2018

知识改变命运

P612;
P631;

摘　要

由于地球电化学方法在地表厚层覆盖区寻找隐伏金属矿具有独特的优势和效果，因而其应用前景非常广阔。本文结合首次在安徽凤凰山铜矿测区运用地电化学提取测量法以及其地质、地球物理和地球化学特征，通过对地电化学研究现状、找矿原理、成晕机制、野外和室内工作方法、仪器设备、地电化学异常特征及其影响因素和地电化学找矿综合评价等方面进行了近三年的研究，获得了以下主要成果与认识：

1、首次在安徽铜陵凤凰山铜矿矿区运用地球电化学勘查法进行隐伏矿体的勘查和找矿预测，并系统地总结了地电化学异常的形成机理、野外工作方法以及应用条件，同时对离子晕的动力学机制进行了探讨和总结；

2、通过已有的地质资料及地质填图进一步增加了对测区的地层特征、岩浆岩特征、构造特征及矿体地质特征的认识，对石英二长闪长斑岩和成矿、地电化学异常关系有了更深层次的了解；

3、通过认真分析地电吸附提取的数据资料，总结和发现了凤凰山铜矿测区8条剖面线的铜金属元素的地电化学异常特征，丰富了找矿资料，并总结出了铜、金地电化学异常特征的标志；

4、详细地总结了地电化学异常的四个影响因素，即：（1）地质体因素；（2）构造因素；（3）地表覆盖层因素；（4）供电条件。并指出了它们的影响特征和消除方法；

5、通过对凤凰山铜矿测区实施地电提取测量法寻找隐伏铜金矿床的研究，发现了该区存在四个巨大的铜异常带，为找矿的定位预测提供了准确有力的理论和技术依据，从而确定了有利的找矿靶区，并进一步证实了凤凰山铜矿测区具良好的找矿前景；

6、经与已有的地质、物探和化探结果进行对比分析及应用评价，结果表明该方法可用于隐伏铜金矿体地段的定位预测，其中部分地电化学异常经钻孔验证，其结果与已揭露的隐伏铜金矿体非常吻合。这从实践方面证实了地电吸附提取法的实用性，说明了地电提取测量法具有广阔的应用前景；

7、研究表明，在隐伏金属矿产勘查中，地电提取测量法是一种行之有效的勘查方法，该方法野外工序简单，样品运输方便，获取的地电化学异常信息结果稳定，重现性好。

关键词：地电提取测量法，地电化学异常特征，找矿预测，应用评价

ABSTRACT

Because the method of geoelectrochemisty which search the buried ore deposit has a special advantage and effect in the earth's surface coving with a thick overburden layer, and the foreground of its application is very amplitude. This paper combined the geoelectrochemical extraction measurenment technique which has been handle first in the study of region in Fenghuangshan copper ore deposit in Anhui and the character of its geology,geophysics and geochemisty, after study for three years on the current situation,the working principle,the genetic mechanism,the field operation, the apparatus, the anomaly feature,the influenced factors and the prospecting appraisal on the geoelectrochemistry.Some achievements have been gotten as follows:

1. The geoelectrochemical method was employed firstly to explorate and forecast the buried ore deposits in Fenghuangshan copper ore deposit in Anhui, and systemly summarized the forming mechanism of geoelectrochemical anomaly, the field operation and the condition of its application and discussed the kinetics mechanism of ion anomaly.

2. The feature of stratigraphy, magma, construction and ore body is more understood through past geological information and filling in the geological chart, as well as the quartz monzonite diorite porphyry, metallogenetion and the anomaly of the geoelectrochemistry.

3. Eight sections of the anomaly feature of Cu and Au geoelectrochemistry have been discoved and summarized through carfully analying the data of the geoelectrochemical extraction measurement technique. Then it increased prospecting data and the symbol of anomaly feature of Cu and Au geoelectrochemistry has been summarized.

4. After carful investigation, four kinds of interference factors about this method have been summarized: (1) the factor of geologic body; (2) the factor of construction; (3) the factor of the earth' s surface coving with a thick overburden layer; (4) the factor of power supply.The characteristics of these interference and the way of elimination have been

indicated.

5. Four big anomaly field of copper have been found throngh the which used the method of geoelectrochemical extraction measurement to search concealed ore deposition,and the accurate and powerful theory and technology have been provided to orientate prognosticate ,and it has confirmed the avail target region in the field of prospecting and approved that this study region in Fenghuangshan copper ore deposit has a good exploration foreground.

6. Based on the employed appraise and contrast analysis with the results of geology, geophysis and geochemistry, this method can be used in predication of the place of concealed ore body, and some geoelectrochemical anomalies have been testified by drill well. This result is consistent with the uncovered concealed ore body. This show in practice that the geoelectrochemical extraction measurement technique is effective and has wide application.

7. After study, it shows clearly that the geoelectrochemical extraction measurement technique is an effective exploration tool for concealed ore deposit finding. This method is characterized by simple fieldwork,convenient transportation of samplies,stable informations of anomaly and better reappearance of anomaly.

KEY WORDS geoelectrochemical extraction measurement method, geoelectrochemical anomaly feature, ore prospecting and prediction, employed appraise

原 创 性 声 明

本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在在论文中作了明确的说明。

作者签名：_____ 日期：_____年___月___日

关于学位论文使用授权说明

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文；学校可根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文。

作者签名：_____ 导师签名_____ 日期：_____年___月___日

第一章　前　言

1.1　论文选题来源及研究背景

1.1.1　论文选题来源

本论文选题来源于国家“十五”科技攻关重大项目“大型紧缺金属矿产资源基地综合勘查与高效开发技术研究”，课题名称为“大型矿山接替资源探查技术与示范”，课题编号：2001BA609A-06。以及铜陵有色金属（集团）公司凤凰山铜矿提供的横向课题，其名称为“凤凰山铜矿区接替资源的综合预测及快速勘查”。

1.1.2　研究背景

随着人口和经济的持续增长，人类对矿产资源的需求不断增长，而大部分已探明的矿产资源储量却严重不足，加上矿产开采中的资源浪费，环境污染以及矿产分布的不均匀性，使得主要矿产资源紧缺与国家或地区经济持续发展这一矛盾加剧。由于地表露头的矿产资源日趋枯竭，找矿的重点研究课题已经由地表矿逐步转向隐伏矿和难识别的方向发展。当代最成功的勘查地质学家之一，澳大利亚西部矿业公司勘查部领导人 R. WOODALL 1993 年在美国召开的“勘查与发现的综合方法”大会主旨发言中明确指出“尽管还有一些世界级的矿床可以用地表勘查手段去发现，但未来属于那些能够在隐伏区进行经济有效勘查的找矿人[1,2]”。1982—1992 年期间，加拿大新发现的大多数贱金属矿床的埋藏深度一般大于 200 米；地质学家 R. Sillitoe 对环太平洋 13 个国家（近 25 年发现的）54 个矿床进行调查表明：只有 2 个矿床是根据露头发现的，而其余大多数矿床都是隐伏矿床。这说明隐伏矿床的勘查是当前矿产勘查的发展趋势。

我国金属矿勘查的状况亦体现了这一发展趋势。找矿工作从 50 年代至 70 年代以表露矿和浅表矿为主转向 80 年代以查证异常和寻找隐伏矿为主。据我国地矿部门统计，1949—1965 年，我国新发现的隐伏矿床仅占发现矿床总数的 10%，而 1965—1983 年新发现的隐伏矿占到发现矿床总数 50%[1]。

作为安徽铜陵有色金属集团公司的骨干矿山企业----凤凰山铜矿也面临着同样的转型，经过几十年的矿山开采，地表露头和浅表矿已经开采殆尽，为了增加矿山保有储量和企业的稳定，只有转而寻找隐伏矿床，并于 1999 年与中南大

学签订了“凤凰山矿区深部及边部找矿预测研究”协议。该协议于2001年11月被列入国家“十五”科技攻关计划（课题编号：2001BA609A-06，详见：国科发计字[2001]463号文），同时将凤凰山铜矿列为隐伏铜矿勘查示范基地。

然而，解决隐伏矿和难识别矿找矿问题的最主要基础，是能够在矿床的各种隐蔽条件下获取到真实可信的直接信息和间接信息。因此，发展和优选使用各类野外和室内探测技术，是提高隐伏矿和难识别矿找矿效果的关键[3]。为此，在凤凰山铜矿区开展隐伏铜金矿体的找矿定位预测中，中南大学铜陵找矿科研队广泛采用地质—地球物理—地球化学—地球电化学的综合勘查方法，对凤凰山矿区的深部和边部（主要是42线以南至相思树一带）的隐伏矿体进行勘查和综合找矿预测。其中，地球电化学勘查法是首次在该区域进行隐伏铜矿体的勘查和找矿预测。

1.2　研究的目的及意义

1.2.1　研究目的

地球电化学勘查法是一种在天然电场或人工电场作用下，隐伏矿体中元素组分自深部向地表进行电化学迁移，利用某种特制的装置直接提取成矿元素或采集这种隐伏矿体上方的土壤、岩石等介质，再对某种元素组分或电化学参数进行测定的测量找矿法[4]。本课题研究的目的是利用地球电化学勘查法对凤凰山铜矿的深部和边部的隐伏铜金矿体进行勘查、取样分析和找矿预测，并对照地质—地球物理—地球化学三种勘查和找矿预测的结果进行对比分析和效果评价，为发展“地质—地球物理—地球化学—地球电化学”的信息综合找矿模型奠定坚实基础，同时也为下一步探矿工程提供一种行之有效的理论依据以及为增加矿产资源、稳定企业生产作出应有的贡献。

1.2.2　研究的意义

近百年来，人类进行了大规模的矿产勘查和开发工作，随着地表露头矿和浅表矿日渐减少，隐伏矿的勘查已经成为整个地质探矿领域的重要研究课题之一。在厚层覆盖区的条件下，利用常规地质、物化探方法往往很难发现深部隐伏矿体，而地球电化学勘查法正是一种针对厚层覆盖区下寻找隐伏矿的找矿勘查法。该方法能够发现500米基岩以下，其中包括200米浮土以下有色金属矿床、贵金属矿床、稀有金属矿床、放射性元素矿床和1800米以下的石油天然气矿床，是一种

直接找矿方法，它既能排除地表人工污染，辨别假异常，而且能够消除地球物理勘查法中物探异常的多解性。而且通过少量钻孔和坑道，还能利用该法获取矿体的组成、含量、结构构造、矿体规模等方面的信息，具有勘探效率高、周期短、投资成本低的特点。本课题研究的地电吸附提取法是地球电化学勘查法的一种方法，利用该法尽量获取与深部隐伏矿有关的信息，减少片面性，避免盲目性，为隐伏矿的预测提供新的直接指示标志和理论依据，从而尽快发现新的接替资源，推动我国矿业经济发展和稳定我国矿产资源供应具有重大的意义。本课题研究属现代成矿学理论中研究的前沿和热点，对成矿学领域的发展和资源濒危的矿山找矿亦具有十分重要的意义。

1.3　地电化学研究现状及应用综述

地球电化学起源于 19 世纪初。1830 年，P. 福克斯首次在康沃尔矿山发现了地球中的电学现象[5]。随后，越来越多的科研人员涉足对自然电场的研究与应用。Г. Б. 什维斯尼科夫在发现地球内部电场后，曾提出关于它们对成矿作用影响的想法，并详细地探讨了自然电场的作用。但由于当时受对活动态金属晕缺乏充分认识以及分析技术条件限制，地电化学发展缓慢。而在这方面比较广泛的研究只是到了 20 世纪 60 年代末才开始兴起的。从 70 年代起，前苏联等国家对地球内部电化学过程的研究不断发展，显著改进了以测量自然地球电流为基础的自然电场法，形成了激发极化法。地电提取测量法正是在这个时期由圣·彼得堡的一些学者所创立的，索科洛夫（1967 年）在矿物电压方面做了开创性工作，雷斯和戈德堡描述了地电提取测量法的基本原理及野外技术方法和找矿实例。经过十余年的研究和摸索，地电提取测量法在前苏联逐步形成一套比较完整的理论，制造出配套的仪器设备，并在生产实践中形成了规范化的应用程序。1983 年雷斯出版了《地电化学勘探法》一书。随着对地电化学过程实质的深入研究，人们陆续又提出了一些新的地电化学方法：接触和非接触极化曲线法，部分提取金属法，黄铁矿类矿床的电化学普查法，阳极-阴极极化法等。特别是人们对硫化矿床周围岩石和土壤中元素分散的电化学机理的研究不断深入、细化，并进行了类似实验模拟，取得了一系列研究成果，进一步揭示了地电化学在找矿过程中的地位和意义。同时在原来的基础上，地电化学方法经过优化组合，形成了现在寻找隐伏矿床中一些常用的方法如：H^+离子浓度和电导率普查法，元素存在形式普查法，偏提取金属普查法，气体地电化学离子法，氧化还原电位法等等。目前地电化学勘查法已在前苏联广泛应用，其理论研究及仪器开发均居世界前列。该方法在找油气田、地热和各类隐伏金属矿方面，均取得了明显的地质找矿效果。西麦肯于

1985 年向西方学者介绍了该方法的原理、技术及应用成果，此外，加拿大、美国和澳大利亚等发达国家的地质同行也在积极研制和应用过程之中[6-29]。

20 世纪 70 年代末至 80 年代初，由邱郁文、吴传璧（1977）、郑康乐[30]（1982）付良魁[31,32]（1982），崔林沛[33]（1980）首先介绍了国外地电化学找矿法的发展概况，接着我国地质矿产部,核工业部 ,冶金工业部和有色金属工业总公司等系统的生产部门和有关院校、研究所等单位 ,先后开展研究并用该法在不同地区、不同类型的隐伏多金属矿和金矿上进行了大量试验和生产 ,积累了丰富经验 ,取得了良好找矿效果.其中，高云龙[34]等人参照前苏联的理论和装置，对地电提取装备进行研究，于 1986 年陆续推出 4 种型号的电源控制仪以及元素接收器等主要部件，并在东北各种类型铀矿上进行了地电提取寻找铀矿试验，证实了该方法和仪器的可行性、有效性，取得了较好的效果；费锡铨[35,36]等学者汲取了电解技术原理，创造了以高电压、低电流和长时间的激发方式，发展了一套适合野外经济快速提取理论和野外工作技术，并在新疆 305 项目中取得了成功；李金铭、卢军等[37]人根据电解质溶液的基本电化学性质和传导体电法的电场分布理论，结合时量曲线的模拟实验对离子淌度、离子迁移的机理进行了研究。与此同时，罗先熔[38-45]、谭克仁[46,47]、刘占元等[48-66]在我国各地区寻找深部隐伏金、银、铜、铅、锌等金属矿过程中进行了许多的地电化学方法试验研究工作。其中罗先熔等研究认为，地电化学方法是一种快速定位预见隐伏金、银、铜、铜、锌等金属矿床的新方法，并利用该方法在全国 16 个省的 20 余个各种不同类型的厚覆盖区找到 18 个具有找矿前景的成矿靶区，其中 10 个靶区经深部工程验证，有 8 个靶区找到了金属工业矿体，取得了良好的找矿效果。

国土资源部廊坊物化探所也进行了地电化学勘查方面的研究工作，提出了战术性深穿透方法[67-69]。地矿部北京地质仪器厂研制出了电化学探测仪。中南大学编著了《地电化学基础及其应用》一书[70]，桂林工学院罗先熔于 1996 年出版了《地球电化学勘查及深部找矿》著作[42]。

地电化学找隐伏矿的试验研究在我国已有近 20 年的历史，从专门的地电化学测量仪器和 各种类型的离子接收器以及该方法在矿产勘查中的应用均进行了广泛的研究，特别是氧化还原电位法的误差处理和在石油勘查中的应用，取得了突破性的进展 ，但基础理论的研究仍显得薄弱，如离子分散晕的形成机制，特别是动力学机制，离子分散晕与矿床之间的动态平衡，离子分散晕在垂直剖面上的分布特征，离子的迁移途径和不同介质中迁移形式的转化以及离子分散晕分布的影响因素，时量曲线突变的地质原因，测量单位的归一化和科学化等诸多方面研究得不够透彻，尚存很多争议，而且很少有人进行专门的研究，推断解释方法的研究也涉及较少。目前，我国在地电化学勘查法中试验研究的重点集中在该方

法找隐伏矿的效果和改善离子接收器的性能等到方面。因此，若不加强地电化学勘查法的理论研究，将会长期处于模仿和低水平的重复状态[54]。

1.4　论文工作方法及工作简况

1.4.1　论文工作方法

采取地球电化学与地质、地球物理、地球化学相结合的综合研究方法，以多因复成矿床成矿理论为指导，重新分析矿田的矿床成因、成矿规律和矿体定位的控制因素，应用构造地球化学技术、地电提取技术探测深部隐伏矿体的地球化学、电化学信息、以三频激电和 CSAMT 等技术探测与深部隐伏矿体有关的地球物理信息，最后综合各方面的信息对隐伏矿体进行预测评价。

(1)收集和整理凤凰山铜矿床地质、地球化学、地球电化学、地球物理等资料；

（2）实地勘察凤凰山铜矿床地质条件，提出合适的勘查方法；

（3）结合实际，应用地质-地球化学-地球物理-地电化学找矿模型；

（4）进行地电化学样品采集点的确定、采集、编录、送样、化验；

（5）将各类数据分别整理、进行技术处理，筛选出有利的地质-地球化学-地球物理-地电化学找矿综合异常；

（6）建立地质-地球化学-地球物理-地电化学综合找矿模型，利用异常信息，定量圈定预测区，优选找矿靶区；

1.4.2　论文工作简况

本人于 2002 年 7 月开始研究工作，历时一年有余，于 2003 年 1 月完成论文工作。具体工作情况如下：

2002 年 8 月至 12 月：课题设计阶段（包括：资料收集、整理，其中包括中外文文献的查阅及相关专著的阅读，整理和充实已有资料，初步拟定论文详细提纲，并为论文工作做准备。）

2003 年 1 月至 10 月：科研实质阶段：包括地质-地球化学-地电化学数据的采集和处理；送样分析，数据处理，以及提取各类找矿信息，优选找矿靶区；

2003 年 11 月至 12 月：学位论文撰写及一些后续工作处理；

1.5　论文主要工作内容及研究成果

1.5.1　论文主要工作内容

采用地质和地球电化学相结合，室内分析与现场研究并用的方法，对凤凰山铜矿区的边部（主要是42线以南至相思树一带）进行如下几个方面的研究：

（1）凤凰山铜矿床地质背景的研究；

（2）凤凰山铜矿床成矿岩体的地球电化学及其找矿机制；① 地球电化学成矿信息的提取：利用地电吸附提取技术来提取隐伏矿床的找矿异常信息，特别是微弱信息；② 地球电化学成矿信息的分离及其地电化学元素综合异常下限的确定；③ 地球电化学成矿信息的解释和找矿机制的研究；

（3）凤凰山隐伏铜矿体的定位预测和地学综合找矿模型：将地质、地球物理的找矿信息和地球化学、地电化学找矿信息综合起来进行有效提取和快速识别地学示矿信息（地质、物探、化探、电化探等），进行矿山资源综合评价和接替资源基地快速定位预测，从而建立快速有效的地质-地球化学-地球物理-地电化学的地学综合找矿模型。

1.5.2　完成的主要工作量

（1）地球化学数据的采集和找矿信息的提取：　206件

（2）地球电化学样品的采集量：226件

（3）地球电化学样品找矿信息的提取测试工作量：452个

（3）地球物理数据找矿信息的提取：　8条

（4）各类地质图件：3件

1.5.3　主要研究成果

1. 地球电化学作用参与金属成矿作用较为广泛，并在成矿金属元素的活化、迁移、富集及定位过程中起着相当重要的作用；

2. 初步总结了地电化学异常的形成机理、野外工作方法以及应用条件，并对离子晕的动力学机制进行了探讨和总结；

3. 通过已有的地质资料及地质填图进一步增加了对测区的地层特征、岩浆岩特征、构造特征及矿体地质特征的认识，对石英二长闪长斑岩和成矿、地电化学异常关系有了更深层次的了解；

4. 首次在安微铜陵凤凰山铜矿矿区运用地球电化学勘查法进行隐伏矿体的勘查和找矿预测；

5. 通过认真分析地电吸附提取的数据资料，总结和发现了凤凰山铜矿测区8条剖面线的铜金属元素的地电化学异常特征，丰富了找矿资料，并总结了铜、金地电化学异常特征的标志；

6. 初步总结了地电化学异常的四个影响因素，即：（1）地质体因素；（2）构造因素；（3）地表覆盖层因素；（4）供电条件。并指出了它们的影响特征和消除方法；

7. 经与已有的地质、遥感、物化探勘探结果对比分析及应用评价，结果表明该方法可用于隐伏铜金矿体地段的定位预测，其中部分地电化学异常经钻孔验证，其结果与已揭露的隐伏铜金矿体非常吻合。这从实践方面证实了地电吸附提取法的实用性，并具有广阔的应用前景；

8. 通过对凤凰山铜矿测区实施地电提取测量寻找隐伏铜金矿体研究，发现了该区存在四个巨大的铜异常带，为找矿的定位预测提供了准确有力的理论和技术依据，确定了有利的找矿靶区，并证实了凤凰山铜矿测区具良好的找矿前景，为科研队伍找矿预测提供了理论依据以及重点找矿研究方向；

9. 研究表明，就某一矿区或矿田而言，地球电化学异常强度和异常宽度的规模越大，找矿潜力就越大。反之，则找矿前景就越差；

10. 研究表明，在隐伏金属矿产勘查中，地电提取测量法是一种行之有效的勘查方法，该方法野外工序间单，样品运输方便，获取的地电化学异常信息结果稳定，重现性好。

第二章　地电提取测量找矿的基本原理及成晕机制

地电提取测量法是近 20 年来由于人类工业化对矿产资源需求量不断增长，而地表出露矿或浅部矿床逐年减少的矛盾中产生和发展起来的。它是一种以电场形式激发，以物质形式记录电化学反应结果的地电化学找矿法。该方法在 70 年代初首先由前苏联学者 IO. C. 雷斯等提出并发展起来，80 年代初传入中国和印度，90 年代初开始引起西方学者的重视。

目前，地电化学勘查法的找矿机理尚未形成统一的认识。原苏联学者认为，电极表面上的提取物直接来自深部矿体，人工电场是驱动深部矿体金属离子上升的主要动力。其找矿机理是在人工电场作用下，电流通过大地形成供电回路，使赋存于地下的隐伏矿体发生电化学溶解，并促使带正电荷的溶解金属离子向电极阴极方向运移和沉淀，带负电荷的物质向电极阳极方向运移和沉淀，通过对每个电极表面上的沉淀物进行分析和处理，从而形成地电化学异常。

然而，一些中国和美国的学者都认为人工电场并不能直接作用到地下几百米深的隐伏矿体，发生电化学溶解并使各种金属离子运移至地表，而且还认为电提取的能力是有限的，用 500mA 的电流所得的结果与用 20mA 电流并无大的差别[71]。一些研究表明[72]：人工电场只起次要作用，驱使金属离子沉积在电极表面上的原因是由于电极液（如硝酸、盐酸等）的扩散导致金属离子向电极的反向扩散[2]，从而在每个电极表面沉积，形成地电化学异常。

笔者赞同后者的观点。因为从电迁移理论的计算结果表明，在短短的 20 多个小时的通电时间里，隐伏矿体的成矿金属离子不可能迁移至几百米远的地表。越来越多的研究人员发现，地电提取测量法的找矿机理是由于各种电化学溶解、机械运移等作用，在隐伏矿体及其周围形成一个强大的活动态的原始金属离子晕。然后在成矿后期的漫长地质年代里，这些原始金属离子晕受浓差扩散、压差扩散、地下水循环、自然电场、地气流、毛细血管作用以及干旱地区的蒸发泵流等的营力作用下，通过岩石孔隙、构造裂隙、断层、破碎带等离子通道运移至地表层，形成以各种金属离子态，络合态，胶体态、吸附态以及氧化物等形态，并赋存于地表，形成活动态的地表金属离子晕。然后，在人工电场作用下，这些地表金属离子晕会发生电化学溶解，定向迁移和在电极表面上富集，选择提取电极表面上的沉积物，并进行分析和处理，便形成了地电化学异常，为寻找隐伏矿体提供有用的信息和依据。

2.1　地电提取测量找矿的基本原理

地电提取测量法的基础是在外加电场作用下，经过电化学溶解出来的岩石和矿体的组分在电极附近富集，并进行一系列电化学反应，从而找出各种矿体的信息。由于金属硫化物中各种矿物组成不同，其电极电位也不一样，因而形成了一种天然的原电池。当甲矿物电极电位比乙矿物的电极电位更负，则会发生甲矿物中多余的电子移向乙矿物，使得两种矿物界面上的物质交换和电荷交换的平衡遭到破坏，为了保持电化学平衡，甲矿物中组分不断破坏，发射或者放出电子，发生氧化电极反应，并在其矿物表面形成正电荷带；而乙矿物界面附近电化学平衡的破坏使正离子放电并以固态形式沉淀在矿物上，并且得到电子，发生还原反应，同时还在其表面形成负电荷带。就这样反应不断的进行，直到达到新的电化学平衡为止。在这过程中，矿体产生的各种金属离子在地下水运动作用，浓差扩散作用，原电池的电动势作用，气体运移作用，毛细管作用以及构造应力作用等运移至矿体周围近地表的覆盖层中形成金属离子晕。当有外加电场时，矿体发生电化学溶解形成的金属离子与原有的离子晕中的离子一起电迁移，使得这些成矿金属元素进入电极的元素接收器，从而显示矿体的各种有用信息。如图 2-1 所示.

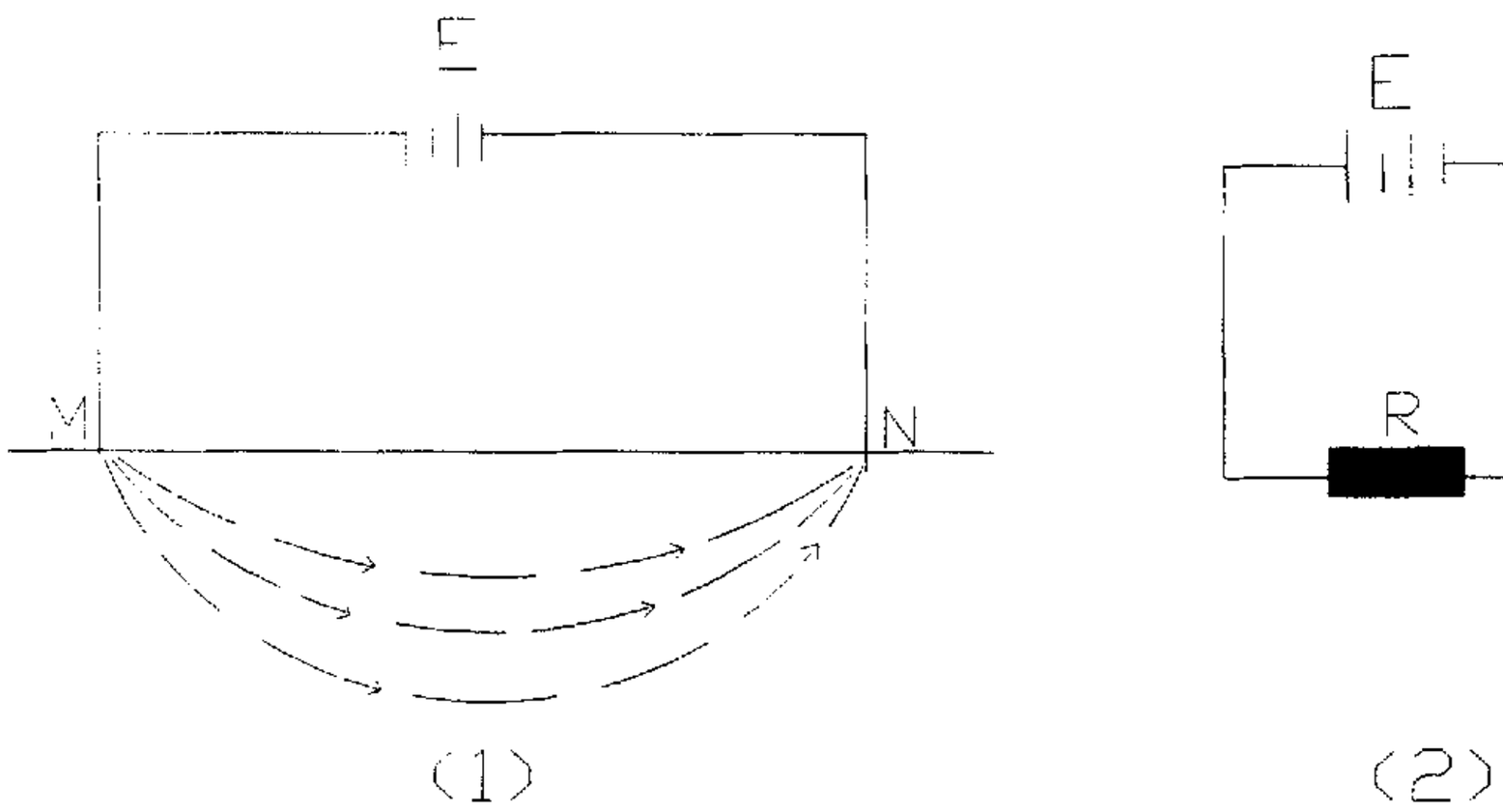


图 2-1　地电提取测量法示意图

图 2-1 表明，地电提取测量法是通过将直流电压施加至与大地相连接的供电正极 M 和负极 N 上，形成外加直流电场。在电场作用下，成矿金属正离子以及带正电荷的水溶物质将向供电负极 N 迁移，而在该处的元素接收器会对成矿金属正离子进行吸收。

假设 S_{MN} 是由一个纯电子导体系 S_0 和一个纯离子导电体系 S 并联而成，这是由于地表介质是一个气相、液相和固相组成的复杂体系，因此，S_{MN} 中应包括电子传导电流和离子传导电流两部分。则图 2-1（b）可表示为图 2-2：

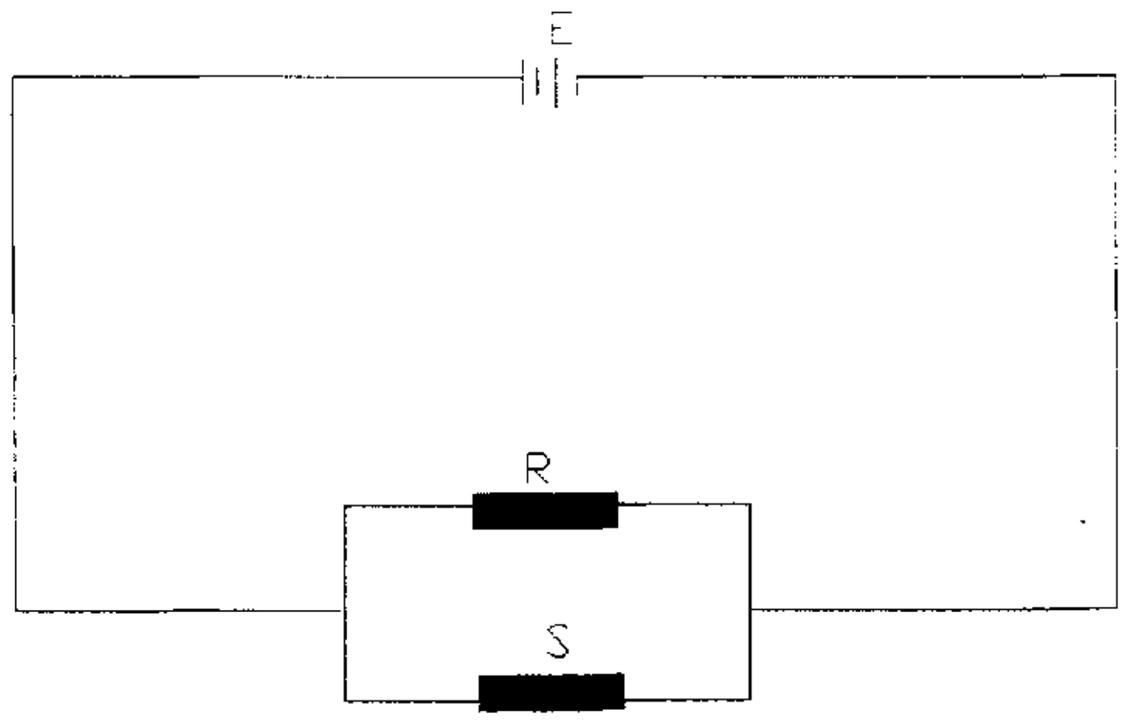


图 2-2　　地电提取等效电路图

S 为纯离子导电体系（液相），R 为纯电子导电体系（固相）

假设 S 体系中离子的种类有 N 种，根据电化学理论和柯尔劳许的离子独立运动定律，S 体系的总电导 σ 为

$$\sigma = \sum \sigma_i \quad (i = 1, 2, 3, \cdots\cdots N)$$

式中 σ_i 表示 i 种离子迁移时的电导。

而在稀溶液中离子的电导同离子的浓度呈线性关系：

$$\sigma_i = K_i C_i \quad (i=1, 2, 3, \cdots\cdots N)$$

式中 K_i 表示 i 种离子性质决定的关系常数；C_i 表示 i 种离子在体系内的浓度，则：

$$\sigma = \sum K_i C_i \quad (i=1, 2, 3, \cdots\cdots N)$$

据 $I = \sigma E$，有：

$$I = E\sum K_i C_i \quad (i=1, 2, 3, \cdots\cdots N)$$

式中 E 表示 MN 两端的端电压。

而 $I_{MN} = I_0 + I$，所以，

$$I_{MN} = I_0 + E\sum K_i C_i \quad (i=1, 2, 3, \cdots\cdots N)$$

若电提取线上有 M 个电提取点，则每个提取点的电流可表示为

$$I_{MNj} = I_{0j} + E\sum K_i C_{ij} \quad (i=1, 2, 3, \cdots\cdots N; j=1, 2, 3, \cdots\cdots M)$$

式中 j 表示电提取点号，C_{ij} 表示第 i 种离子在第 j 点位置的土壤中的浓度。

因而，第 i 种离子在第 j 电提取点的有效电流为：

$$I_{ij} = E \times K_i \times C_{ij} \quad (i=1, 2, 3, \cdots\cdots N; j=1, 2, 3, \cdots\cdots M)$$

而电极元素接收器接收到的物质量设为 Q_{ij}，则 Q_{ij} 是 I_{ij} 电化当量转换的结果且呈线性关系。

$$Q_{ij} = f \times I_{ij} \times t \quad (i=1, 2, 3, \cdots\cdots N; j=1, 2, 3, \cdots\cdots M)$$

式中 f 表示电化当量常数，t 表示电提取时间。

$$Q_{ij} = (f \times E \times K_i \times t) * C_{ij} \quad (i=1, 2, 3, \cdots\cdots N; j=1, 2, 3, \cdots\cdots M)$$

上式中表明，f 和 K_i 只能与特定的物质种类有关，是常量；t 是电提取时间，相对于同一测线各电提取点而言也是一样的；E 是指正负两极的端电压，相对应于同一线路并联的每个电提取点来说也是一定的，因此，元素接收器接收的成矿金属离子的物质量只与该点的近地表的成矿金属离子浓度有关。这便是地电提取测量找矿的基本原理和地电化学异常的形成、指示成矿信息的本质。

2.2　成晕机机制

2.2.1　离子晕的来源

离子晕中离子的来源主要是矿物溶解。矿物溶解包括机械溶解，化学溶解，生物溶解，氧化溶解以及电化学溶解。对于出露和近地表的矿体以及在地下水平上的矿体主要以机械、化学、生物和氧化溶解为主；而对深部隐伏矿体且位于潜水面下或裂隙水发育等条件下，矿体主要以电化学溶解为主。例如：风化程度较高且埋藏浅的黄铁矿、方铅矿和闪锌矿发生氧化溶解生成相应的硫酸盐；其化学反应式分别如下：

$$4FeS_2 + 15O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe(SO_4)_3 + 2H_2SO_4$$

$$PbS + 2O_2 \rightarrow PbSO_4 \downarrow$$

$$ZnS + 2O_2 \rightarrow ZnSO_4$$

当隐伏矿体风化程度低，埋藏深，且位于潜水面附近时，矿体处于上下氧化还原性质不同的围岩溶液中，组成宏电池。 这些天然的宏电池之间互相作用，产生了一系列电化学反应。如被潜水面切割的隐伏黄铁矿和方铅矿，矿体上部都为正极，发生还原反应；矿体下部都为负极，发生氧化反应。

黄铁矿电化学反应式如下：

阴极：

$$O_2 + 4H^+ + 4e \rightarrow 2H_2O$$

$$Fe^{3+} + e \rightarrow Fe^{2+}$$

$$FeS_2 + 4e \rightarrow Fe + 2S$$

阳极：

$$S^{2-} - 2e \rightarrow S$$

$$HS^{-} - 2e \rightarrow H^{+} + S$$

$$H_2 - 2e \rightarrow 2H^{+}$$

$$FeS_2 - 2e \rightarrow Fe^{2+} + 2S$$

方铅矿电化学反应式如下：

$$\text{阳极：} PbS - 2e \rightarrow Pb^{2+} + S;$$

$$\text{阴极：} PbS + 2e \rightarrow Pb + S^{2-};$$

研究表明[73]，地质体中存在着天然原电池。天然原电池可由不同电极电位的岩石、矿物等集合体构成。在原电池正极区主要发生电化学氧化反应，许多金属硫化物、碳及自然金、银、铜等自然金属元素在氧化条件下被活化成金属正离子、SO_4^{2-}、CO_3^{2-}等具有较大溶解度的物质。硫化矿、自然金、银的堆浸过程是对上述“原电池活化”观点最有力的说明。例如，在方铅矿、闪锌矿的浸出过程中，人们发现与方铅矿、闪锌矿相伴产出的经常有黄铁矿和磁黄铁矿。当加入适当的溶液时，前者电极电位往往为负，后者往往为正，并构成很多微电池。经一段时间后，方铅矿、闪锌矿作为微电池的负极被氧化进入溶液，而黄铁矿、磁黄铁矿作为正极被保护残留尾矿中。由此达到有用元素浸出的目的。又如自然金、银的堆浸亦是利用上述类似的原理达到从硫化矿中提取金元素的过程。前苏联学者IO. C. 雷斯在中哈萨克斯坦科恩拉德矿床上就发现在矿床和阳极一侧有明显的黄铁矿溶解的痕迹，并利用电化学实验详细地研究了地球电化学作用对黄铜矿活化（即阳极溶解）的全过程。

在电位不大时（约+0.3 伏电压），溶液会观测到铜离子和硫元素从黄铜矿中溶解出来；当正电位升高至+0.4～0.5 伏时，黄铜矿溶解出二价铁离子；当电位超过+0.5 伏时，溶液中二价铁离子转换成三价铁离子，元素硫也为硫酸盐和硫酸根离子所取代；当电位继续升高至+0.6～0.8 伏时，黄铜矿遭到完全破坏，构成其矿物组成部分的金属元素及其它元素均被活化出来，进入溶液中。其活化机理如下：

黄铜矿是一种复杂矿物，矿物中不但含有铜和铁两种元素，而且这两种元素的价态有多种，铁的价态有正二价和正三价，铜的价态有正一价和正二价[74, 75]。黄铜矿化学分子式可写为：

$$CuFeS_2 \quad 或 \quad 1/4\ Cu_2S\bullet\ 1/2\ CuS\bullet\ 1/4\ Fe_2S_3\bullet\ 1/2\ FeS;$$

1. 黄铜矿中铜元素活化电化学反应为：

$$1/4\ Cu_2S\bullet\ 1/2\ CuS\bullet\ 1/4\ Fe_2S_3\bullet\ 1/2\ FeS \rightarrow 1/2\ Cu^{+} + 1/4\ S + 1/2\ e + 1/2\ CuS\bullet\ 1/4\ Fe_2S_3\bullet\ 1/2\ FeS;$$

$$1/2\ Cu^{-} \rightarrow 1/2\ Cu^{2+} + 1/2\ e;$$

$1/4\ Cu_2S \cdot 1/2\ CuS \cdot 1/4\ Fe_2S_3 \cdot 1/2\ FeS \rightarrow Cu^{2+} + 3/4\ S + 2e + 1/4\ Fe_2S_3 \cdot 1/2\ FeS$;

2. 黄铜矿中铁元素活化电化学反应为：

$1/4\ Cu_2S \cdot 1/2\ CuS \cdot 1/4\ Fe_2S_3 \cdot 1/2\ FeS \rightarrow 1/2\ Fe^{2-} + 1/4\ Fe_2S_3 + 5/4\ S + Cu^{2+} + 3e$;

$1/2\ Fe^{2+} \rightarrow 1/2\ Fe^{3+} + 1/2\ e$;

$1/4\ Cu_2S \cdot 1/2\ CuS \cdot 1/4\ Fe_2S_3 \cdot 1/2\ FeS \rightarrow Cu^{2+} + Fe^{3+} + 2S + 5e$;

3. 黄铜矿中硫元素活化的电化学反应为：

$S + 4H_2O \rightarrow SO_4^{2-} + 8H^+ + 6e$;

4. 黄铜矿活化总电化学反应式为：

$1/4\ Cu_2S \cdot 1/2\ CuS \cdot 1/4\ Fe_2S_3 \cdot 1/2\ FeS + 3H_2O \rightarrow Cu^{2+} + Fe^{3+} + 2SO_4^{2-} + 16H^+ + 17e$;

这种电化学作用包括两个方面：一是矿体形成的地质体原电池、宏电池或微电池引起的电化学溶解----阳极溶解。它是隐伏很深的矿体附近离子晕中离子的主要来源；二是隐伏矿体与围岩溶液形成一个宏大电池，产生自然电场，是离子进行迁移的动力之一。

氧化溶解、电化学溶解以及机械溶解等的最终结果，是导致隐伏矿体附近的围岩溶液中存在很多矿体的成矿金属离子，这些成矿金属离子便是形成离子晕的根源。如一些铜络合物的化学反应平衡常数如表 2-1。

表 2-1　　一些铜络合物的化学反应平衡常数

化　学　反　应	lgK_{25}	lgK_{100}	lgK_{200}	lgK_{300}
$CuS + H_2S_{(g)} + HS^- = Cu(HS)^-_3$	-4.4±0.2			
$CuS + 3HS^- = CuS(HS)^{3-}_3$	-3.7±0.2		-2.13±0.2	
$CuS + H_2S_{(g)} + 2HS^- = Cu(HS)^{2-}_4$			-2.3±0.3	
$1/4Cu_5FeS_4 + 1/2H_2S_{(g)} + HS^- = Cu(HS)^-_2 + 1/4CuFeS_2$			-2.3±0.7	-2.3±0.7
$1/4Cu_5FeS_4 + 3/2H_2S_{(g)} + HS^- = Cu(HS)_2(H_2S)^- + 1/4CuFeS_2$			-3.3±0.7	
$CuFeS_2 + H^+ + 1/4CO_{2(g)} + Cl^- = FeS_2 + 1/4C_{(s)} + 1/2H_2O_{(l)} + CuCl$			-1.2±0.5	0.79±0.5
$Cu + H^+ + 1/4CO_{2(g)} = 1/4C_{(s)} + 1/2H_2O_{(l)} + Cu^+$			-1.6±0.3	-0.29±0.3

$Cu_2O + H_2O + 2Cl^- = 2CuCl + 2OH^-$	-16.5*	-14.59	-12.5	-11.68
$CuO + H_2O + 2Cl^- = CuCl_2 + 2OH^-$	-20.29*	-16.15	-15.4	-13.2
$Cu^+ + Cl^- = CuCl$	2.94	2.75	2.78	3.15
$CuCl + Cl^- = CuCl_2^-$	2.4	2.13	2.0	2.1
$CuCl_2^- + Cl^- = CuCl_3^{2-}$	-0.67	-0.6	-0.57	-0.62

2.2.2　成矿金属离子的迁移

在外加电场作用下，成矿金属离子在近地表层中各种相态赋存形式会发生改变。如表 2-2 所示：

表 2-2　科拉半岛淤积-腐殖土电提取前后的镍铜铁存在形式变化

赋存形式	占样品中金属含量的百分数（E = 4 V/cm ）					
	镍		铜		铁	
	在原样中	通　电后	在原样中	通　电后	在原样中	通　电后
可溶的	0.9~1.62	32.60	1.73~2.33	51.0	0.04~0.05	6.95
吸附的	7.50	6.98	3.46	2.13	0.038	0.10
富里酸盐	3.46~18.6	11.6	13.80~28.20	8.02	2.74~13.00	7.55
腐殖酸盐	2.80~19.50	11.6	8.65~9.50	2.13	0.41~2.01	0.46
残渣（有机物或硅酸盐）	69.50~70.00	58.10	55.50~15.50	38.10	85.00~96.80	85.00

(据 IO. C. 雷斯)

从表 2-2 可知，在外加电场作用下，镍、铜和铁的可溶性分别提高了 30 倍、

25 倍和 139 左右。这对金属离子的迁移和离子晕的形成是非常有利的。

成矿金属离子的迁移方式多种多样，有地下水循环，浓度扩散，地电场迁移，气体运移，外加电场电迁移等。

1. 金属离子的电迁移

在自然电场作用下，离子即进行电迁移，其电迁移距离可表示为：

$$L = u \times j \times \rho \times t$$

式中　u 表示离子淌度（即单位电场力作用下金属离子迁移的速度）；j 表示均匀电场中电流密度；ρ 表示电阻率；t 表示提取时间。

由于离子淌度值很小，因而金属离子电迁移距离较短。离子淌度还与温度、浓度、溶济的种类、离子的特征等因素有关。在地下岩石中，岩石含水量、孔隙度和水的矿化度对离子淌度起着主要作用。从上式可以看出，当该原电池能稳定存在一千万年时，则地表极区的离子可定向迁移四百公里。

2. 地下水循环

由于矿体多存在于构造破碎带、层间滑脱带等一系列构造中，易于地下水发生渗滤作用，产主了地下水循环运动，使各种成矿金属离子在水介质中进行迁移，其迁移形式各种各样。可溶性的成矿金属离子以离子溶液形式迁移；有些金属离子如铁离子形成氢氧化三铁胶体形式进行运移；有些金属离子以络合物形式搬运；还有金属离子以机械形式运移。

3. 浓差扩散

在矿体周围形成金属离子晕，其浓度由内向外逐递减，故形成浓度梯度，金属离子自发地由高浓度区（矿体周围）向低浓度区（近地表等）扩散。研究表明，活动态的金属元素离子晕呈射流状，从矿体延伸到地表，射流直径可达成 1—10 米，往往按异常带聚集，以垂直柱的方式出现。

4. 地气流运移

研究表明[76, 77]，地球内部气体量比表面大气圈多千余倍，地球各圈层不断通过各种方式和途径向大气排放气体，这种来自地球深部的气体，沿着各种构造裂隙汇集成地气流。在喷气分散晕形成阶段，金属气体冷凝时，可形成大量的纳米级的金属微粒，在硫化矿床后生气体分散晕形成过程，也可形成许多金属微粒。这些金属微粒在地气流的搬运下，使矿体周围形成气溶胶分散晕，在温度差、压力差等条件下，地气流对成矿金属离子进行垂直搬运，并向地表迁移。

此外，构造应力作用、毛细管作用、压差和温差也是成矿金属离子迁移的动力之一。

2.2.3　成矿金属离子晕的形成

矿体溶解后，在其周围产生大量的该矿体的成矿金属离子。这些成矿金属多数以可迁移的离子形式存在于围岩溶液中，并发生各种化学、电化学反应，形成一种金属离子动态平衡。由于受到宏电池、浓度扩散、地下水循环、地电场以及地气流等因素综合作用，促使这些溶解下来的金属离子继续向周围或近地表迁移扩散。其中携带有成矿金属离子的地气流通过水层时，转化成气泡流形式迁移，气泡流达到潜水面时，气泡流消失，气泡表面的金属离子被解吸。

受综合作用的各种金属离子进入近地表的土壤层后，会发生表生化学作用，金属离子的赋存形式发生相应的改变。有些金属离子形成络合态和胶体态，被土壤吸附；有些金属离子发生交换反应，形成新的金属化合物；有些金属离子受氧逸度和 Eh 值的影响，形成高价位的金属氧化物。其中，金在地表疏松沉积物中的存在形式可分为两部分：一类为稳定态形式（颗粒金和存在于硅酸盐、硫化物晶质氧化物中）；另一类为活动态形式：（1）作为离子状态存在的金；（2）作为各种化合物和配合物形式存在的金，如卤化物，硫化物，可溶性有机物等；（3）作为离子或超微细颗粒存在于可溶性盐类之中；（4）作为胶体形式吸附在土壤颗粒表面；（5）呈超微细颗粒吸附在粘土矿物表面，或呈可交换的离子状态存在于粘土矿物之中；（6）作为有机质结合形式存在；（7）作为离子或超细微粒吸附在矿物颗粒的氧化膜上或被氧化物包裹。最后，形成一个完整的离子晕。离子晕中的组分一般对应于深部矿体的成份，不同的矿体形成不同的离子晕。但由于金属离子一般是以垂直迁移为主，因而，通常在深部矿体的上方会形成一个强大的金属离子晕。

第三章　地电提取测量法的仪器装备、工作方法及应用条件

3.1　地电提取测量法的仪器装备

3.1.1　电极提取器

电极提取器(即元素接收器)是地电提取测量法的核心技术之一，它要求：效果好、携带方便、处理简单、成本低、适应性强。目前，地电提取测量常使用的电极提取器类型及优缺点见表 3-1。

表 3-1 提取电极类型极其优缺点

	提取器种类	取样方法	优点	缺点
固态型	碳棒电极（石墨电极）	刮下碳粉	效果良好，成本低，携带方便，适应性强	处理不便，易受污染而造成误差，基本上被淘汰。
	泡塑电极（石墨电极外套泡塑）	取下泡塑，酸或王水溶矿，也可先灰化再酸溶	在金矿上效果良好，成本低携带和处理方便，可使用各种电源提取	时量曲线效果稍欠佳，除金矿外其它矿种试验还欠全面
	吸附剂电极	取下金吸附剂泡塑，王水溶矿或灰化	适应不同矿种，对异常有强化作用，成本低处理方便，可使用各种电源提取	时量曲线效果稍欠佳
液态型	元素接收器（离子提取膜）	吸取定量提取液	效果良好易作时量曲线，被提取的各种元素的比例能较客观反映实际情况	成本高，携带不方便，处理复杂，液体易渗漏。
	多孔陶瓷罐接收器	吸取定量提取液	效果良好易作时量曲线，被提取的各种元素的比例能较客观反映实际情况	携带不方便

（据罗先熔）

我们在安徽凤凰山铜矿测区使用的电极提取器是由中科院长沙大地构造所谭克仁研究员自主开发的固态海绵吸附型电极（国家专利号 00114534.7；实用新型专利号 4240055），其结构示意图见图 3-3 所示。

3.1.2 地电提取仪器装备

目前，用于深部提取的仪器装备主要由核工业部沈阳 240 所和地矿部地质技术经济中心仪器室研制的产品。沈阳 240 所生产除 DDHK1-21 型外还有 DDHK2-31 型，该地电提取电源控制仪器系统配备 8kW 发电机组，电场控制仪有 20 和 30 接收道，最大电流 20A，野外可连续工作 50 小时，为便于野外工作，电源部分和电源控制部分安装在汽车上，附属设备包括元素接收器，供电电缆等，该套仪器于 86 年 1 月通过部级鉴定。它们还生产有 DT4-30 型、DT4-22 型，配以 1.5—2.5kW 小型发电机，携带方便，操作间单。

地矿部地质技术经济中心研制的 DHJ-1 型仪器，配以输出功率为 2—5kW 发电机组，输出总电流 10A，该套仪器轻便，激发效果好，控制系统可在较广范围内保证分道电流，可连续供电 24—36 小时，环境温度可在-10°—40°C。1989 年又研制出 DHJ-2 型，配以输出功率为 5kW 的大功率地电化学探测器。

3.2 地电提取测量法的野外工作方法

通常，地电提取测量野外工作方法主要包括测网的确定，电极元素接收的设置、布线、取样方法确定和包装运输等环节。

3.2.1 测网的确定

对地电提取测量而言，测网分布设有一定的规格，总体上，应遵循如下原则：

(1) 地电提取测量法工作最好用 1:2000 到 1:10000 的比例尺；(2) 测网的密度应以能真实反映研究目标体的信息为原则。在异常评价中，需反映的对象是确定有利靶区，主要采用剖面法，剖面间距为 50—200 米，点距离为 10—50 米为宜；(3) 剖面线应垂直测区主控矿构造或地层来布设测点。

根据以上原则，在凤凰山铜矿测区共实施 2 个地段，8 条剖面，226 个测点，剖面总长度 4400 米，其中测区西段施工 4 条剖面，分别是 100 线，104 线，108 线和 112 线，剖面方向为东西方向，每条剖面长度为 800 米，剖面间距为 200 米，点距为 20 米，共 162 个测点；测区东段施工 4 条剖面，分别是 120 线，140 线，160 线和 180 线。剖面方向为南北向，每条剖面长度为 300 米，剖面间距为 200

米，点距为 20 米，共 64 个测点。测点定位采用目估和测绳测量相结合的方法。凤凰山铜矿测区地段地电化学勘查测点分布如图 3-1 所示.

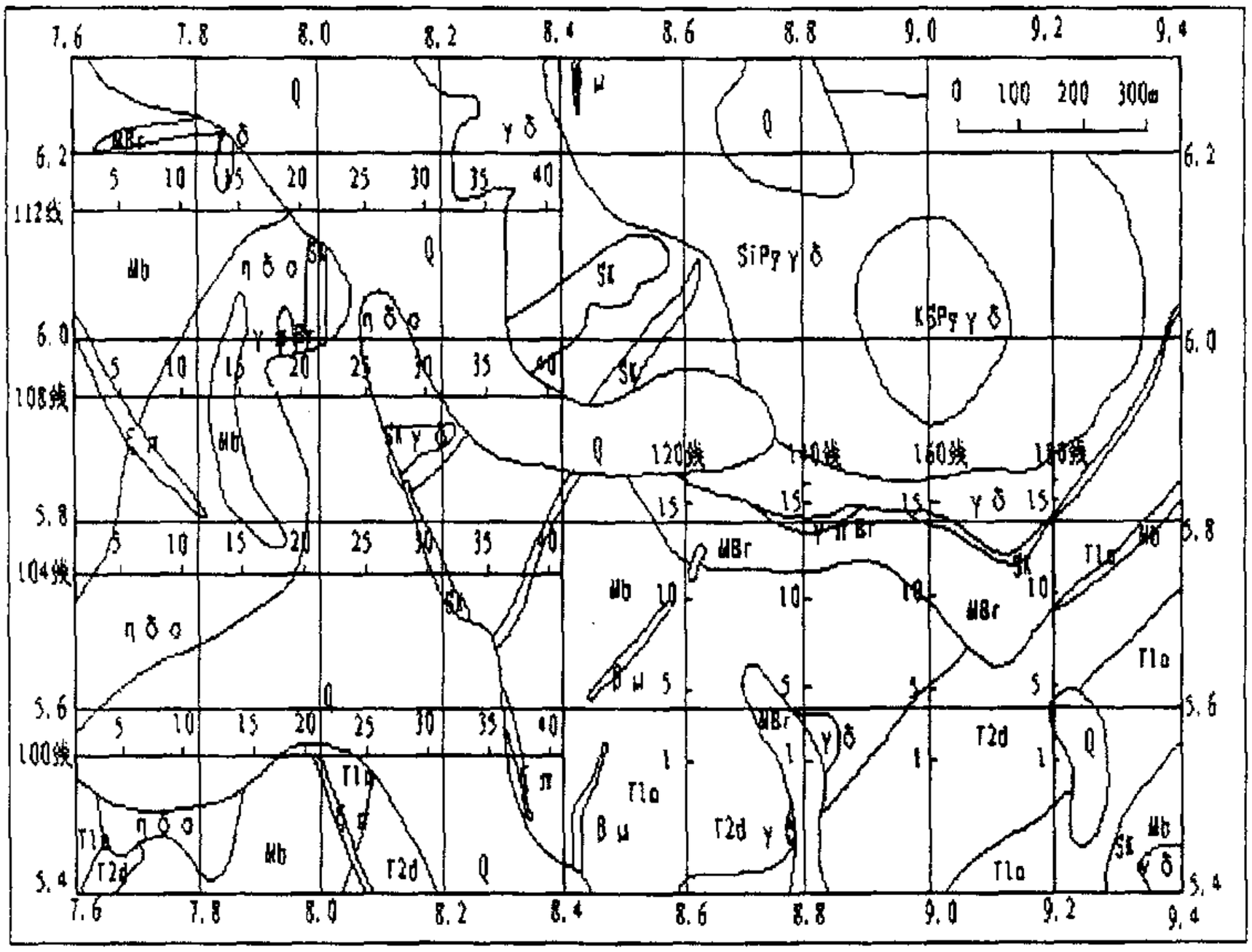


图 3-1　凤凰山铜矿测区地段地电化学勘查地质图

3.2.2　电极元素接收器的设置

地电提取测量野外工作装置见图 3-2 所示 。

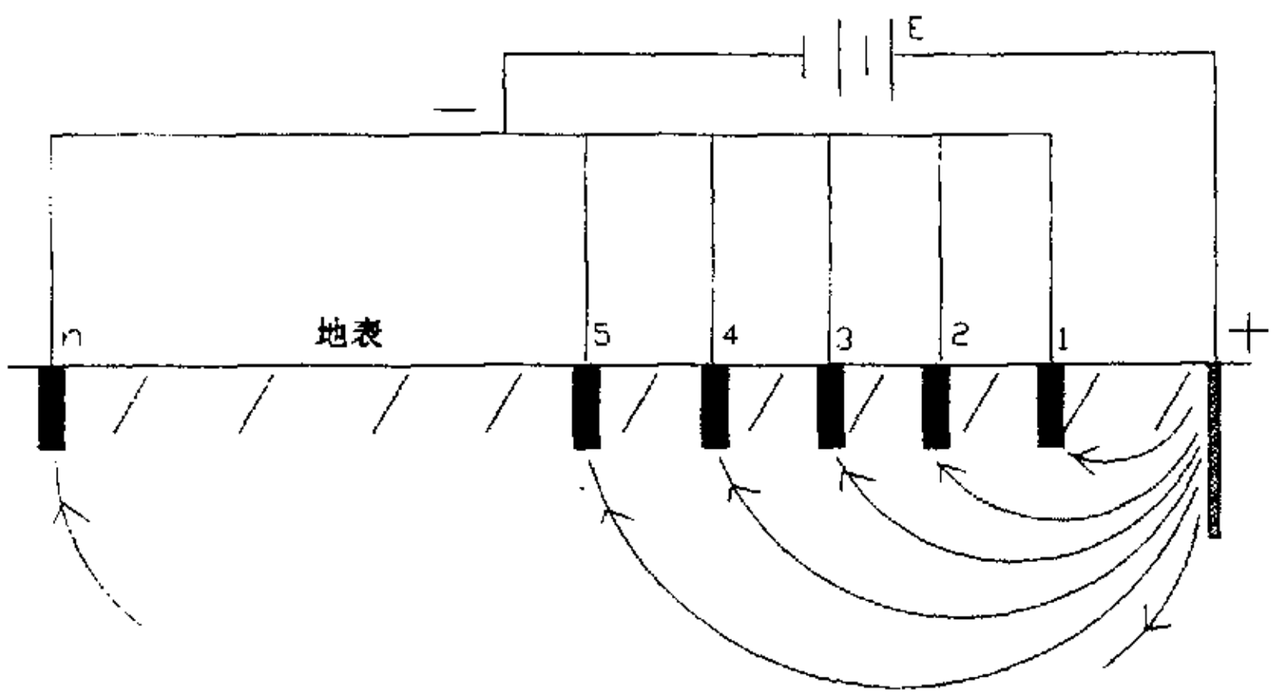
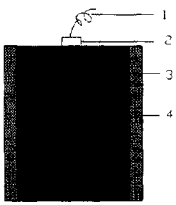


图 3-2　地电提取测量法野外工作装置示意图

从上图可以看出，一条剖面线上的每个电极元素提取器都是并联的，其电压都等于供电电压，而电流则为供电电流的 n 分子一。其中，＋表示无限远正电极，-表示供电电源的负极，→表示电流及金属离子的迁移方向，1、2、3、4、5…n 表示一条剖面线上的 n 个电极元素提取器，E 表示供电电源。

根据每条剖面线上的每个测点的位置，开挖一个 30—50CM 深的土坑，接着将电极元素接收器小心放入土坑，用刚挖出来的细土填并压实，然后再浇上 500—1000ML 的稀盐酸溶液。电极元素接收器的结构示意图如图 3-3 所示



1-电线；　2—铜壳；　3— 石墨电极；　4—海绵状吸附层

图 3-3.　固态电极元素接收器结构示意图

3.2.3　电极正极的设置

电极正极的埋设地点应选择在低洼潮湿、接地电阻良好的地点，垂直剖面方向，其长度按剖面长度的 2 倍距离计算布设。正极材料选用四根长约 1 米的铜棒插入地下，接好引线即可。

3.2.4　布线

剖面线选定后，在其附近地点（如农舍）设置测站，由测站自各元素接收器、电路正极布设供电导线。布线时应尽量避开人畜通行频繁的路口、水田及池塘等，以防漏电或移动测点位置，来达到降低电阻的目的；若接地电阻为无穷大，则说明电路处于断路状态，需沿线检查并处理好。一般而言，导线接头一定用绝缘胶布包好，以免漏电。

3.2.5　取样与包装

当供电时间达到要求后（一般为 20 小时左右），可断电，取元素接收器时应特别小心，防止海绵吸附层的脱落、丢失。取出的样品装入有编号的塑料袋中包扎好，然后按编号整齐有序地放入专门的包装箱送样分析。

3.3　室内工作方法

地电提取测量法的室内工作方法包括：样品测试测试数据分析以及测试元素背景值，异常下限的确定等。

3.3.1　室内测试

元素分析测试是获取地球电化学微观信息的关键技术手段，测试方法合理与否则涉及到能否将蕴含于样品中的最佳找矿信息提炼出来，关系到找矿定位预测成功与否的关键性环节。

固态海绵状电极的化学分析处理方法是把电极上的海绵状物质取下来，烘干后称其重量，然后灰化溶解或用王水（即按 1：3 比例混合的硝酸与盐酸溶液）处理吸附在海绵状物质上的铜离子和金离子或其络合态物质。由于铜离子和金离子的含量低，其检出限分别是 1×10^{-6} 和 3×10^{-9}，因此，检测仪器要求测试准确，误差小，灵敏度高。目前，一般采用原子吸收光谱，等离子质谱法等先进检测技术来分析处理。凤凰山铜矿测区地段地电化学勘查共施工 8 条剖面共 226 个测点，分析的元素为金和铜，其分析结果见表 3-1 和表 3-2。

表 3-1　凤凰山铜矿相思树地段西段地电化学勘查元素分析结果

顺序号	野外号	分析结果		顺序号	野外号	分析结果	
		铜 Cu(m)/ng	金 Au(m)/ng			铜 Cu(m)/ng	金 Au(m)/ng
1	FC1-1	14.3	16.0	42	FC2-1	11.4	17.0
2	FC1-2	47.7	12.0	43	FC2-2	12.0	16.0
3	FC1-3	14.6	17.0	44	FC2-3	16.7	18.0
4	FC1-4	17.6	20.0	45	FC2-4	27.1	37.0
5	FC1-5	13.6	17.0	46	FC2-5	12.2	19.0
6	FC1-6	37.5	15.0	47	FC2-6	23.6	18.0
7	FC1-7	15.1	18.0	48	FC2-7	26.4	22.0
8	FC1-8	11.9	21.0	49	FC2-8	22.4	27.0
9	FC1-9	16.3	15.0	50	FC2-9	34.9	18.0
10	FC1-10	26.9	23.0	51	FC2-10	177.0	20.0
11	FC1-11	26.9	14.0	52	FC2-11	103.0	17.0
12	FC1-12	16.6	16.0	53	FC2-12	203.0	14.0
13	FC1-13	56.4	18.0	54	FC2-13	450.0	16.0
14	FC1-14	65.4	24.0	55	FC2-14	162.0	17.0
15	FC1-15	18.8	16.0	56	FC2-15	51.4	18.0
16	FC1-16	14.8	20.0	57	FC2-16	37.6	22.0
17	FC1-17	29.5	22.0	58	FC2-17	272.0	19.0
18	FC1-18	35.1	24.0	59	FC2-18	49.7	20.0
19	FC1-19	13.8	23.0	60	FC2-19	28.3	12.0
20	FC1-20	44.3	15.0	61	FC2-20	30.2	16.0
21	FC1-21	23.1	13.0	62	FC2-21	42.9	16.0
22	FC1-22	16.0	19.0	63	FC2-22	30.2	17.0
23	FC1-23	26.5	13.0	64	FC2-23	8.0	18.0
24	FC1-24	12.0	18.0	65	FC2-24	3.1	21.0
25	FC1-25	14.7	21.0	66	FC2-25	138.0	57.0
26	FC1-26	83.0	20.0	67	FC2-26	90.8	17.0
27	FC1-27	10.8	12.0	68	FC2-27	272.0	14.0
28	FC1-28	18.8	16.0	69	FC2-28	82.7	24.0
29	FC1-29	14.3	13.0	70	FC2-29	183.0	17.0

30	FC1-30	16.9	12.0	71	FC2-30	834.0	19.0
31	FC1-31	73.2	39.0	72	FC2-31	39.8	18.0
32	FC1-32	98.2	36.0	73	FC2-32	38.0	20.0
33	FC1-33	14.6	15.0	74	FC2-33	31.0	17.0
34	FC1-34	23.2	12.0	75	FC2-34	53.1	18.0
35	FC1-35	9.1	21.0	76	FC2-35	0.8	30.0
36	FC1-36	14.4	13.0	77	FC2-36	105.0	17.0
37	FC1-37	35.0	20.0	78	FC2-37	101.0	16.0
38	FC1-38	63.5	18.0	79	FC2-38	105.0	16.0
39	FC1-39	17.7	11.0	80	FC2-39	1244.0	17.0
40	FC1-40	42.2	20.0	81	FC2-40	181.0	206.0
41	FC1-41	17.8	15.0	82	FC2-41	626.0	19.0

续上表：

顺序号	野外号	分析结果		顺序号	野外号	分析结果	
		铜 Cu(m)/ng	金 Au(m)/ng			铜 Cu(m)/ng	金 Au(m)/ng
84	FC3-1	79.8	17.0	123	FC4-1	24.1	13.0
85	FC3-2	34.2	20.0	124	FC4-2	24.4	24.0
86	FC3-3	46.3	21.0	125	FC4-3	37.8	15.0
87	FC3-4	48.3	404.0	126	FC4-4	78.3	26.0
88	FC3-5	35.2	20.0	127	FC4-5	56.5	15.0
89	FC3-6	151.0	16.0	128	FC4-6	75.8	10.0
90	FC3-7	24.4	25.0	129	FC4-7	35.9	13.0
91	FC3-8	36.8	12.0	130	FC4-8	34.2	20.0
92	FC3-9	280.0	19.0	131	FC4-9	34.5	21.0
93	FC3-10	175.0	17.0	132	FC4-10	48.0	18.0
94	FC3-11	181.0	22.0	133	FC4-11	56.5	24.0
95	FC3-12	1322.0	23.0	134	FC4-12	32.7	14.0
96	FC3-13	132.0	19.0	135	FC4-13	94.0	66.0
97	FC3-14	80.4	21.0	136	FC4-14	40.3	27.0
98	FC3-15	41.4	21.0	137	FC4-15	238.0	16.0
99	FC3-16	56.5	17.0	138	FC4-16	23.9	18.0

100	FC3-17	75.7	19.0	139	FC4-17	85.9	26.0
101	FC3-18	95.2	18.0	140	FC4-18	93.5	38.0
102	FC3-19	59.0	13.0	141	FC4-19	104.0	16.0
103	FC3-20	166.0	12.0	142	FC4-20	292.0	278.0
104	FC3-21	73.6	18.0	143	FC4-21	91.4	28.0
105	FC3-24	43.3	23.0	144	FC4-22	192.0	56.0
106	FC3-25	170.0	27.0	145	FC4-23	28.8	28.0
107	FC3-26	38.2	15.0	146	FC4-24	34.3	15.0
108	FC3-27	46.2	19.0	147	FC4-25	24.8	15.0
109	FC3-28	34.1	25.0	148	FC4-26	20.8	21.0
110	FC3-29	47.4	20.0	149	FC4-27	71.6	15.0
111	FC3-30	83.7	12.0	150	FC4-28	127.0	14.0
112	FC3-31	137.0	22.0	151	FC4-29	64.1	11.0
113	FC3-32	55.7	24.0	152	FC4-30	45.6	11.0
114	FC3-33	20.7	17.0	153	FC4-31	46.1	16.0
115	FC3-34	67.5	18.0	154	FC4-32	43.2	15.0
116	FC3-35	35.5	21.0	155	FC4-33	88.1	10.0
117	FC3-36	28.0	21.0	156	FC4-34	31.3	11.0
118	FC3-37	71.5	14.0	157	FC4-35	83.2	12.0
119	FC3-38	42.1	19.0	158	FC4-36	184.0	27.0
120	FC3-39	52.9	16.0	159	FC4-37	32.8	16.0
121	FC3-40	57.5	10.0	160	FC4-38	33.9	19.0
122	FC3-41	30.4	16.0	161	FC4-39	45.8	20.0
				162	FC4-40	38.3	23.0
				163	FC4-41	130.0	39.0

表 3-2　凤凰山铜矿相思树地段东段地电化学勘查元素分析结果

顺序号	野外号	分析结果		顺序号	野外号	分析结果	
		铜 Cu(m)/ng	金 Au(m)/ng			铜 Cu(m)/ng	金 Au(m)/ng
165	FD1-1	9.7	21	181	FD2-1	21.9	26.0
166	FD1-2	22.8	18.0	182	FD2-2	462.0	3660.0
167	FD1-3	92.5	1188.0	183	FD2-3	192.0	493.0
168	FD1-4	20.7	13.0	184	FD2-4	28.8	68.0
169	FD1-5	11.9	11.0	185	FD2-5	21.4	23.0
170	FD1-6	95.2	10.0	186	FD2-6	15.3	22.0
171	FD1-7	23.2	11.0	187	FD2-7	37.4	83.0
172	FD1-8	33.1	17.0	188	FD2-8	19.5	16.0
173	FD1-9	55.5	15.0	189	FD2-9	16.8	10.0
174	FD1-10	49.0	16.0	190	FD2-10	15.7	16.0
175	FD1-11	20.9	10.0	191	FD2-11	32.3	20.0
176	FD1-12	77.4	54.0	192	FD2-12	13.3	18.0
177	FD1-13	16.2	10.0	193	FD2-13	19.5	14.0
178	FD1-14	18.6	14.0	194	FD2-14	10.8	17.0
179	FD1-15	57.4	13.0	195	FD2-15	13.4	10.0
180	FD1-16	34.4	22.0	196	FD2-16	21.6	19.0

续上表：

顺序号	野外号	分析结果		顺序号	野外号	分析结果	
		铜 Cu(m)/ng	金 Au(m)/ng			铜 Cu(m)/ng	金 Au(m)/ng
				214	FD4-1	22.5	12.0
198	FD3-1	19.4	13.0	215	FD4-2	38.8	10.0
199	FD3-2	21.0	20.0	216	FD4-3	39.9	17.0
200	FD3-3	17.3	18.0	217	FD4-4	516.0	67.0
201	FD3-4	17.6	18.0	218	FD4-5	13.3	14.0
202	FD3-5	23.0	11.0	219	FD4-6	18.7	10.0
203	FD3-6	13.3	13.0	220	FD4-7	62.6	23.0
204	FD3-7	21.8	17.0	221	FD4-8	19.0	17.0

205	FD3-8	15.9	19.0	222	FD4-9	23.6	10.0
206	FD3-9	34.5	23.0	223	FD4-10	23.8	15.0
207	FD3-10	19.9	14.0	224	FD4-11	21.6	14.0
208	FD3-11	28.4	12.0	225	FD4-12	14.9	13.0
209	FD3-12	16.9	13.0	226	FD4-13	24.5	12.0
210	FD3-13	17.3	14.0	227	FD4-14	25.0	22.0
211	FD3-14	29.5	27.0	228	FD4-15	34.6	10.0
212	FD3-15	52.6	13.0	229	FD4-16	23.2	19.0
213	FD3-16	27.8	11.0				

由于提取电极性质的不同，提取出来的金属元素物质量的表示及其单位也不一样。对于液态电极，常用μg/ml 或 ng/ml 来表示每毫升提取液里提取到的金属元素质量数（其单位是μg或ng）；而固态电极常用(m)/μg或(m)/ng来表示每克固态电极中提取的元素质量数（其单位是μg或ng）。

从上述可以看出，电极提取量是一个相对值，在评价提取电极的优劣时，不能用电极提取量的大小作为标准，而是以及其他电化学异常衬度、清晰度及异常与矿体位置的吻合度等来衡量。

3.3.2　地电化学背景值和异常下限的确定

地电化学背景值及异常下限的确定对于圈定异常和解释评价异常都具有重要的意义。因此，在进行地电化学资料的综合处理时，首先要确定其背景值及异常下限。

3.3.2.1　确定背景值和异常下限的原则

通常确定背景值及异常下限时应遵循以下的一些原则：

（1）　尽量选取远离已知矿化地区的样品；

（2）　按工区不同地质单元统计，如按不同时代的地层或者不同的岩性等进行统计；

（3）　每个单元的样品数大约在 50-100 个或者更多；

（4）如有少量特高含量的样品应予以剔除，以免计算结果偏高。最好事先粗略地计算出平均值 X 和标准离差 S_x，把大于（$X+3S_x$）值的数据去掉。

3.3.2.2　确定背景值和异常下限的方法

背景值及异常下限的确定方法有多种，其中常用的有长剖面法、图解法（包括直方图解法、概率格纸图解法）和计算法等[78, 79]，而后两种都属于整理统计方法。在这里我们采用的是计算法，该法是建立在元素在地质体中一般呈正态分布或对数正态分布的理论基础之上的。它是通过计算来确定背景值及异常下限，也是以均值或众数值来代替背景值。其具体步骤是：

一、 背景值的计算

（1） 当元素呈正态分布时，利用计算算术平均值的方法，公式如下：

$$C_0 = \bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$\bar{x}$——算术平均值；　　x_i——各样品某元素的含量；

n——样品的总数；　　C_0——某元素的背景值

(2) 当元素呈对数正态分布时，利用计算几何平均值的方法，公式如下：

$$C_0 = \overline{x_g} = \sqrt[n]{x_1 x_2 x_3 \cdots x_n}$$

$\bar{x}_g$——几何平均值；　　x_i——各样品某元素的含量；

n——样品的总数；　　C_0——某元素的背景值

当样品数量较多时，计算几何平均值可用对数方法，以含量的对数值运算，其结果再查真数，即为背景值。

$$\lg \overline{x_g} = \frac{\lg x_1 + \lg x_2 + \cdots + \lg x_n}{n} = \frac{\sum_1^n \lg x_i}{n}$$

若样品数量较多时，也可将样品按其含量变化进行适当分组，以各含量组的组中值（x_i）与各组样品数（频数 f_i）来计算平均值。

$$C_0 = \bar{x} = \frac{\sum f_i x_i}{\sum f_i}$$

而以含量的对数计算几何平均值时，则查以下的真数值即得几何平均值：

$$\lg \overline{x_i} = \frac{\sum f_i \lg x_i}{\sum f_i}$$

二、 均方差的计算

异常下限是通过计算均方差来得到的，均方差的计算公式如下：

（1）样品分组时的均方差计算公式：

$$\sigma=\sqrt{\frac{\sum f_i x_i^2-\frac{\left(\sum f_i x_i\right)^2}{n}}{n-1}}$$

（2）样品以含量对数计算的均方差公式：

$$\lg\sigma=\sqrt{\frac{\sum f_i(\lg x_i)^2-\frac{\left(\sum f_i \lg x_i\right)^2}{n}}{n-1}}$$

再以 lgσ 查其真数值即为均方差。

三、 异常下限的计算

异常下限的计算一般以背景值加若干均方差作为背景上限即：

$C = C_0 + K\sigma$　　K=2~3

K 为经验常数，一般情况下取 2。

（1） 当元素呈正态分布时，其异常下限为：

$C = \bar{x} + (2\sim3)\sigma$

（2） 当元素呈对数正态分布时，其异常下限为 lgC 的真数值：

$\lg C = \lg \bar{x}_g + (2\sim3)\lg\sigma$

3.3.2.3 测区铜金的地电化学背景值和异常下限

根据以上的元素背景值和异常下限的确定方法和步骤，测区的地电化学勘查铜金提取统计计算结果见表 3-2。

表 3-2　相思树地段地电化学勘查铜金提取统计计算结果表

地段	元素	背景值	标准离差	异常下限
西段	铜	48.18	2.68	56.22
东段		27.21	2.05	33.36
综合		40.94	2.626	48.82
西段	金	19.73	1.73	24.92
东段		20.26	3.37	30.57
综合		20.29	2.305	27.21

3．4　地电提取测量法的应用条件

（1）拟寻找的隐伏矿床必须有离子分散晕和气体分散晕存在；

（2）人工电场的电力线必须达到离子分散晕所分布的范围。因此，接地电阻过大或过小的地区不利于地电化学测量；

（3）地表金属污染严重的地区，如金属冶炼厂和老矿山周围以及城市周围的污水浇灌区，不利于地电化学测量；

（4）盐碱化严重地区和新鲜运积物覆盖较厚地区不利于地电化学测量。

第四章　凤凰山铜矿测区地球电化学异常特征研究

4.1　凤凰山铜矿地质特征

凤凰山矿田位于铜陵市东南约35公里的凤凰山新屋里盆地，盆地中心为燕山晚期的新屋里岩体，主要由花岗闪长岩和石英二长闪长岩组成。盆地四周主要为二叠至三叠系的碳酸盐岩地层。围绕岩体沿接触带产出有凤凰山、宝山陶、铁山头、仙人冲、清水塘和江家冲多个铜矿床，其中只有凤凰山铜矿床达到了中型规模。

凤凰山铜矿床位于长江中下游成矿带中铜陵矿集区的一个中型铜矿床。长江中下游成矿带是我国主要的铜铁金多金属成矿带，它以超壳深断裂与三大构造单元相邻，其南东界以阳新-常州深断裂与扬子克拉通相邻、其北西界分别以襄樊-广济深断裂与秦岭-大别山造山带及中朝克拉通相邻。成矿带中央为长江深断裂带。长江断裂带是一条经过长期发展最后成型于中生代的具有深断裂性质的破碎带，它在中生代的构造格局的发展过程中起着重要的作用，并对沿江一带的岩浆活动及相关的成矿作用起着明显的控制作用。铜陵矿集区正好靠近扬子克拉通、大别山造山带和华北地块相拼接的三叉点。因此，这种特殊的构造环境应该是最为有利于的成矿地段[80-87]。

4.1.1　凤凰山铜矿床测区地质概述

凤凰山铜矿区相思树矿段（以下简称凤凰山铜矿测区）位于凤凰山新屋里岩体西南接触带，凤凰山复式向斜轴部，属于安徽省铜陵县相思村范围内，地理座标是：

东经：118° 00′ 45″ ～118° 01′ 52″

北纬：30° 51′ 02″ ～30° 52′ 13″

面积约2平方公里。矿区为中山地貌，最高海拔388.9m，最低海拔70m。施工区段内山间洼地为稻田和旱土，旱土里种植丹皮、花生、大豆、红薯等作物，山坡荒地生长灌木、竹木及茅草。A层土壤为灰色、灰黑色砂质土壤及腐殖质土壤，厚度在山间盆地中大于50cm，在山坡旱土一般在20～40cm,B层为浅黄色至黄褐色粉砂质亚粘土。B层土壤分两类，一类是花岗闪长岩、石英二长岩及煌斑岩风化而成，另一类是碳酸盐建造风化后的残积层或溶洞堆积。第一类B层土壤发育，第二类B层土壤不甚发育，有时在陡峻山坡上的碳酸盐建造分布地段，B层土壤

缺失，A 层腐殖层直接盖于基岩之上。

相思树地段铜矿点 1959 年 321 地质队作过检查，1974 年安徽省区域地质调查队进行 1/20 万区调时也进行过检查，阐述矿化点三处：①处矿化点位于接触带，矿化体长 3.5m 宽 0.3m，为一铁帽，②、③矿化体位于岩体中，长 10.5m，宽 1.8m，其②号矿化体含铜 1.29%。评价结论是：矿化范围虽小，但品位高、成矿条件好，可做适当的深部工作。“九五”期间，中南大学地质研究所铜陵找矿科研队与凤凰山铜矿合作，进行相思树地段找矿勘查和深部评价研究，并在相思树地段取得重要进展，发现新的富铜矿体。

4.1.2　凤凰山铜矿构造特征

凤凰山地区构造格架为一复式向斜，它由凤凰山向斜、仙人冲背斜和元宝山向斜等次一级褶皱构造组成，褶皱轴向为北东向，是印支期北东向 S 形隔挡式褶皱带的组成部分。由于新屋里岩体侵位产生侧向挤压，使向斜两翼地层扭曲变陡，局部发生倒转。岩体的北东侧，复式向斜紧密，为扇形褶皱或箱形褶皱；岩体南西侧，复式向斜较开阔，为歪斜褶皱。复式向斜东南翼陡倾或倒转，北西翼正常，轴面倾向南东。

在新屋里岩体南西侧发育规模较大的北西向断裂构造破碎带，其延长约 10km，宽 200m 到 300m，走向 320° 到 340°，倾角较陡，它由数条断层组成，它错断了层间滑动构造，是凤凰山复式向斜伴生的张性横断层，构成新屋里岩体西南侵入边界，也是主要的控矿构造，控制了凤凰山铜矿主要矿体的分布。如图 4-1 所示。

相思树—清水塘东西向断褶构造带是新屋里岩体西南侧接触带相思树地段最强烈的变形构造。在相思树村南侧发育中型东西向宽缓向斜构造，褶皱枢纽产状 86° ∠27°，两翼产状大致对称，并有逆掩断层伴生，断层产状 195° ∠86，局部为 5° ∠86°。相思树地段东段金、铜地电化学异常大致呈东西向展布可能与该断褶构造有关，如图 4-2 所示。

新屋里花岗闪长岩侵入以后发生两种构造作用，其一是形成韧性剪切带，表现在金牛洞—相思树—清水塘一带广泛发育产状为 30° ∠68° 的流劈理、置换岩层层理，并被后期一组劈理切割，其中流劈理的产状与接触带产状一致。其二是在清水塘—相思树一带形成宽达 1.5km 的接触交代变质带，使南陵湖组碳酸盐建造变质成大理岩和矽卡岩化大理岩，在花岗闪长岩内接触带形成绢云母化、钾长石化、硅化和矽卡岩化花岗闪长岩，同时还有黄铁矿化和黄铜矿化及矿体形成

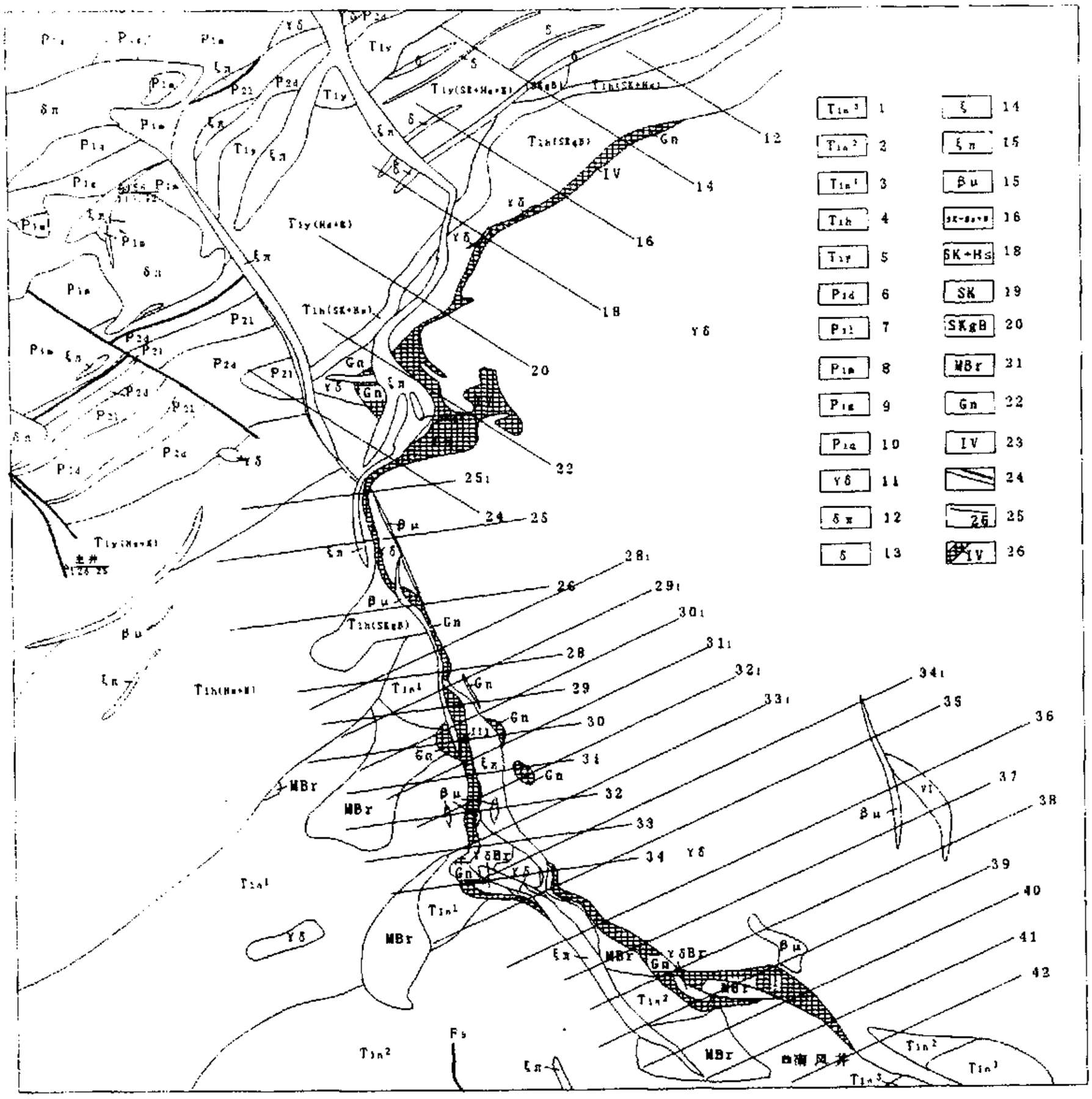


图 4-1　凤凰山铜矿床地表地质图

1~10-地层（略）；11-花岗闪长岩；12-闪长斑岩；13-闪长岩，14-正长岩；15-正长斑岩；16-辉绿玢岩；17-矽卡岩、角岩、大理岩成夹层或互层；18-矽卡岩、角岩成夹层或互层；19-矽卡岩；20-条带状石榴石矽卡岩；21-角砾状大理岩；22-铁帽；23-矿体编号；24-断层；25-勘探线编号；26-矿体

4.1.3　凤凰山铜矿地层特征

凤凰铜矿田出露地层主要为中三叠统月山组、东马鞍山组、下三叠统南陵湖组、龙山组、殷坑组、上二叠统大隆组、龙潭组、下二叠统狐峰组和栖霞组，其次为上石炭统船山组、中石炭统黄龙组、上泥盆统五通统以及志留系地层，而且主要控矿地层是下三叠统南陵湖组，凤凰山铜矿主要铜矿体都产于该地层与岩体

接触带上。

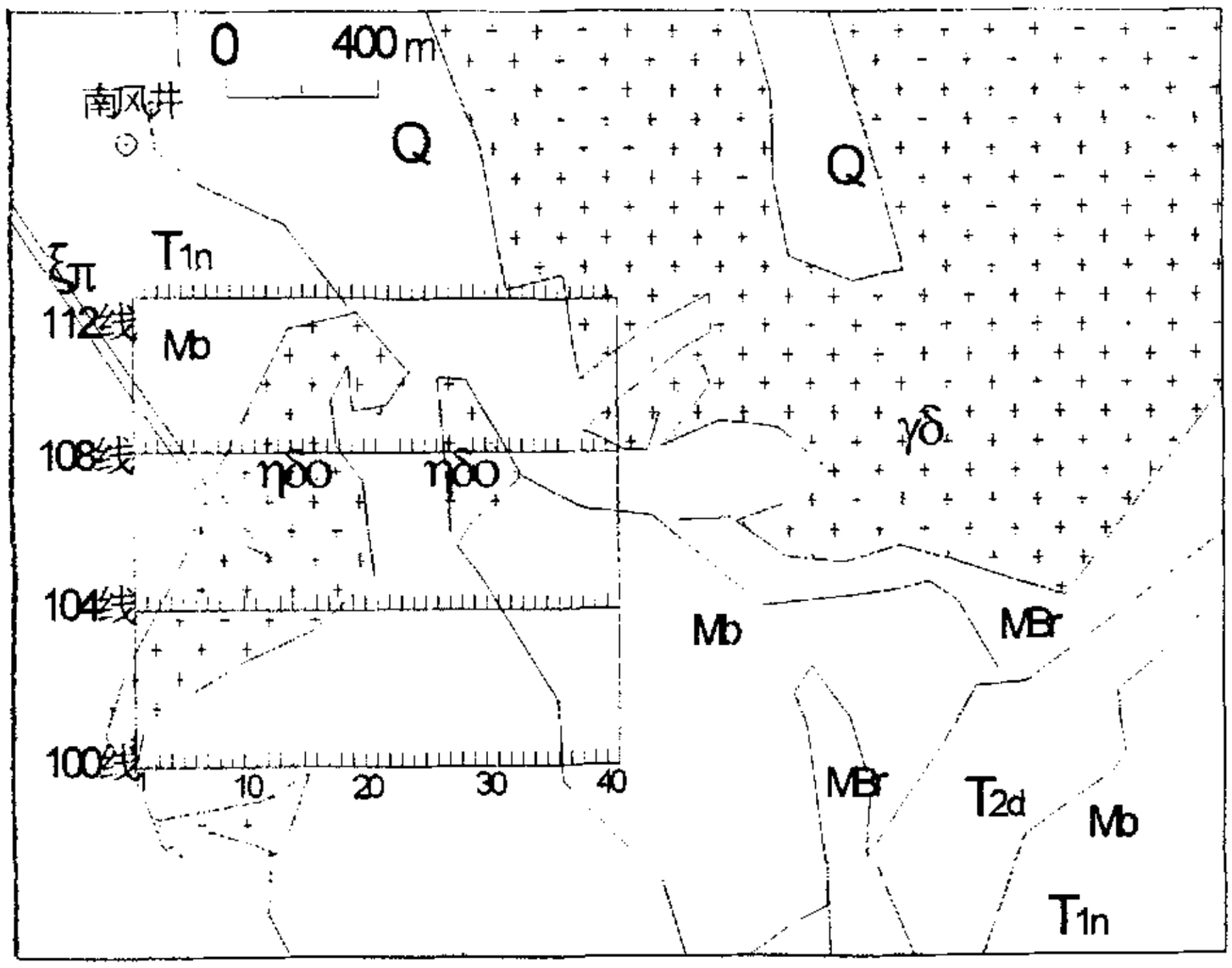


图 4-2　凤凰山铜矿测区地质略图

Mb—大理岩；ηδo—石英二长闪长岩；ξπ—燕山期正长斑岩；Q— 第四系残坡积物、冲积物；MBr—角砾状大理岩；Mb—大理岩；γδ—燕山期花岗闪长岩；T1n—三叠系下统南陵湖组灰岩、白云岩质灰岩；T2d—三叠系下统鞍山白云岩质、白云岩质灰岩

南陵湖组分三部分，上部、中部和下部。上部为灰色中厚层灰岩、灰岩质砾岩、生物碎屑灰岩及白云质灰岩：中部为浅灰色、暗灰色薄层灰岩、局部夹砾状灰岩；下部为浅灰色薄层灰岩、局部夹钙质页岩和白云质灰岩。

该组地层组成凤凰山复式向斜核部，也是相思树地段主要控矿地层，常常蚀变为大理岩、矽卡岩化大理岩和矽卡岩，该组地层厚度在 450m 以上。

4.1.4　凤凰山铜矿岩体特征

凤凰山矿田主要侵入岩体是新屋里岩体，出露面积达 10 km^2，它侵入于凤凰山复式向斜的核部，相思树地段就位于新屋里岩体西南部接触带内。按照矿物成份和结构构造特点，新屋里岩体主要岩石类型有花岗闪长岩、花岗闪长斑岩和石英二长闪长斑岩。

花岗闪长岩主要矿物成份是：斜长石（53%）、钾长石（14.5%）、石英（20%）、角闪石（10%）、黑云母（2%）。

花岗闪长斑岩斑晶主要为斜长石，次为石英、钾长石、角闪石、黑云母，基质为微粒斜长石、钾长石和石英。斜长石主要以斑晶形式产出，占 53%，钾长石大多数呈基质产出，含量占 16%，石英主要为细粒基质，含量为 22.5%，角闪石为长条状斑晶，含量 6.5%，黑云母呈片状斑晶产出，含量为 2%左右。

石英二长闪长斑岩斑晶主要由斜长石、钾长石、石英组成，也有少量角闪石和黑云母，基质由细粒斜长石、钾长石和石英组成。斜长石主要以斑晶形式产出，也是基质的主要成份，含量达 58.5%，钾长石大多数为基质，含量约占 16.5%，钾化很强的岩石中钾长石含量达 51%以上，石英大多数为充填于长石之间的基质，含量为 12%，角闪石常为长条状斑晶，含量占 10%，黑云母为片状斑晶，含量为 3%。

野外调查结果表明，岩体自里向外大致可分为两带，内部主要为花岗闪长岩，靠近边部的主要为石英二长闪长岩。在凤凰山铜矿区北部出露花岗闪长斑岩小岩体，南部可见石英二长闪长斑岩小岩体和舌状体。

新屋里岩体的花岗闪长岩的 SiO_2 平均含量为 64.5%，属于硅酸过饱和岩石，石英二长闪长斑岩的 SiO_2 平均含量为 58.5%，属于硅酸弱过饱和岩石，根据岩石的里特曼指数 σ（花岗闪长岩为 2.045，石英二长闪长岩为 2.89）判断，新屋里岩体为典型的钙碱系列岩石。本岩体岩石氧化度（$Fe_2O_3/(Fe_2O_3+FeO)$）为 0.446 到 0.725，平均为 0.653，因此，岩体侵位较浅，定位环境为相对氧化环境。从稀土元素、微量元素地球化学特征和锶同位素地球化学特征（Sr^{87}/Sr^{86}=0.7070-0.7098）分析，新屋里岩体的岩浆来源于地壳深部，具有壳幔混合源的特征。岩体中主要成矿元素铜、铅、锌、钼含量均高于维氏值的几倍至几十倍，尤其是石英二长闪长斑岩中铜含量高于维氏值的上百倍，表明凤凰山铜矿的成矿作用与新屋里岩浆作用有密切的关系。

4.1.5　凤凰山铜矿矿体地质特征

凤凰山铜矿床矿体主要产于产于新屋里岩体与三叠系灰岩间的接触带上，为矽卡岩型，受接触带和断裂构造的复合控制。接触带产于 T_{1h} 和 T_{1n} 与新屋里岩体间，靠近接触带的岩体的岩性主要为斑状石英二长闪长岩，并且发生了较强的钾化和黄铁矿化。其主矿体由Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ四个矿体组成，其次有Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ三个次要矿体。矿体呈似板状、不规则透镜状产出，延长 100-986m，平均厚度 3.7-35.2m，平均延深（斜深）128-296m，矿体走向 NW，倾向 SW 或变化不定，

倾角一般较陡。其余矿体产于大理岩、矽卡岩及石英闪长岩内，部分矿体产于角砾状花岗闪长岩中，矿体规模较小，长度小 200m，平均厚度小于 12m，斜深在 156m 以下。呈囊状、透镜状、脉状产出，走向 NW，倾向南西，倾角 80°～90°。南部接触带与围岩层理斜交，上部（-150 米以上）向岩体方向倾，矿体厚，下部（-150 中段以下）向围岩方向倾，矿体变薄，并在-600 米逐渐趋于尖灭。

4.1.6　斑岩型矿体的主要特征

斑岩型铜矿体是由中南大学铜陵找矿科研队首次发现的，其主要特征为[88]：

(1)　矿体形态、产状：凤凰山铜矿南区工程揭露的斑岩型矿化体受控于石英二长闪长斑岩体，其形态复杂，分布规模很大，但品位变化也很大。其中具有工业意义的富矿体受断裂构造的控制，是由二次成矿富集而成的。这种矿体的主要形态是脉状和透镜状，多组构造交汇部位膨大富化。根据控矿构造的研究推测，空间上矿体具有成群成带分布的特点，呈现侧幕式排列。从工程控制情况可知，斑岩型矿体总体走向北西，向南东方向陡倾，倾角在 60° 左右。由于多组构造的控制，矿体局部的产状会有变化。

(2)　矿石特征：斑岩型矿体的矿石类型复杂，包括细脉浸染状黄铜矿石，密集细脉状黄铜、斑铜矿石，不规则小脉状浸染状黄铜、斑铜矿石，块状黄铜矿石，块状黄铜、斑铜矿石，团包状、脉状黄铜、斑铜矿石和角砾状矿石。上述矿石特征中，第一种类型(细脉浸染状黄铜矿)代表斑岩型矿化的第一成矿阶段的特征，以矿化均匀、分布广、品位低、受微裂隙控制为特点。其它类型代表第二成矿阶段，是斑岩成矿作用进一步富集的过程，受构造控制更为明显，具有矿化不均匀、品位高、受断裂构造控制等特点。

(3)　主要矿物组成：斑岩型矿石的主要特征之一是矿体中的磁铁矿、赤铁矿、菱铁矿等铁的氧化物和碳酸盐矿物少见。矿化岩体中磁黄铁矿的经常出现则反映了一种相对还原的条件。成矿过程中还有一部分铁则以绿泥石的方式固定下来。在斑岩型矿体及附近围岩(斑岩、矽卡岩、绿泥石化破碎带)中常见有辉钼矿。呈星点状分布，与铜的富集无明显的相关性或分带性关系。辉钼矿分布的空间范围和物理化学条件范围较铜矿化更广。斑岩型矿化的主要有用矿物是黄铜矿和斑铜矿，其它金属矿物还有黄铁矿、磁黄铁矿、辉钼矿等，主要脉石矿物为方解石、石英、石榴石、透辉石、硅灰石、绢云母、绿泥石、绿帘石等。矿石化验结果表明，有用元素除了铜外，还伴生金、银等，金银品位与铜品位具有正消长的关系，即铜品位高则伴生金银的含量也高。

新发现的斑岩型矿体的特征与以往探明的主要矿体(如 1 号、2 号、3 号、新 5

号等)对比如表 4-1。

表 4-1　斑岩型矿床(体)与矽卡岩型矿体(1、2、3 号)及新 5 号矿体对比

矿体 / 矿化特征	斑岩型矿体	新 5 号矿体	1、2、3 号矿体
主要含矿围岩	石英二长闪长斑岩	爆破角砾岩(胶结物中含岩浆物质)	花岗闪长岩外接触带矽卡岩和矽卡岩化大理岩
矿体形态产状	脉状、透镜状。受岩体内裂隙带控制，在断裂交汇部矿体有膨大现象	筒柱状、囊状。受爆破角砾岩筒形态控制	似板状、透镜状。受岩体接触带形态控制
围岩蚀变	绢云母化、硅化、褪色化、内矽卡岩化、绿泥石化	碳酸盐化、绢云母化	矽卡岩化、碳酸盐化、硅化、绢云母化
典型金属矿物组合及矿物共生(伴生)关系	黄铁矿—磁黄铁矿—黄铜矿—班铜矿组合。 黄铜矿与斑铜矿紧密伴生，见斑铜矿交代黄铜矿，两者亦呈共结关系或交替出现	磁铁矿—赤铁矿—菱铁矿—黄铁矿—黄铜矿—斑铜矿组合。磁铁矿(赤铁矿)多呈角砾被蚀变岩体和菱铁矿胶结。赤铁矿常沿磁铁矿边缘交代呈似反应边。黄铜矿、斑铜矿呈细脉、网脉状分布于角砾和胶结物中。斑铜矿常交代黄铜矿。	磁铁矿—赤铁矿—黄铁矿—黄铁矿—黄铜矿—斑铜矿组合。矿物生成顺序：磁铁矿→赤铁矿→菱铁矿→黄铁矿→黄铜矿→斑铜矿

4.1.7　凤凰山铜矿矿石特征

根据矿石的成分和结构构造，凤凰山铜矿床的矿石可分为七种自然类型，即块状含铜磁铁矿、赤铁矿型矿石；块状含铜菱铁矿型矿石；角砾状矿石；浸染状含铜石榴子石矽卡岩型矿石；块状含铜黄铁矿型矿石；浸染状含铜花岗闪长岩（石英二长闪长岩）型矿石；含铜大理岩型矿石。其中以含铜磁（赤）铁矿型和含铜菱铁矿型为最主要的矿石类型。

含铜磁（赤）铁矿型矿石中主要矿物为磁铁矿（含量 21~36%）、赤铁矿（含

量 1.5~4.0%）、黄铜矿（含量 0.4~7%）、黄铁矿（含量 10~17%），次要矿物有斑铜矿、辉铜矿、闪锌矿、磁黄铁矿、辉铋矿、硫铋铜矿、辉钴矿、银金矿、蓝铜矿、辉钼矿、铜兰等，脉石矿物有方解石、菱铁矿、铁白云石、石英、玉髓、绿泥石、绿帘石、角闪石、磷灰石、绢云母、榍石、重晶石、斜长石、钾长石、石榴子石等。

含铜菱铁矿型矿石中主要矿物为黄铜矿（含量 3.1~3.4%）、斑铜矿（含量 1.4~1.8%）、黄铁矿（含量 2~17%）、菱铁矿（含量 32~62%）。次要矿物有磁铁矿、赤铁矿、辉铜矿、黝铜矿、毒砂、方铅矿、闪锌矿、辉钴矿、磁黄铁矿、白铁矿、锐钛矿、自然银、自然铜、自然铋、辉铋矿等，脉石矿物有方解石、铁白云石、石英、斜长石、菱镁铁矿、玉髓、白云母、石榴子石等。矿石化验结果表明，有用元素除了铜外，还伴生金、银、钼、铅、锌等，金银品位与铜品位具有正消长的关系，即铜品位高则伴生金银的含量也高。

凤凰山铜矿床矿石结构构造特征比较简单。主要构造特征有：浸染状构造，块状构造，脉状构造，团包状构造，角砾状构造。主要结构特征有：它形粒状结构、网脉状结构、文象结构和交代溶蚀结构等。

4.1.8　成矿期次及矿化蚀变特征

经各种地质资料的综合分析表明，凤凰山铜矿床的形成主要经历了两个成矿作用过程：

(1) 矽卡岩成矿过程：形成与花岗闪长岩有关的接触交代型铜矿，包括含铜磁铁矿型、菱铁矿型、细脉型、角砾岩型等铜矿石类型。代表矿段位于药园山。根据其成矿作用的地质和物理化学条件变化还可分为矽卡岩期和石英硫化物期。

(2) 斑岩成矿过程：形成与石英二长闪长斑岩有关的细脉浸染状、浸染状、团包状和块状黄铜矿、斑铜矿体，伴生金、银矿。成矿作用包括一个成矿期即石英硫化物期，并可细分三个主要阶段：①细脉浸染状黄铜矿化阶段（早期硫化物阶段）；②黄铜矿、斑铜矿富集阶段（硫化物富集阶段）；③碳酸盐阶段。其中以前两个阶段为主要成矿阶段。该成矿作用过程以南区为代表。上述两个成矿过程叠加改造则形成新的矿化类型，如新五号矿体。

凤凰山铜矿床具有矽卡岩化蚀变特征和斑岩型矿床蚀变特征。矿区有明显的钾长石、黑云母化→石英、绢云母化、黄铁矿→泥化→青磐岩化蚀变分带现象。具体的蚀变类型较多，主要有大理岩化、矽卡岩化、硅化、钾长石化、黑云母化和石英-绢云母化、黄铁矿化、泥化、绿泥石化、绿帘石化和碳酸岩化等。

4.2　凤凰山铜矿测区地球电化学异常特征

4.2.1　测区西段铜金元素地球电化学异常特征

测内区，我们选择了 100 号、104 号、108 号和 112 号四个剖面进行了地电化学方法的找矿研究。这四个剖面的地表覆盖物厚度均在 0.5~10m 之间。测量剖面长 800 米，并按 20 米的等距来布置剖面测点[89]。供电电流采用当地农村网电力，供电时间 20 小时。各测线实施恒电压提取的仪器输出电压、电流变化情况如表 4-2：

表 4-2　凤凰山铜矿测区恒压提取输出直流电压、电流值

测线号	初始电压	初始电流	正常工作	
			电压	电流
100 线	237V	6.6A	200~250V	2.6~6A
104 线	201V	7.0A	155~210V	5~6A
108 线东部 27~41 号测点	234V	5.7A	209~280V	3.7~5A
108 线西部 1~26 号测点	200V	7.3A	204~242V	3.9~6A
112 线	225V	5.4A	180~250V	1.7~2A

数据来源于自测（测试时间：2002 年 9 月）

表 4-2 表明，测区恒压提取时，输出电流值较大，而电流变化相对平缓。同时，天气情况对输出电流影响很大，如在 108 线野外作业时，因遭遇雨天造成输出电流过大而改为分段实施。最后，经取样测试分析得到了 100 号、104 号、108 号、112 号四个剖面 162 个样点的 160 个有效提取铜样品，另外 2 个样点因地表原因而无法布置。

1.　100 号剖面地电化学异常特征

凤凰山铜矿测区西段 100 线剖面从第 1 号测点到 17 号测点为旱土，第 17 号测点到 24 号测点为竹林，从 24 号测点到 36 号测点为旱土，从 36 号测点到 41 号测点为陡峭的山坡，荆棘丛生。在地质上，从第 1 号测点到 16 号测点为石英二长闪长岩，以 16 号测点到 41 号测点之间为下三叠统南陵湖组灰岩、大理岩，其中第 21 号测点和 37 号测点到 38 号测点之间有正长斑岩脉穿插。

该剖面铜的地电化学异常位于 12~15 点、24~26 点及 30~33 点之间，异常强

度为 56.4~98.2Cu(m)/μg，其铜异常是背景值的 1~2 倍。该剖面具有铜的地电化学异常强度较弱，其强度最大值 32 号点，仅为 98.2 Cu(m)/μg，异常规模较小，其异常宽度只有 60 米等特点.

该剖面金的地电化学异常位于 31~32 点之间上，异常强度为 36~39 Au(m)/ng，其金异常是背景值（19.73 Au(m)/ng）的 2 倍。该剖面具有金的地电化学异常强度不明显，其强度最大值 32 号点，为 39 Au(m)/ng，但各异常点异常规模较大，其异常宽度有 40 米等特点（见图 4-3）。

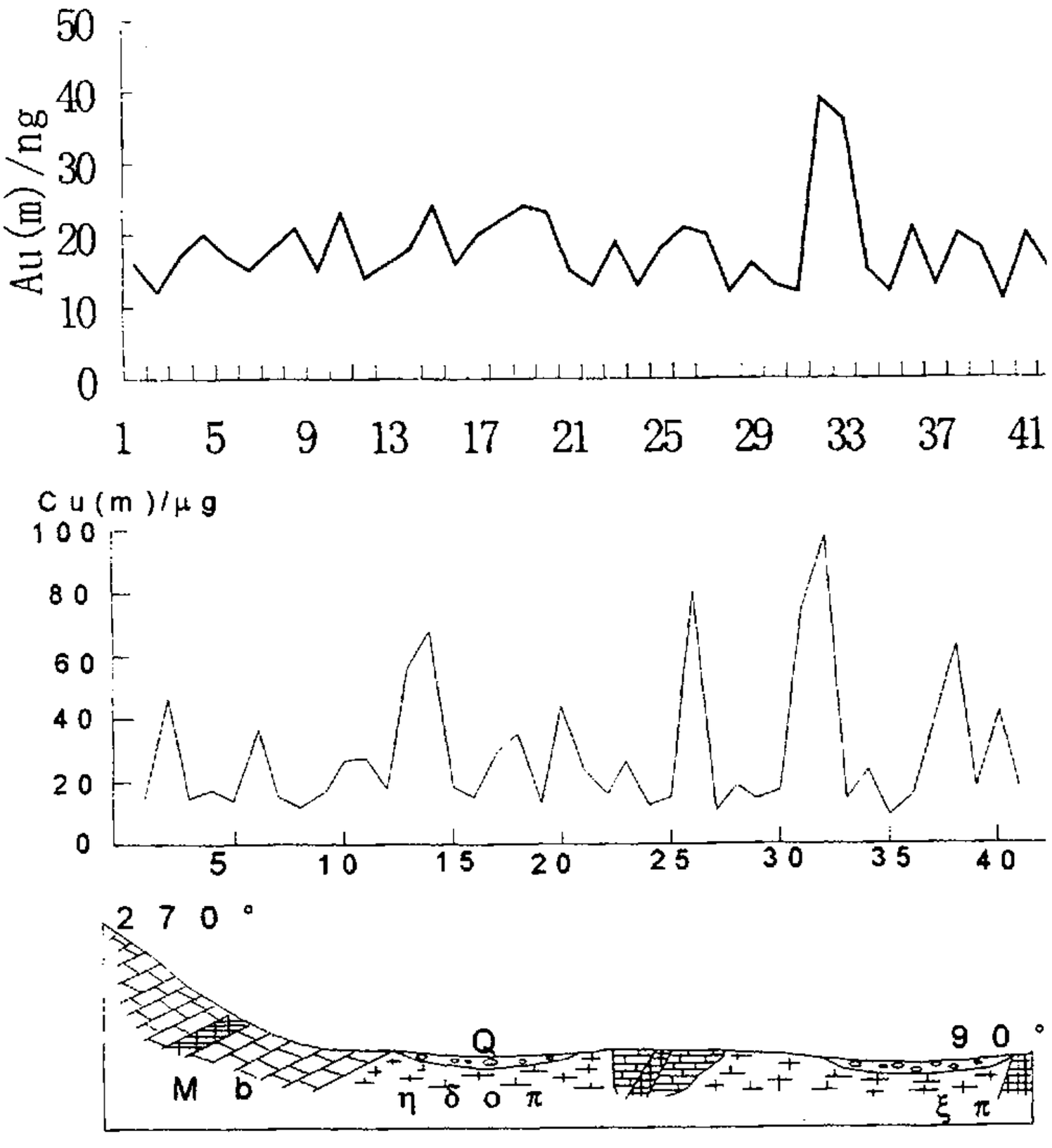


图 4-3　测区 100 线地电化学异常剖面图

Mb—大理岩；　　ηδoπ—石英二长闪长斑岩；

ξπ—燕山期正长斑岩；　Q— 第四系残坡积物、冲积物

2.　104 号剖面地电化学异常特征

104 线从 1 号测点到 3 号测点之间为陡峻的山坎，荆棘丛生，从 3 号测点到 31 号测点为山间盆地和旱土，其中第 22 号测点和第 23 号测点是农家住房前水

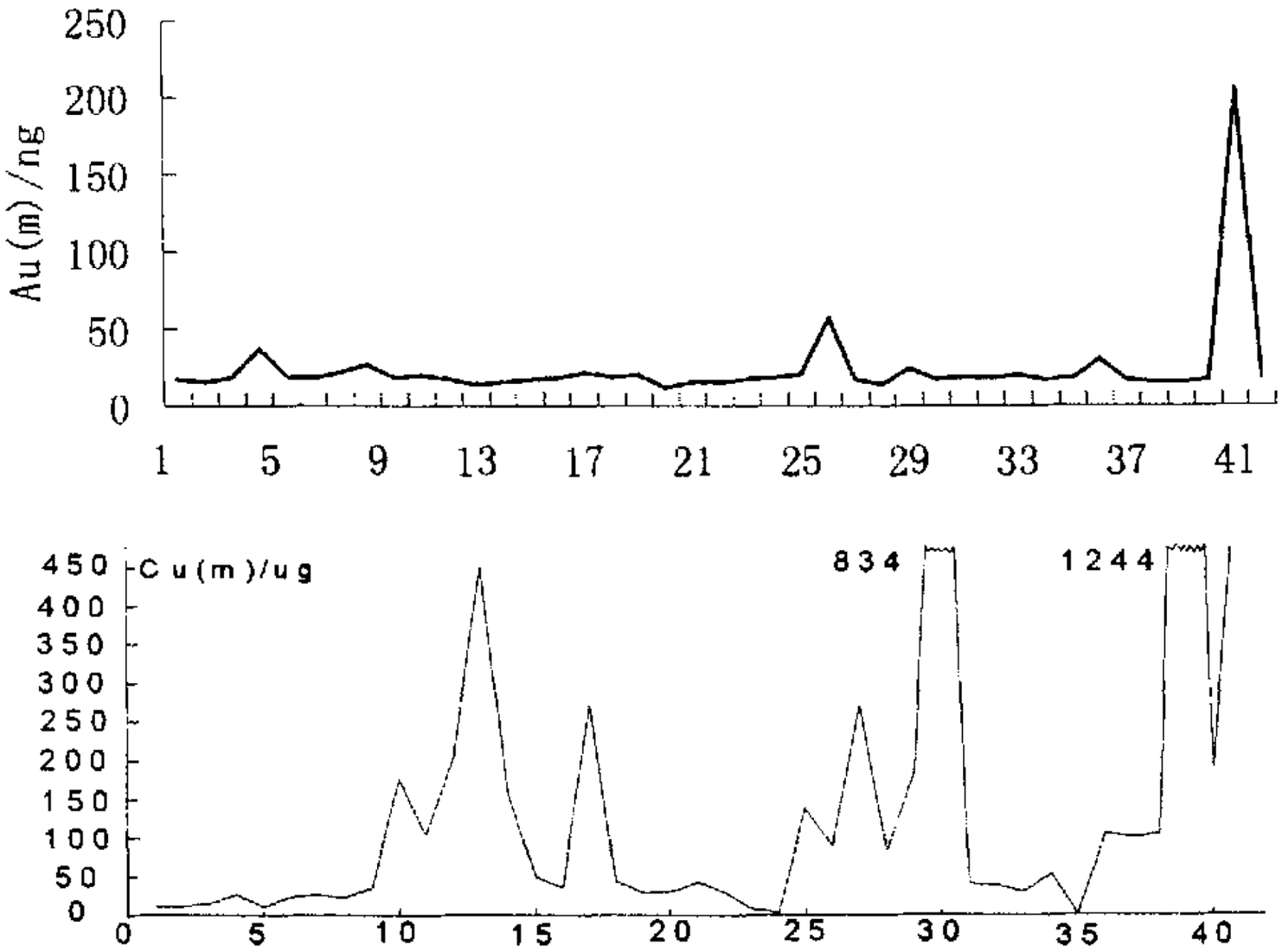


图 4-4　测区 104 线地电化学异常剖面图

Mb—大理岩；　　ηδοπ—石英二长闪长斑岩；

ξπ—燕山期正长斑岩；　Q— 第四系残坡积物、冲积物

泥浇注场地无法施工而缺失，从第 31 号测点到 41 号测点之间为陡坡荆棘丛生之地。在地质上从第 1 号测点到 3 号测点之间为下三叠统南陵湖组灰岩和大理岩，从 3 号测点到 19 号测点之间为石英二长闪长岩，19 号测点西侧见正长斑岩脉穿插，从 19 号测点到 31 号测点之间为浮土覆盖，推测基岩为石英二长闪长岩和南陵湖组灰岩、大理岩，31 号测点到 32 号测点之间为正长斑岩脉，从 32 号到 41 测点之间为下三叠统南陵湖组大理岩。

该剖面铜的地电化学异常位于 9~15 点、16~18 点、24~31 点及 35~41 点之间，极值点位于 39 号点，铜提取量达 1244 Cu(m)/μg，是背景值的 26 倍。该剖面具有铜的地电化学异常强度大，其最大值为 1244 Cu(m)/μg，异常规模大，其异常宽度有 120 米等特点。

该剖面金的地电化学异常位于 4、8、25、35、40 五个点上，异常强度为 27~206 Au(m)/ng，其金异常是背景值（19.73 Au(m)/ng）的 1~10 倍。该剖面具有金的地电化学异常强度较大，其强度最大值 40 号点，为 206 Au(m)/ng，但各异常点不连续且异常规模较小，其异常宽度只有 20 米等特点（见图 4-4）。

3. 108 号剖面地电化学异常特征

108 线从 1 号测点 7 号测点为荆棘丛生的陡峻山坡，7 号测点到 26 号测点之间为旱土庄稼覆盖，从 26 号测点到 31 号测点为低缓山丘和树林，从 31 号测点到 41 号测点稻田旱土。地质上从 1 号测点到 7 号测点之间为下三叠统南陵湖组灰岩、大理岩，从 7 号测点东侧到 18 号测点之间为石英二长闪长岩，其中从 12 号测点东侧到 14 号测点东侧见有大理岩捕虏体，从 18 号测点到 26 号测点为浮土，推测为石英二长闪长岩侵入体，从 26 号测点到 31 号测点之间为石英二长闪长岩，从 31 号测点到 41 号测点之间为浮土覆盖，推测基岩为石英二长闪长岩，矽卡岩和花岗闪长岩。

该剖面铜的地电化学异常位于 5~6 点、9~14 点、16~21 点、23~24 点、28~30 点、32~33 点及 35~38 点之间，异常强度为 80.4~1322 Cu(m)/μg，其铜异常是背景值的 2~28 倍。该剖面铜的地电化学异常强度更大，最大值为 1322 Cu(m)/μg，位于 12 号点；异常规模更大，其异常宽度约有 140 米等特点。而 25 号点铜异常位置经验证正是埋深 200~400 米的铜矿赋存部位。

该剖面金的地电化学异常位于 4、7、23、26 四个点上，异常强度为 25~404 Au(m)/ng，其金异常是背景值（19.73 Au(m)/ng）的 1~20 倍。该剖面具有金的地电化学异常强度相差悬殊，其强度最大值 4 号点，为 404 Au(m)/ng，最小值为 25 Au(m)/ng。而且各异常点不连续且异常规模较小，其异常宽度只有 20 米等特点（见图 4-5）。

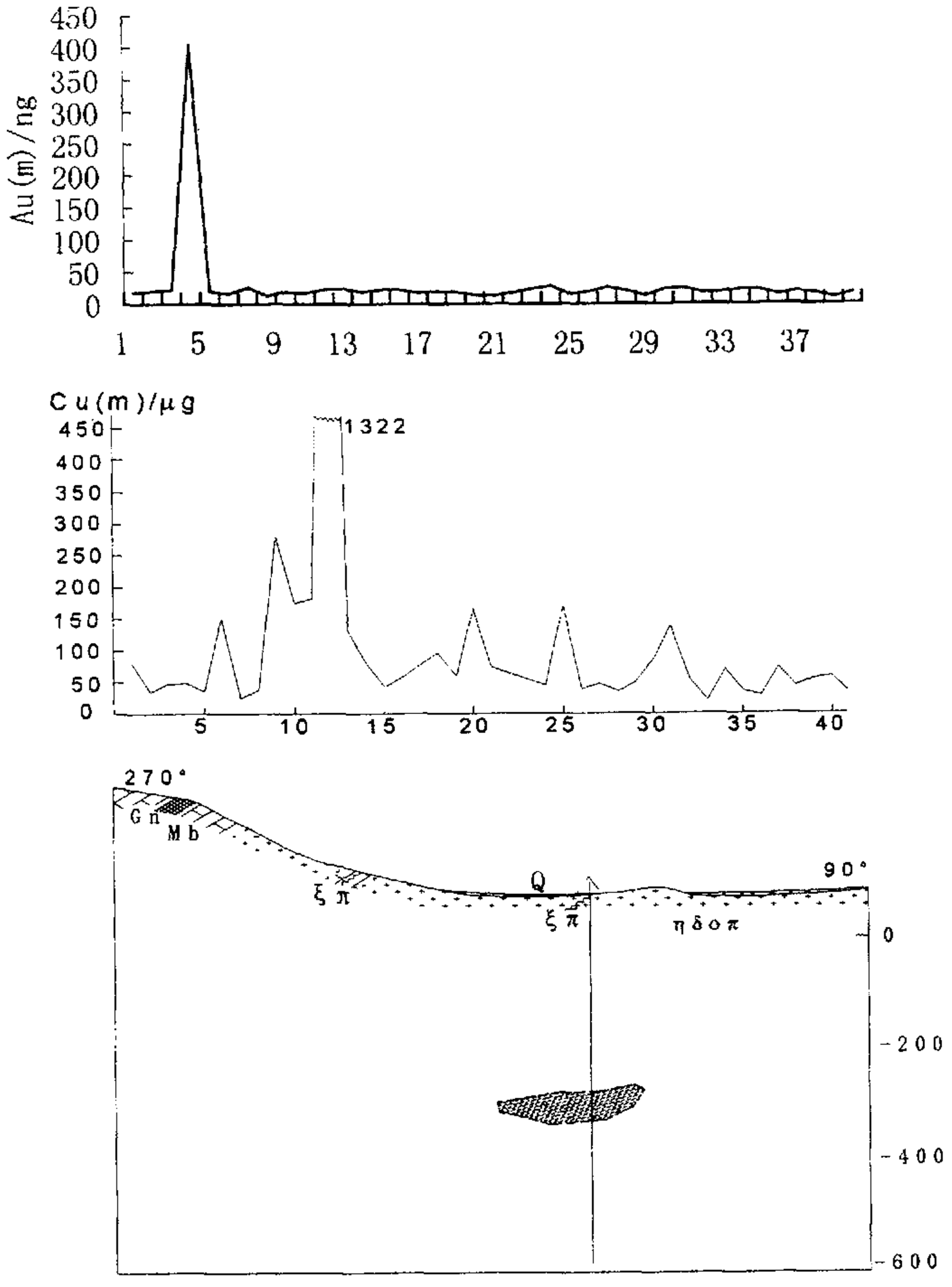


图 4-5　测区 108 线地电化学异常剖面图

Mb—大理岩；ηδοπ—石英二长闪长斑岩；Gn—铁帽

ξπ—燕山期正长斑岩；　Q—　第四系残坡积物、冲积物

4. 112 号剖面地电化学异常特征

112 线从 1 号测点到 18 号测点之间为陡峻山坡，荆棘丛生，从 18 号测点到 41 号测点为山间盆地稻田地和低缓山坡的和庄稼旱地。地质上从 1 号测点到 18 号测点东侧为南陵湖组大理岩，从 18 号测点到 37 号测点之间为浮土覆盖，

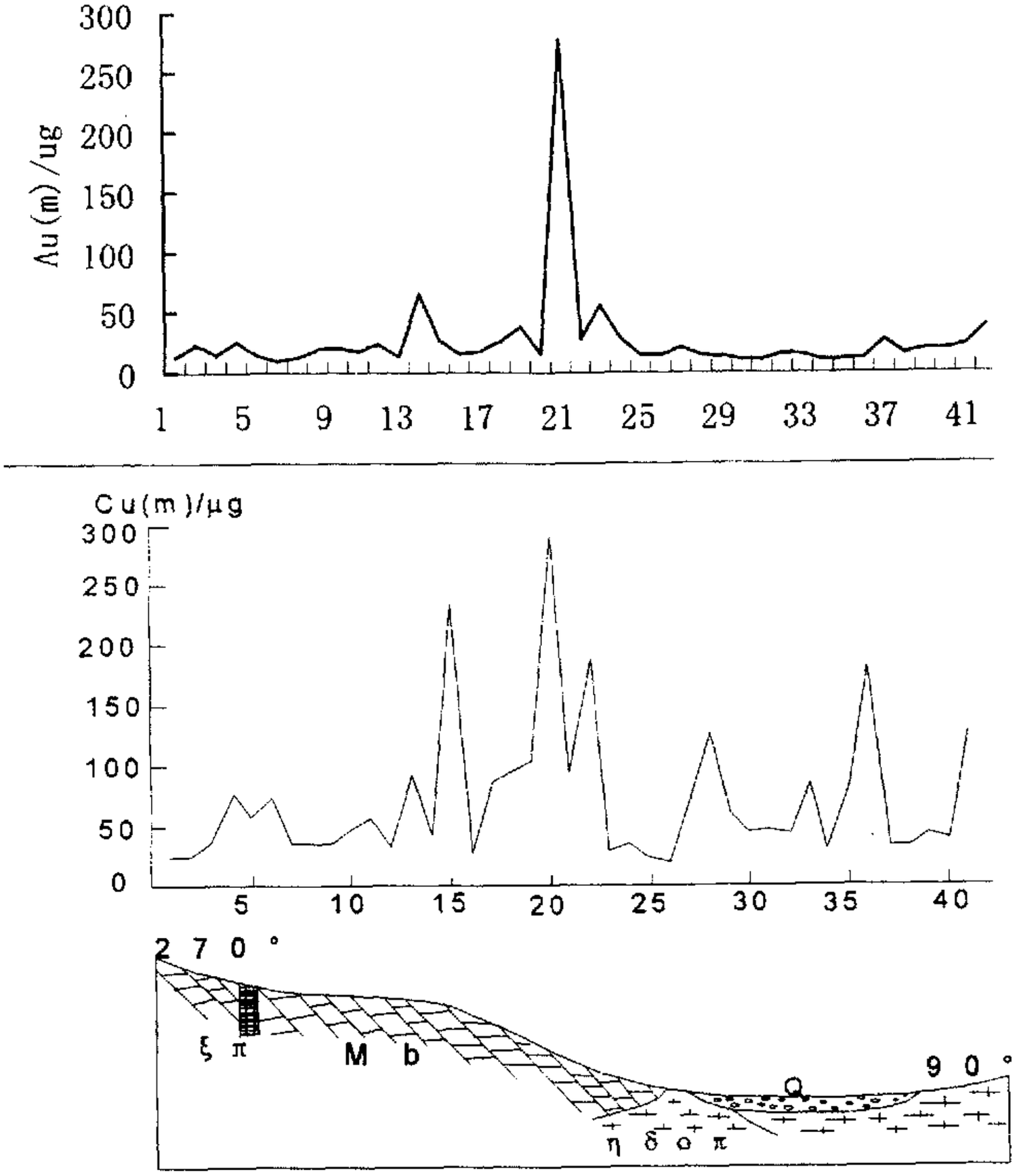


图 4-6　测区 112 线地电化学异常剖面图

Mb—大理岩；ηδοπ—石英二长闪长斑岩；

ξπ—燕山期正长斑岩；　Q— 第四系残坡积物、冲积物

推测其西部基岩为大理岩，东部基岩为花岗闪长岩，从 37 号测点到 41 号测点为花岗闪长岩侵入体。

该剖面铜的地电化学异常位于 3~7 点、12~15 点、17~23 点、26~30 点、32~34 点及 34~37 点之间，极值点位于 20 号点，强度值为 292 Cu(m)/μg，是背

景值的 6 倍。该剖面铜的地电化学异常强度较弱，但异常规模大，其异常宽度为 140 米;

该剖面金的地电化学异常位于 4、13、17~18、20~23 以及 41 点之间，异常强度为 26~278 Au(m)/ng，其金异常是背景值（19.73 Au(m)/ng）的 1~13 倍。该剖面具有金的地电化学异常强度较大，其强度最大值 20 号点，为 278 Au(m)/ng，而且各异常点连续且异常规模大，其异常宽度达 60 米等特点（见图 4-6）。

4.2.2　测区东段铜金元素地球电化学异常特征

1、120 号剖面地电化学异常特征

凤凰山铜矿测区东段 120 线位于相思树村东部山坡上，山坡较陡，大部分为

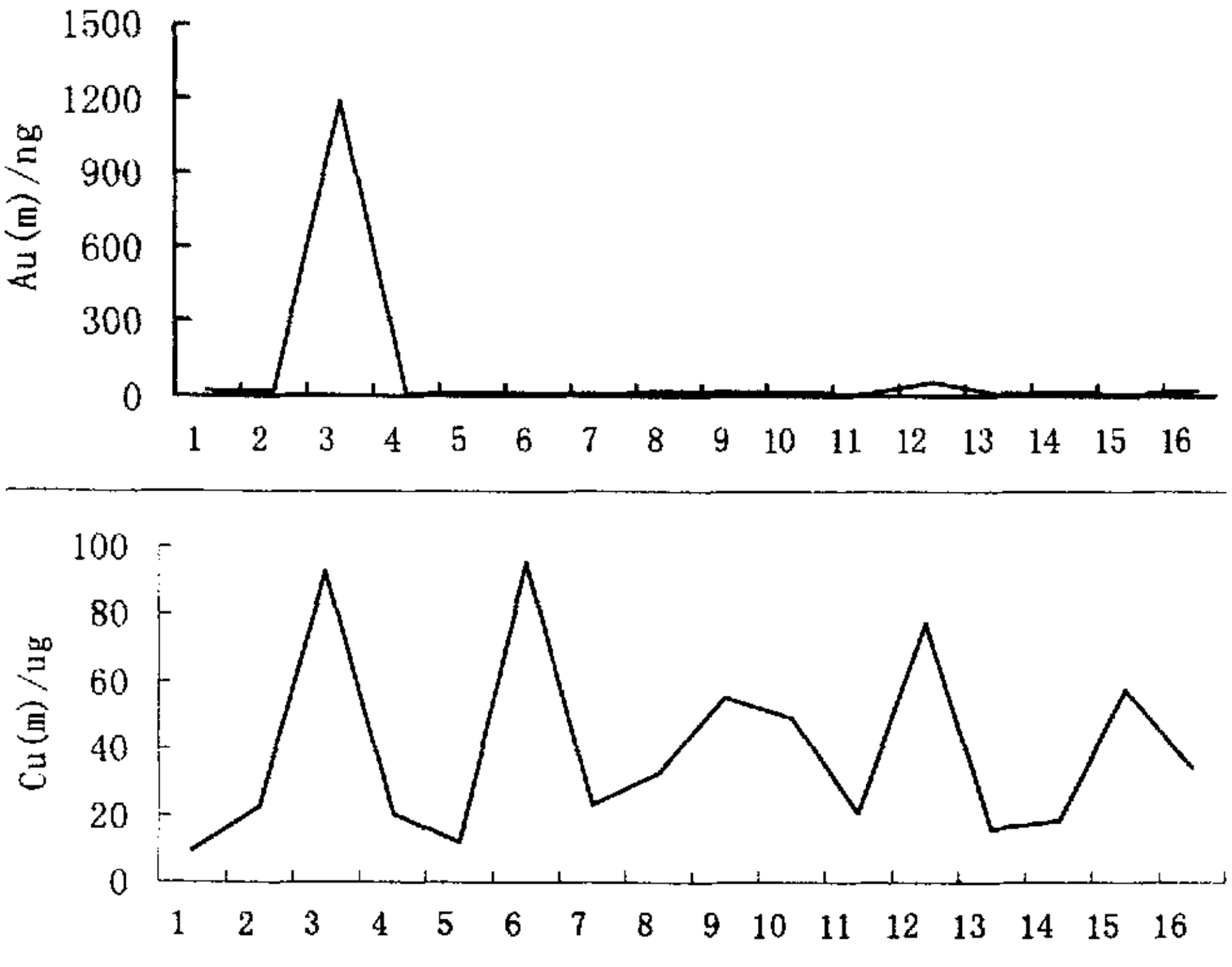


图 4-7　测区 120 线地电化学异常剖面图

荆棘丛生的山地，少部分为种植丹皮的旱土。在地质上，120 线从 1 号测点到 12 测点之间为南陵湖组大理岩，12 测点到 16 号测点之间为南陵湖组角砾状大理岩。

该剖面铜的地电化学异常位于 3 点、6 点、9~10 点、12 点、15~16 点之间，极值点位于 6 号点，强度值为 95.2 Au(m)/ng，是背景值的 3 倍。该剖面铜的地电化学异常强度较大，但异常规模一般，其异常宽度为 40 米.

该剖面金的地电化学异常位于 3 点、12 点，异常强度为 54~1188 Au(m)/ng，

其金异常是背景值（20.46 Au(m)/ng）的 2~59 倍。该剖面具有金的地电化学异常强度较大，其强度最大值位于 3 号点，为 1188 Au(m)/ng，但各异常点少而且不连续，异常规模小，其异常宽度只有 20 米（见图 4-7）。

2．140 号剖面地电化学异常特征

凤凰山铜矿测区东段 140 线位于相思树村东部山坡上，山坡较陡，大部分为荆棘丛生的山地，少部分为种植丹皮的旱土。在地质上，140 线 1、2 号测点为南陵湖组角砾状大理岩，3 号测点及其两侧为花岗闪长岩，4 号测点南侧到 12 号测点为南陵湖组大理岩，12 号测点到 13 号测点北侧为南陵湖组角砾状大理岩，14 号测点及其南北两侧为花岗质角砾岩，15 号测点南侧往北到 16 号测点为花岗闪长岩。

该剖面铜的地电化学异常位于 2~3 点以及 7 点之间，极值点位于 2 号点，强度值为 462 Cu(m)/μg，是背景值的 17 倍。该剖面铜的地电化学异常强度较强，而且异常规模较大，其异常宽度为 40 米。

该剖面金的地电化学异常位于 2~4 点以及 7 点之间，异常强度为 68~3660 Au(m)/ng，其金异常是背景值（19.73 Au(m)/ng）的 2~122 倍。该剖面具有金的地电化学异常强度较大，其强度最大值位于 2 号点，为 3660 Au(m)/ng，而且各异常点较为连续，异常规模大，其异常宽度达 60 米等特点（见图 4-8）。

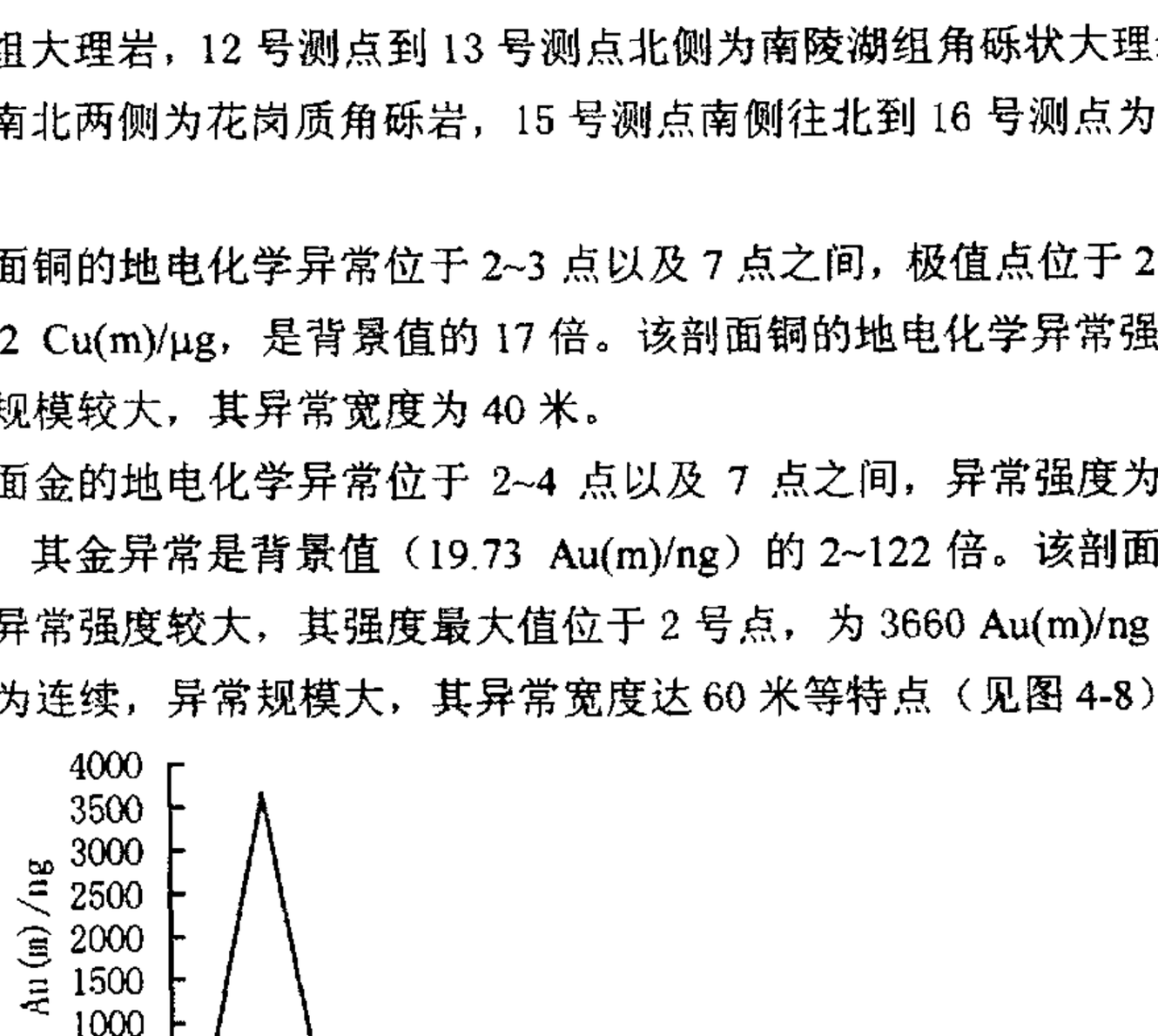


图 4 -8　测区 140 线地电化学异常剖面图

3. 160 号剖面地电化学异常特征

凤凰山铜矿测区东段 160 线位于相思树村东部山坡上，山坡较陡，大部分为荆棘丛生的山地，少部分为种植丹皮的旱土。在地质上，160 线 1 号测点到 9 号测点北侧为中三叠统东马鞍山组白云岩、白云质灰岩，从 10 号测点南侧往北到 14 号测点之间为下三叠统南陵湖组角砾状大理岩，14 号测点往北到 16 号测点为花岗闪长岩，在花岗闪长岩侵入体与南陵湖组角砾状大理岩之间的接触处见有厚度不大的矽卡岩。

该剖面铜的地电化学异常位于 9 号点及 15 号点上，极值点位于 15 号点，强度值为 52.6 Cu(m)/μg，是背景值的 2 倍。该剖面铜的地电化学异常强度弱，而且异常规模小，其异常宽度只有 20 米。

该剖面没有金地电化学异常，其金元素地电化学提取量均低于该段的金元素异常下限（29.79 Au(m)/ng）（见图 4-9）。

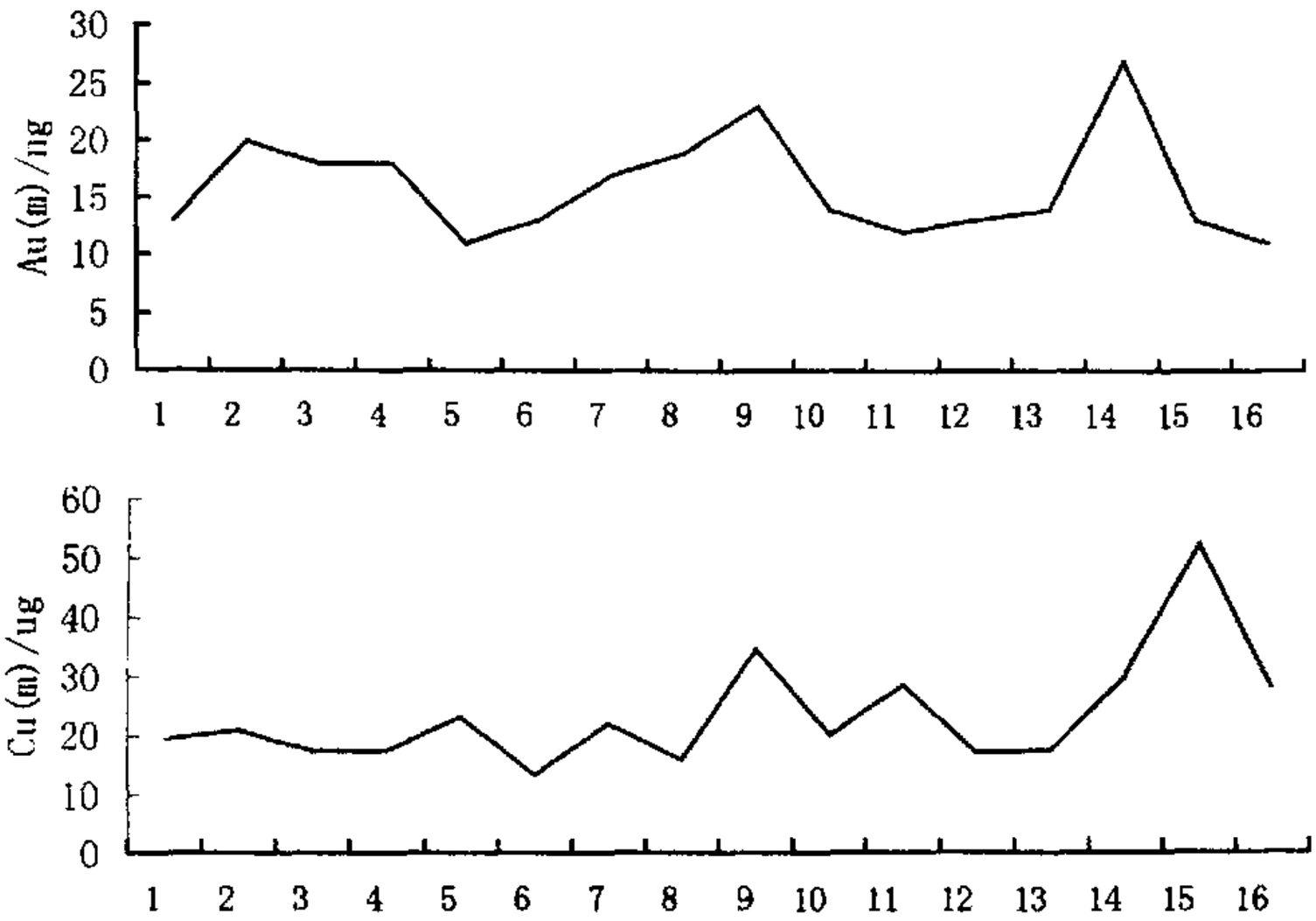


图 4-9　测区 160 线地电化学异常剖面图

4. 180 号剖面地电化学异常特征

凤凰山铜矿测区东段 180 线位于最东部山间洼地中，大部分为种植丹皮的旱土。在地质上，180 线从 1 号测点到 9 号测点北侧为中三叠统东马鞍山组白云岩，白云质灰岩，9 号测点北侧到 10 号测点南侧之间为南陵湖组大理岩，从 10 号测点南侧往北到 14 号测点北侧为南陵湖组角砾状大理岩，从 15 号测点南侧往北到

16 号测点之间为花岗闪长岩，在花岗闪长岩侵入体与南陵湖组角砾状大理岩之间见有厚度不大的矽卡岩。

该剖面铜的地电化学异常位于 2~4 点、7 点以及 15 点之间，极值点位于 4 号点，强度值为 516 Cu(m)/μg，是背景值的 19 倍。该剖面铜的地电化学异常强度强，而且异常规模大，其异常宽度为 60 米。

该剖面金的地电化学异常位于 4 号点，异常强度为 67 Au(m)/ng，其金异常是背景值（19.73 Au(m)/ng）的 2 倍。该剖面具有金的地电化学异常强度弱，而且异常点只有一个，异常规模小，其异常宽度只有 20 米（见图 4-10）。

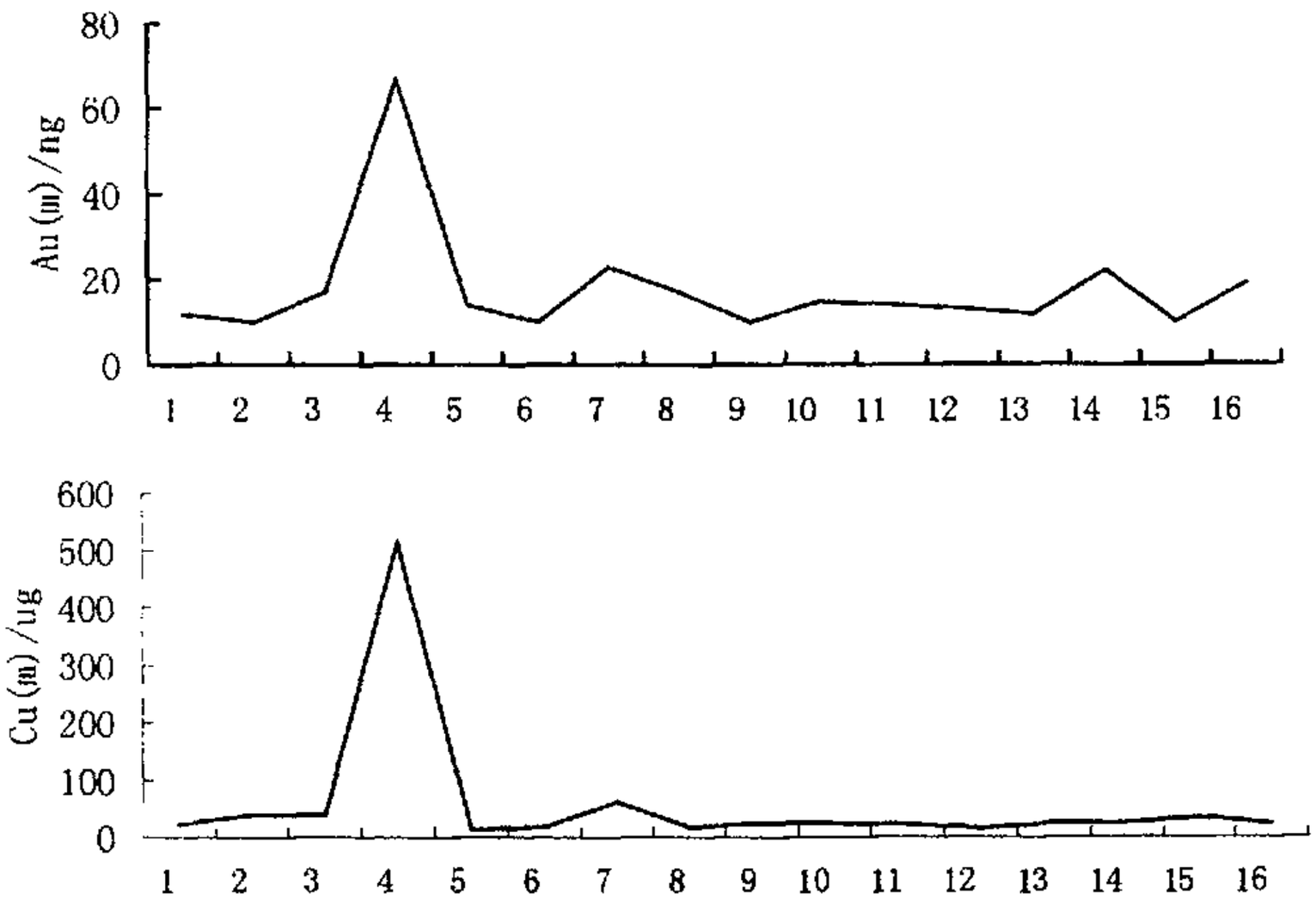


图 4-10　测区 180 线地电化学异常剖面图

4.3　地球电化学异常影响因素分析

由于金属矿体赋存在一定的地质体环境中，其各要素如地层岩性水系物理化学环境及构造等都会引起金属矿体周围地球化学环境发生变化，因此铜金的地球电化学异常常与地质体、地质构造、地表覆盖层、供电条件等诸多因素有关。

4.3.1　地质体因素

各种地质体的物理性质对于金属离子的迁移有着重要的影响，其化学性质对矿体与周围地质体的反应、电化学溶解有以及离子的沉淀等过程也有很大的影响。研究表明：金属矿体矿物成份复杂，硫化物多，具有良好的成晕条件和地质条件，其矿体电化学溶解能力强，易形成明显的离子晕，这是地电提取测量法取得良好效果的必备条件之一。当地质体具有很高的孔隙度、裂隙度、力学强度、化学动力以及渗透率时，在一定内应力作用下，有利于矿液的通过，使其与周围地质体发生交代置换反应，带出或带入不同的物质组分，若有岩浆活动，易发生同化作用、混染作用，从而改变岩浆分异作用的速度和进程，影响成矿元素的分异和富集。由于孔隙度好，易发生渗滤、扩散，改变成矿元素的含量和离子晕的形成与分布。本次研究发现：由于大理岩、石英二长闪长岩以及花岗闪长岩等各类地质体中的铜元素的含量各不相同，其平均含量分别为：19.4ppm, 106ppm, 348ppm, 从而导致了在石英二长闪长岩和花岗闪长岩上的铜元素地电化学异常比大理岩上的要强的多，而且异常宽度也要大的多。

4.3.2　构造因素

构造运动对成矿作用有重要的影响，它既是驱动成矿元素的主导因素，又是提供含矿流体和成矿离子运动的通道和堆积空间，褶皱和断层都是矿体赋存的有利部位，有利于成矿溶液运移和富集。如凤凰山铜矿矿体基本上发育在沿接触矽卡岩带的断层破碎带上，表现出明显的沿扩容性断裂充填的成矿特征。在上述构造发育而且地下水循环丰富的地区，往往形成的地电化学异常具有强度大，宽度大，异常清晰的特点。本次研究也表明了这一点：在凤凰山铜矿测区西段由于各种隐伏的断层破碎带矿化蚀变带以及节理、裂隙都比测区东段发育，因而测区西段的输出电流高而且电流变化平稳，所形成的地电化学异常强度强，异常宽度大；而测区东段输出电流小而且电流变化速度快，所形成的地电化学异常强度弱，异常宽度小。

4.3.3　地表覆盖层因素

地表覆盖层的各种性质如 PH 值、湿度、厚度、污染状况等对地电化学异常的形成和真假异常有着很大的影响。由于电极的离子接收器接收到的是可迁移的溶解性的成矿金属离子，当地表覆盖层的 PH 值偏大，呈碱性时，如盐碱地，在

电场作用下，电极附近会发生如下反应：

$$O_2+2H_2O+4e---4OH^-$$

加上土质中的大量 OH^-，使许多成矿金属离子与氢氧根离子的乘积大大超过该金属氢氧化物沉淀的浓度积而导致离子晕的破坏，使电极离子接收器无法接收吸附各种成矿金属离子，最终造成地电化学异常的减弱，甚至消失。

地表覆盖层的湿度对地电化学异常有很大的影响。地表覆盖层湿度大，有利于各测点与离子晕的沟通以及形成良好的离子迁移环境，生成的地电化学异常较为明显。本次研究中测区西段 104 线，108 线和 112 线的大部分测点位置均位于相思河流域的潮湿地带，而 100 线的大部分测点位于山坡、旱土，因而引起了 104 线，108 线和 112 线的地电化学异常明显要比 100 线强得多的现象。

从离子累积空间来看，地表覆盖厚度大的地区有利于吸附、贮存来自深部矿体的离子。并逐渐形成强大的离子晕。因为在漫长的地质年代里，从矿体中溶解出来的大量金属离子在地电场、浓度扩散、地下水循环以及地气流等的作用下，不断地垂直迁移扩散至地表覆盖层。覆盖层越厚，各种带电胶体、有机质、络合物、腐殖酸盐等能与金属离子相结合的介质越多，散逸、淋滤带走的金属离子越少，因而在同等条件下，所形成的地电化学异常愈明显。

地表覆盖层的污染状况以及迁移距离都会直接影响到地电化学异常的真伪判别。如金属冶炼厂，矿山的新老尾沙坝以及其它金属污染区都会对地电化学异常产生不利的因素。

4.3.4　供电因素

供电因素包括供电时间、供电电压、接地条件等。研究表明：随着供电时间的增加，电解出来的金属离子的浓度会逐渐增加，但供电时间一般达到 20 小时以后，金属离子浓度增加有限；同时，随电压升高，电流增大，金属离子的浓度逐步上升，但电压大于一定值时，金属离子含量增值变小。因此，仅靠增加电压来提高金属离子的含量是不合算的。接地条件的变化也会引起地电化学异常的变化。如接地电阻高，植被发育，土质类型变化较大的地域，往往会对地电提取测量法产生不利的影响。

4.4　隐伏铜金矿地电化学异常标志

通过对上述八个地电化学异常特征的综合分析，隐伏铜矿体的地电化学异常具有以下标志：1）地电化学铜异常呈多峰状形态出现；2）铜异常强度变化很大，

异常最小值为 56.4 Cu(m)/μg,而异常最大值却可以达到 1322 Cu(m)/μg，二者相差 23 倍；3）地电化学铜异常是垂直出现在铜矿体的上方，异常的宽度与矿体规模成正比；4）地电化学异常指示元素与隐伏铜矿体的成矿物质元素是一致的。

隐伏金矿体的地电化学异常具有以下标志：（1）受铜地电化学异常强度影响很大，呈正消长关系；（2）地电化学金元素异常呈多峰形态出现，异常强度变化大，且异常宽度小；（3）地电化学金元素异常由单点或很少几个点组成异常非地电化学金元素异常突出，但范围窄。

第五章　地球电化学异常区及综合评价

5.1　测区的地电化学异常区

5.1.1　测区西段的地电化学异常区

根据凤凰山铜矿测区西段100线、104线、108线和112线四条测线综合作出平面等值线图，研究结果表明，反映测区内存在三个明显的地电化学铜异常区和三个金异常区（见图5-1，5-2）。

1号铜金异常区　　呈近南北向分布，北端未封闭，南端封闭于测区100线处，异常带南北长大于650m，东西宽200m，面积大于130000 m^2。它由5个异常组成。异常带最高峰值为1322Cu（m）/μg，平均值为180.97Cu（m）/μg，最高富集系数为32.29，平均富集系数为4.42。金异常位于铜异常带西侧，为一个弧立的点异常，其值为404Au（m）/ng。该地电化学铜异常位于石英二长闪长岩与下三叠统南陵湖组大理岩西接触带以及内接触带的大理岩捕虏体内，异常规模大，浓集明显。结合地质、地球物理和构造地球化学等因素情况综合分析，该异常带地段成矿条件十分有利，是凤凰山铜矿测区寻找隐伏铜矿的有利靶区之一。

2号铜金异常区　　呈近南北向分布，南端狭长，且封闭于测区100线以南70m处，南北长大于600m，东西宽60m到120m，面积大于54000m^2，铜元素异常最高峰值为834Cu（m）/μg，平均值为165Cu（m）/μg，最高富集系数为20.37，平均富集系数为4.03。金异常位于铜异常的西北侧，金元素异常最高峰值为278Au（m）/ng。该异常产于石英二长闪长岩体与花岗闪长岩及下三叠统南陵湖组大理岩的接触带内，在石英二长闪岩体与大理岩接触带上见正长斑岩脉穿插，是凤凰山铜矿测区寻找隐伏铜矿的有利靶区之一。该铜离子异常带出现的地段经钻孔和坑道验证，正是埋深269—446米的矽卡岩型和斑岩型铜矿赋存部位。

3号铜金异常区　呈南北向展布，该异常南部封闭于测区100线以北20m处，往北到测区112线尚未圈闭，南北长大于650m，东西宽最大达120m，面积约40000m^2，异常明显浓集于108线98点处。铜元素异常最高峰值为1244Cu（m）/μg，，异常平均值为236.91，最大富集系数为30.39平均富集系数为5.79；金异常由四个弧立的点异常组成，其值分别是206、30、29、27Au（m）/ng，铜金异常重合性较好。本异常带位于花岗闪长岩体与南陵湖组大理岩以及石英二长闪长岩体接触带附近，异常带内正长斑岩脉穿插频繁，矽卡岩发育，异常形态规整，

浓集显著，异常带浓度高，富集系数大，成矿条件有利。一小型铜矿正位于该铜异常带的东北部，是本区段勘探发现的富铜矿体。因此，推测该铜异常带所属地段也是凤凰山铜矿测区寻找隐伏铜矿的有利靶区之一。

5.1.2　测区东段的地电化学异常区

根据凤凰山铜矿测区东段 120 线、140 线、160 线以及 180 线四条测线综合作出平面等值线图，研究结果表明，东段测区内存在一个地电化学铜异常区和一个金异常区（见图 5-3，5-4）。

本异常带由两个弧立的铜异常呈东西向展布。其中西部异常由两个测点的分析值较高，铜的分析值分别是 192Cu（m）/μg,和 462Cu（m）/μg,，同时金异常也很清晰，金的分析值分别是 493 Au（m）/ng 和 3660 Au（m）/ng，金、铜异常重合性好，该两个测点位于花岗闪长岩小岩体内，其异常是由于花岗闪长岩小岩体侵入所致，东部异常只有一个弧立的铜、金点异常，其铜和金的分析值分别是 416 Cu（m）/μg 和 67 Au（m）/ng，它产于中三叠统东马鞍组白云岩、白云质灰岩与下三叠统南陵湖组大理岩的接触带上。由于本异常规模小，且为弧立的铜金点异常，因此，找矿的意义不大。

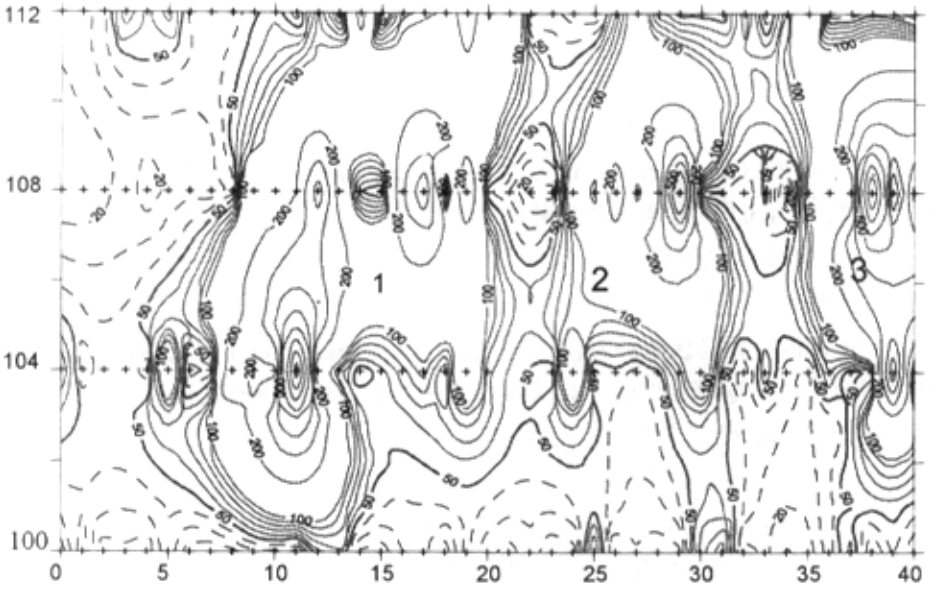


图 5-1　测区西段铜元素地电化学异常平面图

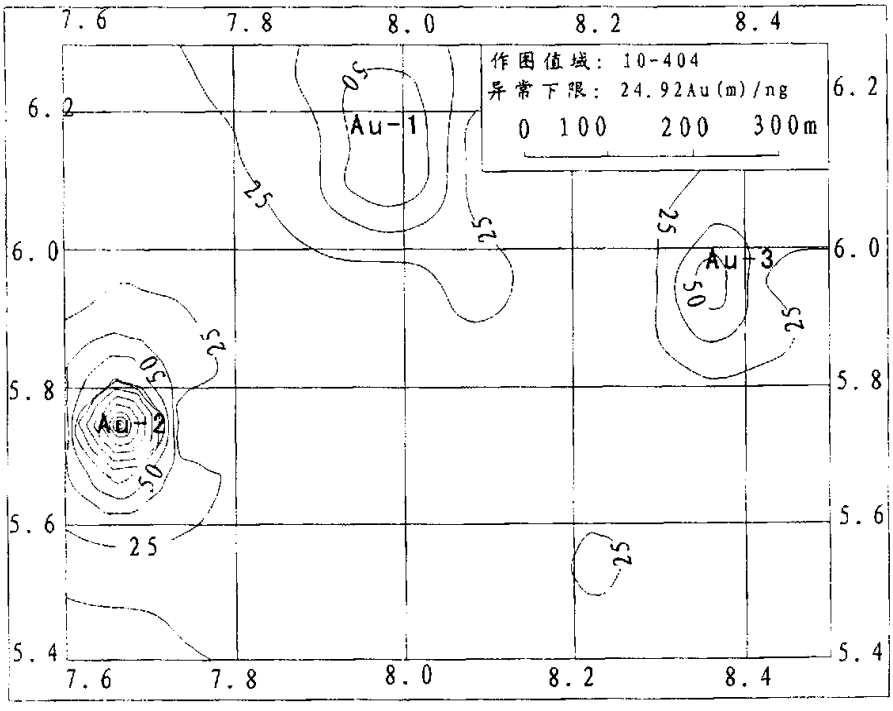


图 5-2　测区西段金元素地电化学异常平面图

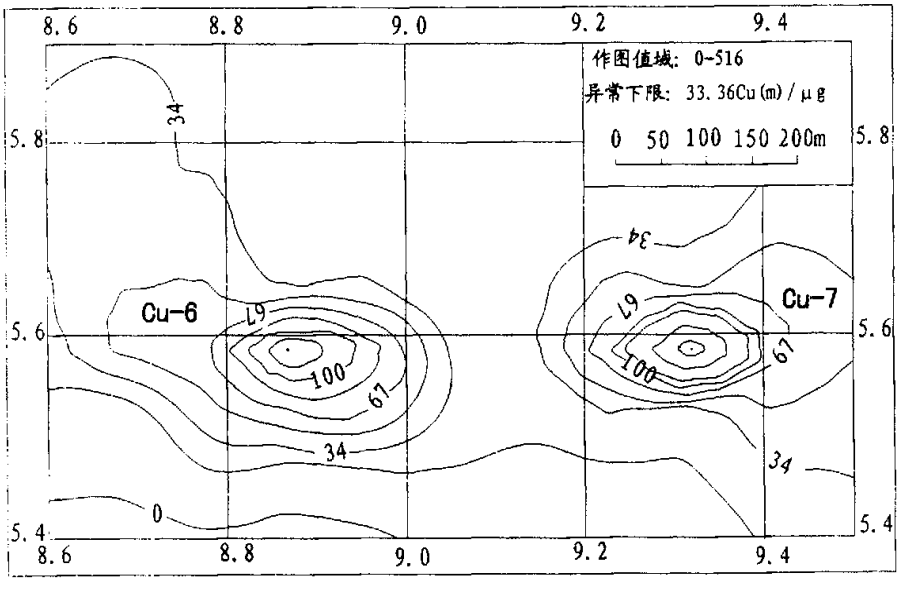


图 5-3　测区东段铜元素地电化学异常平面图

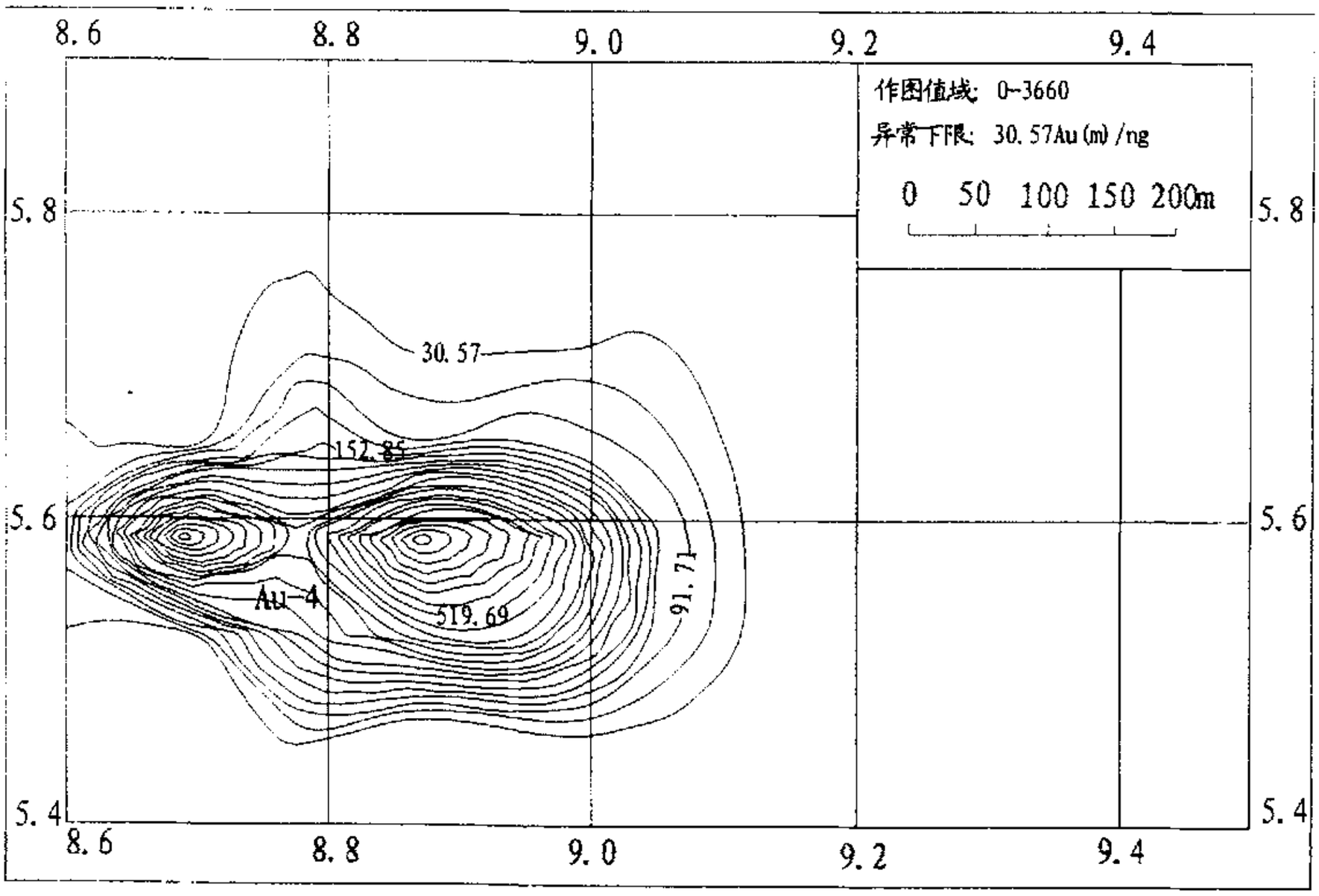


图 5-4　测区东段金元素地电化学异常平面图

5.2　地电化学找矿综合评价

5.2.1　测区地质条件分析

测区内出露的基岩单元主要有四种：一是新屋里岩体，二是三叠系下统南陵湖组，三是三叠系中统东马鞍山组，四是燕山晚期的基性和碱性岩脉。从这些基岩的成分、蚀变特征及变形构造等来分析，区内具有优越的成矿地质条件，并且地表显示有较好的找矿标志。主要表现在如下几个方面：

（1）在地表，测区北部 100/108～130/106 以北、相思河以东，主要为等粒结构和似斑状结构的花岗闪长岩，而在相思河以西、106 线以南主要为具斑状和似斑状结构的石英二长闪长斑岩。从 74/108 点的验证孔揭露的情况来看，在深部（-700m 以下）仍为等粒状花岗闪长岩。与花岗闪长岩相比，这种石英二长闪长斑岩是在更晚期更浅的环境中侵位的浅成岩体，是有利于成矿的；

（2）在地表，新屋里岩体的边部局部地段（110 线 56 号点南 10 米左右和 106 线 126 号点以北 50 米左右）还发育有一种特殊的角砾岩，其角砾的主要成分为

石英，特别是隐晶质的石英（碧玉和玉髓），并见有矽卡岩角砾、含铜磁铁矿角砾、含铜菱铁矿角砾、大理岩角砾等，胶结物主要为岩浆质和岩粉等，局部见有矿化。这种角砾岩在凤凰山矿床已经发现，已构成工业矿（凤凰山铜矿的新 5 号矿体）。从角砾岩的各项特征来看，属隐蔽爆破作用形成的角砾岩，即隐爆角砾岩。它们是在矽卡岩形成以后区域抬升引起的低温浅成环境中形成的，是一种寻找斑岩型铜的非常有利的标志。

（3）新屋里岩体普遍发生较强的蚀变作用，地表见到的蚀变主要为石英钾长石化、石英绢云母化和黄铁矿化，在坑道中和验证钻孔中还见有较强的黑云母钾长石化，表现为黑云母交代角闪石和钾长石交代斜长石，地表和坑道中最常见的一种蚀变是沿裂理和劈理发育的黄铁钾长石英脉。这些蚀变不仅与已发现的矿体和矿化体表现出密切的关系，而且从斑岩型矿床模式来看，都是与成矿密切相关的，是在成矿热液体系在运移演化过程中的产物。

（4）在测区内与新屋里岩体相接触的主要是南陵湖组（T_{1n}），岩性以灰岩为主，此外还出露有小面积的东马鞍山组（T_{2d}），以白云质大理岩为主。区域上，这两个地层单元都是有利的成矿层位。新屋里岩体与 T_{1n} 碳酸盐岩间的接触带大于 32 公里，接触带的局部以及靠近接触带的围岩中还发育有石榴石矽卡岩、石榴石硅灰石矽卡岩和透辉石阳起石矽卡岩，从凤凰山矿床和示范区内的江家冲铜矿床以及验证钻孔所揭露的情况来看，矽卡岩是一种十分有利的矿体围岩。

（5）矿化现象比较普遍，主要表现为黄铜-黄铁矿化（氧化成褐铁-孔雀石化）以及方铅-黄铜-黄铁矿化，而且这种矿化主要发育在角砾岩带、近东西向的剪切带以及北西和北北东向的裂隙中，是一种有利的深部隐伏矿体的指示标志。

（6）凤凰山铜矿测区内基岩出露的地段，各种构造，特别是作为热液和元素迁移最有利通道的断裂、裂隙、节理和劈理构造，十分发育，这是应用构造地球化学方法和地电化学方法探测深部隐伏矿化信息的最有利条件：①区内发育三个方向的接触带构造，一是北西方向（NW310° 左右）、二是北东方向（NE30° 左右）、三是近东西方向。与这三个方向相对应的断裂构造也很发育，其中还发育有基性

岩脉、碱性岩脉或脉状矽卡岩化。这些断裂活动与接触带构造套合、断裂并与流体活动耦合时，最有利于成矿作用发生；②区内矿化裂隙构造发育，主要有三种类型，一是发育在花岗闪长岩和石英二长闪长（斑）岩体中的 NNW 向的和 NEE 向的断裂中的黄铁绢英岩脉，颗粒较粗，脉幅一般在 3cm 以上，二是产在大理岩中的含铜方铅石英方解石脉，这种脉的走向主要为 NEE 至 SEE，次为 NW 至 NNW 向，脉幅较窄，一般在 1cm 下；三为产在矽卡岩化石英二长闪长斑岩中的黄铜黄铁矿脉，其走向也以 NW 向为主，次为 NE 向，脉幅也一般在 1cm 以下 ，在-300

南沿探矿坑道的石英二长闪长斑岩中还发现有宽约 20cm 的黄铜矿脉 。所有这些成矿裂隙构造都是深部隐伏矿体的指示标志；③区内构造显示出多期变形特征，主要构造形迹可分为三期，最早的是印支期（新屋里岩体侵位以前）形成的以 NE 向新屋里复式向斜为主体的构造，从地貌和测区地质要素的变化规律和地球物理资料的解译来看，这一类型构造在本测区主要的构造之一，而且与铜成矿有密切关系；第二期为燕山晚期的新屋里岩体侵入期形成的构造，主要有 NNW、NW 和 NEE 向断裂构造及相伴的褶皱，以及与岩体边界平行的劈理构造。这期劈理构造普遍发育矿化；第三期是成岩成矿以后形成的构造，主要为 NNE 向和 NW 向的左行断层及相伴的节理构造，对成矿有破坏作用。这种多期次、多方向的构造叠加造成了本区复杂的构造型相，其中断裂裂隙构造为成矿元素和矿化相关元素的扩散创造了条件，有利于形成大范围的扩散晕，便于用地电化学、构造地球化学方法发现隐伏矿体引起的弱地球化学异常。

5.2.2　测区化探异常特征

在测区以 200 米线距、20 米点距沿 114 线、112 线、108 线、104 线和 100 线等剖面从 20 号点到 100 号点取原岩样品做化探分析（见图 5-5，5-6），发现本区铜的构造地球化学异常有如下特征：

（1）铜元素的浓集中心主要在相思树至江家冲一带，但从异常的规模来分析，此区的异常并不是地表和近地表所见到的矿体所能解释的，深部还应该存在更大规模的隐伏矿体，实际上在相思树所施工的第一个验证钻孔就已证实了深部具有大的隐伏矿体。

（2）本区的异常主要呈三个方向展布：①北东东向展布，主要相思树至江家冲异常，异常中心轴线为 56/106—100/110 连线，整个异常区呈哑铃状。②呈北西向展布，主要有 126/96—70/106—56/110 一线分布的异常，其次为沿 142/104—92/112 线分布的异常；③南北向展布，主要为沿 180/100—180/112 一线分布的异常。这种异常展布规律实际上受构造控制，四个异常展布带对应着四个断裂构造带。

（3）区内 Cu 的异常浓集中心主要有 15 个，其位置、特征和地质背景及对应的地球物理异常及其解译见表 5-1。综合各种特征来分析，其中以相思树测区的异常浓集中心最具找矿潜力。

表 5-1　相思树测区 Cu 的构造地球化学浓集中心特征及解译简表

编号	位置	Cu 含量 ($\times 10^{-6}$)	地质特征	地球物理特征	解译
1	114/116	460	暗灰至红色花岗闪长岩，含黑云母较多	近矿充电激电的高异常区	可能存在隐伏矿体
2	38～44/110	2650 (42/110 点)～31, 平均 709	大理岩与岩体接触带，岩体风化严重,大理岩中见有碎裂化和褐铁矿化,140/110 处见有矽卡岩化和黄铁矿化，42/110 点的岩体中出露有产状 13°<76°、厚约 2 米的含铜黄铁矿脉	弱的三频激电异常	沿北北东走向接触带可能存在分散型矿化
3	52～62/110	3130 (56/110 点)～274.7，平均 856.16	出露石英二长闪长岩，有较强的褐铁矿化，局部见较强的硅化,在 60/110 点见有矽卡岩化和较弱的黄铁矿化	三频激电异常很弱	
4	97/110 — 92/112	3600 (97/110 点)～88, 平均 1244.5	出露花岗闪长岩，发育有北东东向的石榴石硅灰石矽卡岩脉,矽卡岩和矽卡岩化花岗闪长岩中发育有黄铜和黄铁矿化	具有平稳的中等大小的近矿充电激电异常	江家冲铜矿，在其深部应该还存在规模更大的隐伏矿体
5	118/110 — 126/112	4300 (118/110 点)，平均 1395.75	花岗闪长岩中发育有北东东向的石榴石硅灰石矽卡岩脉，矽卡岩化花岗闪长岩中发育有黄铜矿、斑铜矿和黄铁矿化	具有平稳的中等大小的近矿充电激电异常	
6	182/112	450	花岗闪长岩中发育北东东走向、宽约 10cm 黄铁钾长石英脉	近矿充电激电负异常区内	可能存在隐伏的斑岩型矿化
7	140/108	420	花岗长岩中出露一宽约 5m 黄铁绢英岩脉,中间为黄铁石英脉,两侧为强黄铁矿化的绢英岩	近矿充电激电向异常高变化梯度带	可能存在斑岩型矿化
8	60～72/106	13700 (70/10	靠近石英二长闪长斑岩与大理岩的接触带，岩体发生矽卡岩	三频激电强异常区和近	深部隐伏矿体已被 1 号

编号	位置	Cu 含量 ($\times10^{-6}$)	地质特征	地球物理特征	解译
	—	点)～	化，沿裂隙发育黄铜矿化(大多	矿充电激电	验证孔所证
	74/107	193.8，平	已变成孔雀石化)和黄铁矿化，	弱异常区内	实
		均 5104	岩体发育有较强黄铁矿化、硅		
			化和绢云母化		
9	181/106	970	靠近岩体与大理岩的接触带,接触带发育有矽卡岩,岩体有较强的硅化和黄铁矿化	近矿充电激电负异常区内	接触带的分散型矿化
10	138/104～152/104	2800 (142/104 点)～10，平均 1270	大理岩中发育较多走向近东西向的含铜黄铁方铅石英细脉(<2cm)，在其它方向的裂隙中亦发育有黄铁矿化，局部有孔雀石化	近矿充电激电平稳异常区内	大理岩下伏的岩体和接触带中可能存在隐伏的矽卡岩型和斑岩型矿体，其走向可能以近东西向为主
11	102/104	360	大理岩中发育近东西走向的含铜方铅石英细脉(<1cm)	近矿充电激电平稳异常区内	
12	122/102～130/102	1500 (126/102 点)～53，平均 776.5	大理岩中缝合线发育,并发育近东西走向的含铜方铅石英细脉,在 126/102 点处含铜方铅石英脉大于 10cm 厚	近矿充电激电平稳异常区内	
13	166/102	510	T_{2d} 的白云岩,发育有近东西走向的含铜方铅石英细脉,东 5 米见褐铁矿化角砾岩.	近矿充电激电高异常高变化区	
14	180/100～181/102	520 (180/100 点)～300，平均 410	T2d 白云质大理岩中发育有近南北走向的方铅石英脉，白云质大理岩中网状裂隙较发育,局部发育角砾岩	近矿充电激电异常区高变化带内	下伏岩体和接触带可能存在近南北走向的隐伏矿
15	114/96～126/96	2600 (126/96 点)～10，平均 1403	大理岩中发育切穿缝合线的走向北西(320°)和走向北东(72°)的含铜方铅石英脉	近矿充电激电平稳异常区内	下伏隐伏岩体中可能存在隐伏矿体，向南出示范区

5.2.3　测区物探异常特征

利用物探方法对凤凰山铜矿测区西段的700×1000m范围进行了100×20m网度的三频频激电测量，每条测线从2号点做到90号点（即900米长）。通过对所测得的极化率 Fs（似频散率）、相对相位与二者的对应关系及其地质背景进行对比分析（见附录图5-7，5-8 ），发现如下特征[90, 91]：

（1）在人为电力干扰较小的前提下，三频激电技术对寻找本区的硫化物型隐伏矿体的是有效的，判别矿致异常的标准为：①连续2点以上 Fs>4%；②低频与高频的相对相位分离，即$\Delta\phi_{1\text{-}2}>\Delta\phi_{2\text{-}3}$，或$\Delta\phi_{2\text{-}3}>\Delta\phi_{1\text{-}2}$，二者相差越大、变化相反时，更有可能反映是矿至异常；③极化率（似频散率）异常与相对相位异常相对应。

（2）综合考虑极化率（Fs）、和相对相位（$\Delta\phi$）的特征以及二者的吻合程度，在区内可确定两个有意义的激电异常带——东部异常带和西部异常带。东部异常带呈北北西走向，从102线至112线沿86/102—80/104—72/106—70/108—68/110—70/112为轴线展布，到112线后转向北北东向，而102线往南并未封闭。西部异常带从呈北北东向沿 44/112—42/110—38/108—34/106—32/104—28/102 轴线展布，向南亦未封闭。这两个异常带基本对应着两条接触带构造。

（3）对比东部异常与西部异常带，东部异常带的Fs和$\Delta\phi$异常都强，连续性也要好得多，而且其$\Delta\phi$异常的特征更符合有利找矿的异常特征，所以东部异常应该是更优先的找矿区段。

（4）在116线的44号点至62号点，在114线的50号点至52号点，存在一半圆形的强异常，并且向北仍未封闭，虽然是全区最强的异常区，但并非矿致异常，因为异常极高，表现出强干扰特征，Fs 和$\Delta\phi$的空间变化太稳定，由于此地段太靠近离矿山生产区（地表不到100米为露天采场，露天采场对应的地下有采矿坑道），其为是地下分散型矿化（包括黄铁矿化）再叠加强电力干扰引起的异常，找矿指示意义不大。

（5）根据矿致异常的判别标准，三频激电测区内，最有可能找到隐伏矿体的地段为：74～90/102、54～66/104、80～84/104、64～76/106 等点，其中 106 线的70号线具有极佳的指示深部矿化的异常特征。

（6）根据 72/108 和 32/102 点三频激电测深结果，推测 72/108 点的异常源的深度为 125 米左右，32/102 点的异常源的深度为 30 米左右。

5.2.4　地电化学找矿综合评价

结合前人已有的地质、地球物理和地球化学大量的找矿信息，利用地电化学异常对凤凰山铜矿进行综合预测评价以及进一步检验该方法的可靠性和可行性，最终使地电化学这种找矿新方法更好地服务于我国经济建设。

如前所述，1 号铜金异常区呈近南北向分布，北端未封闭，南端封闭于测区 100 线处，异常带南北长大于 650m，东西宽 200m，面积大于 130000 m^2。其异常中心位于 100~108 线 30~40 号点之间，异常带不仅宽度大而且幅度值高。带内地质构造复杂，位于测区石英二长闪长斑岩舌状体中部和西部接触带，其中部夹有弧形的大理岩残余体，并在 108 线 44~46 点之间的大理岩中发现有一条南北向延伸的铁帽，局部有原生块状的黄铜矿，是一个有利的成矿部位；同时该区也出现了物化探异常带，该异常带呈北北东方向延伸，从 100 线至 112 线，两端未封闭，长度超过 600 米，宽度从几十米到两百米不等。三频激电相对相位异常为正异常，且异常幅值较大，而带上的三频激电极化率异常幅值相对较小，但带状明显；地球化学异常在此亦存在一个铜的浓集中心，位于 108~112 线之间的 38~44 点。而且物探综合探测剖面还表明测区深布存在找矿目标。由此可见，该异常带地电化学、地质、物探和化探找矿信息高度吻合，可能对应有一个新的隐伏矿体群，值得进一步深入研究和工程验证。

测区西段 2 号铜的地电化学异常带是唯一进行工程验证的预测区。至今为止，已施工地表钻孔 2 个，坑道 1000 余米，井下钻孔 1600 余米。其中地表 1 号钻孔位于 2 号地电化学异常带 104~108 线之间。该带呈近南北向分布，南端狭长，且封闭于测区 100 线以南 70m 处，南北长大于 600m，东西宽 60m 到 120m，面积大于 54000m^2；此处物探三频激电极化率和相对相位都出现异常，且呈近南北向分布，从 100 线开始延伸到 112 线，长度也在 600 米以上，宽达百米，异常面积大于 10000 平方米；本区地球化学异常带主要在相思树至江家冲一带，异常中心为 110 线 58 点和 106 线 56 点，呈异常面积大，幅值高的特点。各种方法所获得的异常的高度一致表明该处存在隐伏矿体。经地表 1 号钻孔揭露，该处确实存在隐伏矿体群：上层矿体，即 55 线-300 中段的 370 矿体在平面上显示为西北-东南走向，向南西倾斜，具有从北西向东西变化的特征。该矿体北西端受南北向构造控制，南东端受东西向构造控制，中部则受上述两组构造交汇部位控制，矿体的南西侧被一条向南西陡倾的后期构造破碎带所切断，具有侧幕式排列成群的特点。位于 55 线-500 米的下层矿体即 502 矿体，也具有同样的特点。这正好说明了 1 号验证钻孔所控制的北西向矿体与呈近南北走向的地电化学和物探异常带

的不一致是由于排列成群的矿体存在所导致的。

测区西段 3 号铜的地电化学异常带呈南北向展布，该异常南部封闭于测区 100 线以北 20m 处，往北到测区 112 线尚未圈闭，南北长大于 650m，东西宽最大达 120m，面积约 40000m^2，异常明显浓集于 108 线 98 点处。而该处的化探异常带也呈近南北展布，异常中心位于 108 线 96~98 点，即江家冲铜矿所在的位置。但无论是化探异常还是地电化学异常，本区的异常范围都很大，远远超出了江家冲铜矿的开采范围。同时位于 3 号地电化学异常带的 90~100 点的物探异常带也呈近南北向。各种方法异常带重合性比较好。

综上所述，地电化学方法所提取的地电化学异常与地质、物探和化探的找矿信息具有高度的吻合性，从而表明该方法在金属矿产勘查中的可靠性和可行性。因此，地电化学方法可作为一种综合预测评价的依据来指导找矿。

第六章　结　论

针对目前地电提取测量法在国内外的金属矿产、石油、地热等资源勘查中尚处于试验，应用阶段和不断完善的特点，本文始终以系统科学的地电化学理论为指导，在全面总结地球电化学作用与金属成矿作用的基础上，通过对凤凰山铜矿测区的 8 条剖面线的地电化学异常源的实测与分析，确定了一套地电提取测量法寻找隐伏铜金矿的野外工作方法和室内工作方法。而且，针对目前地球电化学基础理论薄弱的环节，本文在整个研究过程中，十分注重地球电化学基础理论的开创、拓展、完善和总结。对离子迁移的动力学机制、地球电化学作用与金属成矿、地电化学异常的影响因素、离子晕的剖面分布特征以及隐伏铜金矿的地电化学标志等基础理论进行详细总结和拓展。同时努力将化学、电化学、物理、地质等多门学科的基础理论融合在一起，使地电提取测量的基础理论更加牢固，更加丰富。

本论文通过系统分析前人资料的基础上，利用地电提取测量寻找隐伏铜金矿的地电化学勘查法对凤凰山铜矿测区进行了找矿定位预测研究，结合野外室内工作方法，辅之以计算机数据处理技术，本文初步取得了如下主要成果和结论：

1. 地球电化学作用参与金属成矿作用较为广泛，并在成矿金属元素的活化、迁移、富集及定位过程中起着相当重要的作用；

2. 初步总结了地电化学异常的形成机理、野外工作方法以及应用条件，并对离子晕的动力学机制进行了探讨和总结；

3. 通过已有的地质资料及地质填图进一步增加了对测区的地层特征、岩浆岩特征、构造特征及矿体地质特征的认识，对石英二长闪长斑岩和成矿、地电化学异常关系有了更深层次的了解；

4. 首次在安微铜陵凤凰山铜矿矿区运用地球电化学勘查法进行隐伏矿体的勘查和找矿预测；

5. 通过认真分析地电吸附提取的数据资料，总结和发现了凤凰山铜矿测区 8 条剖面线的铜金属元素的地电化学异常特征，丰富了找矿资料，并总结了铜、金地电化学异常特征的标志；

6. 初步总结了地电化学异常的四个影响因素，即：（1）地质体因素；（2）构造因素；（3）地表覆盖层因素；（4）供电条件。并指出了它们的影响特征和消除方法；

7. 经与已有的地质、遥感、物化探勘探结果对比分析及应用评价，结果表明该方法可用于隐伏铜金矿体地段的定位预测，其中部分地电化学异常经钻孔验证，其结果与已揭露的隐伏铜金矿体非常吻合。这从实践方面证实了地电吸附提

取法的实用性，并具有广阔的应用前景；

8. 通过对凤凰山铜矿测区实施地电提取测量寻找隐伏铜金矿体研究，发现了该区存在四个巨大的铜异常带，为找矿的定位预测提供了准确有力的理论和技术依据，确定了有利的找矿靶区，并证实了凤凰山铜矿测区具良好的找矿前景，为科研队伍找矿预测提供了理论依据以及重点找矿研究方向；

9. 研究表明，就某一矿区或矿田而言，地球电化学异常强度和异常宽度的规模越大，找矿潜力就越大。反之，则找矿前景就越差；

10. 研究表明，在隐伏金属矿产勘查中，地电提取测量法是一种行之有效的勘查方法，该方法野外工序间单，样品运输方便，获取的地电化学异常信息结果稳定，重现性好。

11. 笔者认为，这项研究工作虽然还很肤浅，但由于地电化学提取测量法对地表覆盖区的矿产勘查具有独特的优势和效果，因而决定着其应用前景非常广泛，若对其继续深入研究，可加深对地球电化学成矿作用，成矿过程，成矿规律以及成矿预测的全面认识，推动地球电化学这门新兴的边缘学科更快地发展。笔者深信，在地表厚覆盖区内寻找隐伏金属矿床方面，地电化学方法将在今后的金属矿产勘查中发挥更大的作用。

参考文献

[1] 吴其斌，王君恒.崔霖沛.勘查隐伏金属矿的新方法[J].地质与勘探，1999，35（6）：44~47

[2] 吴其斌.寻找隐伏矿的地电化学新方法[J].有色金属矿产与勘查,1993,2(2):104-110

[3] 刘亮明，王志强，彭省临等. 综合信息论在储量危急矿山深边部找矿中的应用—以铜陵凤凰山铜矿为例[J]. 地质科学，2002，37（4）：444-452

[4] 罗先熔.再论地球电化学测量法寻找隐伏矿床[J]. 桂林冶金地质学院学报,1994 ,14(3): 295~302

[5] IO.C.雷斯. 地电化学勘探法[M]. 北京：地质出版社，1986.1~244

[6] ANTROPOVA L V, GOLDBERG I S, VOROSHILOV N A, et al. New methods of regional exploration for blind mineralization: application in the USSR[J]. J.Geochem Explor,1992,43:157~166

[7] CAMERON E.M. Deep-penetrating Geochemistry[R].CAMIRO-Exploration Division.1998,117

[8] KRISTIANSSON K, MALMQVIST L, Evidence for nondiffusive transport[J]. Geophysics,1982,47(10):1444~1452

[9] GOLDBERG I S.Geoelectrochemical systems in the earth,their geological and exploration significance[A].The Proceedings of the 17th IGES[C]. Towsville,1995,326~328

[10] SMITH D B.Preliminary studies of the CHIM electrogeochemical method at the Kokomo Mine ,Russell Gulch,Colorado[J].J Geochem Explor. 1993,46:257~278

[11] Govett G J S . Soil conductive assessment of an electro-chemical technique[J]. Geochemical exploration,1974,101~118

[12] Shmakin B M .The method of partial extraction of metals in a constant current electrical field for geochemical exploration[J]. Geochemical exploration,1985,27~33

[13] Alekseev S G,et al. Some aspects of practical use of geoelectrochemical methods of exploration for deep-seated mineralization.Journal of Geochemical Exploration, 1996(56): 79~86

[14] Levitski A ,et al. "Dipole"CHIM: concept and application. Journal Geochemical Exploration,1996(57):101~114

[15] G.J.S.Govett. Detection of deeply buried and blind sulphide deposits by measurement of H^+ and conductivity of closely spaced surface soil samples[J]. Geochem,explor,1976(6)

[16] B.W.Smee. Laboratory and field evidence in support of the electrogeochemically migrations of ions through glaciolaiastrine secliment[J]. Geochem,explor,1983(1)

[17] G.J.S. and Atherden.P.R. Electrogeochemical patterns in surface soil detection of blind mineralization beneath cover, Thalanga clueersland Australia[J]. Geochemical Exploration,1985:201-218

[18] L.V.Antropova I.S.Goldberg. New methods of regional exploration for blind mineralization: application in the VSSR[J].J.Geochem Explor,1992,43:157~166

[19] Smith D.B.,Hooler.D.B. and Sanrolore R.F. Preliminary studies of the CHIM electrogeochemical method at the Kokome mine Russell Gurch.colorado.j[J].Geochem,explor,1993(46):257-278

[20] Reinhord W.Leinz. Ideal CHIM with the newly-Developed NEOCHEM electrode[J]. V.S.Exploration Geochemists,1994(83):10-15

[21] Alexander Leviski. A study of "dipole" extraction in tracing and interpreting ore induce secondary epigenetic haloes,Extended abstract of 17th JGES,1995:15-19, Townsville Queensland.

[22] Kieran D Fluid-rock interaction in crustal shear zone: a directed percolation approach[J]. Geology,1994,22:843~846

[23] James P.Evans.Fluid-rock interaction in the San Andres system:inferences from San Gabriel fault rock geochemistry and microstructures[J]. J GR, 100(B7),1995,13007~13020

[24] Taylor H P Jr. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to the problems of hydrothermal alteration and ore deposition . Econ. Geol., 1974,69:843~883

[25] Carten R B, Geraghty E P ,Walker B M and Shannon J R .Cyclic development of igneous features and their relationship to hig-temperature hydrothermal features in the Henderson porphyry deposit,Coroade. Econ. Geol.,1998,v83:266~296

[26] Giggenbach W F. Magma degassing and mineral deposition in hydrothermal systems along convergent plate boundies. Econ. Geol.,1992,v86:404~412

[27] Keppler H and Wyllie P J. Partioning of Cu,Sn,Mo,W,U and Th between melt and aqueous fluid in the System haplogranite-H_2O-HCl and hyplogranite-H_2O-HF:

Contrib Mineral Petrol,1991, 109~150

[28] Hayashi K, Ohmoto H .Solubility of gold in NaCl-and H_2S-Bearing aqueous solutions at 250~350℃.Geochim.Cosmochim.Acta,1991,55;2111-2126

[29] Gammons C H,Bloom M S,Yu Y. Experimental investigation of the hydrothermal geochemistry of platinum and palladium:I .Solubility of platinum and palladium sulfide minerals in $NaCl/H_2SO_4$ solutions at 300 ℃ .Geochim. Cosmochim. Acta, 1992,56:3881~3894

[30] 郑康乐. 部分金属电化学提取法[J]. 苏联化探工作进展，1981

[31] 付良魁. 地电化学找矿法----国外电法勘探的发展概况[M].国外地质勘探技术. 1982

[32] 付良魁.电法勘探教程[M].北京：地质出版社，1983

[33] 崔林沛.地电化学法[M]. 北京：地质出版社，1980

[34] 高云龙. 地电化学勘探法[M]. 北京：地质出版社，1986

[35] 费锡铨. 电法勘探[M]. 北京：地质出版社.,1986, 1~310

[36] 费锡铨.地电提取离子法[M].北京:地质出版社.1992

[37] 李金铭，卢军，严良俊.地电化学提取法的理论与实验研究[J].地学前缘, 1998, 5（1）：208~217

[38] 罗先熔.我国地电提取测量法的应用现状及研究方向[J]. 桂林工学院学报，1994,15（1）：34~39

[39] 罗先熔. 寻找金、银、铜、铅、锌等金属矿床的新方法——地球电化学勘查[J]. 有色金属矿产与勘查，1999,8(6):676~677

[40] 罗先熔,王桂琴,杜建波等. 锑矿地电化学异常特征、成晕机制及找矿预测[J]. 地质与勘探,2002,38（2）：59~62

[41] 罗先熔.地电提取离子异常形成机理探讨[J].地质与勘探,1992 ,28(10):48-50

[42] 罗先熔.地球电化学勘查及深部找矿[M].北京:冶金工业出版社,1996,1-221

[43] 罗先熔.厚层覆盖区壤中电导率测量找矿研究[J].地质与勘探,1987 ,(3):60-64

[44] 罗先熔.地电提取测量寻找隐伏矿研究[J].地质与勘探,1989,(12):43-51

[45] 罗先熔，杨晓.地电化学测量找寻隐伏矿的研究及找矿预测[J].地质与勘探, 1989,25(12):43-51

[46] 谭克仁. 金矿地电化学勘查新技术、新方法研究进展[J].黄金科学技术,2000,

8（1）：23~31

[47] 谭克仁，蔡新平. 吸附电提取技术野外实验研究，大地构造与成矿学，2000，24(2):189-193

[48] 刘吉敏，刘占元，程志中.地电化学法在隐伏矿产勘查中的应用效果[A].北京：地质出版社，1993

[49] 刘占元，刘吉敏，崔爱明.电提取过程作用条件问题讨论[J].物探与化探，1997，21（2）：115-122.

[50] 刘占元，崔爱明.电提取器周围土壤 PH 值变化[J].物探与化探，1998，22（4）

[51] 刘占元，崔爱明.电提取过程中极化现象的讨论[J].物探与化探，1998，22（3）

[52] 王学求,程志中.元素活动态测量技术的发展及其意义[J].国外地质勘探技术,1996（2）：17~22

[53] 丁汝福.国内外寻找隐伏矿化探新方法研究进展[J].地质与勘探，1999,35(2)：30~34

[54] 谢学锦，邵跃，王学求主编，走向 21 世纪矿产勘查地地电化学[M].地质出版社,1999

[55] 李江,高明诲,王士梅等.地电化学提取法寻找金矿的应用[J].地质与勘探,1989,25(1):52-54

[56] 邓涛声.硫化矿物的稳定电位[J].桂林冶金地质学院学报, 1987,7(1-2):113-120

[57] 邓涛声.外电场作用离子晕中的离子迁移[J].桂林冶金地质学院学报,1992,12(4):20-24

[58] 伍宗华,金仰芬. 地电化学和水电化学在金矿勘查中的应用.<地球化学探矿实例>第四辑,北京:地质出版社.1991:163-170

[59] 屈大祥.地电化学电量谱勘探法简介[J].国外地质勘探技术，1991，(4):210~216

[60] 张守本.铀矿化探找矿新方法——腐殖酸抽提法[J].铀矿地质，1996，12（3）：163-170.

[61] 周奇明.电法地球化学方法快速寻找隐伏矿的效果[J].矿产与地质，2001，84（4）：275-278.

[62] 周奇明.电吸附找矿方法寻找隐伏金矿的研究[J].矿产与地质，1996，（3）：145-149

[63] 周奇明.电吸附法寻找隐伏矿床在河北后沟金矿试验效果[J].物探与化探，

1998，（6）

[64]姚锦其,周奇明.电吸附法寻找隐伏铜金矿的试验结果[J].矿产与地质,1996，（3）

[65] 费锡铨.电提取离子法在几个矿区的试验结果[J].物探与化探，1984，8（3）：162-165

[66] 任天祥，伍宗华，汪明启.近十年化探新方法新技术研究进展[J].物探与化探，1997，21（6）：411-417

[67] 谢学锦，王学求. 深穿透地球化学新近展[J].地学前缘,2003，10（1）：225~238

[68] 谢学锦. 战略性与战术性深穿透地球化学方法[J].地学前缘,1998，5（2）

[69] 王学求. 深穿透勘查地球化学[J].物探与化探，1998，22（3）

[70] 温佩琳,仇勇海,陈白珍.地电化学基础及其应用[M]. 长沙：中南工业大学出版社,1991

[71] 康明，罗先熔.电化学方法的改进及应用效果[J].地质与勘探,2003,39（5）：63-66

[72] Reinhard W.leinz,Donald B.Hoover. The Russian CHIM method-electrically-or diffusion-driven collection of ions[J].Explore,1993,79(1):5-9

[73] 李和平. 天然原电池地球化学：[博士学位论文].长沙：中南工业大学，1995

[74] 江琳才.物理化学[M]. 北京：人民教育出版社，1979

[75] 刘承科.大学化学[M].长沙：中南工业出版社，1994

[76] 施俊法.金属气相迁移新机制[M].北京:冶金工业出版社,1997

[77] 童纯涵,李巨初.地气测量寻找深部隐伏金矿及其机理研究[J].地球物理学报,1999,42(1):135-142.

[78] 王崇云等. 地球化学找矿基础[M]. 北京：地质出版社,1987

[79] 黄薰德，吴郁彦等. 地球化学找矿[M]. 北京：地质出版社,1986

[80] 陈国达. 成矿构造研究法[M]. 北京：中国地质出版社，1978：147-151

[81] 刘文灿,高德臻,储国正.安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测[M].北京:地质出版社,1996,1~133

[82] 黄许陈.安徽铜陵地区成矿物质和含矿流体来源问题的探讨[J].安徽地质,1994,4（3）:23~30

[83] 翟裕生,姚书振,林新多等.长江中下游地区铁铜（金）成矿规律[M].北京:地质

出版社,1992,1~233

[84] 刘文灿,高德臻,储国正.安徽铜陵地区构造变形分析及成矿预测[M].北京:地质出版社,1996,1~133

[85] 吕古贤，李晓波.成矿规律与构造物理化学研究[J].地质力学报，1996，2(3)：38~40

[86] 张德会，张文淮，许国建. 岩浆热液出溶和演化对斑岩成矿系统金属成矿的制约[J].地学前缘,2001，8（3）：193~201

[87] 於崇文,岑况,鲍征宇等.成矿作用动力学[M].北京:地质出版社,1998,1~221

[88] 彭省临,刘亮明,赖健清等.凤凰山矿区深布及边布找矿预测研究.内部资料，2003

[89] 谭克仁，彭省临，林才顺等.安徽省铜陵县凤凰山铜矿地电化学勘查.内部资料，2003

[90] 崔霖沛.寻找隐伏铜矿的物探工作部署和方法问题[J].国外地质科技，1996（4）：1-11

[91] JS 萨姆纳（陈文华译）.地球物理勘探的极化原理[M]. 北京：地质出版社，1981，287-294

致　谢

值此论文结束之际，我不禁感慨万千。回首三年往事，俱在眼前，心中充满着无限的崇敬和感激之情。

首先感谢我的导师赖健清教授。本论文从选题一直至论文定稿整个过程都是在赖老师的直接指导下完成的。感谢赖老师为我提供了宽松的学习环境和条件，在这样一个充满朝气、洋溢激情的学术团队里开始我的论文选题、开题乃至论文撰写，我觉得我是非常幸运和自豪的。我的导师不但学识渊博，思想深邃，思维敏锐，而且胸怀宽广，积极开拓，善于引导等等，这些都给我留下了深刻的印象，同时还时刻激励着我努力前行。导师教学、科研任务繁重，而且还身兼数职，但他时刻惦记着我们，及时地将我们召集在一起，了解我们每一个人的学习状况和科研进展，定时定期地举办学术研讨会，活跃学术氛围，促进学术交流，为我们指明前行的方向。感谢恩师在生活上给予我无微不至的关怀和帮助。读硕期间，正是恩师的周密安排和无私帮助，才使得我学业和爱情双丰收。

感谢刘亮明研究员的仔细审阅和无微不至的关怀以及鼓励。感谢中国科学院长沙大地构造所研究员谭克仁老师在地球电化学方面的亲自指导和详细讲解，为我的论文写作提供了许多可借鉴的思路和资料；感谢杨兵博士后，因为我们曾在一起将地质与化学进行融合大讨论，为我的论文内容充实了许多不可多得的材料。感谢地洼学术队伍彭省临教授、博导，邵拥军博士后，杨群周博士后，毛政利博士，王志强硕士，杨果岳硕士等在我的论文撰写过程中的帮助和指导。

感谢铜陵有色金属集团公司、有色地勘公司，以及凤凰山铜矿杨文总工程师，科研科曹祖武科长，毛润新副科长，李生法工程师等单位和个人，在野外地球电化学新方法的试验、测量和地质资料的提供以及野外工作、生活中为我们提供的许多方便。

能够顺利完成论文还得益于许许多多的老师、同学和朋友的热情帮助与鼓励。他们是地学与环境工程学院地质所的胡祥昭教授、张术根教授、刘纯波硕士、黎明硕士、王万军博士、杨宗保博士，成功博士和师兄弟杨波博士、唐攀科博士、彭涛硕士、王雄军硕士、张健东硕士等的技术支持和帮助，在此一并致谢。

此外，特别感谢我的爱妻、父母、弟妹以及亲朋好友，是他们多年来始终如一、毫无怨言地支持我、帮助我，才使得我顺利完成学业。同时，感谢让我拥有了一个和睦、团结的家庭，我相信，这是我在今后人生风风雨雨中的坚强后盾和永不枯竭的学习动力源泉。

最后，再次衷心感谢关心和帮助过我的老师、同学和朋友们！

硕士研究生在读期间论文发表情况

[1] 赖健清,林才顺,彭涛. 地球电化学研究现状及进展[C].湖南省矿物岩石地球化学论丛.2002 年;

[2] 林才顺. 精炼系统铜洗塔技改小结[J].小氮肥，2001（5）;

[3] 林才顺. 废旧正、负极穿孔钢带极片的回收利用[J].湿法冶金，2002（2）;

[4] 林才顺. 从湿法硫酸镍中去除锰铁的新工艺研究[J].湿法冶金，2002（3）;

[5] 林才顺，黄璐. 从废镍钴料中回收镍钴时 PH 值对去除杂质的影响[J].湿法冶金，2002（4）;

[6] 林才顺 氟化钠去除钙镁工艺的影响因素分析与控制[J] 湖南冶金：2003（5）

[7] 林才顺. 废弃储氢合金粉湿法回收工艺[J].电源技术，2004（3）：（全中文核心期刊）;

[8] 赖健清,林才顺等 地电提取法寻找隐伏铜矿床的研究[J] 地质与勘探,已录用待刊:（全中文核心期刊）;

[9] 林才顺. 电池正极材料纳米氢氧化镍的制备新近展[J].湿法冶金，2004(2).

附　　录

图 5-5　铜的构造地球化学等值线图
图 5-6　铜的构造地球化学一次滤波后的等值线图
图 5-7　测区三频激电似频散率等值线图
图 5-8　相思树示范区三频激电相对相位差等值线图
图 5-9　凤凰山铜矿测区地电化学提取铜含量等值线图
图 5-10 凤凰山铜矿测区地电化学提取金含量等值线图

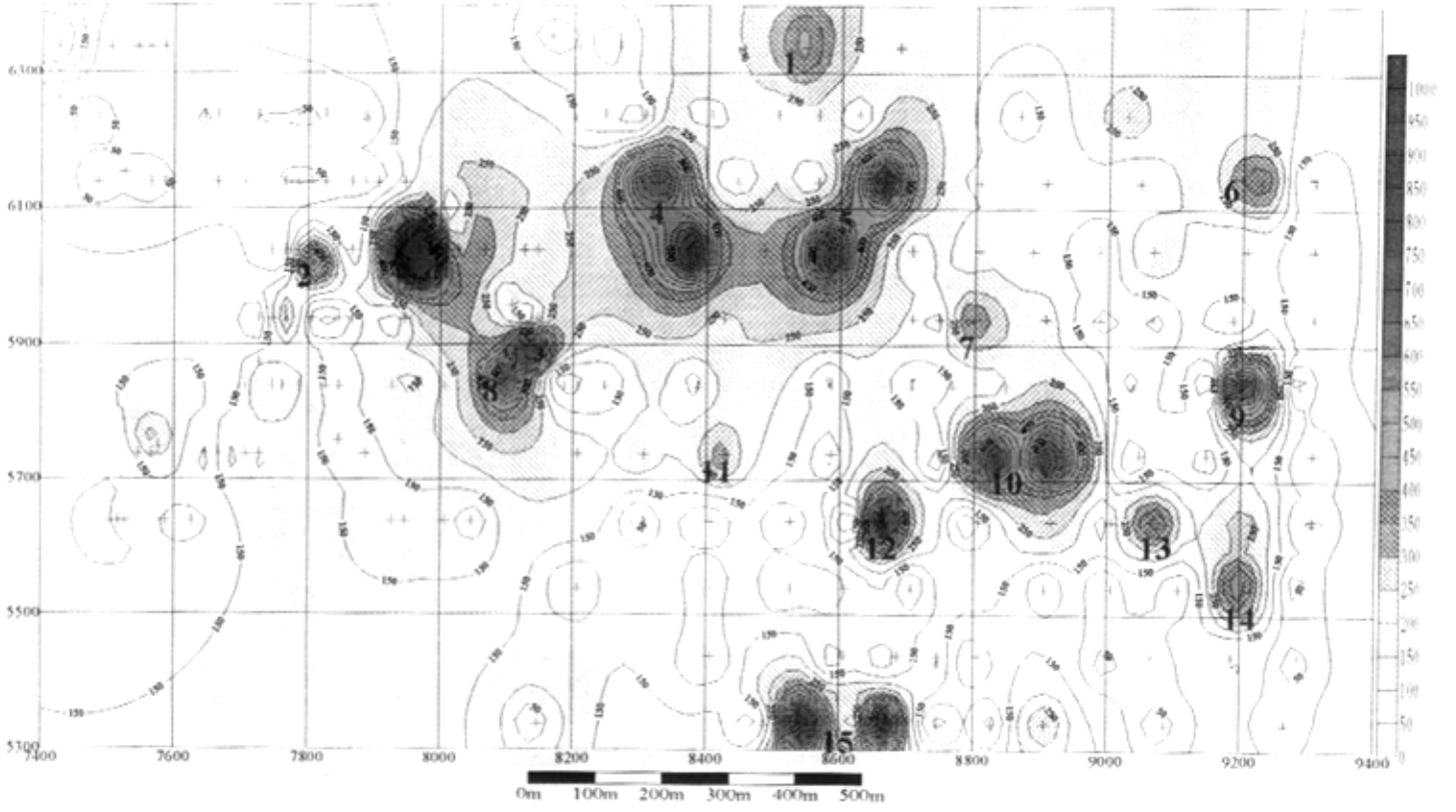


图 5-5　铜的构造地球化学等值线图

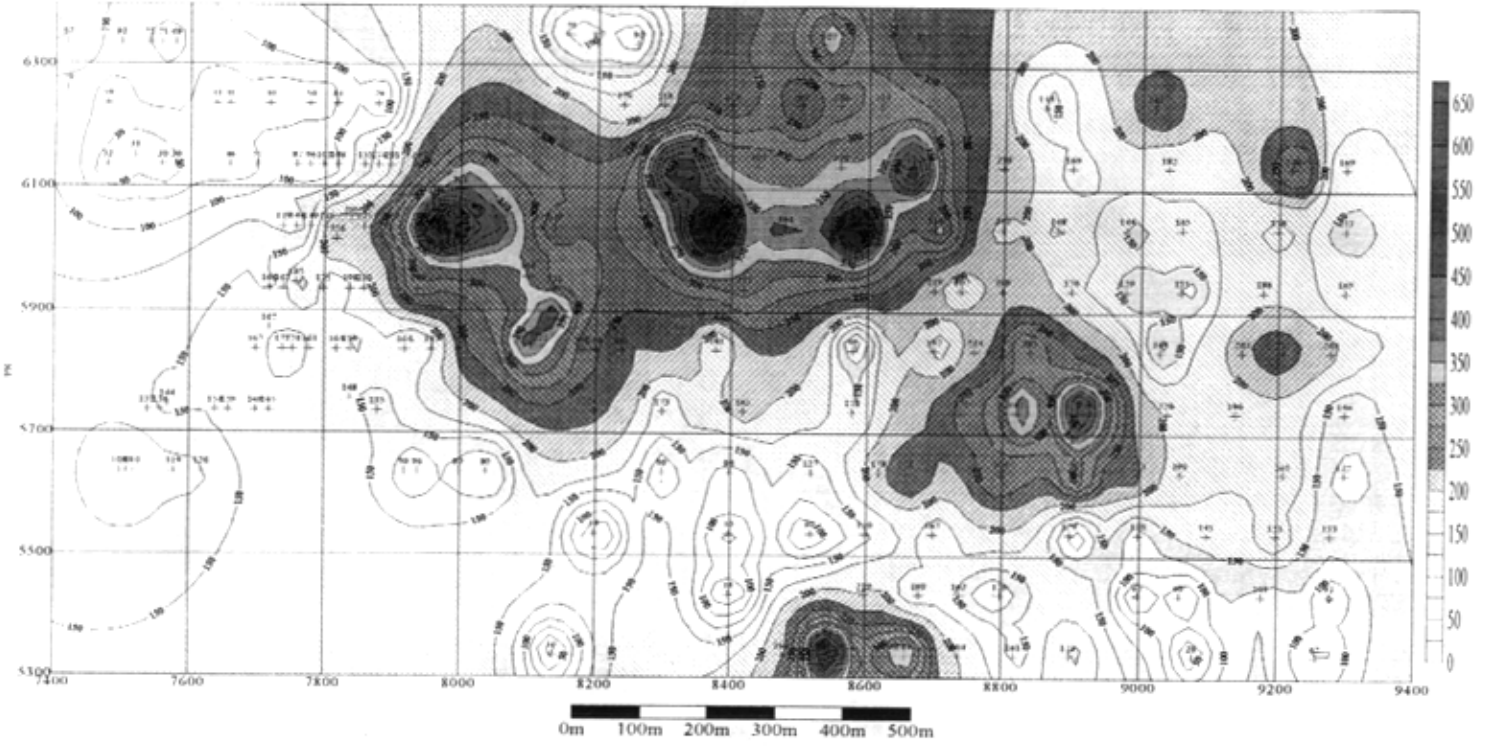


图 5-6　铜的构造地球化学一次滤波后的等值线图

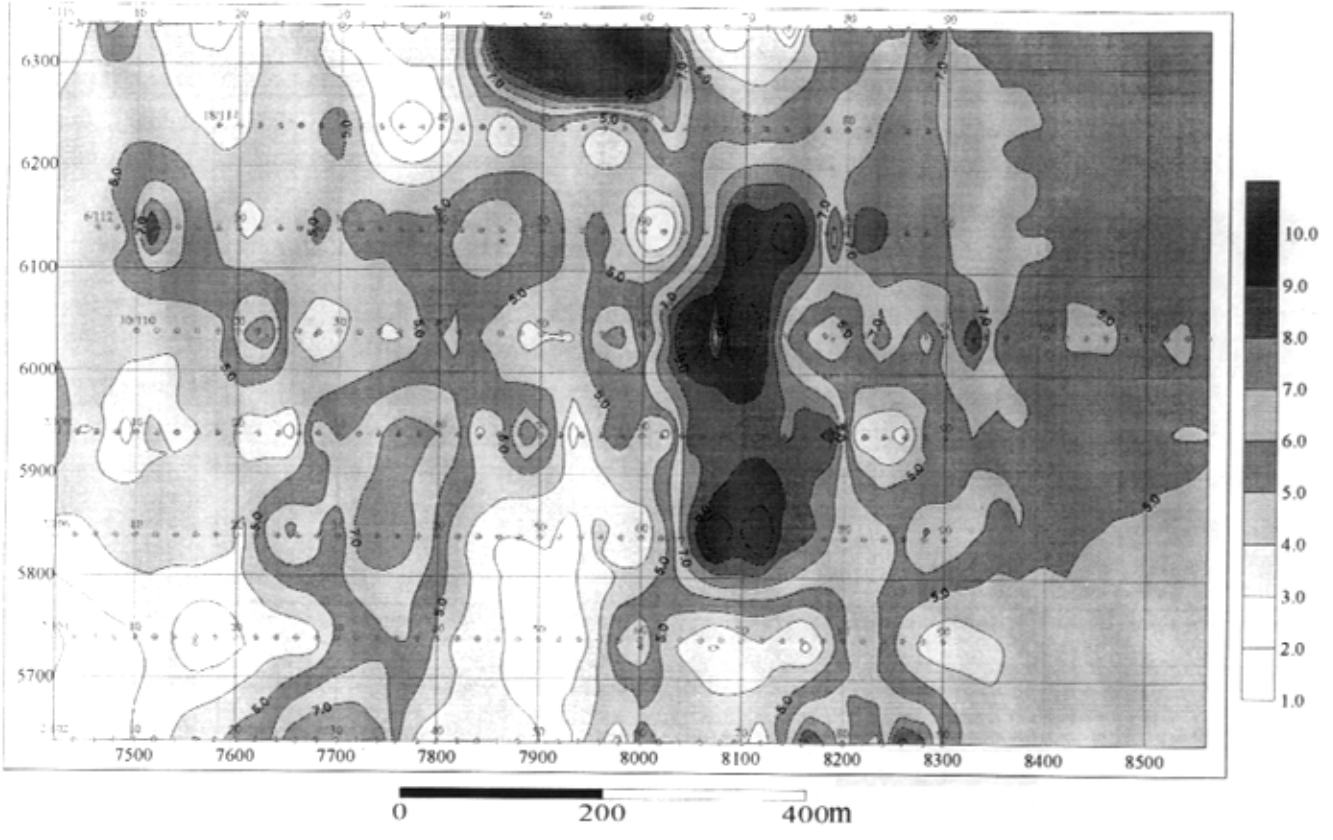


图 5-7　测区三频激电似频散率等值线图

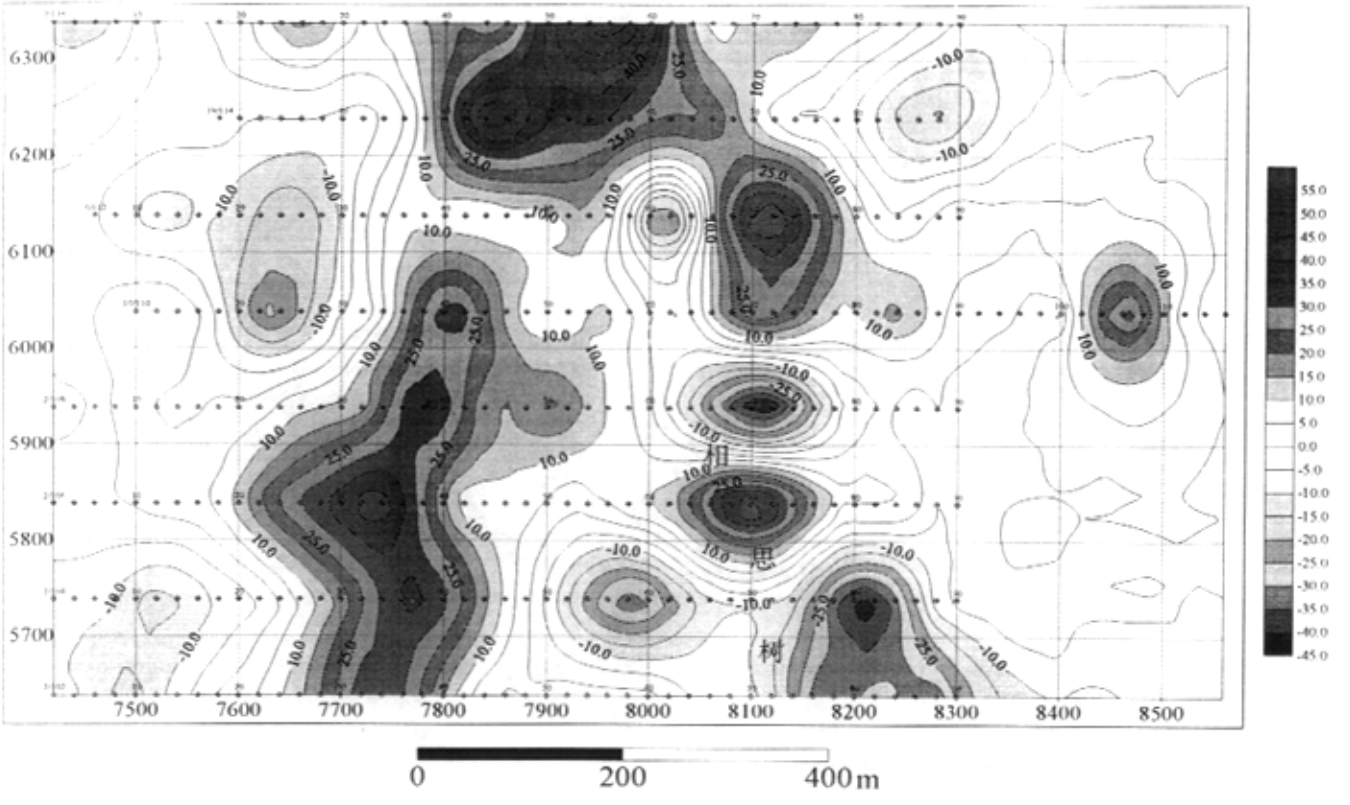


图 5-8　相思树示范区三频激电相对相位差等值线图

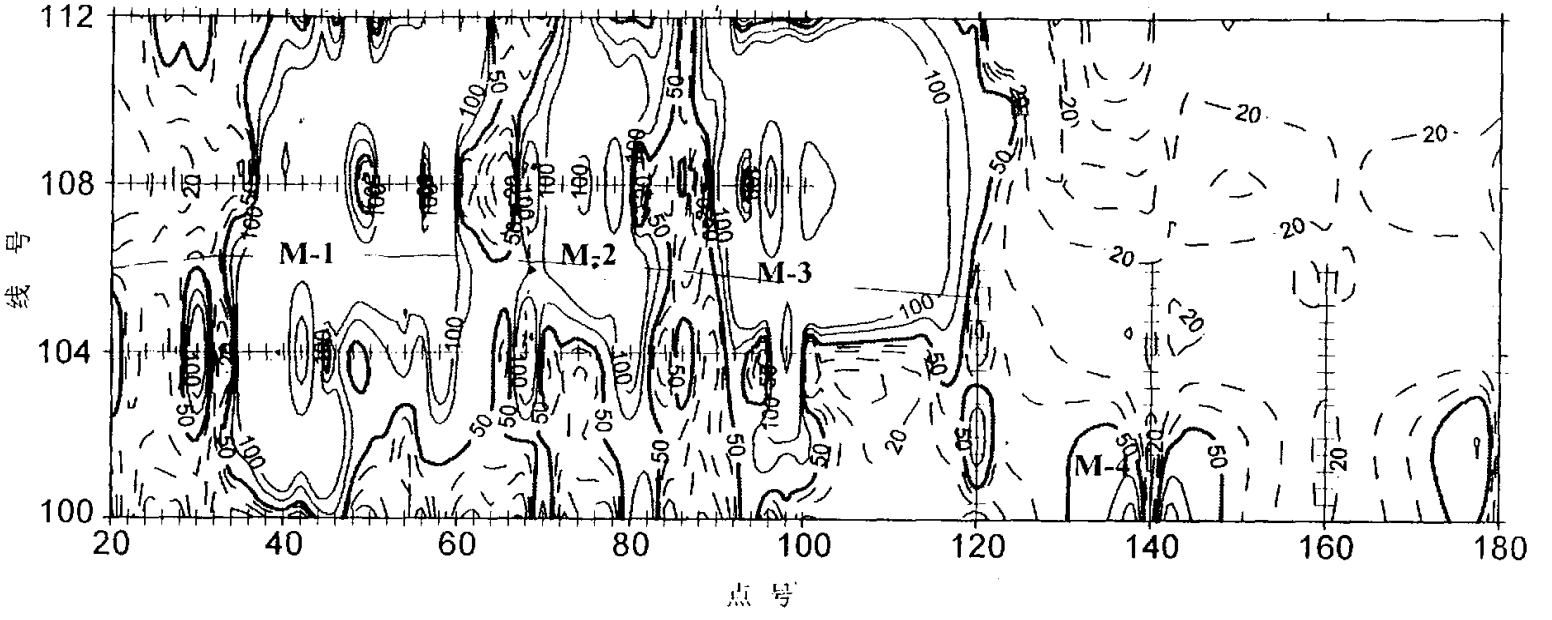


图 5-9　凤凰山铜矿南区地电化学提取铜含量等值线图（异常边界为 40×10^{-6}）

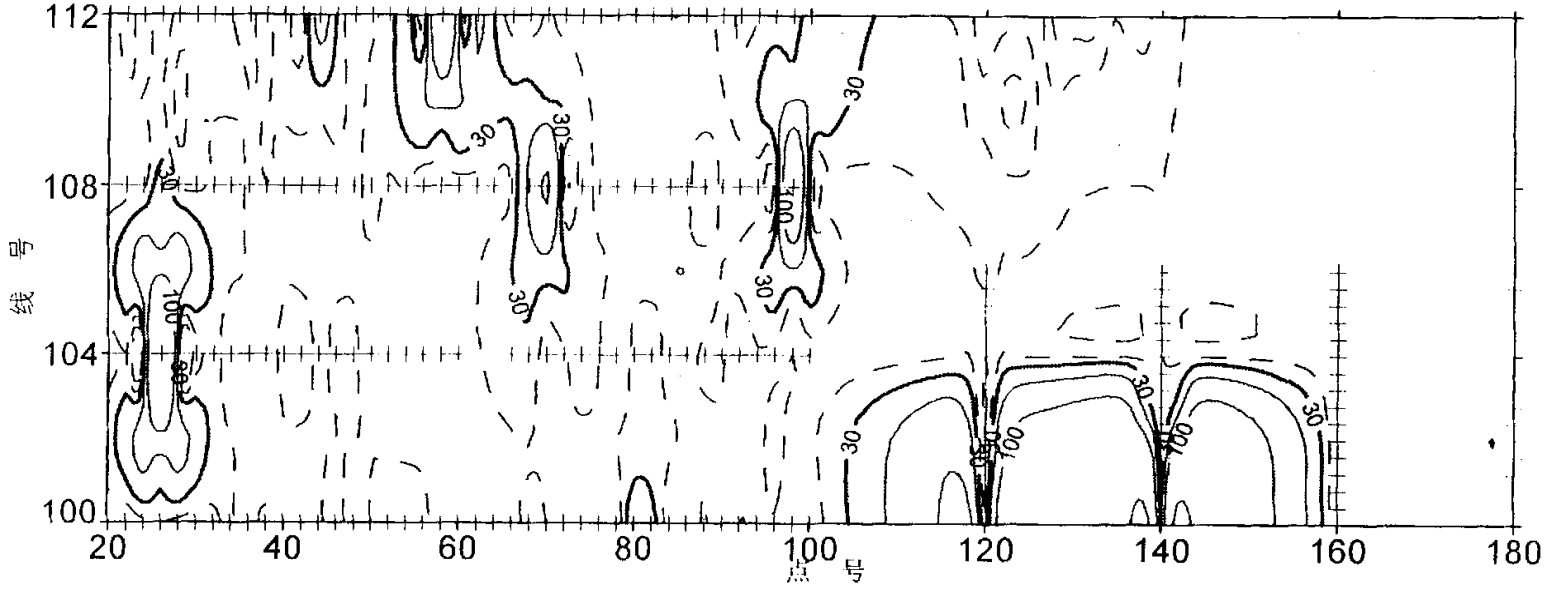


图 5-10 凤凰山铜矿南区地电化学提取金含量等值线图（异常边界为 40×10^{-9}）