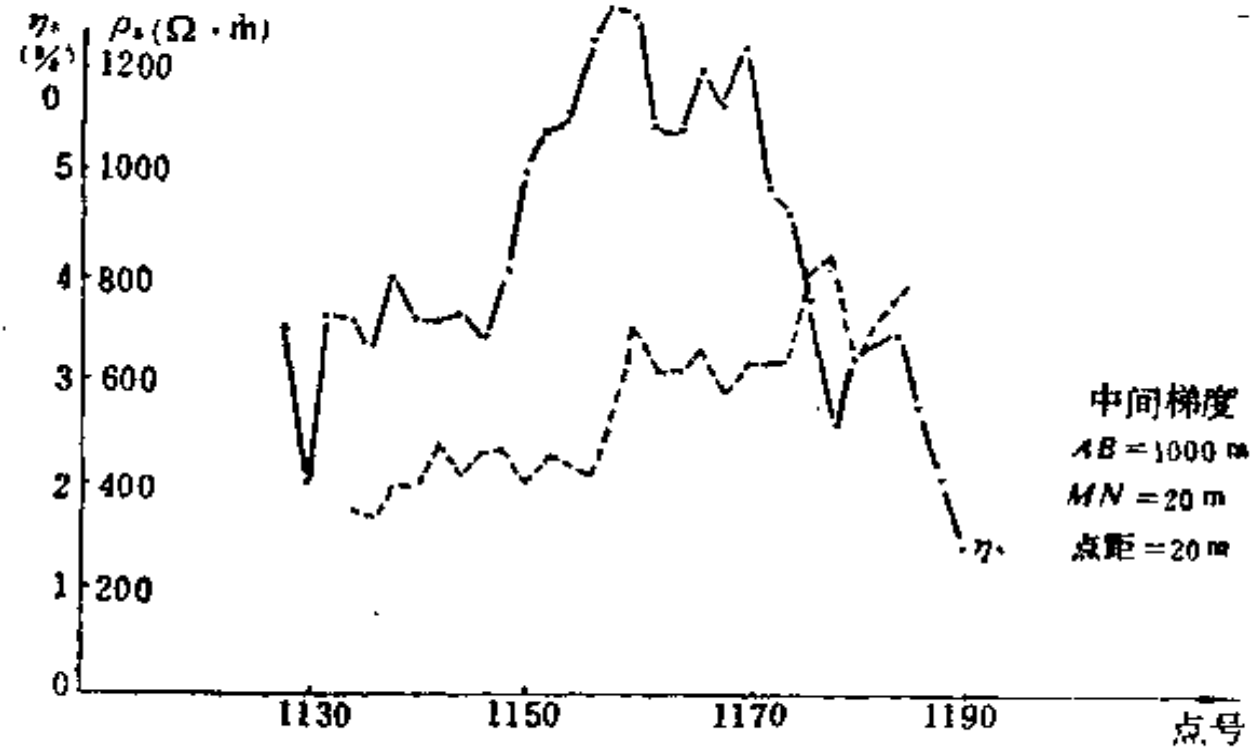
2．异常有一定走向，具有脉状体特征，异常强度较大，一般最大值达10%～20%，中梯ρ_S高阻异常明显或不明显；化探异常不明显；异常分布在玲珑岩体内。这类异常一般属富黄铁矿化引起的。

3．异常形态为透镜状，最大异常值达到20%，中梯装置电阻率异常不明显；化探无异常；地表无构造存在，也未见黄铁矿化。经研究认为，该异常是含铁磁性矿物的黑云母片岩层所引起的。在朱家咀地区见到此异常。

4．异常是由少数的黄铁矿化的脉岩所引起的。异常出现在有黄铁矿化的地段，不是在整个的脉岩中，异常强度最大值为5%～6%。中梯装置高阻异常明显或不明显，有时出现少量单元素低含量化探异常或异常不明显。

5．异常出现在胶东群地层中，一般位于齐 组地层中。异


η_s (%)
ρ_s (Ω · m)
800
600
400
200
4
3
2
1
0
1130
1150
1170
1190
点号
中间梯度
AB = 600 m
MN = 20m
点距 = 20m


η_s (%)
ρ_s (Ω · m)
1200
1000
800
600
400
200
0
5
4
3
2
1
0
1130
1150
1170
1190
点号
中间梯度
AB = 1000 m
MN = 20 m
点距 = 20 m

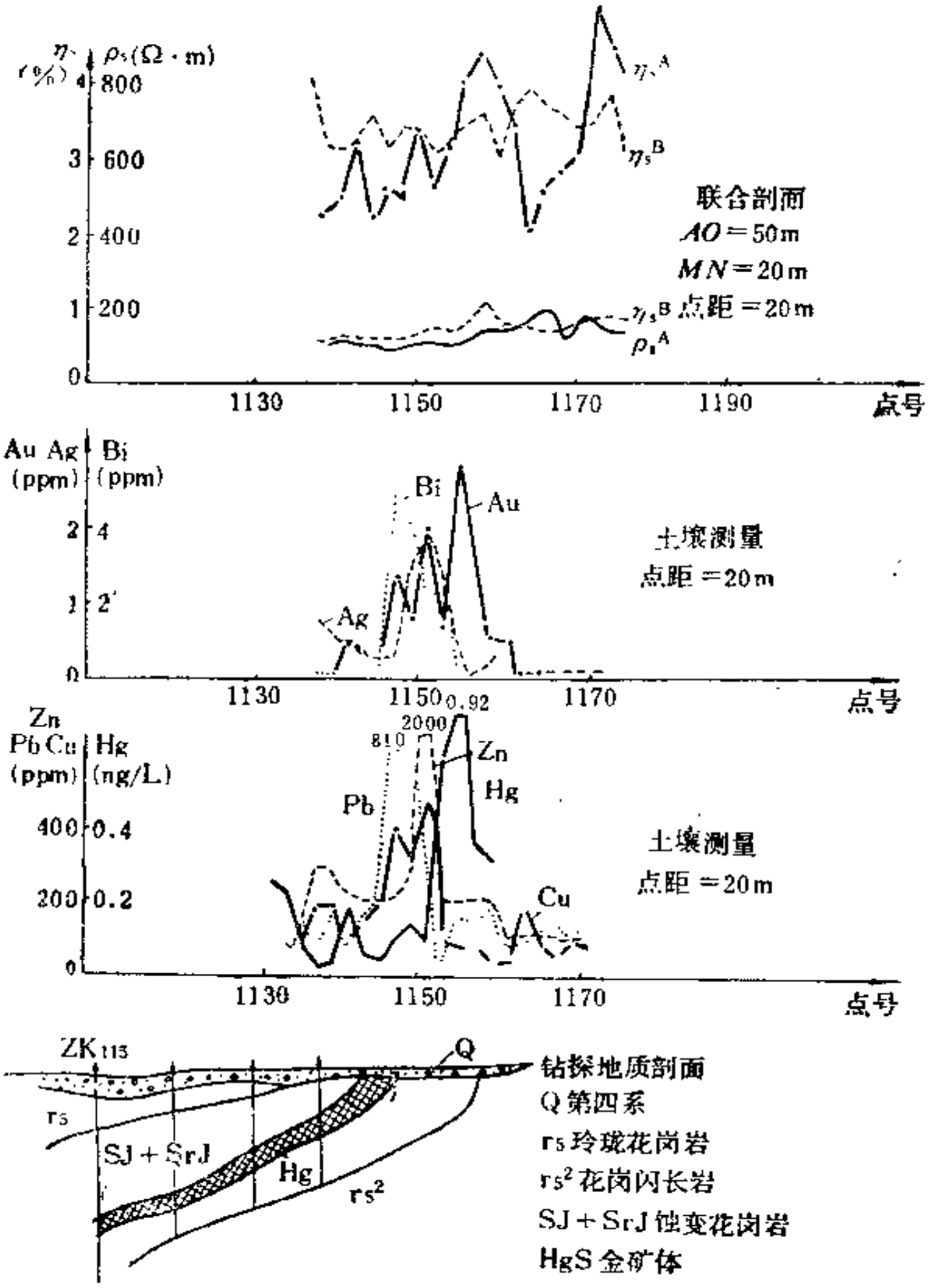


图7-1-12　新城金矿区990线综合剖面图（引自山东物探队）

常最大值达5%～6%，在η_S异常及其附近有变化较零乱的Ni、Ag、Cu等异常。这类异常一般为意义不大的分散金属矿化所引起的。

6．地下水管、地下电缆引起的非矿干扰异常。

由于本区存在以上干扰因素，故进行激发极化法资料解释时应注意区分矿与非矿异常。在胶东地区寻找焦家式金矿床应注意几点：

（1）首先圈定断裂破碎带（可用电法和磁法或重力）；

（2）在断裂带附近圈定硫化物富集带(用激发极化法)；

（3）在已圈出的硫化物富集带内有强硅化、黄铁绢英岩化等蚀变（中梯装置ρ_S出现局部高阻异常特征，同时磁异常减弱或为负值）；

（4）化探具有明显的Au、Ag、Bi、Cu、Pb、Zn组合异常。

以上四条便是该区反映金矿床的主要地质-地球物理-地球化学特征。具备以上四条的地段可选为进一步工作的勘探靶区。

§7.2 日本菱刈金矿床物探方法应用的地质效果

日本菱刈金矿床位于九州岛鹿儿岛县东北部的伊佐郡菱刈町大山口，距鹿儿岛市45km处。该金矿床是80年代以来发现的六个世界级特大型金矿床之一，储量120t，是目前日本最大的金矿山。

一、矿山历史及勘查经过

菱刈及其毗邻地区都有许多金矿床，从十九世纪晚期，即日本藩政时代至1975年的几十年间，由于各种原因断续开采。在藩政时代有人在菱刈矿山试采过，明治初年开矿失败。1903年2月再次开采，鼎盛时期职工有120人。1922年继续开采。1935年在标高230m处挖了180m坑道。1942年计划开采坑道下的矿体，翌年由于颁布了整顿金矿山的命令而中止。1952年再次恢复坑道工作，沿3号脉挖了40m左右，由于矿脉情况不理想而停止了勘查工作。后来采矿权转给了住友金属矿山公司。

1952年至1973年间，曾有不少地质工作者对该区进行了地质勘查。1972—1973年间，小林直树等四人、西泽德雄等三人（住友金属矿山公司勘查部）在该地区进行了地质调查后指出：（1）北萨地区是金矿山密集的地带，但是大多是私人矿山，至今尚未进行过基础性区域地质调查；（2）该地区大部分被矿化期后的新时期火山岩类和火山喷发物所覆盖；（3）从该地区的地质构造情况看，有金矿赋存的可能性。如果采用最新的勘查技术，搞清下部的地质构造，很有可能找到隐伏的金矿床。他们根据这一认识，通过金矿振兴协会制定了“北萨地区”的基础地质调查计划，并促进有关部门予以实施。

1975至1977年间，金属矿业团进行了北萨地区的基础地质调查。1975年对整个地区进行了重力勘探，1976年和1977年进行了地质调查。通过一系列的调查工作，不仅查明了区域地质构造，而且明确指出：“目前的大多数矿脉发育在北萨早期安山岩类的隆起—背斜构造的顶部和翼部。”重力勘探确定了菱

表7-2-1　测区及其附近地区的主要地层

时代		地层	岩相
第四纪	全新世	冲积层	砂、砾、粘土
	更新世	白色浮石层，火山灰岩	浮石降落/流动沉积物，熔结凝灰岩
		黑园山流纹岩	流纹岩、凝灰岩、玻质岩相
		田野安山岩	紫苏辉石、普通辉石安山岩、凝灰角砾岩、凝灰岩、黑色泥岩
晚第三纪	上新世		
	中新世	山野流纹岩	流纹岩
		北萨安山岩	凝灰角砾岩
			凝灰岩
			紫苏辉石、普通辉石安山岩
中生代	晚白垩世	四万十层群	页岩、砂岩

组成，也称为北萨古期安山岩类，不整合地覆盖在四万十层群之上。第四系自下而上由北萨新期火山岩类，黑园山流纹岩类、熔结凝灰岩、火山碎屑堆积物和冲积层组成。

矿脉主要产于基底岩石背斜构造的轴部和西北翼之断裂破碎带中。已知金矿大口矿床的金一般产在火山堆积底部附近的北萨安山岩的浅成热液石英脉中，高品位矿石常见于条带状岩系中。该区山丘陡峭，高度在100m到300m，森林茂密，山谷狭窄，人口稠密。区内有热泉，在大口矿山井发过程中，发现含金矿脉和热泉间有密切关系。

刈山田的高异常带。

1978年在该区开展了线距为1000m的深部电法勘探工作。后又利用先达利公司的HEM系统进行了直升飞机航空电磁法测量。测量结果指出：菱刈地区显示低电阻率。这个地带相当于下部地层的隆起部分。这个异常带也是个极其值得勘查的地区。

1980年11月举行了区域地质调查现场会，与会者同意在该地区最有希望的地点，即在电法低阻异常中心和东西侧打三个钻孔，以了解菱刈地区的地质构造情况。三个钻孔钻探结果，孔孔见矿，金的最高品位达290.3g/t，最低金品位也有44.7g/t；最大厚度达5m以上。一个世界级特大型金矿床经过几十年努力，终于为日本地质工作者和金矿物探工作者所发现。

二、地质概况

日本九州南部的区域构造位置为日本海沟西侧和九州－帕劳（Palau）海岭东缘的北西延长部。区域中部有与日本海沟相连的鹿儿岛地沟。基底岩石为被北东及北西向断裂切割的四角形地块集聚而成，并发育有与九州－帕劳海岭相连接的北西向断裂。区内金银矿床的分布受切割基底岩的北西向构造控制。

菱刈金矿床位于鹿儿岛地沟现代火山构造带上，离樱田活火山只有20km。矿区断裂发育，温泉到处可见。该区也是琉球弧的一部分。

该区基底岩石为白垩纪四万十层群，其上不整合地覆盖着第三系和第四系（见表7-2-1）。白垩纪四万十层群主要由黑色页岩和砂岩组成，在该区没有露头。第三系主要由火山岩类

三、物探工作及其地质效果

1975年对包括后来进行的电磁法测区在内的整个地区进行了重力测量。测量结果如图7-2-1所示。分析图7-2-1可见，在后来发现的菱刈金矿床处为重力高，反映了该区未出露的四万十层群平缓产状的隆起部分。地质调查指出：“目前的大多数矿脉发育在北萨早期安山岩类的隆起－背斜构造的顶部和翼

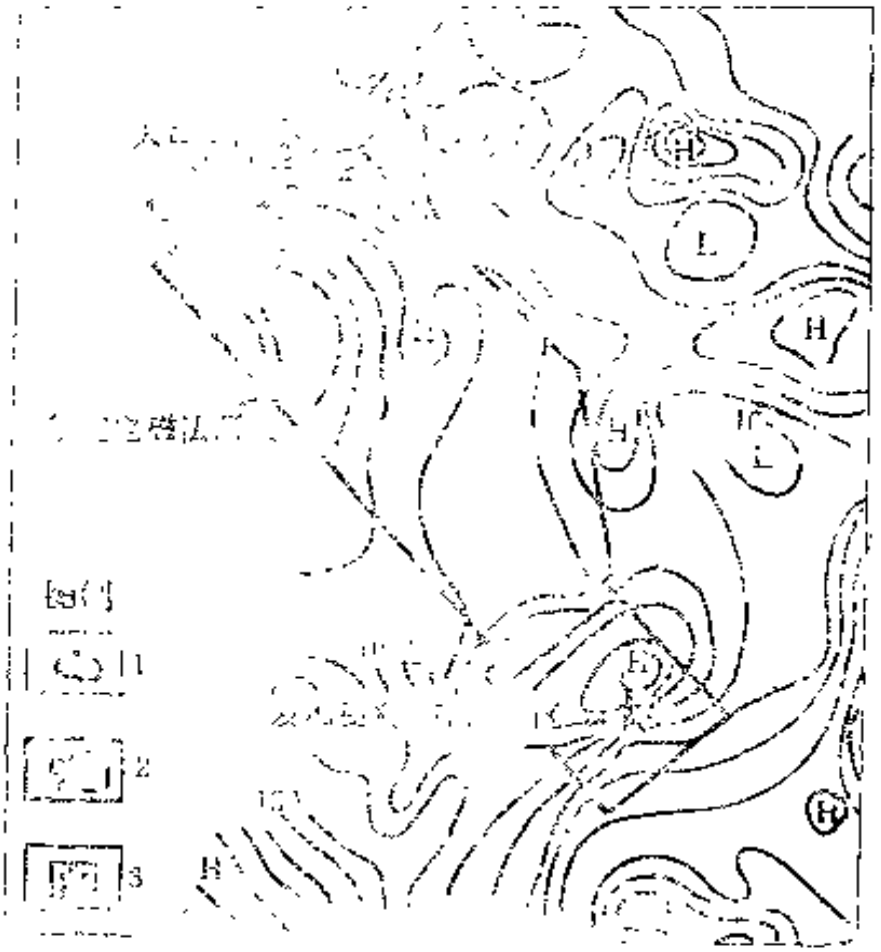


图7-2-1　区域重力布格异常等值线图和航空电磁法测区
（引自I. M. 约翰逊等）

1-重力异常等值线；2-航空电磁法测区；3-已发现的菱刈金矿床的地区

部。”显然，重力勘探结果圈出了这些有利于找矿的构造部位，这只是找矿的必要条件而不是充分条件。

在进行大面积电法工作之前，首先在已知的大口矿山的下牛尾矿床上进行了多种地面物探方法试验。试验所用装置有a=50、100和200m的显纳装置。地面电法试验结果表明：矿床与围岩（北萨安山岩或青磐岩）具有明显的电性差异（图7-2-2）。在矿体正上方，在50m视深度上测到的视电阻率小于20Ω·m，在远离矿床的地段，视电阻率值大于100Ω·m。这一试验

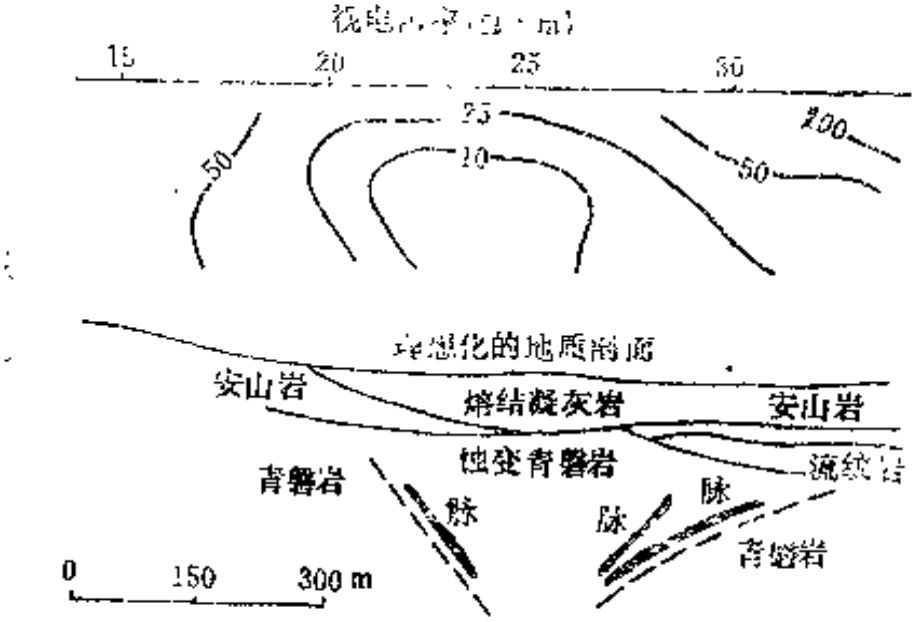


图7-2-2　大口矿山下牛尾矿床上的视电阻率拟断面和相应的理想化地质剖面图　（引自I.M.约翰逊等）

工作表明：在下牛尾矿床所确定的范围和深度内进行视电阻率区域填图是适当的。航空电磁法很适用于解决这类勘查问题。

日本金属矿业事业团选定了直升飞机航空电磁法和磁法测量。根据有利的构造环境、区内热泉位置和金矿点的分布，圈定了包括已知金矿——大口矿山下牛尾矿床在内的60km²测

区，如图7-2-1所示。

1978年末，用先达利公司的HEM—802系统进行了航空测量。发射线圈和接收线圈安装在飞机下约30m吊仓内，垂直共轴排列，线圈距8.5m。工作频率为$f\approx735$和3220Hz。观测同相和异相二次分量。磁力仪探头位于直升飞机电磁系统吊仓内。飞升高度为40m，飞行测线间距250m。总工作量约250测线公里。绘制了比例尺为1:25000的磁测等值线圈、电磁测量

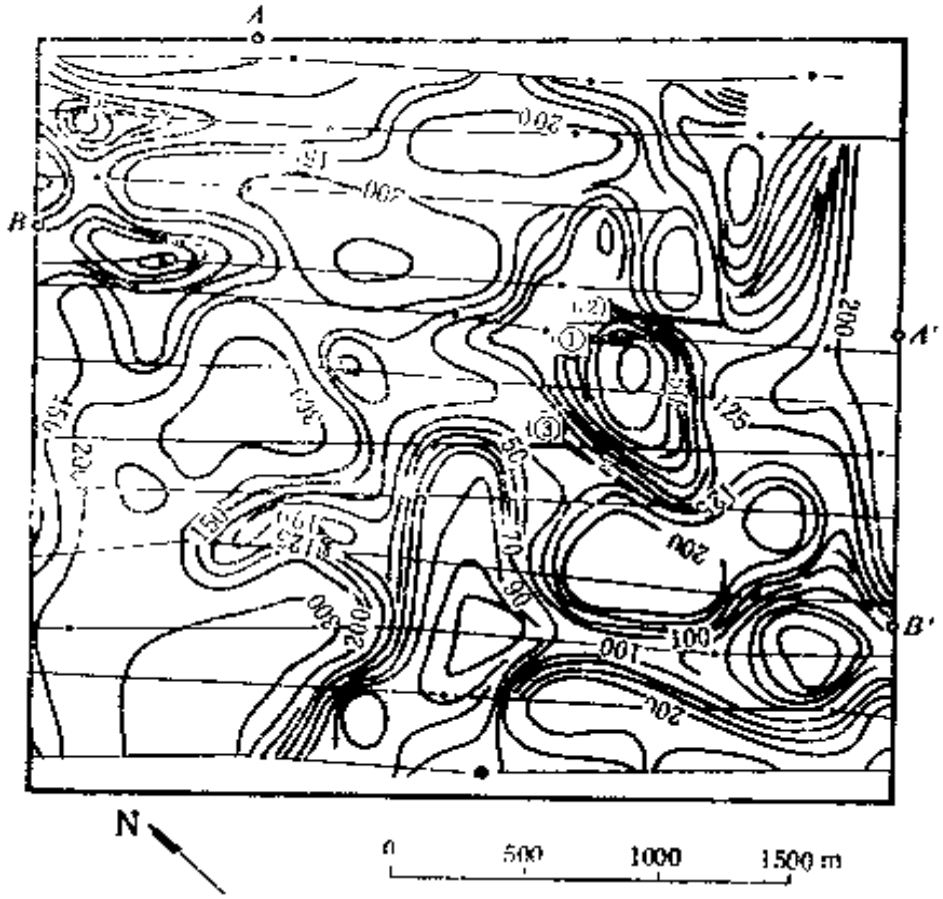


图7-2-3　用735赫芝数据绘制的视电阻率等值线图

（引自I. M. 约翰逊等）

等值线间距在0～100 Ω·m区间为10 Ω·m；在100～150 Ω·m区间为25 Ω·m，尔后绘制200、300、500和1000 Ωm等值线。图中直线为航线；A、A′B和B′表示电测深测线；①、②、③为钻孔位置、编号及钻进方向

异常图和视电阻率等值线图。图7-2-3和图7-2-4给出了f=735、3220Hz电磁法获得的视电阻率结果。

分析图7-2-3和图7-2-4可见，当f=735和3220Hz时，在测区中部均出现一个明显的低电阻率区，f=3220Hz的低阻区比f=735Hz范围大，更接近测区中部，最内圈等值线值为20Ω·m，与已知金矿区视电阻率异常相似。

图7-2-5给出了图7-2-1中★区1978年区域调查的地面电法勘探视电阻率等值线、1978年航空电磁法视电阻率等值线及

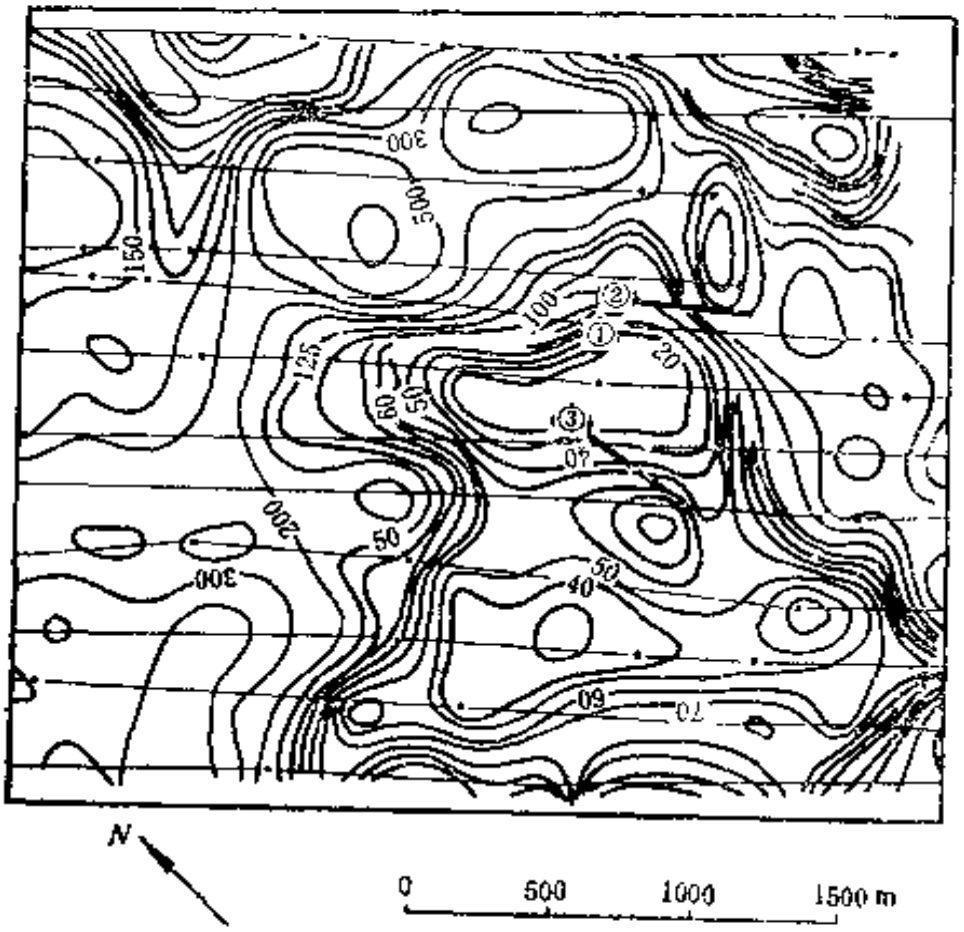


图7-2-4　用3220Hz数据绘制的视电阻率等值线图

（引自I. M. 约翰逊等）

测区和等值线间距与图7-2-3相同

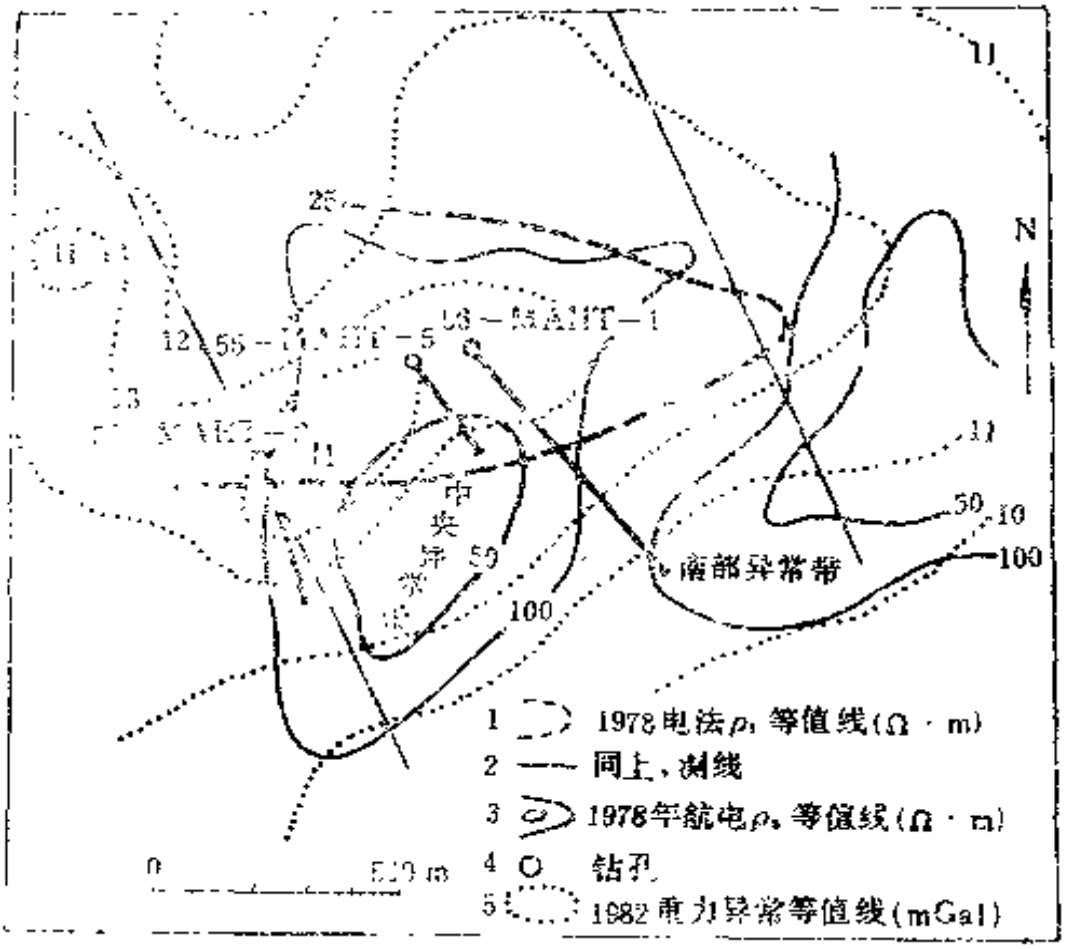


图7-2-5 菱刈地区综合物探异常及钻孔布置图
（引自西泽德雄、茨城谦三）

1-1978年电法 ρ_s等值线(Ω·m)；2-同上，测线；3-1978年航电 ρ_s等值线(Ω·m)；4-钻孔；5-1982年重力异常等值线(mGal)

1982年该公司详细重力勘探结果。很明显，在中央异常带，地面电法视电阻率以25Ω·m所勾绘的ρ_s等值线范围与航空电磁法视电阻率ρ_s=50、100Ω·m勾绘的等值线范围基本吻合。电法低阻异常部位与重力高异常位置大致吻合。结合地质情况，深入研究各种物探方法所获得资料，并与已知金矿区情况进行对比发现：重力异常高反映了该区未出露的四万十层群的隆起部

位，电法低阻异常正好对应该隆起部位，表明该隆起部位岩石断裂破碎形成低阻带。1978年日本矿产资源勘探技术开发调查报告中指出："虽然菱刈山田地区的地表电阻率数据很少，但是通过航空电磁法勘查结果，掌握了低电阻率带的全貌，特别是已知矿床的东北延伸部分，与已知矿床地带相同，都是今后勘探工作中极其值得注意的方向。"

为了验证物探异常和寻找深部矿体，在图7-2-5所示异常部位布置了三个钻孔：56—MAHT—1、55—MAHT—5、56—MAHT—2。三个钻孔的钻探结果列入表7-2-2中。

表7-2-2　菱刈地区区域钻探分析结果

钻孔编号	深度(m)	宽度(m)	金(g/t)	银(g/t)
55—MAHT—5	291.70～291.85	0.15	290.3	167
56—MAHT—1	465.25～466.0	0.75	102.0	50.3
56—MAHT—1	476.35～476.60	0.25	149.7	52.0
56—MAHT—2	241.68～242.90	1.22	63.7	44.0
56—MAHT—2	261.40～265.15	3.75	69.9	52.8
56—MAHT—2	277.65～283.10	5.45	220.3	57.6
56—MAHT—2	301.75～302.50	0.75	44.70	26.3

1981年11月到1982年4月，住友金属矿山公司又打了18个钻孔，进尺6870.8m。探明了这一著名的金矿床的储量。

图7-2-6给出了经钻探查明并正在开采的地质剖面。重力高正好反映了四万十层群隆起，电法低阻异常反映了四万十层群顶部断裂破碎，含金石英脉赋存在断裂破碎带中。以上说明物探资料的推断解释是正确的。

从该金矿床的勘查过程可以看出：菱刈金矿床的发现，物探方法，尤其是航空电磁法起了十分重要的作用。I.M.约翰逊等人发表文章，题目为"菱刈金矿是航空的电磁法发现的"。

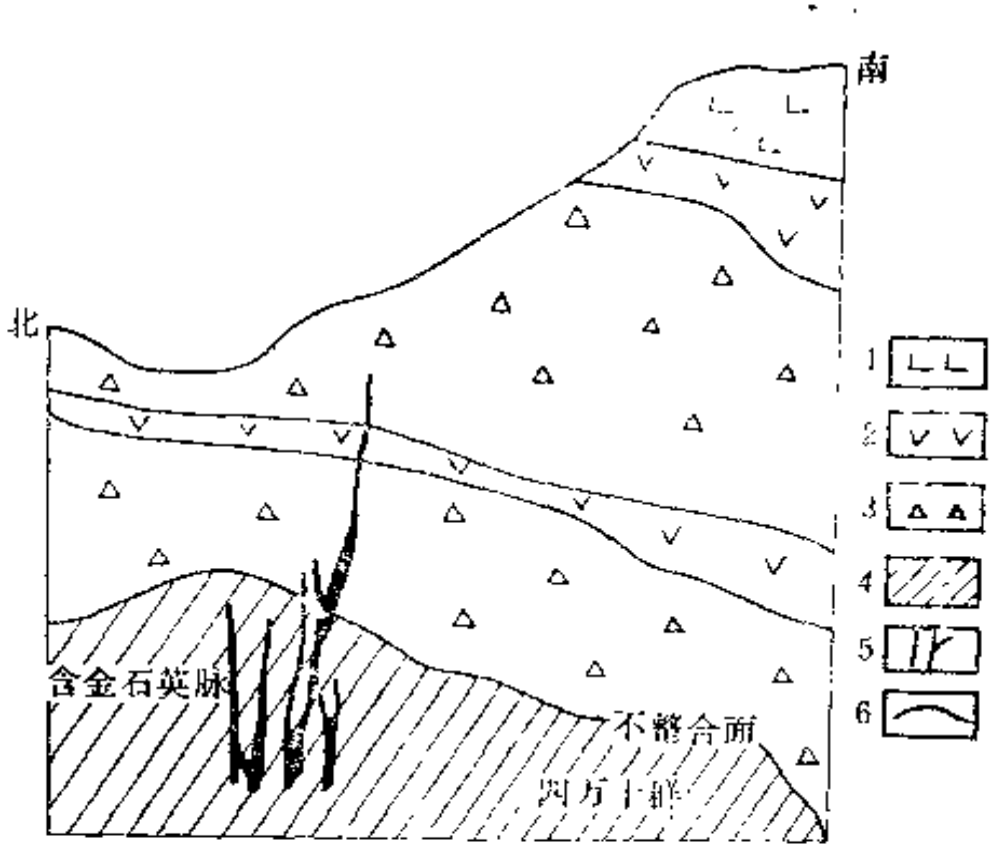


图7-2-6　菱刈金矿矿床剖面图（引自冶金部考察团考察报告）

1-黑园山流纹岩；2-北萨新期火山岩类；3-北萨古期安山岩类；
4-四万十层群；5-含金银石英脉；6-不整合面

日本人西泽德雄和茨城谦三在“日本菱刈矿山的勘查经过”一文中写到：菱刈矿床的发现，是经过漫长的岁月，众多的勘查人员灵活运用各种技术手段，反复调查而取得的成果。希望诸位在其他地区灵活地运用该区的有效经验，找到新的矿床。”中国冶金部代表团赴日本考察报告中写到：“找矿工作必须利用综合手段，努力引用新技术、新方法。目前我们有些地质队忽视物化探工作，这是值得注意的。我们认为，物化探和其它新技术、新方法对寻找金属矿是有效的，……。”

笔者认为该矿床的找矿经验有以下几点：

（1）物探工作要与地质工作紧密配合。该区地质人员根

据地质构造、成矿条件指出该区深部可能有隐伏矿床。搞清深部构造成为寻找隐伏金矿床的关键。又如地质人员指出：大多数矿脉发育在北萨早期安山岩类的隆起—背斜构造的顶部和两翼。重力异常高确定的四万十层群隆起才具有一定的找矿意义。

（2）该区为了应用物探方法研究深部构造，首先在已知金矿区进行方法试验，掌握已知金矿区的地球物理特征及方法有效性，取得经验，然后再开展面积性工作。这样做有的放矢，易于取得较好地质效果。

（3）该区找金矿是从已知到未知。测区内包括已知金矿床，并且掌握了已知金矿床上电法为低阻异常带。在未知区发现的电法低阻带与已知区类似，故电法低阻带就成为进一步工作的靶区。日本菱刈金矿的发现，主要是在地质工作基础上，地质与物探紧密配合，用物探方法研究深部构造，并与已知金矿上的异常进行类比，圈出进一步工作靶区，最后经地质钻探工作，查明该金矿床的储量。

（4）物探方法间应综合利用。在该区重力与电法结果综合进行解释，地质效果较好。例如，利用重力高确定了四万十层群的隆起部位，隆起部分破碎，岩石电阻率降低，电法勘探在此部位出现视电阻率低阻带。含金石英脉恰位于四万十层群隆起顶部与北萨早期安山岩底部破碎带中。各种物探方法具有不同特点，可从不同侧面提供信息，使所要解决的地质问题获得令人满意的结果。

日本菱刈金矿的找矿经验是很宝贵的，值得我国金矿物探工作者借鉴。但要根据工作区内具体的地质—地球物理特征，灵活运用他们的经验，不可生搬硬套，以免造成遗憾。

§7.3 砂金矿床物探方法应用的地质效果

在第三章中我们曾引用了我国几个砂金矿床上物探方法应用的地质效果，这里不再赘述。本节中引用美国拜哲山砂金矿区的物探工作的地质效果。

美国矿业局于1968年5月开始对加利福尼亚州内华达县拜哲山（Badger Hill）地区的第三纪古河道砂金矿进行研究，目的是建立砂金矿的三维模型，圈定含金层位的深度、厚度和范围。为此使用了折射地震法、重力法、磁法和测井方法。由于物探工作的结果，节约了约40%的钻探工作量。

一、地质概况

该区基岩主要为晚古生代的板岩、千枚岩和石英岩，出露岩层的走向为北北西，倾向为北东。有花岗岩和少量石英脉侵入变质岩。

古河道的填充物分为下部和上部砂砾层。下部砂砾层砂砾较大，分选性差。它又分为兰色砾石和红色砾石两层。兰色砾石充填主河道的底部，沿河道中心线厚度由28.96至38.1m。其特点是，其特有的兰灰色、有次生硫化物存在、密度高、在基岩以上6.1m内大漂砾的比例较高。兰色砾石层的约71%由变质岩、风化岩石和乳石英卵石、中砾和漂砾组成，其余的29%由石英砂和扁豆体或脉状兰色粘土组成。兰色砾石中混有少量的金、云母、黑砂、黄铁矿、锆石和碳质物。上覆的未固结的红色砾石在颜色上与下伏的兰色砾石大不相同，但这两层在岩性组份和分选特征上是类似的。红色砾石经过氧化，被铁的氧

化物染成赭红色，一般缺少硫化物，其厚度6.1m至24.38m。

上部砂砾层为白色，厚约27.43m。这一层的5%是由乳石英卵石组成，其余的95%为细至粗粒石英砂和粘土组成。

大约80%的金赋存于靠近基岩的兰色砾石层中，其余20%的金无规律地分布在所有的红色和白色砂砾层中，由地表直至兰色砾石层的顶板，由古河道的一岸至另一岸。兰色砾石层应为本区研究的主要目标。

二、野外工作方法

本区投入的物探方法有浅层地震、重力测量、磁测和井中声速测量。

地震测量：采用SIE RS—4型12道折射地震系统进行测量，检波器间距从15.24至30.48m，最大排列长度为335.28m。有一至三个炮点，一点设在排列的中心点，另外，有时在排列两端，距最后一个检波器一定距离上也设置炮点，这样可以提供有关复杂的近地表层位的信息。炸药是由0.15kg到45.36kg 40%的硝酸甘油炸药。中心点炸药量一般为1.35kg，在排列的端点，当炮点距最后检波器较近时，炸药量为9kg，较远时为22.68kg，炸药一般放入0.305～0.61m深的浅孔中。检波器和炮点的平面位置和高程用经纬仪和卷尺测定，垂直精度0.03m水平精度0.305m。

重力测量：由于重力测量也需要精确的高程数据，故大部分观测是在地震检波器的点位上进行的。重力仪为拉柯斯特—隆伯格G型。为了减少仪器零漂所造成的误差，每隔4小时左右对一次基点。

磁测：前期采用饱和式垂直磁力仪，精度约±10纳特

(nT)。后期采用核旋磁力仪，灵敏度±1纳特。

井中声波测量：采用12个相距3.05m的陶瓷换能器检波。炮点位于地面，测量仪器为SIE RS—4型地震仪。此外，还进行了电测井和井径测井，电测井包括以下几类：单点电阻、自然电位、8、16、32、64吋*的电位电极系测井。

三、物探工作结果

在该测区共作地震折射剖面14条，总计约7162.8测线m。重力测量共作300点，地面磁测共作1000点。在物探工作之前所打的一些取样钻，用来作为根据地震结果进行分层的基准，在钻孔中还做了测井工作，一方面为地面物探资料的解释提供了参数（声速），另一方面也有助于划分岩性。

根据重力测量资料编绘了布格重力异常图（图7-3-1）。它清晰地反映出古河道的范围、走向和总的形态，因而也就提供了有关砂金矿赋存范围和总体形态的资料。

大部分地震测线布置在古河道范围内，垂直其走向，目的是对沉积物进行分层，确定古河道底部的形态，圈出古河道最深的部分，也就是金最有可能富集的部位。个别测线延伸到古河道范围以外，以便准确确定古河道的界线，此外还作了一些沿古河道走向的剖面，目的是建立古河道沉积物的三维模型。

对该区所有地震剖面的解释表明，该区存在着四个波速明显不同的层位，其地震波速值已列在第四章的表4-2-2中。第1和第3层的波速变化不大，变化是随机的。第2和第4层的波速在空间上变化较大。

根据不同地震剖面的解释结果，建立了拜哲山地区的立体

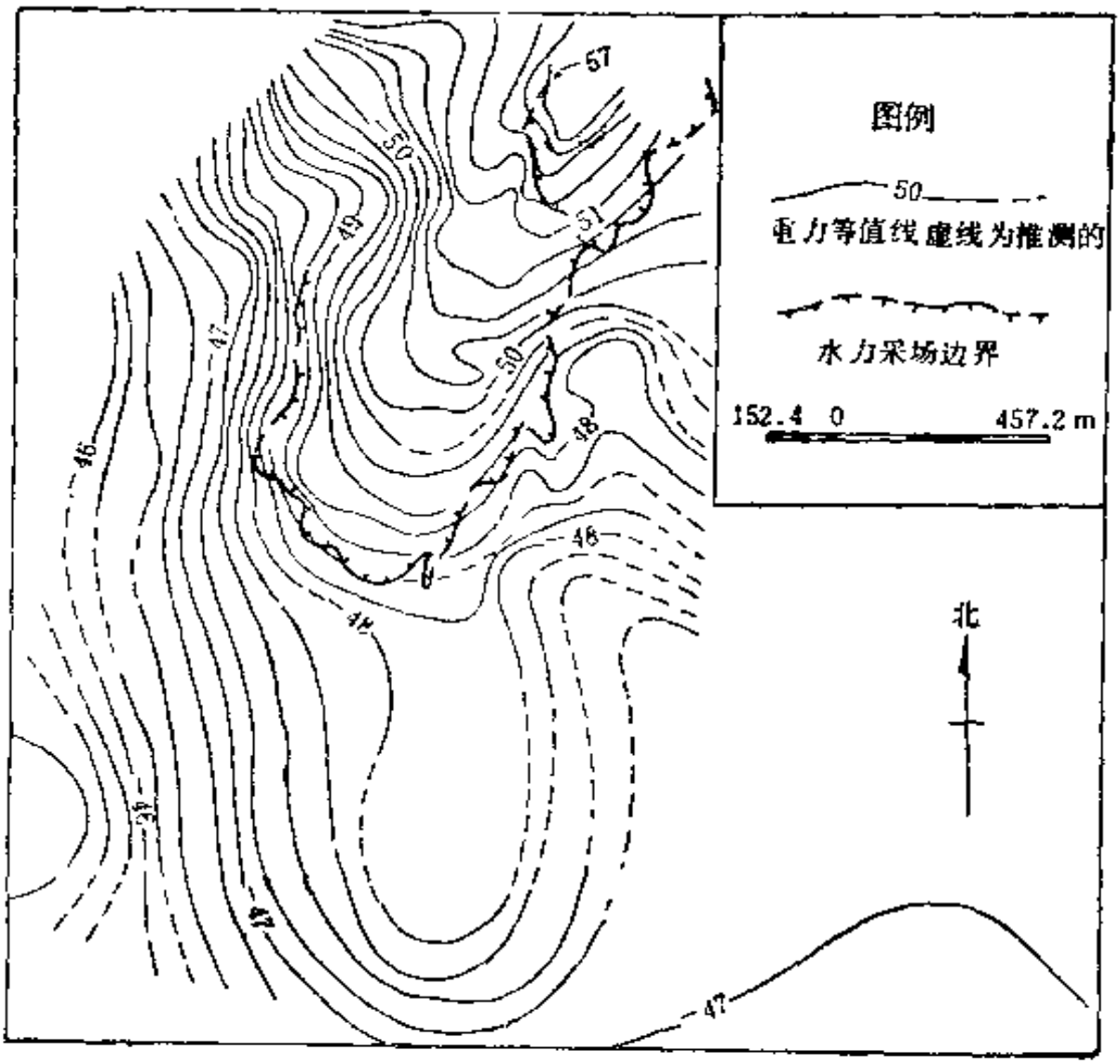


图7-3-1 美国拜哲山地区布格重力异常图

剖面图（图7-3-2），它实际上就是该区的一个三维总体模型。

根据折射地震结果还分别编制了蓝色砾石层和基岩表面等高线图（图7-3-3和图7-3-4）。从图7-3-3和图7-3-4可以看出富集金的蓝色砾石层的顶底板的构造起伏和厚度的空间变化。

大部分钻孔都取芯一直到基岩内，根据钻孔资料与折射地

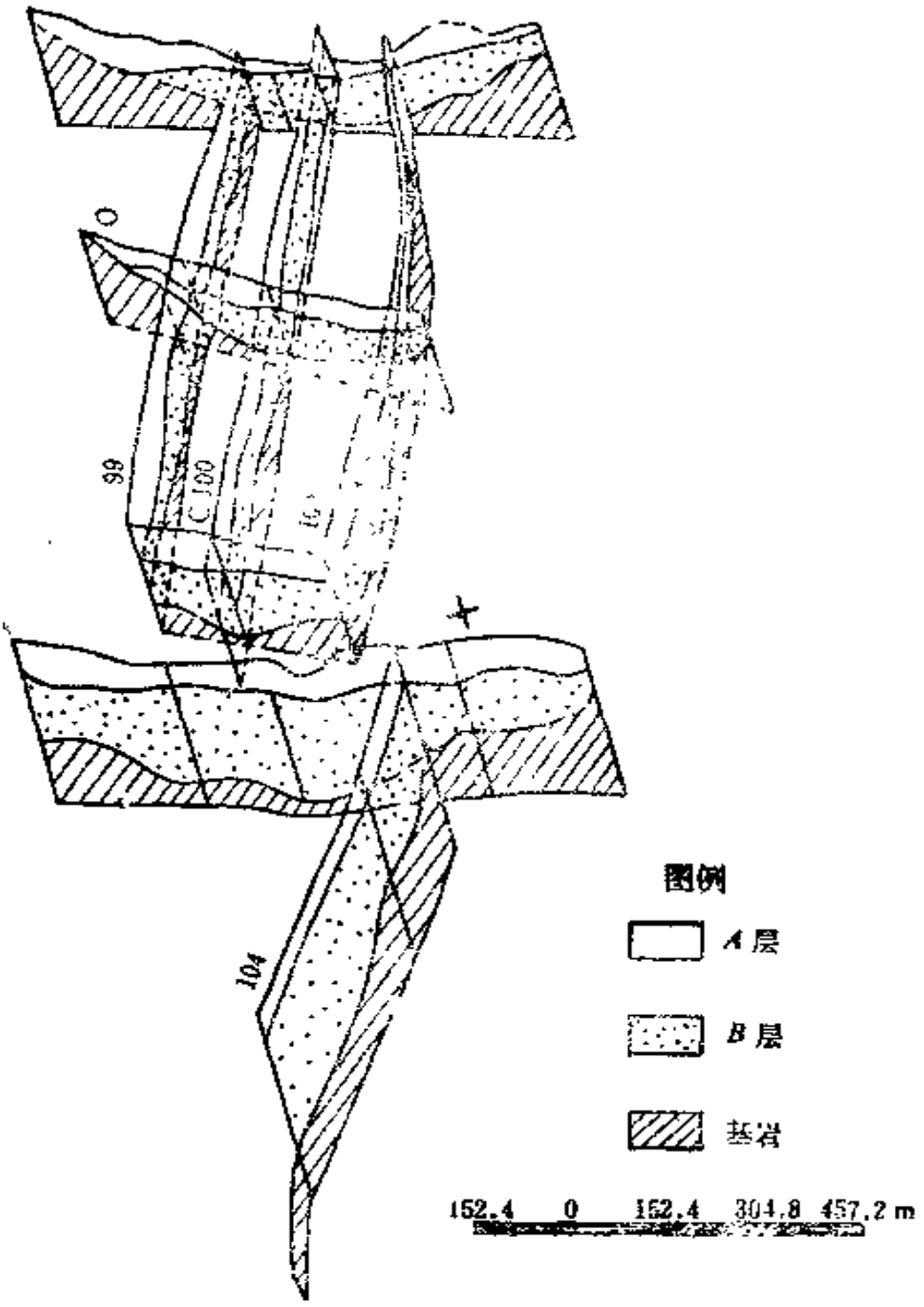


图7-3-2 拜哲山地震折射测量立体剖面图——三维总体模型

A层-第1与第2层之和，B层-富集金的黑色碳石层

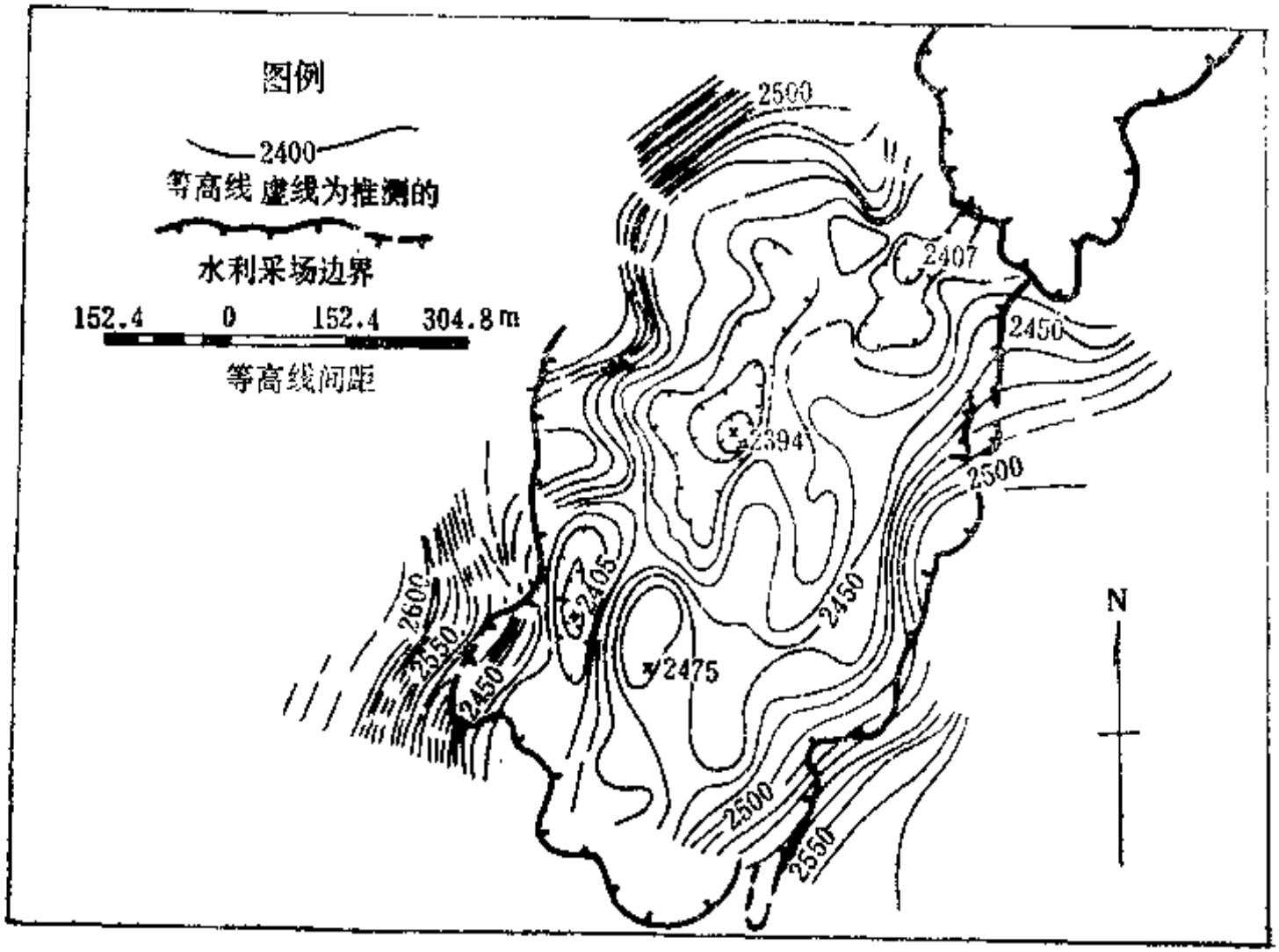


图7-3-3 拜哲山蓝色砾石层顶板构造等高线图

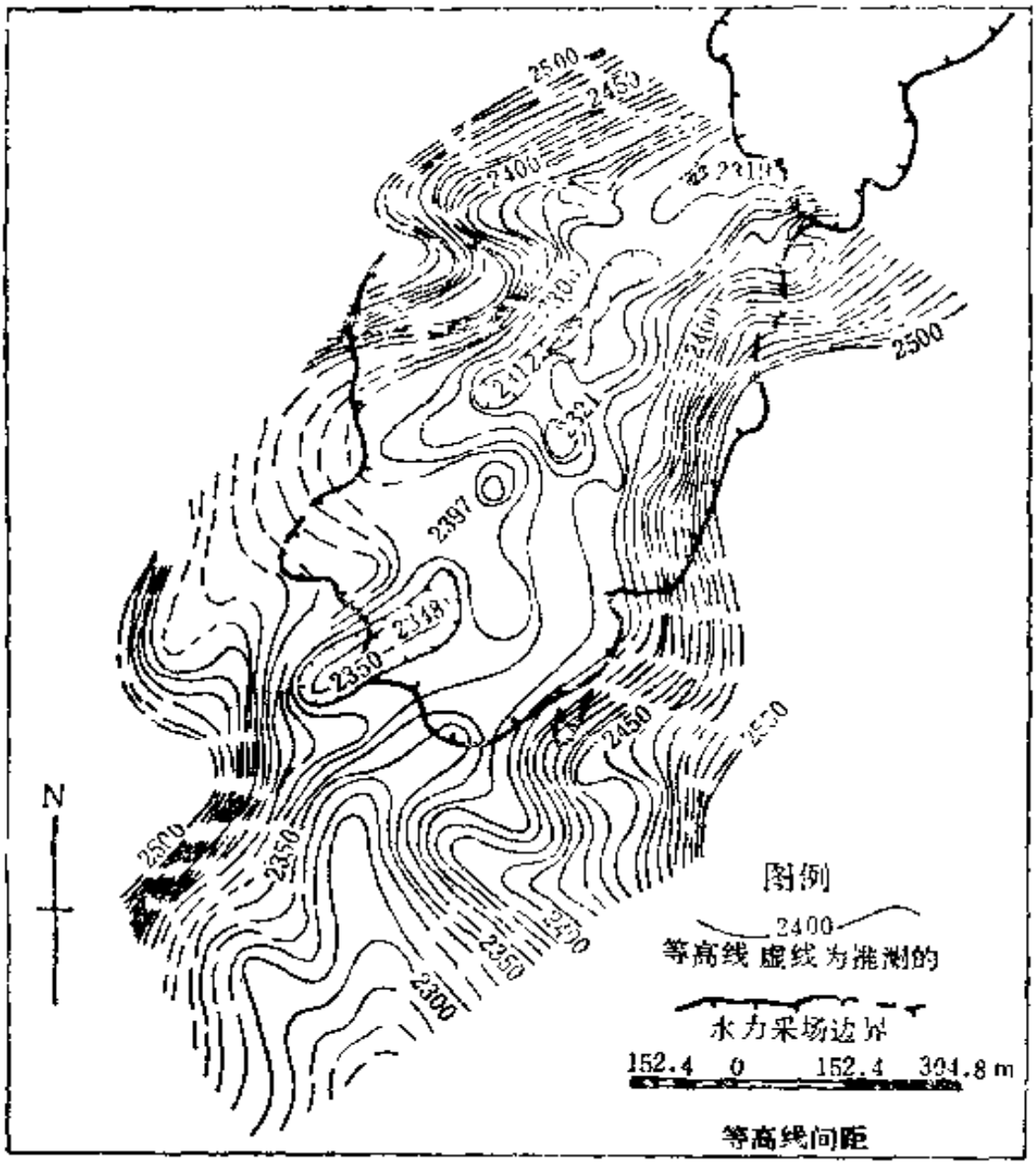


图7-3-4 基岩顶板构造等高线图

震剖面上划分出的层位对比，误差小于±10%。仅有两个钻孔用地震确定的基岩顶板深度与钻孔资料相差超过10%，这是由于此处基岩表面风化严重造成的。图7-3-5示出了K线折射地

震的分层与钻孔确定的层位深度的对比（钻孔距测线的距离均小于15.24m）。

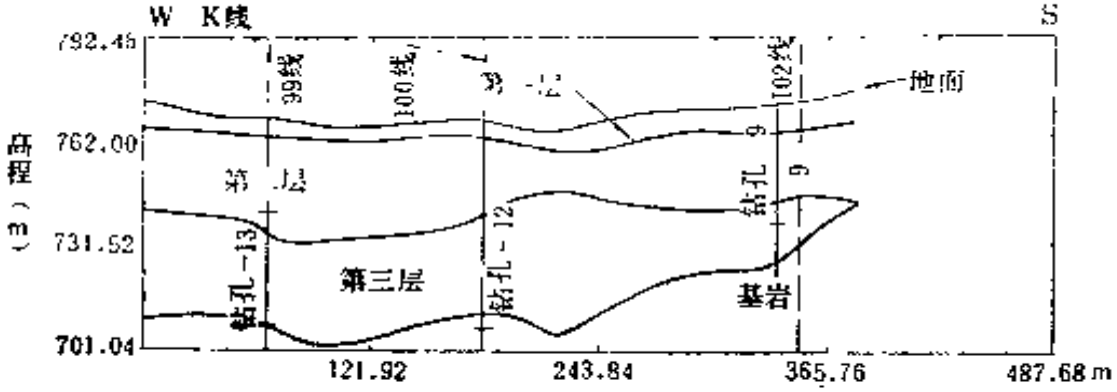


图7-3-5　K线折射地震分层结果与钻孔确定的第3、4层的深度
（垂直比例尺比水平比例尺放大一倍）

在测井方法中，0.2m的电位电极系测井对于岩性对比来说效果最好，对电阻率的突变反映灵敏，能提供较多的细节，与单极电阻测井相比，受孔径变化的影响小。图7-3-6为K线的0.2m电位电极系测井结果，可以与图7-3-5折射地震结果加以对比。

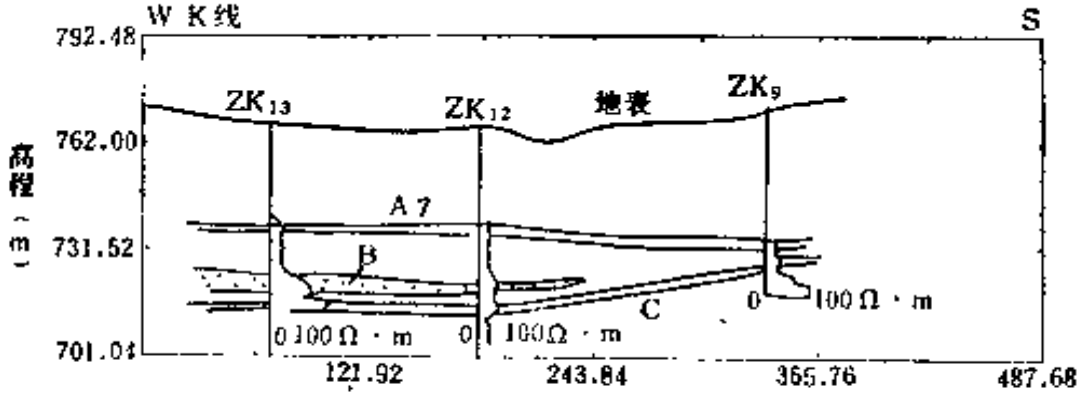


图7-3-6　K线8时电位电极系测井结果
（垂直比例尺比水平比例尺放大一倍）

从图7-3-6可以看出，有三层明显的低孔隙度砂砾层A、B、C，C层直接在基岩上面，电阻率最高（>50Ω·m），是三层中孔隙度最低的。B层在C层之上9.14～15.24m，电阻率比C层略低（<50Ω·m），孔隙度比C层则略高。A层在B层之上15.24m，电阻率25Ω·m，孔隙度没有B、C层那样低。三层之间的砂砾层电阻率低而孔隙度高。另外，其间也有一些低孔隙度砂砾透镜体。A层一般对应于蓝色砾石层的顶板。

从采矿的角度来说，A、B、C是三个难于剥离的硬岩层，所以利用电测井资料可以在采矿之前预测出硬岩层的深度和厚度，这对采矿规划是有用的。另一方面，那些电阻率低，孔隙度高的层位渗透性好，地下水流量可能较大，这也是在采矿时需要事先了解的，以便采取相应措施。

综上所述，象拜哲山这样的地质-地球物理特征的砂金矿区，可以首先采用重力作为普查手段，大致圈定古河道的位置和形态。然后作地震折射测量，它对确定基岩面的起伏和圈定砂砾沉积中的不同层位是最有效的手段。测井可用来识别和对比岩性单元并可估计不同层位的可剥离性。磁测和电阻率法效果不好，不能提供更多的信息。

§7.4 层控金矿床地质填图中物探方法应用的地质效果

本节将介绍美国东部最大金矿产地——黑尔金矿利用物探方法进行地质填图所取得的地质效果。

黑尔金矿是卡罗来纳板岩带中具有代表性的金矿床。从

1829年开采到1942年停产的114中，金的总产量为3.603t.

1980年斯潘斯等人通过对该矿床矿化作用的研究，建立了一种喷气-热泉层控金矿的成因模式，从而使该矿山重新变得重要起来。这一模式目前已在美国好些地区得到运用。在类似矿床上可以用某些地球物理方法来进行地质填图，在这方面，磁法和甚低频电磁法是非常有用的。

一、地质概况

黑尔矿区位于卡罗来纳板岩带中，其上为海滩沉积物所覆盖。区内最主要的岩石是变质的长英质晶屑凝灰岩，其上为板岩。这些火山碎屑岩和表生碎屑岩属于寒武系的普勒西蒙弗克组（Persimmon Frok）和瑞其特克斯组（Rechtex）。该区在构造上表现为一系列走向北东、倾向北西、倾角60°～80°的地层所组成的等斜褶皱。晚三迭到早侏罗纪的辉绿岩呈北西走向的岩脉侵入，晚白垩纪和更晚的滨海砂层将本区覆盖，盖层厚度一般为6m。

二、矿化与蚀变

该区有两条走向为北东的平行延伸矿化带，二者相距约500m。每条矿化带均由绢云母化岩石带和上覆的硅质岩带组成。显微粒状的自然金主要富集在各硅化岩层中，少数富集在硅质层中的浸染状黄铁矿里。为此希望有一种方法能快速地将这些被海滩沉积物覆盖的硅质岩层填绘出来。

三、物探野外工作

1979年和1980年曾在黑尔金矿床进行物探工作。该项工作

仅由三人进行，测线方向为北西（垂直矿体走向），线距30m，投入方法有甚低频电磁法、磁法和激发极化法。甚低频电磁法的场源为美国海军发射台，其频率为18.6×10^3kHz。磁测使用的仪器是质子旋进磁力仪。

甚低频电磁法通常测量由大地导电率的不均匀性所引起的二次场的倾角和相位差。其工作过程是观测垂直于一次场走向（不一定垂直于地质体走向）的值，其目的在于记录由地质体（不是由一次场）所引起的变化。但是黑尔矿区所测倾角和相位参数并不理想，而用此方法直接测量大地电阻率效果较好。所记录的读数实际上是40～100m深处大量岩石的平均值，其成果如图7-4-1和图7-4-2所示。

四、物探工作成果

在该区磁法测量快速地圈出了地质图上的辉绿岩和铁镁质岩脉的位置，并指出另外一些前人未圈定的岩脉。准确确定岩脉位置非常重要，因为岩脉错动通常反映了断层作用，而断层作用又能反映潜在矿体的错动。

由图7-4-1可见，甚低频电磁法在各条测线上均出现了形态相似的具有三个峰值的极大型异常。其中测线A还穿过了南面另一条矿化带，并出现一个单峰极大型异常，其峰值超过了1000Ω·m。该区电阻率值高的原因，是由于同生的蚀变和矿化有关的硅化作用的增强造成的。测线A北端电阻率峰值大于其它测线，这是由于测线与矿化带斜交造成的。

图7-4-1中电阻率异常可用来圈定矿化带的走向延伸。这些峰值的最南端与矿坑轴重合。在上覆沉积岩较厚的测线C上，电阻率异常变为宽阔而平缓的单峰异常，幅值明显减小，

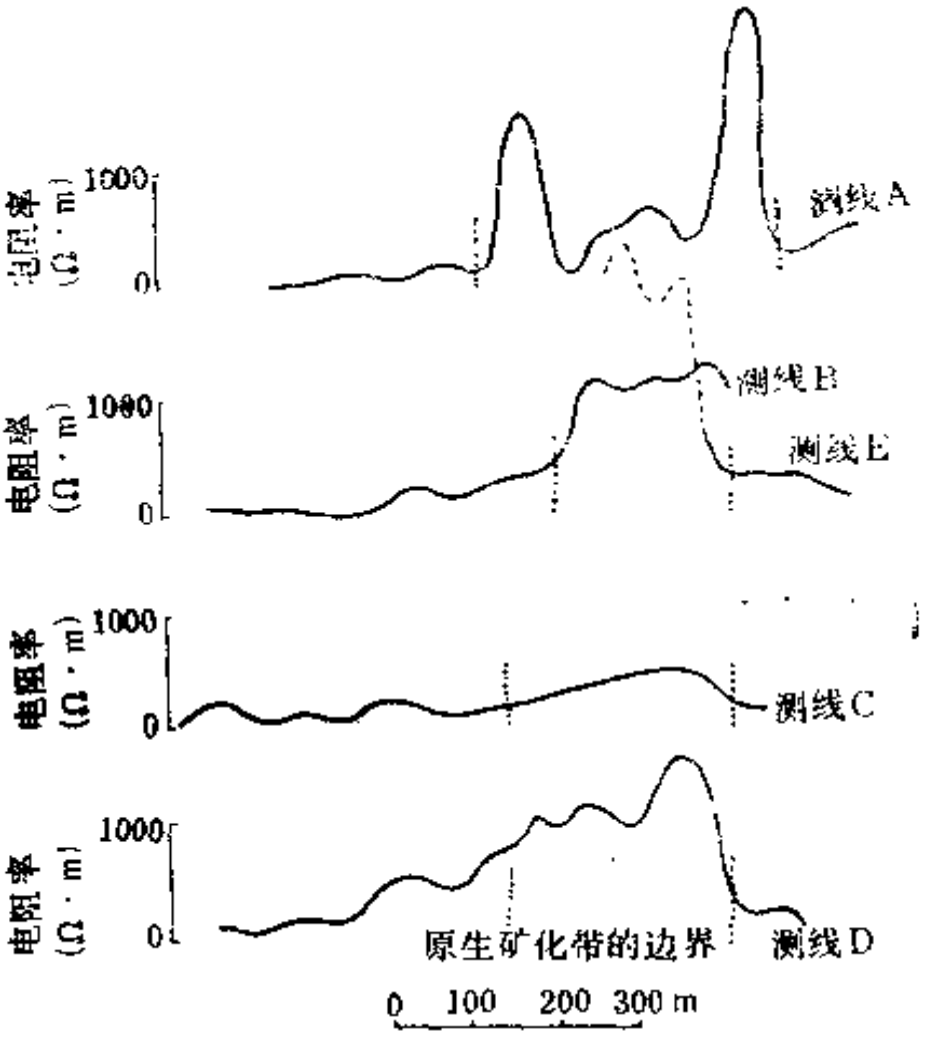


图7-4-1 黑尔金矿山甚低频电磁法电阻率剖面图
（引自J.C.温、B.W.卢斯）

但是作为异常仍然是可信的。依此可对黑尔矿山矿区外围的东北部的矿化带进行填图。也有可能对西北或东南面重复的地层层序进行填图。

本区所用的分辨率最高的方法是激发极化法，它虽然效率低，但对解释地层、蚀变及间接解释金的成矿作用很有用处。图7-4-2和图7-4-3给出了测线B上的野外激发极化测量的 拟断

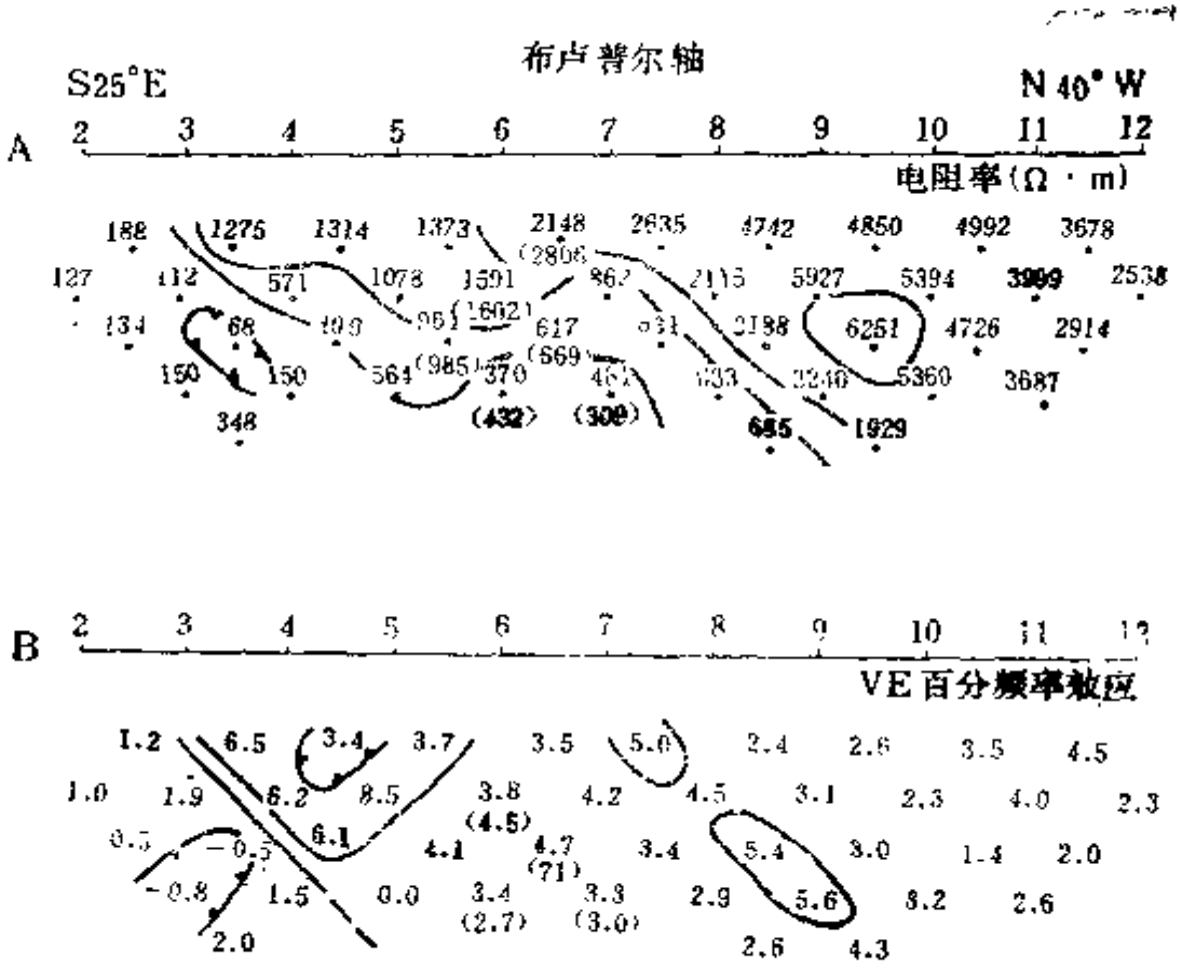


图7-4-2 黑尔金矿山测线B上观测的激发极化测量拟断面

（引自J.C.温、B.W.卢斯）

A是以Ω·m为单位的视电阻率拟断面；

B是频率为0.3和3.0Hz的百分频率效应拟断面。偶极距为30m。

面图和二维理论模型上理论计算的拟断面图。经地表和钻孔岩石观测表明，异常高的电阻率值反映了硅化带的存在以及富粘土绢云母化带的存在。百分频率效应拟断面在测点2与7之间的地表存在着可极化体（百分频率效应高）。然而，在这些测点下面的拟断面上极化强度低，这清楚地表明这些极化体仅存在于有限的深度范围内。

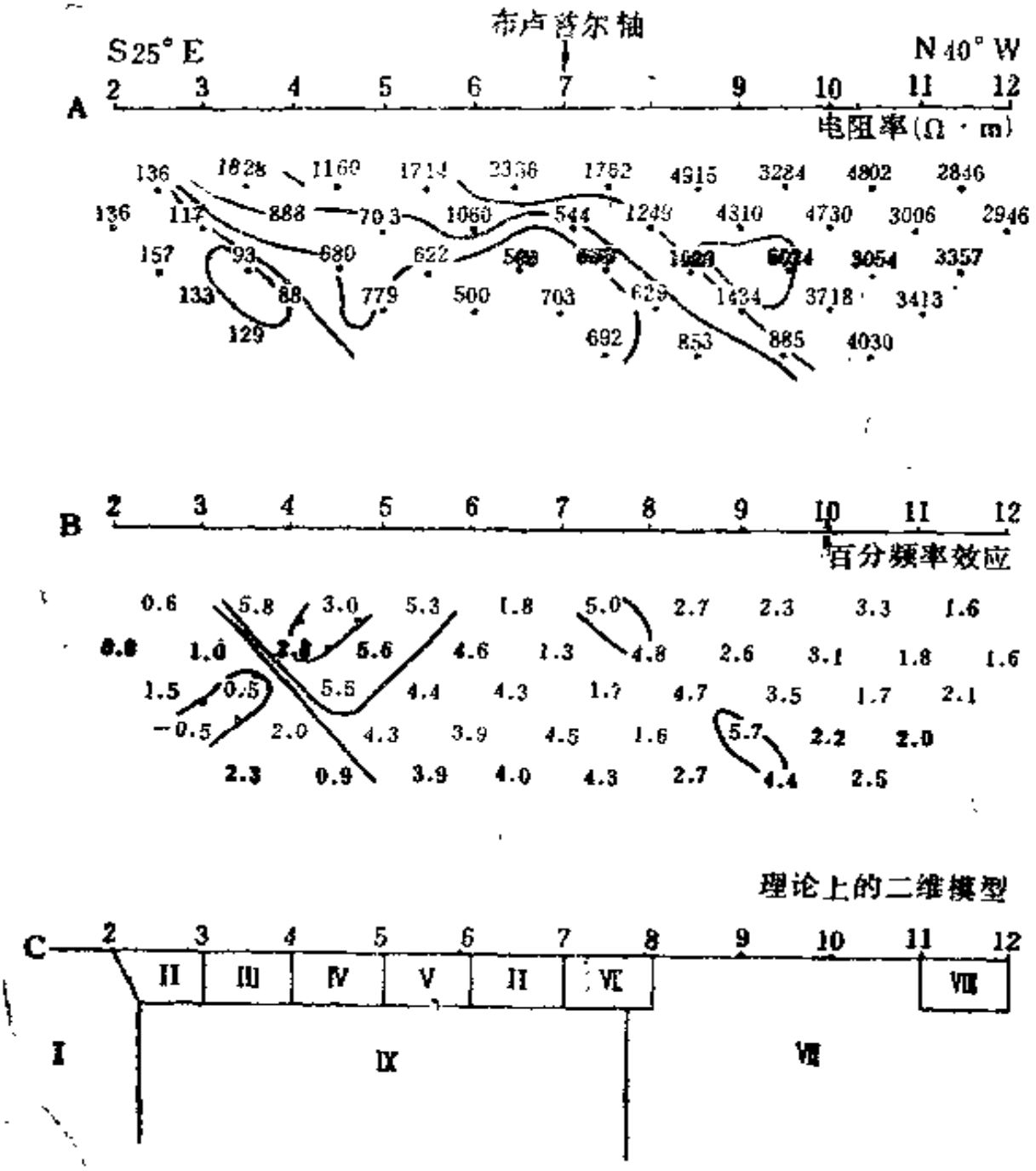


图7-4-3　二维理论模型上计算的拟断面图

（引自J.C.温、B.W.卢斯）

（理论模型资料见后页。其中A是以Ω·m为单位的视电阻率拟断面；B是百分频率效应拟断面；C是二维理论模型；偶极距为30m；D是二维理论模型的各种参数及地质资料。）

D　模型参数　　已有的地质资料

岩体号	电阻率(Ω·m)	百分频率效应	氧化硅含量	黄铁矿含量	地质单元
Ⅰ	125	0.5	很低	未知	厚层泥岩
Ⅱ	5000	7.0	中等	高	长英质凝灰岩
Ⅲ	2000	6.0	中等	高至中等	
Ⅳ	2500	5.5	低	中等	
Ⅴ	2500	0.5	中等至高	无	
Ⅵ	12000	4.0	很高	中等	
Ⅶ	3500	2.5	中等至高	低	层状长英质凝灰岩
Ⅷ	7500	5.0	未知	未知	
Ⅸ	400	4.0	未知	未知	厚层泥岩

为了可靠地解释野外观测结果，该区使用有限差分模拟程序，做了大量的二维模拟。模拟程序是戴伊和莫里森(1976年)首先提出的，后经法国地质矿产调查局和美国地质调查所修改。模拟结果示于图7-4-3中。图7-4-3C中用棱柱体模拟九个不同的单元体的组合，以使其达到与野外原始数据最佳拟合。对比图7-4-2A、B与图7-4-3A、B的结果说明，这种拟合是相当好的，也是非常合理的。图7-4-1的测线B上所见的三个甚低频电磁法高阻异常（从东南到西北）对应于激发极化模型中的单元Ⅵ、Ⅶ和Ⅷ（图7-4-3C）。

图7-4-3C的测点2和7处的激发极化数据证明了地质图示出测点2和3之间厚层泥岩与长英质凝灰岩的接触带以及激发极化剖面上的测点6和7之间某地的长英质凝灰岩和层状凝灰岩的接触带确切位置。

图7-4-3C还示出了几个独立单元组成的表面层，这些单元覆盖在导电性较好的岩体（模型体Ⅸ）上，该岩体的特征与剖面东南部出露的厚层泥岩（模型体Ⅰ）的特征很接近。厚层泥岩富含高岭土而没有黄铁矿。虽然有些粘土是可以极化的，但是已知高岭石对激发极化效应无反映。因此，模型体Ⅱ至Ⅷ必然相当于硅化凝灰岩单元，若在此处发现有较高的极化强度必定是硫化物引起的。单元Ⅵ、Ⅶ、Ⅷ上电阻率高异常值相当于一个强硅化带。浅部极化体Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ很可能含有黄铁矿。它们也位于布卢普尔矿坑的轴上。

图7-4-3D对一些模型参数作了对比，这些参数用来使激发极化实测数据与模拟之后提供的地质资料之间达到最佳拟合。其中第6栏所示的地质单元是从地质图上得到的。一般来说，氧化硅含量越高，电阻率就越高。同样，黄铁矿含量越高，百分频率效应就越高。这种对比关系，很明显，能提供比用有限钻孔资料证实的地质剖面更详细的资料。

该区过去和J.G.温、B.W.卢斯此次地质填图表明，褶皱作用导致火山碎屑岩层、矿化和绢云母化蚀变根部带在黑尔矿山至少重复出现一次。甚低频电磁法数据指出了两个北东向高阻带，那两个带重复出现，并与矿坑轴重合（图7-4-1）。测线D北端异常高电阻率值说明，或者是岩层出现另一次重复，或者是岩层中含有高电阻带，而且比原来想像的要大。

激发极化数据指出了在单元Ⅱ到单元Ⅵ与其下面的单元Ⅸ之间有一岩性接触带。另一个主要接触带必然在单元Ⅶ与单元Ⅸ之间。模拟研究过程中的大量实验表明，这第二条接触带是直立或近直立的。这两条接触带都可能是断层。

通过上述工作表明，甚低频电磁法电阻率测量可用来确定

卡罗来纳板岩带中的黑尔型矿床的蚀变作用和硅化带。这种方法对于地质填图是一种有用而且比较廉价的方法，特别是适用于海岸平原沉积物和强烈风化作用把地表地质特征弄得模糊不清的地区。磁法明显的磁力高异常与隐伏的铁镁质和超铁镁质岩脉有关。因此，磁法测量对圈定作为金矿化容矿岩石的变质火山碎屑岩中的水平断错可能是有用的。激发极化法尽管代价高，效率低，但是，已经证明可提供与矿化作用有关构造的二维资料，而且指出了所研究的带的深度有限，可能是等斜褶皱作用和断层作用的结果。

§7.5 充电法在围山城金银矿床上应用的地质效果

河南围山城金银多金属矿，自从被发现以来，先后做了大量的物化探工作。在该矿床的普查、详查和勘探过程中，物化探资料曾发挥过相当重要的作用。本节仅介绍一下充电法的应用效果。

一、地质-地球物理概况

1. 地质概况

围山城金银矿床赋存的地层为下古生界歪头山组的一套火山碎屑沉积岩系。破山银矿赋存在歪头山组上部第二岩性段（$Pz_1W_3^2$）中，称为“上含矿层”。银洞坡金银矿赋存在歪头山组中部第二岩性段（$Pz_1W_2^2$）中，称为“下含矿层”。碳质绢云母石英片岩是矿区最主要的含矿岩石。

矿体受构造和岩性双重控制，其形态多呈似层状、脉状或透镜状。

2．地球物理概况

该区曾根据破山银矿区电测井资料对岩、矿层视电阻率进行过统计，统计结果列于表7-5-1。

表7-5-1 破山银矿区钻孔岩、矿层电阻率统计表

岩、矿层名称	产出地点	统计层数	电阻率（Ω·m）		
			几何平均值	最大值	最小值
矿　　层	破山钻孔	61	20	150	2.5
碳质绢云石英片岩	破山钻孔	59	139	360	38
绢云石英片岩	破山钻孔	47	181	650	39
变粒岩	破山钻孔	51	230	530	73
云煌岩	破山钻孔	31	286	880	80
斜长角闪片岩	破山钻孔	6	351	520	123

（引自滕铁华、曾绍金）

61层矿样的电阻率几何平均值为20Ω·m，比一般岩石的电阻率低一个数量级，与围岩有明显的差别。银矿层电阻率分布直方图（图7-5-1）明显出现双峰，这种情况反映了统计样中的两种不同的矿石类型。右峰反映平均值约为30Ω·m的以浸染状矿石为主的矿层电阻率，左峰则反映平均值约为几Ω·m的连通较好的金属硫化物的矿体电阻率。这种矿体以细脉状、角砾状和块状矿石为主。破山矿区视电阻率测井结果中常见的那种连续性好、阻值低（几Ω·m甚至趋于零）的异常推测主要是这种类型矿石的反映。

由于本区围岩与矿石电性差异明显，加之干扰因素少，这就具备了在本区进行充电法工作的良好地球物理前提。

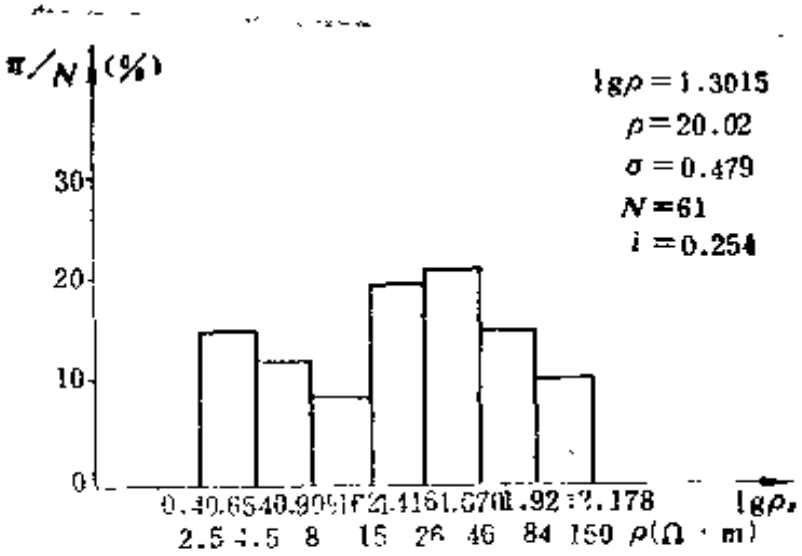


图7-5-1 银矿层电阻率分布直方图（引自陈铁华、曾绍金）

（注：柱状图第三竖线的0.909应为0.908；之后的162应为1.162）

二、物探工作的地质效果

该区充电法采用钻孔矿层充电、地面观测的方法，测量一次电位和充电梯度。

1．充电法配合钻探能查明低阻矿体的产状要素及矿体的边界范围。

破山银矿区ZK$_8$孔充电成果示于图7-5-2中。充电点深度为126m。电位极大值（约65mV/A）和极大值点均不在充电点的上方，而是明显地向东偏移120m左右。这说明矿层的重心不在充电点，等位线近于圆形。但由于在矿体走向上有一横向平推断层存在，致使等位线在图的上端微向北偏斜，利用梯度曲线零值点确定矿体顶端在地表的投影与实际位置基本一致。根据O线上梯度极大值的位置大致计算出矿体倾角为31°，倾向西南方向。

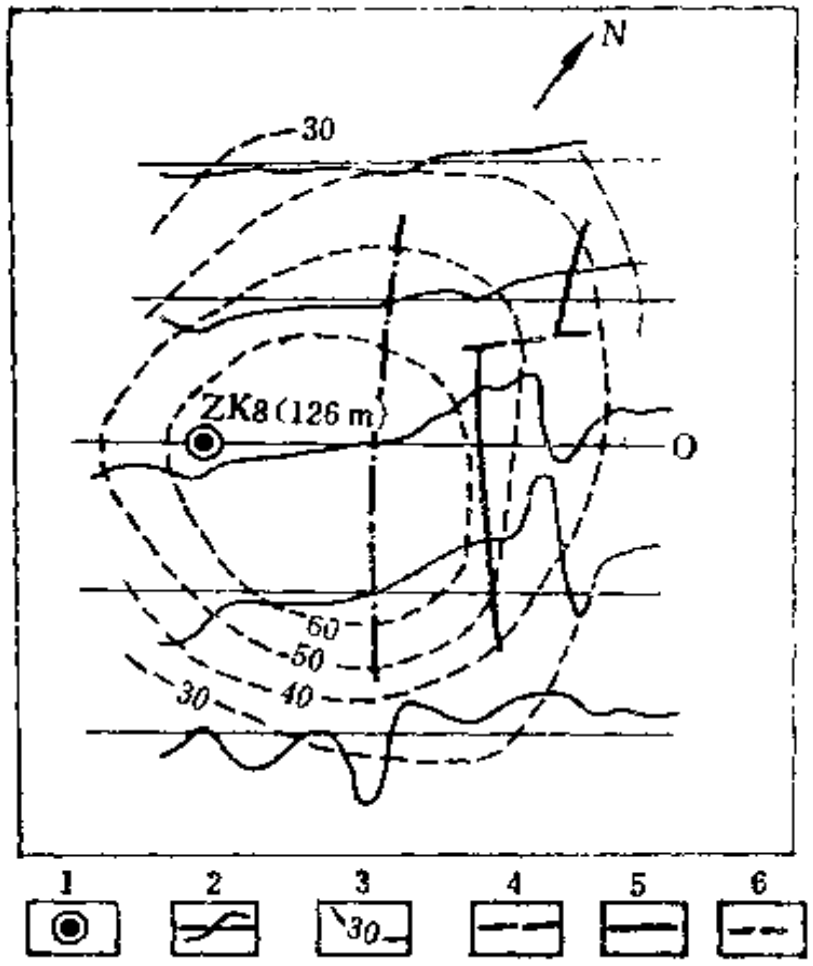
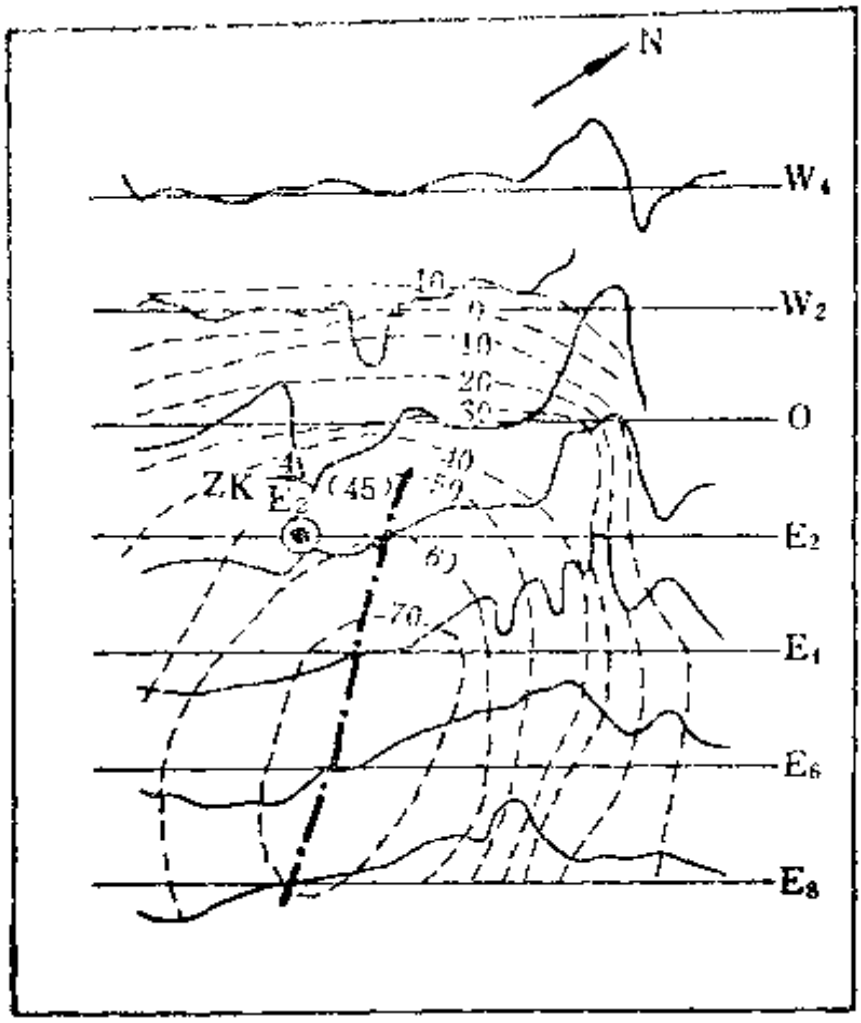


图7-5-2　破山矿区ZK₈孔充电成果平面图(引自陈铁华、曾绍金)

1-充电孔；2-梯度曲线；3-电位等值线；4-充电轴；
5-推断充电矿体顶端在地表投影；6-推断断层

银洞坡矿区ZK$\frac{4}{E_2}$孔的充电结果见图7-5-3。电位等值线图呈椭圆状，充电轴由北西向南东150°延伸。矿体可能在W_1线断开，因为W_1线电位值明显下降，到W_2线电位值接近0，再向北变为负值。同时，电位等值线沿测线方向稀密程度不同，南西侧等位线稀，北东侧密，说明矿体向西南方向倾斜。根据E_2线上梯度曲线极值点的位置计算出矿体倾角为34°。根



1 2 3 -70 4

图7-5-3 银洞坡矿区ZK$\frac{4}{E_3}$孔充电成果平面图

（引自陈铁华、曾绍金）

1-充电孔；2-梯度曲线；3-电位等值线；4-充电轴

据该区具体情况，经研究发现，梯度极小值的位置与矿体尾端在地表的投影位置基本吻合。从银洞坡矿区E_3线充电剖面可

知(图7-5-4、图7-5-3)：梯度极小值点位于ZK_4和ZK_8孔之间，因而推断矿体应在两孔之间尖灭。后来ZK_6孔未打到矿体，证明推断正确。

从图7-5-3可知，电位极大值在充电点南东方向160m处的E_8线上，而电位极大点正代表了导电矿体的重心位置。综合上述，该充电矿体的大致范围应当是长约600m、宽约300m的层状矿体，倾向约240°，倾角约34°。

2．充电法解决矿体的连接问题

充电法不仅在确定矿体产状方面有效，而且在有利条件下，还可以判断矿体是否连接。破山矿区0线的ZK_2、ZK_8孔的充电结果就是很好的说明(图7-5-4)。ZK_2孔在孔深82m和98m处各见一层矿，ZK_8孔在125.5m处见一较厚矿层。从这些矿层充电曲线可知，电位和梯度曲线都基本相同，只是充电点深度和水平位置不同引起电位曲线、梯度零点位置变化，但梯度极值位置未变，解释矿体顶端位置一致，说明三个充电点处于同一矿层中。

破山矿区E_6线在两个钻孔中分别在三处充电，所得结果明显不一致。ZK_{10}孔中充电点位于非矿层中。ZK_6孔两充电点分别位于A_4号和A_5号矿层中。梯度极小值基本反映了矿体下端的位置，但在充电点的上方，由于有两层近地表矿的干扰，导致梯度曲线的畸变。

银洞坡矿区E_2线在两个钻孔中分别在四处充电。这四个充电点主要受A_{21-1}号矿体的影响。$ZK\frac{4}{E_2}$孔中充电点位于矿体中，梯度极小值位于充电点外侧，它基本反映了矿体下端的位置。$ZK\frac{5}{E_2}$孔中充电点位于矿体下端的延伸方向上(与矿

图7-5-4　破山矿区O线、E_6线，银洞坡矿区E_2线充电剖面图
（引自陈铁华、曾绍金）

1-矿体；2-充电点；3-电位曲线；4-梯度曲线；
5-梯度圆滑曲线；6-推测充电点端在地表投影

体位于同一相对低阻层中），故梯度极小值位于充电点的内侧。综合上述可知：对倾斜板状矿体充电将出现明显的梯度极小值。利用充电极小值位于充电点的内侧或外侧可判定充电点是处于矿体中还是处于矿体下端外延处。

最后，还要强调指出，金在矿体中的含量很低且分散，对岩、矿石的物理性质毫无影响。充电法应用的条件之一是矿体或充电对象必须是良导体。良导体中可以含金而成为金矿体，也可能是含金的矿化体，也可能根本不含金，所以充电法所圈出的是良导体，所确定的产状、走向和埋深皆是指良导体而言，良导体和金矿体间并无必然联系，只是金矿往往赋存在断裂带中或受断裂带控制。为了使充电法获得较好地质效果，除了工区或充电体必须具备充电法应用条件之外，尤其重要的是，充电法的资料解释一定要与地质工作密切配合，这是该方法能否取得较好地质效果的关键问题。

§7.6 核物探在寻找火山岩中近地表金银矿的应用效果

本节中以苏联鄂霍茨克-楚科特火山带金矿床为例，说明核物探在寻找火山型金矿床的地质效果。

该火山岩带中的金银矿赋存于中生代火山沉积岩层中，在空间上与大构造的交会部位重合。该岩层中见有被侵蚀的火山机构、次火山侵入体、斜长花岗岩和花岗闪长岩体。

在大面积变安山岩化的背景上，石英-冰长石-水云母和石英-冰长石相与次火山岩体中的线性断裂、被侵蚀火山机构中

的环形断裂、爆发角砾岩和围岩的接触带有明显关系。冰长石化在中酸性喷出岩和喷出沉积岩中发育。

矿体一般为相互靠近的细脉、矿化破碎带或形状复杂的分叉的石英脉。矿体规模各不相同，一般长数百米，宽达几十米。金属矿物有：天然金和银、辉银矿、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、辰砂等。非金属矿物有：石英、冰长石、方解石、辉石、红锰矿，氧化带的次生矿物有水锰矿、软锰矿、硬锰矿。

在很多情况下，矿脉最富的地段位于冰长石表现最明显的地带，有的地方甚至形成单矿物的冰长石。钾交代带的厚度可达几百米。离断裂带越远，冰长石含量越少。

该区的金银矿化在空间上与钾交代带有密切关系。次生石英岩的石英-冰长石-水云母相是圈定金银矿化的最好标志。该区金银矿岩石放射性元素含量的分布情况，见第二章中的表2-5-1。在§2.5.1中曾叙述了该区放射性元素的分布特点，这里不再重述。

为了在该区寻找近地表的火山岩型金矿床，在该火山岩带上进行了航空γ能谱测量。工作中采用的是МИ—4飞机，АГС—3K型航空能谱仪，航高25～75m，线距200～300m。为了分别确定钍、镭、钾的含量，测量是在三个能窗内进行的(2.2～2.7MeV，1.65～1.9MeV，1.4～1.6MeV)。对测量结果进行了一定的计算机处理和计算，求得放射性元素的含量。

由于进行航空γ能谱测量时的几何条件和用标准源标定时不一样，所以算出的U、Th、K含量实际上是相对单位。

图7-6-1给出了该区在蚀变喷出岩中的金矿冰长石化地段上的一条典型剖面。显然，在含矿的冰长石化流纹岩上钾含量曲线出现明显的极大型异常，反映了冰长石化流纹岩的存在。

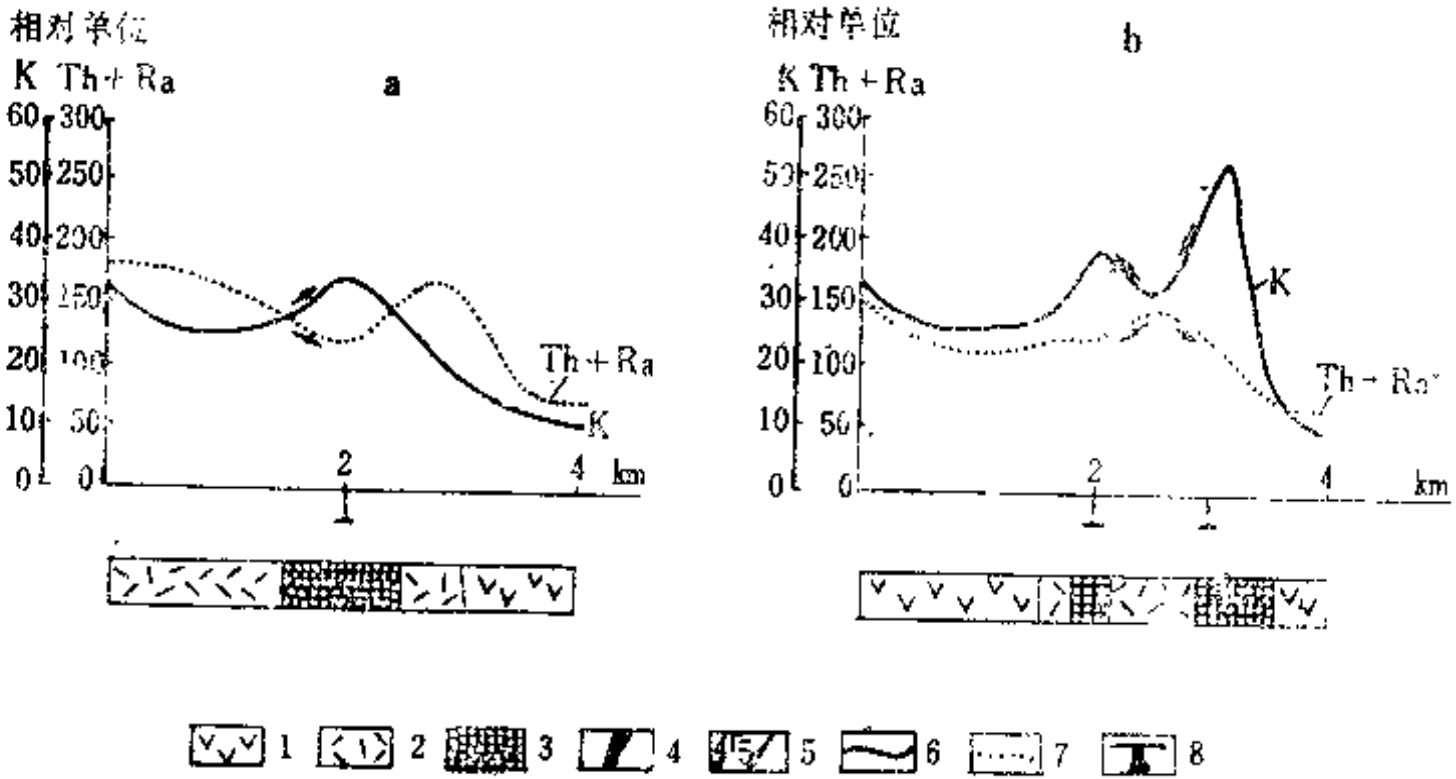


图7-6-1　鄂霍茨克-楚科特火山带上某金银矿区未蚀变喷出岩中的金矿冰长石化地段上的一条航空γ能谱测量结果

1-粘土化安山-英安岩；2-流纹岩；3-冰长石化流纹岩；4-矿体；5-航线；6-钾含量变化曲线；7-钍-镭含量变化曲线；8-指示钾聚集的符号

位置和层数；而Th＋Ra含量曲线则出现明显的极小型异常(图7-6-1a)或幅值减小（图7-6-1b），可依此异常特征圈出冰长石化流纹岩的位置和范围。图7-6-1反映与前面§2.5.1中核地球物理特征是一致的。

通过研究钍—镭（Th＋U(Ra)的和）及钾含量的分布特点可以分析金银矿的γ场。

图7-6-2给出了该区及矿床上的γ能谱测量结果。

图中钾含量上升和相应的钍－镭含量降低(图上箭头所示)，意味着钾交代带的出现，这和图7-6-1中所示结果是一致的。冰长石化的矿体上明显地表现为钾量升高，放射性元素性状相反的地段，未蚀变的流纹岩钾和钍-镭含量都偏高。使用航空γ能谱测量能快速、经济地评价广大地区的含金远景性（一架飞

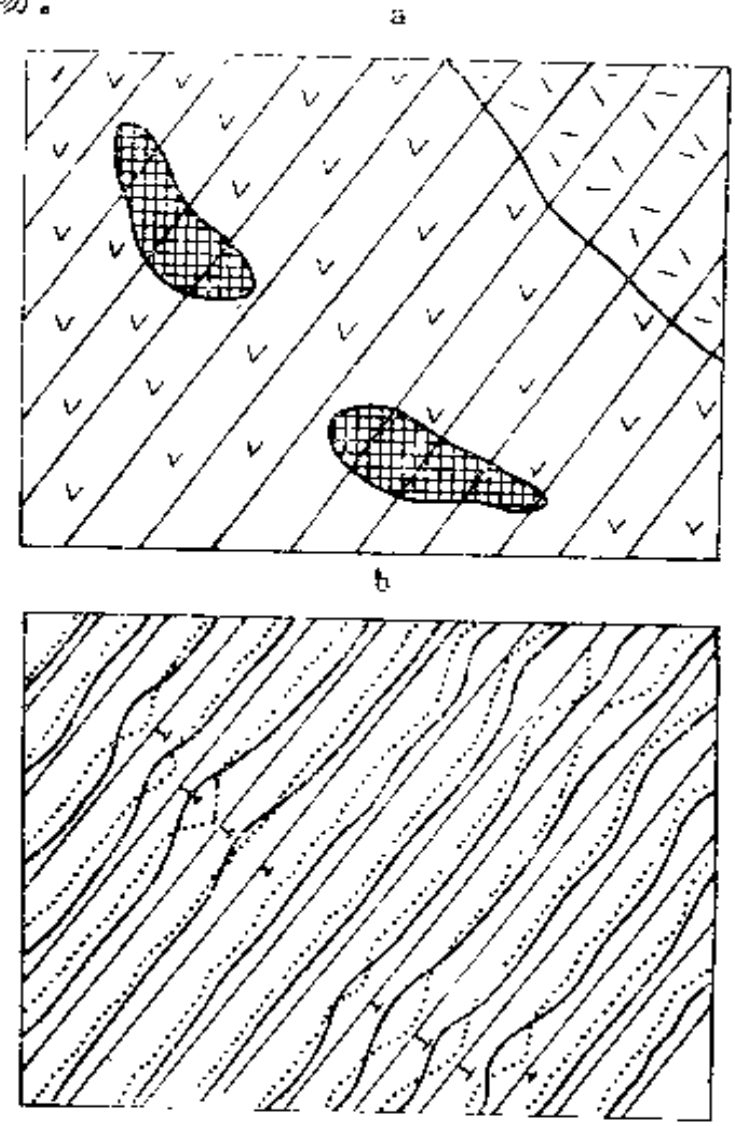


图7-6-2　鄂霍茨克-楚科特火山岩带某金银矿区航空γ能谱的测量结果
（图例同图7-6-1）

机一个野外季节可飞5000～7000km²）。

该区还进行了水化学测量，它的任务是普查矿带和查明近地表金银矿的构造特点。由于元素的水分散晕大大超过内生分散晕，水化学方法的经济效果较高。工作结果表明：通过研究天然水的成分发现了金含量偏高的地段以及某些元素组合与特定的地质构造有关系，即与古火山口、断裂带有关(图7-6-3)。



图7-6-3 水电化学异常图

1-火山口相岩石；2-明显的SO_4^{2-}、Si、Fe、Ti、Mn、Ga、U、Ba异常的轮廓；3-成矿元素异常（ΣMe、Ag、Cu、Zn、Pb、Co）；4-金含量异常地段；5-与次生石英岩有关Ci、To_4^{2-}、Fe、Mn、Al弱异常；6-矿田外的Cr、V、Ti、Sn、Ga、U含量异常的轮廓；7-河流

综上所述，用航空γ能谱测量圈定冰长石化地带，用水化学方法圈定火山口相岩石和矿化带，这两种方法生产效率特别高（一个操作员在一个野外季节可以完成水化学测量150km²），所以综合应用这两种方法能够在火山岩地区迅速而可靠地发现近地表的金银矿。

参考文献

1. 傅良魁主编. 电法勘探教程. 地质出版社. 1983
2. 长春地质学院重力教研室编. 重力勘探. 地质出版社, 1980.
3. 成都地质学院、武汉地质学院、河北地质学院、合肥工业大学编. 应用地球物理学——磁法教程. 地质出版社. 1980
4. 丁绪荣主编. 普通物探教程——地震附声波探测. 地质出版社: 1984
5. 武汉地质学院地下物探教研室编著. 金属矿钻孔地球物理勘探. 地质出版社, 1980
6. 范永香编著. 矿产预测的理论与实践（试用教材）, 武汉地质学院, 1985
7. 程裕生主编. 矿田构造学概论, 冶金工业出版社. 1984
8. 张成喜编著. 金矿床地质学（上册）, 沈阳黄金学院, 1982
9. 张成喜编著. 外生金矿床地质学（下册）. 沈阳黄金学院, 1985
10. 冶金工业部黄金情报网、冶金工业部长春黄金研究所编. 金银矿产选集（第四集）, 1985
11. 福建省地质矿产局科技情报室编. 金矿地质资料选编（地质工作参考资料第二十五辑）, 1986
12. 全国金矿地质工作领导小组办公室、地质矿产部情报研究所编. 世界金矿及典型矿床. 1986
13. 中国人民武装警察部队黄金指挥部黄金地质研究所编. 中国典型金矿床实例（第一集）, 1985
14. 史元盛. 金矿物探的特点及效能. 地质科技情报. 1988; 7(2)
15. 李治华. 华北地台地球物理场、深部构造和金矿床. 物探与化探, 1987; 11(6)
16. 胡家杰. 金矿的控矿构造概述. 地质科技情报, 1986; 5(3)
17. 范永香. 试论区域成矿规律研究的发展方向. 地质科技情报, 1986; 5(3)
18. 姚敬劬. 鄂东金矿床中的伴生金. 地质与勘探, 第7期, 1981; (7)
19. А.А.Фелдман. 陆克译. 地球物理方法普查勘探贵金属——金. 物探化探译丛, 1983; (1)

20.肖荣岳，顾留成，赵俊华 蚀变岩型金矿普查中电法的应用，勘查地球物理勘查地球化学文集，第3集，激发极化法专辑，地质出版社，1985
21.李精波，晋北太那水村激电找金的地质效果，勘查地球物理勘查地球化学文集，第3集，激发极化法专辑，地质出版社，1985
22.齐国忠，肖朝经，应用激发极化法寻找含矿的尝试，勘查地球物理勘查地球化学文集，第3集，激发极化法专辑，地质出版社，1985
23.曾绍金，陈铁华，桐柏山区围山城金银多金属矿床物化探应用效果，勘查地球物理勘查地球化学文集，第3集，激发极化法专辑，地质出版社，1985
24.I.M.约翰逊，等；王振华译，菱刈金矿是航空电磁法发现的，CIM Bulletin，1985
25.西泽德雄，茨城谦三，姜贵善译，日本菱刈矿山的勘查经过，日本的金银矿石，第3集，1985
26.张福霖，金成洙，鄢启云，日本菱刈金矿地质考察，地质与勘探，1986；6
27.大久保泰邦，大熊茂雄，日本九州岛南北萨金银矿化区重磁异常模式，陈炳文译，Mining Geology，黄金地质科技，1987
28.陈继宇，我国东中部深部重力场特征与金矿床的分布，地质与勘探，1983；(2)
29.Борцов В.几等；张肇元译，电法普查金矿，Разведка И Охрана，1976；(12)
30.J.G.温，B.W.卢斯，汪云鹏译，物探方法在层控金矿床填图中的应用，Economic Geology，1984；79(2)
31.潘男飞，论寻找原生金矿的物化探方法效果及其有关问题，黄金地质参考资料——物化探专辑，1984；(6)
32.荆国章，物化探方法在老作山金矿床应用效果，黄金地质参考资料——物化探专辑，1984；(6)
33.许金枝，华北地区几个金矿床上物化探方法找矿实例，黄金地质参考资料——物化探专辑，1984；(6)
34.赵衍江，朱嘉臣，辽宁省金矿物化探工作概况，黄金地质参考资料——物化探专辑，1984；(6)
35.夏维江，物化探方法在柏杖子寻找金矿的地质效果，黄金地质参考资料

——物化探专辑，1984；(6)
36.洪树琪．物化探在金厂矿区的应用．黄金地质参考资料．——物化探专辑 1984；(6)
37.岳友君，陈其栋．青海门源松树南沟金矿物化探找矿效果．黄金地质参考资料，——物化探专辑，1984；(6)
38.李宝印．山东招掖金矿的地质特征与地球物理方法的应用．黄金地质参考资料——物化探专辑，1984；(6)
39.于文功．直流电法在招掖金矿带应用效果初析．黄金地质参考资料——物化探专辑，1984；(6)
40.吴相赫．夹皮沟金矿区联合剖面法在普查找矿中的作用．黄金地质参考资料——物化探专辑，1984；(6)
41.潘勇飞．岩金矿上的磁异常特征．黄金地质科技，1987；(2)
42.潘勇飞．物探方法在砂金地质普查勘探中的应用．黄金地质参考资料——物化探专辑，1984；(6)
43.崔林涛译．美国拜皆山砂金矿区的物探工作．Geophysical Measurements of Gold Bearing Gravels, Nevada County, Calif, 1971
44.L.A.Anderson，林慧明译．美国怀俄明州提教县提教国家森林区金矿的磁法和电阻率法研究，U.S.Geol. Survey prof. paper 750C, pages C145～C173.
45.Ю.С.留斯著；张肇元，崔霖涛译．地电化学勘探法．地质出版社，1986
46.B.M.Shmakin，程席法译．用于地球化学勘查的稳流电场部分提取金属法，Journal of Geochemical Exploration, 1985
47.М.И.К Иселев．金矿地球物理普查勘探方法的合理综合．Разведка И охрана недр, 1973；(3)
48.徐邦梁，费锡铨，王和平．一种新的金矿找矿法——地电化学取样测金．地质与勘探，1984；(10)
49.柯汉生．压电勘探法．黄金地质参考资料，物化探专辑，1984；(6)
50.地矿部地质技术经济研究中心选矿室编．矛式探金仪使用说明，1987
51.牛宪章译．美国黑尔矿区层控金矿地质制图的地球物理方法．Economic Geology，1984；(2)