第 23 卷　第 3 期　　地 球 物 理 学 进 展　　Vol. 23　No. 3
2008 年 6 月(页码:871～891)　　PROGRESS IN GEOPHYSICS　　June　2008

深部金属矿产资源地球物理勘查与应用

严加永[1,2]，　滕吉文[1,3]，　吕庆田[2,3]
(1. 中国科学院地质与地球物理研究所,北京 100029；　2. 中国地质科学院矿产资源研究所,北京 100037；　3. 吉林大学,长春 130026)

摘　要　随着找矿勘探工作程度的不断深入,许多露天的和近地表的金属矿产资源已基本上被查明,在地表浅部(第一深度空间:0～500 m 深度)找到大型或超大型金属矿床的难度将必越来越大,而金属矿产资源的短缺已在日益加剧.为了缓解当今的资源危机,必须进行深部找矿勘探(第二深度空间:500～2000 m 深度).这是因为在地壳深部具有良好的成矿环境和找矿潜力,地球物理勘探技术的发展与成效已使得深部找矿成为可能.本文通过分析和讨论国内外典型金属矿产资源找矿过程的实践表明:地球物理勘探方法发挥着重要作用,因为它具有大探测深度、高精度和高分辨率的特点,可为深部金属矿勘查提供有效信息,是第二深度空间找矿勘探的有力手段.近年来,国内外的实践表明,深部矿产资源的地球物理勘探取得了尚在不断取得重要成效.

关键词　金属矿床,资源紧缺,地球物理勘探,第二深度空间,应用成效
中图分类号　P631　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　1004-2903(2008)03-0871-21

Geophysical exploration and application of deep metallic ore resources

YAN Jia-yong[1,2]，　TENG Ji-wen[1,3]，　LÜ Qing-tian[2,3]
(1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*;　2. *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geoscience, Beijing* 100037, *China*;　3. *Jilin University, Changchun* 130026, *China*)

Abstract　With strengthening of geological and mineral exploration, a great deal of strip mines and near surface mine hare been be found out. It is more and more difficult to find great metallic ore deposits in shallow subsurface (first deep space: 0～500m depth). On the other hand, the shortage of metallic ore resources becomes more and more serious. In order to decrease this crisis of resources, deep metallic ore exploration (second deep space: 500～2000m depth) must be carried out as soon as possible. There are good metallogenic conditions in deep subsurface and the development of geophysical techniques makes deep mineral exploration become feasible. In this paper, we make analyses and discussion of the important role of geophysics in deep ore exploration on representative deep ore deposits in abroad and China. The geophysical methods can probe great depths with high precision so can provide effective information on deep ore depositions. In recent years, many practices all over the world indicate that geophysical exploration of deep mineral resources hare obtained and are obtaining important results.

Keywords　metallic ore exploration, resource shortage, geophysical exploration, second deep space, application effect

0　引　言

随着我国经济建设的快速持续发展,需要大量资源的消耗,而当今常用性金属大宗矿产资源的紧缺形势正在日益加剧,现有 25 种主要金属矿产的 415 座大中型矿山中,已有 192 座(占 46.2 %)面临着不同程度的资源危机①.因此,急需加强危机矿山的深部和外围的找矿工作,发现接替资源,延长矿山寿命.这不仅可以缓解资源供给的紧缺格局,促进矿业可持续发展,而且有助于矿山和矿区职工就业与

收稿日期　2007-12-14；　**修回日期**　2008-03-12.
基金项目　中央级公益性科研院所科研业务费专项资金(K2007 - 4 - 3)、"十一五"国家支撑计划项目<立体地质填图、流体填图技术与深部成矿预测示范研究>(2006BAB01B01)和中国科学院学部 2007 年咨询项目联合资助.
作者简介　严加永,男,1977 年生,中科院博士研究生.主要从事深部金属矿产资源地球物理勘查研究.(E-mail: yanjy@163.com)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

社会稳定,这在维护国家资源安全供给,有着重要的社会和经济意义,并已成为当今新形势下地球科学工作者必须承担的重大使命.

当今国家所公布的资源量仅仅是 0～500m 深度,即第一深度空间找矿、勘探和开发的资源量,尚不能完全表征全国金属矿产资源量的全部.基于现阶段地球物理探测技术、开采技术的发展水平,将深部金属矿产勘查的深度范围确定为 500～2000 m (第二深度空间)[1] (下文中将深部金属矿勘查简称为"深部找矿")的理念在我国经济可持续发展中具有重要的科学和实践意义.

基于成矿理论研究和分析,成矿的深层过程[2]和有利空间是一种颇具战略意义的找矿新理论,在地下 5～10km 的深度范围正好是地壳内外动力作用的复合场,也是多种成矿要素发生突变与耦合的转折地带,适于大量岩浆运移、热液矿床的产出[3].通过对一些成矿区(带)的综合研究,一个大型热液成矿系统的垂直延伸可达 4～5 km 或更深[4].俄罗斯科拉半岛的超深科学钻井中,在地下 10 km 附近尚发现变超基性岩中有 Cu、Ni 硫化物和基性岩中有 Fe、Ti 矿化,幔源的金刚石矿可能最初形成在岩石圈底部.这便说明,在地壳中相当大的深度范围内,均具有形成金属矿床的有利空间和条件,即存在着深部成矿勘探的巨大潜力.

近年来,国内外深部找矿成效明显,直接证明了深部找矿的巨大潜力.国外对深部找矿十分重视,深部找矿理论和技术方法日趋成熟.政府的强力支持,矿业企业的高强度投入,基于成矿理论建立的矿床模型的指导,新技术新方法的联合探测,综合信息的提取,大密度的工程施工是深部找矿成功的关键.国外已深部新发现了数十个大型—超大型隐伏矿床,如加拿大 Sudbury 铜镍矿的勘探深度已达 - 2430 m;南非 Carlrtonville 金矿田的 Western Deep Level 金矿,勘探深度达到 - 4000 m 以下.卡林金矿在 550 m 深部发现储量达 311 t 的高品位的波斯特—贝茨硫化物金矿.国内深部找矿也有所突破,安徽庐江泥河铁矿在孔深 675～1096 m 见到较大厚度铁矿体.辽宁本溪桥头深部 1279 m 深处开始见到铁矿体,至 1500 m 终孔时仍在矿体内.河南舞阳—新蔡地区 860～890 m 见到条带状磁铁矿层.山东省济宁铁矿钻孔至 1600 m 深度后见 3 层磁铁矿体.辽宁红透山铜矿勘探深度达 1300 m.山东省莱州市寺庄金矿据专家预测,在 500～1500 m 的第二找矿空间,尚有 2000 t 以上的找矿潜力.通过对驱龙铜矿实施整体勘查,加大探矿深度,钻孔控制的重大深度达 901 m.普朗铜矿目前最深钻孔已达 801 m.雄村铜金矿勘探深度已经达到 800 多米[5,6].

然而,当今人类尚无法直接目睹地下深部的物质成分与地质结构,因此,传统的地质方法已失去了直接进行深部金属矿找矿与勘查的能力,深部找矿的难度巨大[7].地球物理找矿勘探方法与技术是在当今高新科学技术成果不断应用和创新下发展起来的,故具有探测深度大、分辨率高、方法手段多元化的特点,能为深部找矿勘探提供丰富的信息.高精度的重、磁、电法可在较大范围内探测地下介质结构、构造和物质的物理—力学属性,特别是深部物质与能量交换及其深层动力过程.而人工源地震和大地电磁方法则可以给出深达数十公里处的精细结构,为此,地球物理勘探在深部找矿勘探中发挥着并不断发挥着至关重要的作用,将必是这一历史进程中的核心勘探手段[8].近年来,在国内外深部找矿勘探的实践中,在第二深度空间已发现,且还在不断发现大量的大型、超大型矿床和多金属矿集区[1,9,10,11],这不仅大为缓解金属矿资源的对外依存度,而且还能在可共享世界资源的同时,立足本土,并为建设起安全、稳定和长期供给的战略后备基地不断的打下坚实的基础.

1 地球物理勘探在深部找矿中的主要作用

1.1 开展深部地学填图,优选深部找矿靶区

通过深部地学填图,可以从区域成矿背景和成矿规律来圈定和优选深部找矿靶区.地球物理方法在深部地学填图中可解决以下几个主要问题:

(1)确定沉积盖层构造和风化层的厚度,研究基底的起伏变化.俄罗斯奥罗尼日结晶地块的铜、镍矿床与前寒武纪结晶基底的基性-超基性侵入岩有密切相关,而该基底上普遍覆盖有 300m 左右的中-新生代沉积建造[12].为探明基底起伏变化,利用 1:5 万重磁资料进行深部填图、并结合钻孔资料查明了基底起伏,圈定了多个重要的具有深部找矿潜力的有利靶区.

(2)建立深部地球物理反演模型,确定深部构造环境.金属矿床的形成在岩浆作用下往往与深大断

①吕古贤,郑大瑜,朱裕生,等. 2003. 危机矿产资源潜力调查与评价. 中国地质调查局地质调查项目成果报告(编号: 200110200104). 121～124.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

裂有关,例如俄罗斯乌拉尔铜矿区[13]、美国内华达佛罗里达大峡谷金矿床[14]等均为沿着深大断层分布,利用区域航磁资料和区域重力资料的线性异常与断裂的正相关关系,准确的确定了深大断裂延伸,为勘探靶区的圈定提供了重要依据.

(3)进行深部岩性填图,确定赋矿层位.基于金属矿床的形成与分布与花岗岩体、基性-超基性侵入岩体有着直接或间接的关系,故利用地球物理方法可以进行深部岩性填图,确定不同物理属性岩体的异常场展布和形态.美国卡林型金矿与深成花岗岩体有关,美国地调局利用区域磁测数据,编制了内华达深成花岗岩分布图,推断出了可能存在卡林型金矿的部位[15].

澳大利亚的"玻璃地球计划"(The Glass Earth)是一项包含以上 3 项功能的综合性计划,其目的是使澳大利亚大陆地表以下一千米内所发生的深层过程变得透明,以便可以发现澳大利亚下一代巨型矿床,其实质就是进行深部立体地学填图.地球物理勘探在其中起到的重要作用为:地震和电、磁方法用以确定深部控矿构造和围岩分层以建立初始模型,利用航空重力梯度测量、航空磁力张量梯度测量可获取高精度数据,并通过三维重磁模拟和多尺度分析来约束和修改初始模型,以确定地质界线、构造和岩体分布等信息[16,17].目前,该计划获得了较大进展,发现了大批深部隐伏矿床.

1.2　金属矿产资源形成的深部原因

地下浅表处所见的金属矿产资源,如大型、超大型矿床和多金属矿集区的形成,均是由于地球内部在地史期间深部物质与能量的交换所致,而不是近地表处形成与堆积的[2,9,11].因为矿物元素的分异、调整、运移和聚集,即大型、超大型矿床和多金属矿集区的形成与分布是受着深部物质与能量的交换和其物理-力学-化学过程的制约,即热物质在运移和上涌过程中与壳、幔介质围岩的蚀变交代与变质作用而逐渐聚积的.为此就必须涉及到地球深处壳、幔介质与构造格局、物质状态、运移行为、物质属性和其空间展布的深层动力过程[10].传统的地质方法很难解决这些深层次的问题,虽然大陆超深钻探和深井钻探能直接给出地下深部信息,但是,目前世界上最深的钻孔,如前苏联的科拉半岛超深钻井的深度也仅达到 12261 m,无法解决更深层的地下结构,况且超深钻井的成本巨大,不可能到处布置超深钻井.因此,解决这些问题只能依靠地球物理方法[18,19],如天然地震、大地电磁等大探测深度的方法.澳大利亚在高勒克拉通地区开展的地震和大地电磁探测,不但可查明地壳(0～50 km)结构,而且基本查明了奥林匹克坝矿区成矿流体的来源、运移通道和含矿物质的沉积等问题,并对奥林匹克坝大型矿集区的成因给出了合理解释.

1.3　直接寻找深部隐伏盲矿体

对一些与围岩有着明显物性差异的深部隐伏矿体,航空和地面地球物理方法可以用来直接找矿,特别是低空飞行、或利用直升机进行的高精度地球物理探测.国土资源部航遥中心在大冶铁矿区进行的大比例尺直升机航空磁法和电磁法测量,并依据精细解释结果布设的钻孔,已有三孔见矿,其中的 ZK21-8 孔,于孔深 721.98～770.37 m 间发现了 6 层铁矿体,累计厚 14.8 m,矿石中矿物主要为磁铁矿,磁黄铁矿、黄铜矿等,采用同样的方法,在狮子山西侧亦布设了 ZK26-6 孔并已于 732 m 见矿,其铁矿体厚度为 4.44 m[20].

利用已有钻孔,进行井中地球物理勘查,可以直接探查井旁具有良导体、高密度的金属矿体.西方国家非常重视井中地球物理方法,如井中激电、井中 TEM 等方法.加拿大利用井中 TEM 在北奇瑟尔(Chisel North)锌铜矿床 500m 左右深度处直接发现了矿体,为该矿床增加了约 300 万吨的矿石资源量.近年来,澳大利亚在奥林匹克坝矿区钻孔密集区开展了井中 TEM 方法,在矿区深部发现了大量的块状硫化物矿床[21].

2　国外几个典型矿床的深部地球物理勘查

2.1　加拿大萨德伯里(Sudbury)铜、镍矿区

2.1.1　矿区概况及地质背景

萨德伯里矿区是世界上著名的铜、镍矿区,位于加拿大地盾南部,萨德伯里市北缘.控矿构造为一北东向延伸 60 km 多的向斜,宽约 30 km,铜、镍矿均产出于该构造岩体的边缘.岩体围岩为元古代的砂岩、石英岩、角闪岩和凝灰岩,岩盆中岩相分异明显,自下而上,由边缘向中心为苏长岩、辉长岩和花岗斑岩,其间有分异的花岗岩和石英闪长岩侵入,岩体向中心倾斜,铜、镍矿直接赋存于苏长岩的底部[22].该矿区已知的大型矿床 10 余个,中、小型矿床 30 余个(图 1).在萨德伯里矿区深部相续发现了大量的矿床和矿点,例如维克多矿床主矿体位于 1520 m 与 1672 m 深度之间,目前最深的钻孔已经达到 3057 m,在 2500 m 的部位仍然见到大量浸染状镍硫化物.通过深部勘探,在老矿区深部及边部发现了一系列矿床,故使这个 1889 年发现的老矿区铜、镍储量

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

增加到 1 亿多吨,并已成为目前世界上最大的铜、镍矿产区. 萨德伯里矿区最深的勘探深度现已达 2430 m,开采深度已经超过 2000 m,是一个典型的第二深度空间赋存的深部金属矿床集中区.

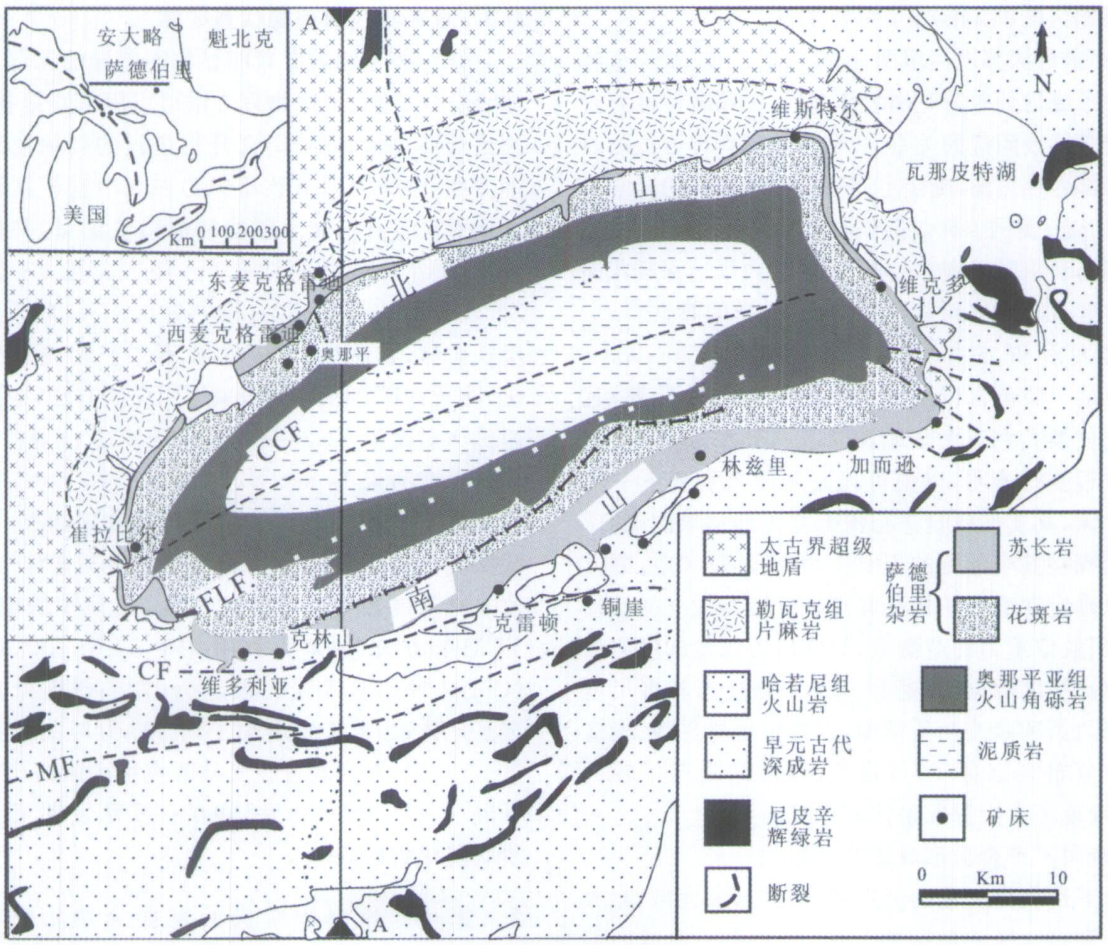


图 1 萨德伯里金属矿区地质图

Fig. 1 Geological map of Sudbury metallic ore deposit area

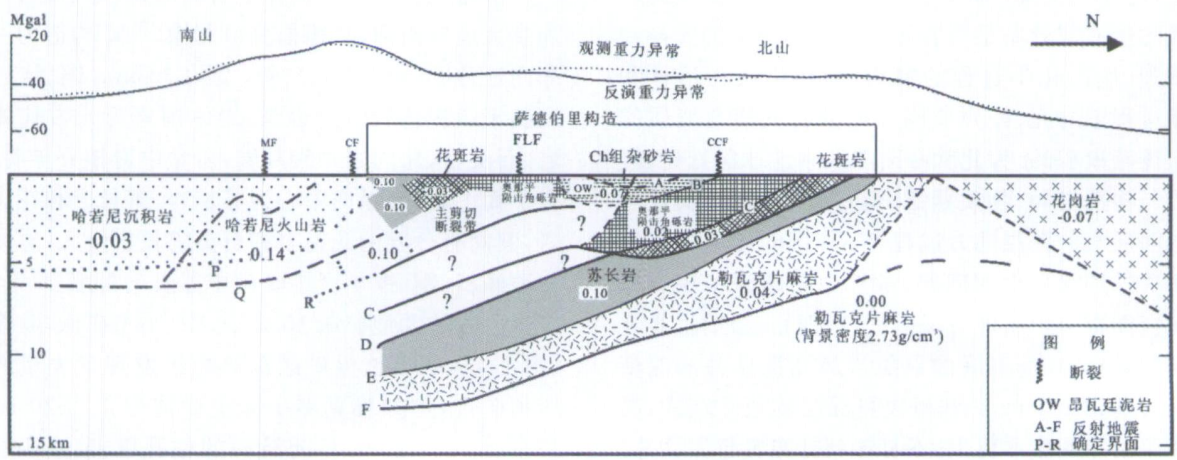


图 2 A-A′剖面地震和重力测量联合反演剖面

Fig. 2 Cross section of joint inversion of seismic and gravity data along A-A′line

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.1.2　地球物理方法在深部找矿中的效应

经过多年研究,很多地质学家们均认为萨德伯里的铜、镍矿化分布和萨德伯里火成杂岩体有着密切的关系. 随着深部找矿的需求,查明萨德伯里盆地的深部构造确定火成杂岩体的底面深度就成为一个急需解决的关键问题. 基于常规浅表处找矿勘探的地质方法已难以凑效,而探测深度大的地震和高精度重力勘探方法及其综合效应便成为解决这一问题的重要途径.

作为 Lithoprobe 计划的一部分,在萨德伯里完成了 100 km 的高分辨率反射地震剖面和 40 km 的高频地震剖面. 常规反射地震采用扫描频率为 10～55 Hz 的可控震源,60 次覆盖. 高频地震剖面采用 20 m 道间距,扫描频率范围为 30～140 Hz,记录时间 4 s,120 次覆盖. 通过静校正、动校正、叠加、偏移等方法进行地震数据处理,获得了较好的地震剖面[23]. 沿 Lithoprobe 地震剖面,完成了点距 1 km 的高精度重力测量,在地震剖面给出的界面深度和依钻孔确定的不同层位等条件约束下,建立了地下模型,并据此模型进行联合反演,其中一条剖面(图 1 中的 A - A 剖面)的联合反演结果示于图 2.

由该图可见,萨德伯里在深部构造上的明显不对称,北部 E 和 F 反射界面为花岗岩-苏长岩和苏长岩-底板界面的反映,证明萨德伯里北山是由向南倾斜的底板片麻岩、萨德伯里火成杂岩及沉积岩组成的,构造起伏不大. 高频地震结果发现盆地中心下面的构造样式发生了变化,靠近萨德伯里火成杂岩地带中轴部的沉积岩层被断层错开,而底板片麻岩和杂岩带的铁镁质岩则继续向南倾,在盆地中心可延伸到 4.5 km 深度,而在南山则深达 13 km. 南山的地震反射界面以向北陡倾和南倾为主,有些南倾的反射面向上可投影到南山剪切带上,其它反射界面可解释为单独的主剪切带和断层. 这些剪切带和断层上的岩性呈叠瓦状,而萨德伯里构造在 NW-SE 方向发生明显的缩短作用. 地震提供了本区岩性单元厚度的重要信息,地震解释结果表明,在盆地中心下方,Ch 亚组最大厚度达 500 m,Ow 组厚达 1500 m,Op 组和花岗斑岩的总厚度达 2500 m,而在南山下则达 900 m.

在初步查明萨德伯里深部构造的基础上,针对在萨德伯里火成杂岩接触带底板以下还存在很富的底板型矿床. 因此,利用井中瞬变电磁法(DHEM)勘探,使钻孔的勘查半径从 10 cm 扩大到 200～300 m[24]. 在萨德伯里林兹里矿床开展的 DHEM 探测(图 3),虽然钻孔 7 中没有打到苏长岩的接触带,但是利用 DHEM 在钻孔 7 中观测到的负异常,经过分析认为其旁可能侧存在良导体,且可能是一个形状复杂的弯曲状的良导体,经过其余钻孔(1～6)的验证,在地下 600～1280 m 间找到了高品位矿体[25]. 随后,利用 DHEM 在萨德伯里矿区相继发现了深达 2430 m 的大型、高品位的维克多矿床,深 1370 m 含 Cu 达 9.9 %、Ni 达 0.9 %的东麦克格雷迪矿床,最深达 2190 m的克雷顿矿床(矿床位置见图 1).

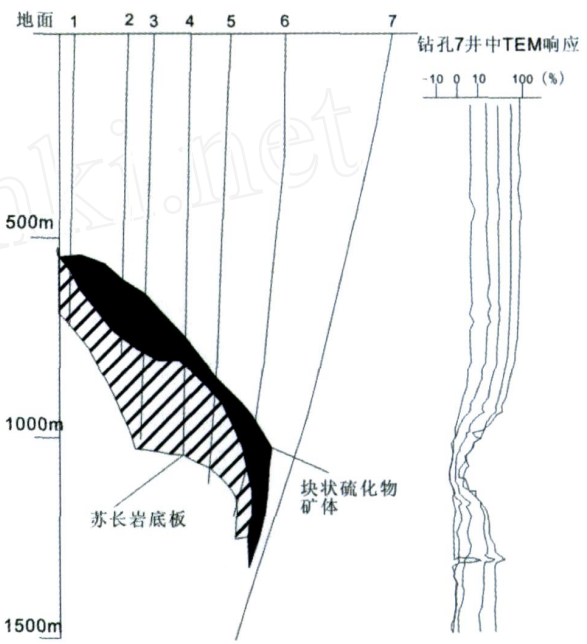


图 3　林兹里矿床钻孔 7 中 DHEM 测量结果与钻探验证图

Fig. 3　DHEM survey and drilling validation result at drillhole 7 in Linsley

通过地震反射和重力反演,初步查明了萨德伯里深部构造的基本特征:即在深部具有明显的不对称特征,而萨德伯里火成杂岩底面深度为 10 km,基本上反映了主要地层界面的形态和深度,并推断出控矿的凹槽部位. 利用老钻孔和一批新钻孔,采用 DHEM 勘查扩大了范围,直接发现了深部良导体,进而圈定出深部矿体. 利用地震和重力测量确定深部构造,结合 DHEM 直接寻找井间盲矿体的技术组合,对萨德伯里深部找矿特别是寻找底板型矿床具有重大意义.

2.2　澳大利亚奥林匹克坝(Olympic dam)铜、铀、金矿区

2.2.1　矿区概况及地质背景

奥林匹克坝矿区位于澳大利亚南部阿德莱德城

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

附近,是世界上著名的铜-金-铀-银矿床. 该矿区于1974 年发现,以铀、铜为主,铀储量居世界第一,铜储量世界第六,并伴有、金、银、铁 、稀土元素等. 该矿区在大地构造上位于高勒克拉通与阿德莱德地槽衔接部位的斯图尔陆棚区,且与元古宙裂谷环境密切相关[20] (图 4). 该矿区直接位于一条长 7 km、宽 4 km 以断层为界的 NWW 向裂陷带 —"奥林匹克坝地堑"内,其基底地层为中元古代奥林匹克坝组碱性花岗岩[26]. 主要含矿岩为产状较陡的碎裂花岗岩和角砾岩杂岩体,中心主要为富赤铁矿角砾岩(面积约 1.5 ×2.5 km^2) ,现已探明其向下延伸大于 1 km,属于深部空间金属矿床范畴. 杂岩体中分布有铜、铀矿和金矿带,铜、铀矿带由斑铜矿、辉铜矿和黄铜矿组成两个亚带,铀矿体则产于斑铜矿和辉铜矿亚带的上部. 金矿带分布于角砾岩上部. 它们的成矿主要发生于热液喷发及热液角砾岩形成阶段:其中以铜形成最早,其次为铀,金最晚. 矿质来自深源流体,矿床成因以内生为主,内生与表生相结合[27].

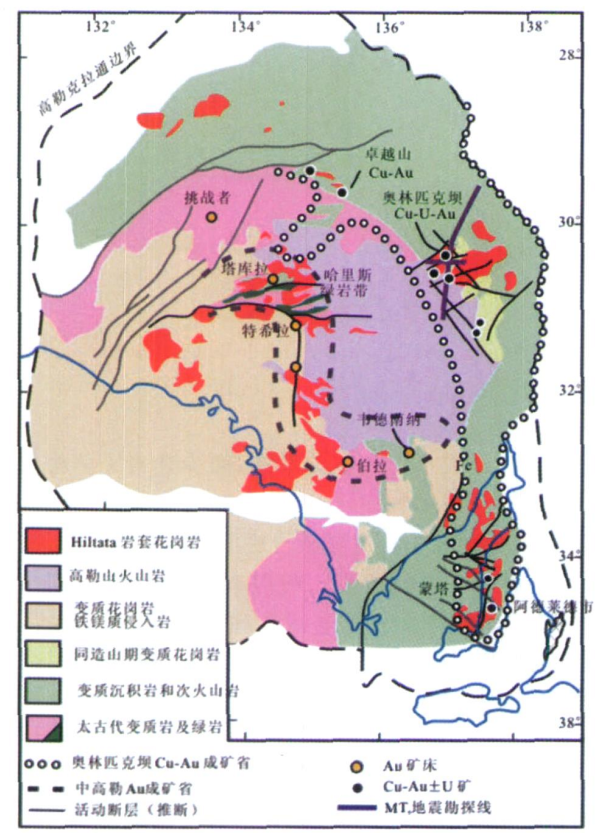


图 4 奥林匹克坝金属矿区地质图

Fig. 4 Sketch geological map of Olympic dam ore deposit area

2.2.2 地球物理方法在深部找矿中的效应

在奥林匹克坝矿床的发现过程中,重、磁方法就起到了重要作用. 从 1957 年西部矿业有限公司根据"世界和澳大利亚等大型铜矿均产于元古界地层或岩石中"的认识为导向开始了在元古界地层中的找铜工作. 发现重、磁异常可能是由隐伏于中生代沉积物之下的玄武岩引起的,并注意到一些地区的铜矿具有重力和航磁高值的一致性等. E. S. 奥德里斯科尔根据西澳找矿经验,总结出澳大利亚许多大型矿床与区域线性构造有着密切关系. 根据区域重、磁资料,发现奥林匹克坝地区的几个大型构造系统是 WNW、NNW 和 NNE 向线性构造体,其中 WNW 向大型线状异常带与成矿关系最为密切(图 5). 为此,利用线性构造分析来确定构造靶区,在 Andamooka 图幅内,在 8 个地球物理异常靶区中的四个靶区符合构造靶条件. 因此,在奥林匹克坝重力、航磁 —构造重叠靶区布置了钻探验证,在 RD1 钻孔深度 700m 附近发现了 38 m 厚的矿层,岩心中含铜达 1 %,为这个巨型矿床的深部找矿开启了大门[22].

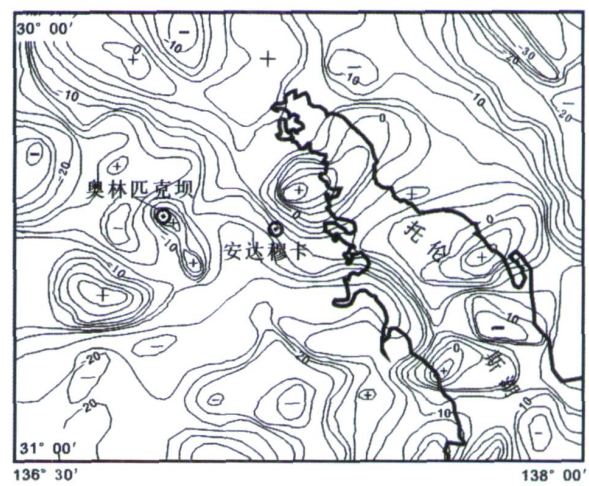


图 5 奥林匹克坝矿区区域重力异常图

Fig. 5 Gravity anomaly map of Olympic dam ore deposits

随着大规模的开采,奥林匹克坝深部找矿的问题也显得日益突出. 当今普遍认为:奥林匹克坝矿床的形成是来自深部地壳和地幔的铁镁质物质在铁氧化层和深部流体之间沉积形成的,但是,含矿流体的路径和侵入机制尚未明确[28]. 为解决此问题,大探测深度的大地电磁测深(MT)和人工源深层地震勘探相继在奥林匹克坝矿区开展(测线位置见图 4). 穿过奥林匹克坝矿区及主要地壳边界完成了北东-南西向长 200 km 以上的大地电磁测深(MT)剖面,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

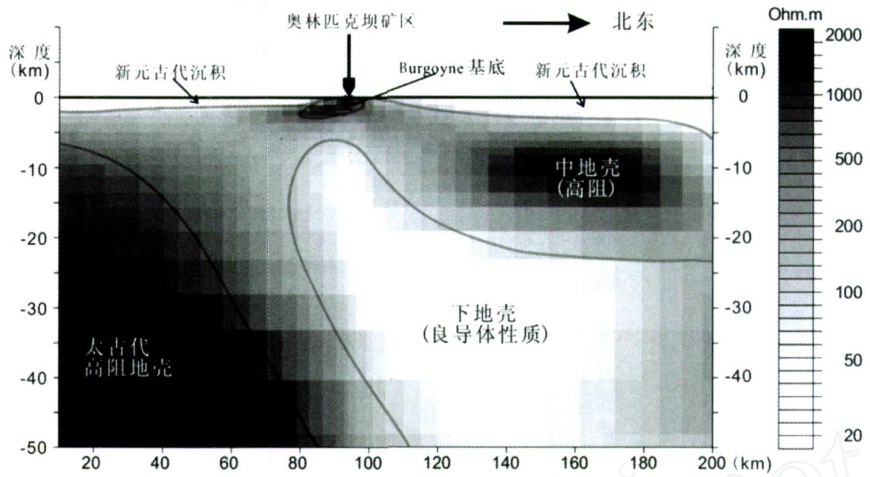


图 6　穿过奥林匹克坝矿区的 MT 二维平滑反演[32]电阻率剖面图
(据 Graham S. Heinson 修改)

Fig. 6　2D Resistivity section of 2D smoothed MT inversion actoss Olympic Dam ore deposit area

通过二维反演求得了电阻率测深断面(图 6). 该 MT 测深剖面显示出奥林匹克坝西南部为高电阻率(>1000 Ω·m)的太古代地壳,推测大部分为麻粒岩,原因是良导体的自由流体与麻粒岩相变质岩不相容[29]. 反演结果清晰的刻画出了 Burgoyne 基底,容矿的奥林匹克坝角砾杂岩恰好切穿了该基底[30]. 奥林匹克坝矿床下面的地壳为低电阻率,与人工源深地震层析成像的透明(低反射)率区域一致. 在西南部高阻的太古代地壳与东北良导体下地壳之间地段,结合深地震成像结果,推测是一条深至壳内的深大断裂带,来自下地壳和上地幔富含 CO_2 的流体通过该大型断裂向上运移[31],在某些部位沉积形成了含石墨较高的岩石,从而导致电阻率和反射率降低. 该深大断裂也被证实是含矿热液的运移通道,该通道的形成晚于 Hiltaba 组花岗岩,而奥林匹克坝矿床的成矿年代也稍晚于 Hiltaba 组花岗岩,来自幔源的流体富含混合 U 和 Au,沿着该通道向上迁移,并在奥林匹克坝角砾杂岩带沉积,故形成了这个巨型的铁氧化 U-Cu-Au-REE 矿床[32,33].

在奥林匹克坝矿床的发现过程中,地球物理勘探就起到了重要作用,特别是区域重、磁资料反演、分析和解释,圈定了多个找矿靶区. 在进入深部找矿阶段后,大探测深度的人工源深地震和大地电磁测深在整个高勒克拉通地区进行的深部地壳结构探测,查明了该大型矿集区的成因,为深部找矿奠定了理论基础,同时,也为寻找深部金属矿产资源指出了范围.

2.3　南非兰德金矿

2.3.1　矿区概况及地质背景南非维特瓦特斯兰德盆地(Witwatersrand 以下简称兰德盆地)的砾岩型金矿是世界上最重要的金矿类型,约一百年来,其黄金产量居世界各种类型金矿之首. 兰德盆地位于南非共和国约翰内斯堡以南至韦尔科姆(Welkom)之间,呈北东向狭长展布,盆地面积约 25000 km^2,沿盆地北、西、南三面分布有 Evander、East Rand、Cen-

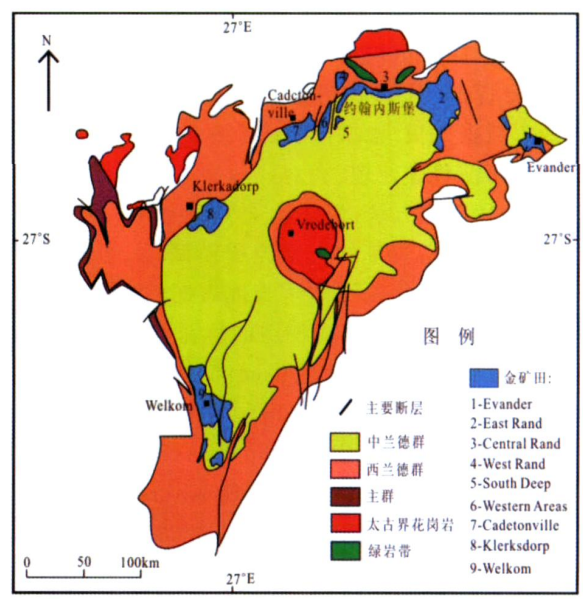


图 7　兰德盆地金矿分布及区域地质图
(据 Hartwig E.[39] 修改)

Fig. 7　Gold deposit location and areal geological map of Witwatersrand

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

tralRand、WestRand、Carlrtonville、Klerkdorp 和 Welkom 等 9 个金矿田(图 7),总计有 100 多个金矿床.目前,Western Deep Level 金矿已开采到 4800 m,不久可达 5000 m 左右[35,36].

兰德盆地内的砾岩型金矿床绝大多数是碎屑沉积成因的,金矿经历了沉积成矿作用和沉积后改造作用两个阶段:金、铀等呈碎屑以机械形式由河流从内陆搬运到盆地边缘,在砾岩中富集,然后在埋藏和成岩作用期间,金矿又受到流体的改造[37].兰德金矿多为复合叠加型的沉积-热液矿床,并伴有热液交代作用和晚期动力变质作用,金主要产出于中兰德群砾岩中,金矿石的主要矿物为黄铁矿,次要矿物为黄铜矿、镍黄铁矿和其他硫化物[38].矿床的矿化仅与砾岩层有关,其内金呈不均匀分布,受断裂控制.

2.3.2 地球物理方法在深部找矿中的效应

在兰德金矿田勘探过程中,地球物理方法就起到了重要作用,根据东兰德金矿田在含金砾岩层下部一定深度处有一层磁性页岩的特点,曾利用磁法勘探确定隐伏和半隐伏的磁性页岩层,通过钻探控制了金矿床.但是随着开采深度的加深,深部找矿的难度也越来越大.为确定深部控矿构造及深部赋矿部位,一系列大勘探深度的物探方法相继在兰德盆地展开,其中,最有特色的就是在 Welkom 金矿田开展了 3 维人工源地震勘探.

3D 地震数据采集由著名的地球物理服务公司 CGG 负责,采用 20 次叠加,完成了 13 ×5 km 范围的地震数据采集.根据传统的数据处理流程,进行了叠前时间偏移等处理.在对比垂直和水平切片的基础上,利用成像方法,最终建立了 2 个 3D 地震体模型.利用这个高质量的三维地震模型,从反射振幅、瞬时频率、瞬时相位和倾角等地震属性中提取了详细的地质信息,增强了对构造的解释,如利用相位属性进行含矿砾岩的岩性变化成像、控矿断裂的展布方式分析等.结合该矿区完成的钻孔资料发现:Welkom 金矿主要产出于 Klipriviersberg 群下部的中兰德群砾岩中.声波测井发现 Klipriviersberg 火山岩的地震波 P 波速度为 6000～6500 m/s 之间,其他沉积岩层的 P 波速度为 5600～5900 m/s 之间,可见赋矿层顶部与非赋矿层围岩存在着明显的速度差,即波阻抗差,故能产生较强反射.图 8 是从 3D 地震数据体中抽取的一条东西向断面,该断面揭示了该控矿构造特征,能量较强的同相轴是 Klipriviersberg 群火山岩界面的反映,其下面为含矿砾岩层.利用地震振幅属性,基本查明了 2000 m 深度处赋矿有利部位.地震剖面还清楚地显示出主要的控矿断裂,如 Eldorado 等断裂等.结合提取三维地震剖面图像中的其它属性,在地震探测区内发现了 22 个含金的砾岩体.根据三维地震的解释结果,在 Welkom 金矿田部署了 50 多个钻孔,在 1800～2800 m 深度范围内均发现了多个具工业品位的金矿体[40].

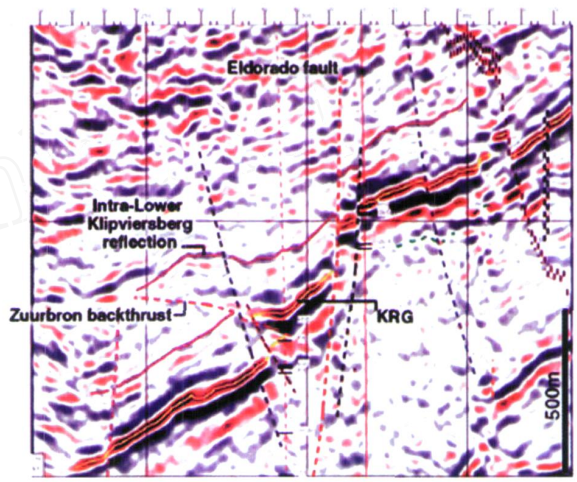


图 8 Welkom 金矿床一条地震解释剖面
注:KRG-Klipriviersberg 群火山岩底面反射界面
Fig. 8 Seismic interpretation section
of Welkom golden deposit in Witwatersrand

可见,利用三维地震勘探可以查明含矿层位的深度和空间形态,结合一定的钻孔控制、地质观察和地震图像,甚至可以提供小尺度断裂(最小 10～20 m)的空间展布以及含矿层位的岩性变化,为深部找矿提供丰富的信息.Welkom 金矿田的三维地震勘探,为深部找矿指明了方向,大大降低了勘探风险.

2.4 俄罗斯诺里尔斯克(Norilsk)铜、镍多金属矿集区

2.4.1 矿区概况及地质背景

诺里尔斯克铜、镍矿区位于西伯利亚北部泰梅尔半岛的叶尼塞河河口处,主要有塔尔纳赫矿床和十月矿床(见图 9).该矿区是俄罗斯镍、铜、钴、铂的主要产地,初步探明 cu 储量 545 万吨、镍 360 万吨.诺尔里斯克矿区在构造上属于西伯利亚克拉通的西北缘,其交界带属于贝加尔期褶皱带,克拉通基底为元古界地层[41].铜、镍硫化物矿体主要与两种特殊的基性、超基性侵入体有关,即诺里尔斯克(Norilsk)型和塔尔纳赫(Talnakh)型,这两种类型的侵入

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

岩都出现在诺里尔斯克-哈莱拉赫断裂带中. Noril-sk 型侵入岩本身就是容矿体,而 Talnakh 侵入体的下部和周围接触带为重要的成矿部位[42]. 含矿侵入体的分布主要受深部断裂的控制,控矿主断裂为北东向的诺里尔-哈莱拉赫断裂(图 9). 矿石主要为浸染状和致密块状硫化物,硫化矿物包括黄铜矿、镍黄铜矿、磁黄铁矿和黄铁矿.

2.4.2　地球物理方法在深部找矿中的效应

近年来,随着矿山的开采,浅部金属矿产资源逐渐面临枯竭,因此,必须要向深部发展,即要求探测和追索更深处的侵入体. 塔尔纳赫矿床分布与塔尔纳赫侵入体有着密切的关系,上世纪 60 年代,主要探测了其西南部较浅的部位,为扩大资源储量,探测工作开始向东北部转移,这里的侵入体埋藏深度在 700～2000 m 之间. 在深部找矿勘探过程中,主要采用的地球物理勘探方法是:高精度重力测量、瞬变电磁和电测深等方法.

地面观测的局部重力异常,幅值为 1.3 mGal,异常峰值对应于侵入体的加厚部位,异常中 30～40 %是侵入体接触带上的蚀变岩石引起的,分异含矿侵入体较不分异的侵入体蚀变带范围更大. 图 10 为塔尔纳赫侵入体东北部的模型. 据此模型计算断裂带以东侵入体的重力效应为0.7 mGal,以西为

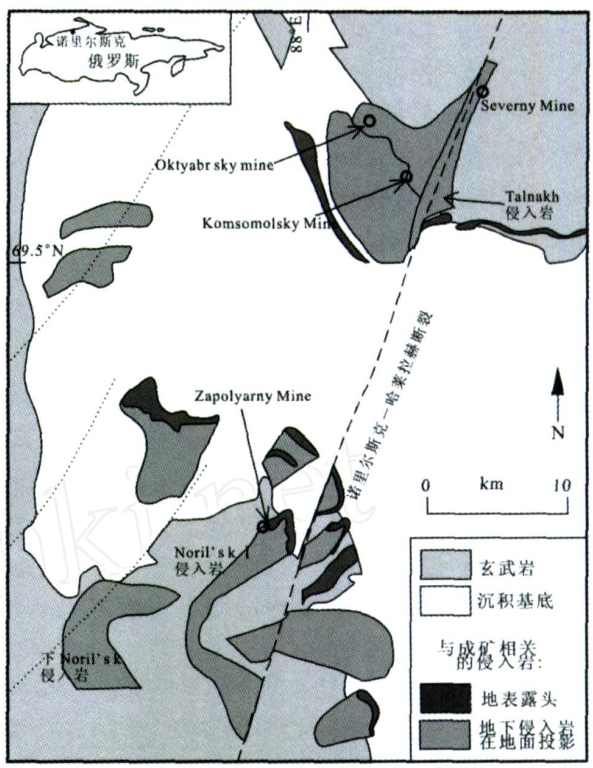


图 9　诺里尔斯克矿区地质简图

(据 Naldrett and Lightfoot, 1999[43]修编)

Fig. 9　Geologic map showing the spatially close association of ore-bearing and related mafic intrusions in the Noril′sk-Talnakh area, Siberia

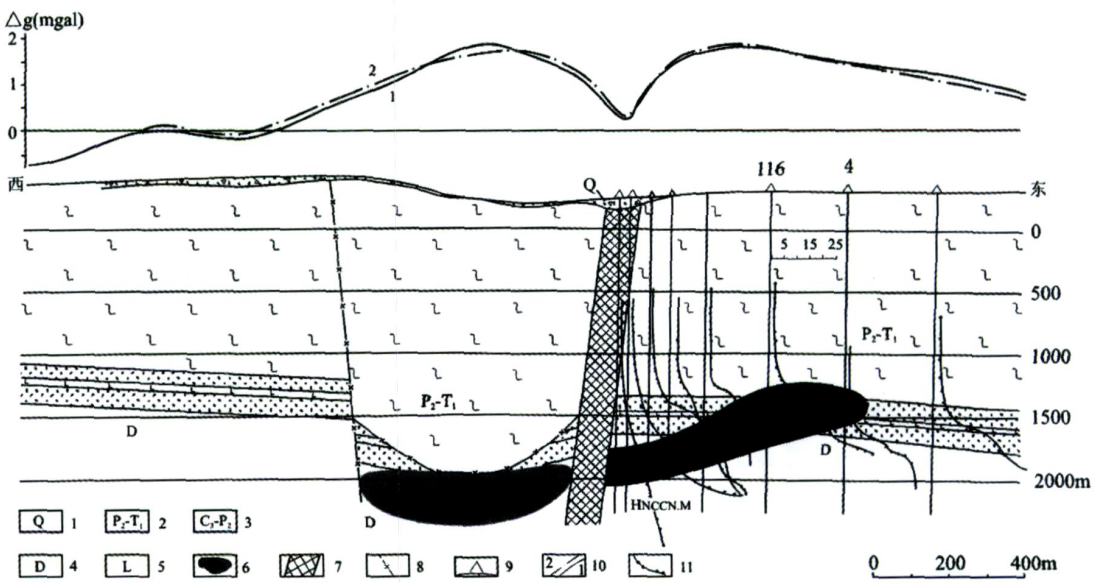


图 10　塔尔纳赫侵入体东北段地球物理反演地质模型

1. 第四纪沉积;2. 凝灰熔岩;3. 通古斯群;4. 泥盆纪;5. 席状辉绿岩;6. 塔尔纳赫侵入体及饰变带;7. 诺里尔-哈莱拉赫断裂带;8. 断裂;9. 钻孔和 TEM 测深点;10. Δg 剖面:(1)实测,(2)反演曲线;11. TEM 测深曲线

Fig. 10　Geophysical inversion model of northeast Talnakh intrude body

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0.4 mGal,蚀变岩石的重力效应 0.25 mGal,即该模型计算的重力效应与实测曲线一致[44].通过 TEM、电测深和钻孔确定侵入体的深度,首先利用视电导率曲线追索 10～40 Ω·m 的层位,该层与通古斯群对应,在测深点 116 点和 4 点之间该层位埋深发生突变,说明两点间有断距可达 250 m 左右的断层.在通古斯群下面电阻率为 300 Ω·m,厚 200～300 m 的层位为塔尔纳赫侵入体,再下面的电阻率升高的部位推测其为含矿层,通过钻孔控制验证了该模型的正确性,找到了较富的硫化物矿体,实现了深部找矿的有效突破[35].

在诺里尔斯克矿区,由于矿体埋藏较深,地球物理方法虽然没能用作直接找矿,但是,重力、TEM 和电测深在追索控矿侵入体埋深中发挥了重要作用.此外,在该矿区还对航磁数据进行了有效处理,建立了暗色岩的磁场模型,故可消除了暗色岩的干扰,清晰的反映出了诺里尔-哈莱拉赫深大断裂,而在此断裂附近发现了多个与成矿有关的侵入体(图 11).

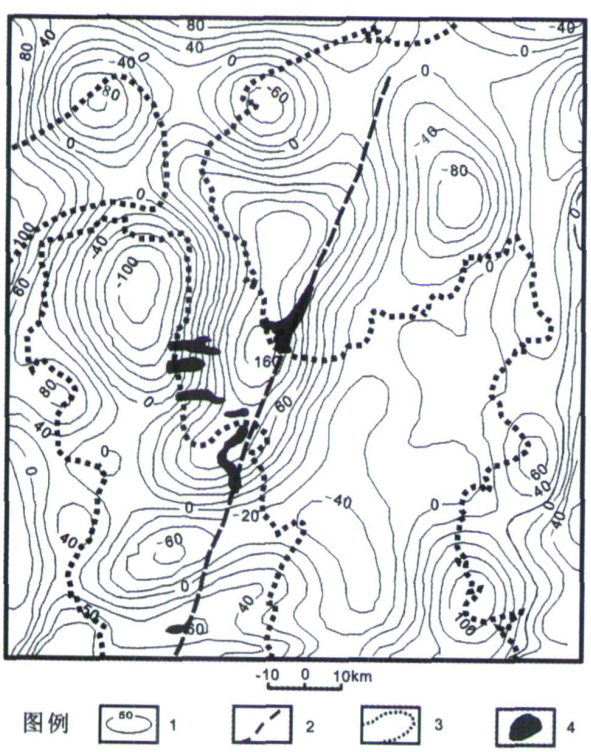


图 11 经暗色岩磁场模型滤波后的磁异常图
1.磁异常等值线;2. 诺里尔-哈莱拉赫断裂带;
3.侵入体轮廓;4.暗色岩层底板轮廓
Fig. 11 Magnetic anomalies after filter of dark rock magnetic model

3 我国近年来在深部找矿勘探中几个典型矿床的地球物理勘查

3.1 铜陵狮子山矿区

3.1.1 矿区概况及地质背景

狮子山矿区位于下扬子准地台东北缘,在构造上处于北东向复向斜内青山次级背斜的北东段,区内出露的地层为下、中三叠统的碳酸盐岩和页岩.印支期、燕山期的断裂构造与褶皱组成的复杂网格状格架,控制了区内岩浆和矿床分布.区内岩浆岩活动多呈岩墙—岩枝产出,以钙碱性—碱性系列的辉石闪长岩、石英闪长岩及花岗闪长岩为主,且与成矿关系密切.狮子山矿区是铜陵矿集区最为重要的铜矿区,它的成矿地质背景、控矿因素、矿化特征等,在整个长江中下游地区具有一定的代表性[45],在其周围分布有东、西狮子山、老鸦岭、花树坡、大团山等多个矿床,整体上构成了"众星捧月"式的矿集区(图 12).

狮子山矿田具有独特的"多层楼"式成矿特点[47]:花树坡矿床产于栖霞组(P_1q)底部含铅锌、铜硅质岩和孤峰组(P_1g)硅质岩中;老鸦岭矿床产于孤峰组顶部硅质岩、大隆组(P_2d)含钼-多金属硅质岩-黑色页岩及殷坑组(T_1y)条带状灰岩、泥岩中;大团山矿床产于殷坑组底部条带状灰岩(夕卡岩)和泥岩(角岩)互层中;西狮子山矿床产于和龙山组(T_1h)夕卡岩化-角岩化的泥灰岩夹页岩互层中,在狮子山矿田中最具特点是深部隐伏矿床-冬瓜山大型铜矿,则是"多层楼"中的最底层.冬瓜山铜矿床是狮子山矿田内埋藏最深(主矿体埋深在 680 m 至近 1000 m[48])储量最大(单个矿体的铜金属量近 100 万吨,铜平均品位为 1.01 %)的大型铜矿床.冬瓜山铜矿以层状铜矿为主,矿体主要赋存于石炭系中上统黄龙组—船山组地层之中,后期经历了热液叠加改造作用,在接触带附近发育有斑岩型矿化,形成了热液叠加改造型叠生式层状铜矿床[49].由于该区地质工作程度极高,在浅表地层中找到一定规模矿床的可能性已经非常小,因此,必须进行深部找矿,深部找矿的主攻方向则是寻找类似于冬瓜山矿床的深部介质和构造环境.

3.1.2 地球物理方法在深部找矿中的效应

重、磁资料的重新处理对狮子山矿区外围和深部找矿起到一定的指示作用:通过对狮子山矿田布格重力异常进行处理后的 1:5 万剩余重力异常(图 13 上)发现:局部串珠状正异常和负异常相间呈北东向排列分布的特点与矿田内背斜与向斜的相隔分布是一致的,胡村南侧的局部异常与乌栗山磁异常相吻合,作为一种重要的在已知矿床边部或外围寻找隐伏矿的标志,朱村向斜东侧第四系覆盖区的局

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

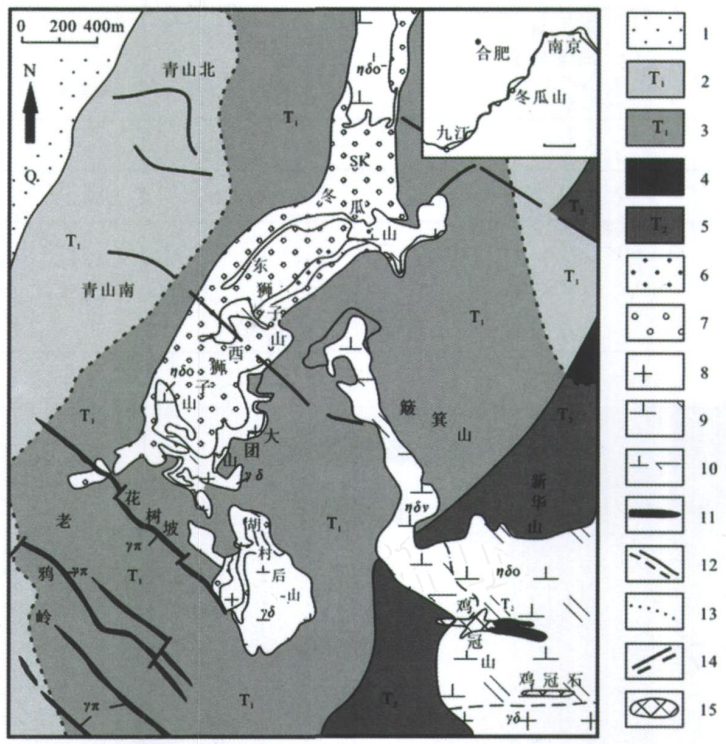


图 12　狮子山矿田区域地质矿产图

(据曾普胜[46]修改)

1. 第四系;2. 下三叠统灰岩;3. 下三叠统大理岩;4. 中三叠统白云岩;
5. 中三叠统白云质大理岩;6. 角岩;7. 矽卡岩;8. 花岗闪长岩;9. 石英二长闪长岩;
10. 辉石二长闪长岩;11. 花岗斑岩;12. 实测、推测地质界线;13. 接触变质界线;14. 实测、推测断裂;15. 矿体

Fig. 12　Geological and mineral map of Shizi Mt. mine field

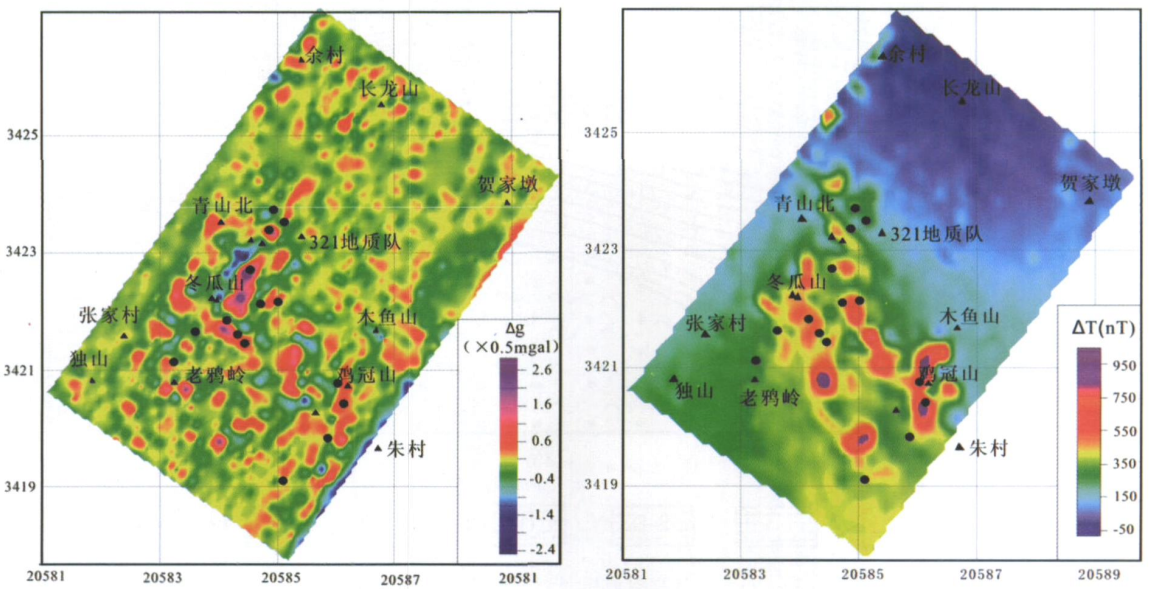


图 13　狮子山矿区剩余重力异常(左)和滤波化极磁异常(右)

Fig. 13　Residual gravity anomalies (left) and filtered and reduced to pole anomalies(right) of Shizi Mt. mine field, Tongling

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

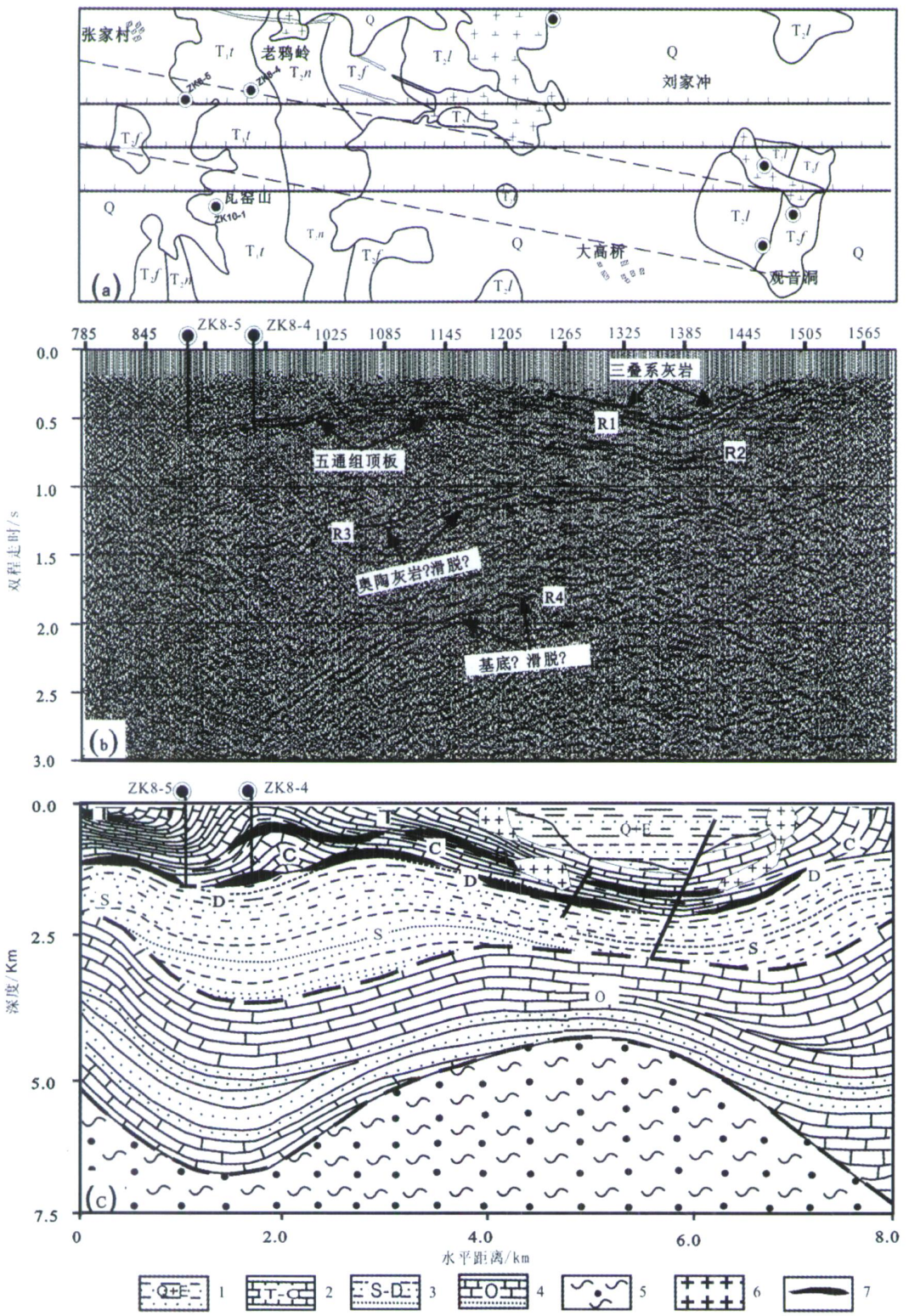


图 14 (a) **高分辨率地震探测剖面位置及地质简图**;
(b) **中心剖面**(TGS2) **叠加剖面**;(c) **对应** TGS2 **叠加剖面的地质解释**.
1. **第四系、老第三系**;2. **三叠系、二叠系和石炭系**;3. **志留系、泥盆系**;4. **奥陶系**;5. **基底**;6. **推测花岗岩体**;7. **推测的容矿层**

Fig. 14 (a) Simplified geological map showing the high resolution seismic reflection profiles; (b) Stackedsection of the central profile (TGS2); (c) Corresponding geological interpretation.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

部重力异常可能与局部的次级褶皱隆起有关,同时推测与埋深较大的隐伏矿体有关. 对磁测资料进行滤波化极处理后(图 13 下),对比异常与矿床分布关系,发现局部磁异常与矽卡岩带对应,即沿岩体与围岩接触带分布,几个典型的接触带矽卡岩型矿床,东狮子山、胡村、新华山等与强磁异常一一对应[50].

泥盆系五通组和石炭系黄龙组界面是狮子山矿田(如冬瓜山矿床)的主要容矿、控矿层位,为准确确定该界面的空间分布情况,在铜陵矿集区的狮子山矿田开展了高分辨率反射地震试验研究[51]. 图 14 是工区地质简图和 TGS2 测线中心叠加剖面和对应地质解释剖面. 叠加剖面清楚地反应出盖层的结构,由浅到深依此出现 R1、R2、R3、R4 四组反射界面. R1 出现在剖面右测,形态呈向下凸出的弧形. 该反射波组对应着地表的朱村向斜,该向斜充填着第四系沉积和老第三系砂砾岩,推测该反射层为由中三叠统龙头山组灰岩引起. R2 反射波组出现在剖面中部的大部分地段,对应 CDP 点在 905(1445 之间,空间连续性很好. 空间上呈"波浪"起伏状,"波谷"深度在 0.9s(TWT),转换深度约 2.5 km;"波峰"深度在 0.4 s(TWT),转换深度约 1.1 km(假设平均速度为 5.5 km/ s). 根据已有勘探线的钻孔资料,主要容矿层(石炭纪黄龙组灰岩底部)的深度从冬瓜山主矿体的近 700 m 向南逐渐变深,最南端钻孔控制的矿体顶部深度已达 913 m,按照这种变化趋势推测,中心剖面位置经过容矿层的深度最浅也应在 1000 m 左右. R2 反射界面的深度与推测容矿层的深度基本一致. 因此,将 R2 反射界面解释为狮子山矿田的容矿层,即黄龙组灰岩与五通组砂岩之间的界面(不排除是矿体的可能性). R2 反射层在局部出现错位或不连续,可能为岩体侵入或断层引起,它们破坏了原反射层的连续性. 由于 R2 反射界面为多个同相轴组成,故可能由反射层束形成,并可能包括了五通-黄龙组和二叠系内部的岩性界面. R3 反射波组在剖面中部清晰可见,推测 R3 反射界面可能是志留系砂页岩与奥陶系灰岩之间分界面形成的反射;R4 反射波组在 CDP 点 965(1265 之间较为清晰,向南东逐渐模糊,但尚可辨认[52]. 基于区域褶皱构造特征和沉积层总厚度分析[53],R4 可能是前震旦变质基底与盖层之间的界面. TGS2 叠加剖面及其中的 4 组反射层清晰地勾画出盖层的结构形态,反应了盖层经历了褶皱变形和断块隆起的动力学过程. 在空间形态上 4 组反射不尽一致,故反映了由浅到深不同地层在变形过程中的非耦合特征,这种变形特点容易导致刚性强度不同地层之间的滑动、破碎和裂隙,并形成一些规模大、连续性好的通道,为后期岩浆热液流体运移创造了有利条件. 这可能是长江中下游成矿带褶皱断块隆起区的共同特点,也是为什么层状"矽卡岩"型矿床能形成大矿的重要原因之一[45].

铜陵矿集区的金属矿地震试验剖面虽然没有直接穿过冬瓜山矿体的中心部位,但剖面离矿体最南端仅 1 km 左右,而且冬瓜山矿体本身向南并没有闭合. 因此,反射地震发现的 R2 反射层极有可能是冬瓜山矿床向南部延伸. 这一推论还可以从 R2 的形态、深度和冬瓜山矿体顶面的形态、深度得到佐证. 基于地震勘探反演结果:在观音冲布置了深 1500 m(实际孔深 1440 m)的验证钻孔,在地震反射确定的 R2 反射界面深度处见到了五通组石英砂岩,其上的黄龙组黄铁矿化明显②. 虽然没有直接见到铜矿体,但却说明地震反射深部探测技术在探查浅层地壳结构和主要赋矿层位分布的有效性,为在长江中下游地区寻找深部隐伏矿床提供了深部空间的依据. 显见,这对区域找矿方向具有重要指导作用,同时也显示出地球物理探测技术在深部找矿勘查中的极大潜力.

3.2　大冶铜绿山矿床

3.2.1　矿区概况及地质背景

铜绿山矿区位于长江中游南岸,长江中下游的鄂城—大冶—瑞昌铁、铜、金成矿带的西北部、阳新岩体的西北端,且岩体以低硅、富碱质、低铁镁为特征,属于浅-超浅成侵入的岩株. 矿区地层主要为下三叠统大冶组碳酸盐岩(T_1dy1～7),呈隐伏状沿 NNE 向构造排列的断块状出现,与成矿关系最为密切的主要有第 5、第 6 岩性段的大理岩和白云质大理岩;主要控矿构造为印支期的 NWW 向断裂-破碎带构造和 NNE 向褶皱 - 断裂构造带;这里的灰岩和白云岩均已变质为大理岩或矽卡岩. 在构造耦合及岩浆侵入作用下"分割"成捕虏体或残留体,矽卡岩型铜铁矿体就是产出于花岗闪长斑岩与残留-捕虏体的接触-断裂带处. 它们自南西至北东向排列,Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ(Ⅴ)、Ⅴ及Ⅻ号矿体组成的 NNE 向矿带,和Ⅱ、Ⅺ、Ⅷ、Ⅶ、Ⅸ号及 MⅡ(民采矿)号组成的 NE 向矿带,其中以Ⅰ号、Ⅲ号、Ⅳ号和Ⅺ号矿体为主,而Ⅲ号矿体规模最大(图 15). 在接触带与构造破碎带交叉复合部位,易形成富厚矿体(如Ⅲ号矿体),基于已形成的矽卡岩型矿体受后期成矿作用叠加改造,使成矿元素(特别是金)进一步富集,

② 与 321 地质队内部交流资料.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

形成构造角砾岩型铜金矿和隐爆角砾岩型金(铜)矿(如Ⅹ号矿体等)[54~56].

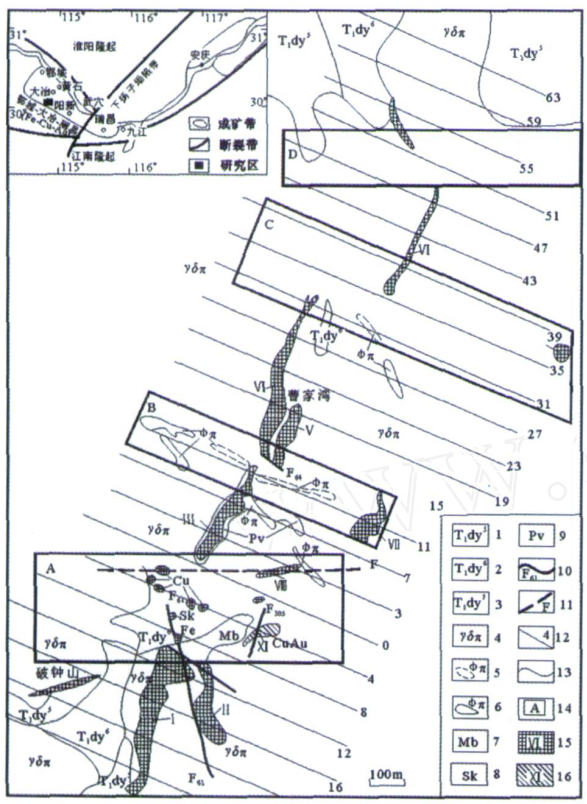


图 15 铜绿山矿区综合地质图

1. 大冶组第 5 段;2. 大冶组第 6 段;3. 大冶组第七段;
4. 花岗闪长斑岩;5. 推测钠长斑岩;6. 钠长斑岩;
7. 大理岩;8. 矽卡岩;9. 斜长石岩;10. 断裂及编号;
11. 破碎带;12. 勘探线及编号;13. 地质界线;
14. 预测区及编号;15. 矽卡岩型矿体及编号;
16. 隐爆角砾岩型矿体及编号

Fig. 15 Geological map of Tonglushan ore deposit area

该矿床以富铜铁、伴生(共生)金、银、钴、规模大而著称. 随着大规模的开采,可采矿量锐减. 据保守估计,铜绿山矿床保有储量仅能维持 12~15 a,特别是大露天采矿场即将闭坑,全部转为地下坑采,生产成本将大幅度上升,故对矿山的可持续发展形成了严重的威胁. 因此,在矿区深部、外围找到接替资源,增加矿山工业储量已成为铜绿山矿床寿命能否延伸所面临的重要任务[57].

3.2.2 地球物理方法在深部找矿中的效应

由于矿区第四系及人为覆盖严重,常规地质方法已很难发挥作用,所以,物探工作就显得格外重要,在找矿勘探进程中,具有大探测深度的混合场源电磁仪-EH-4 发挥了关键作用. 该仪器是大地电磁(MT)和可控源音频大地电磁(CSAMT)的结合体,采用可控源以弥补天然场信号微弱及不稳定性,并且克服了天然场源在 1 kHz 和 10 Hz 附近信号差(噪声洞)的固有问题. 通过采集地下地质体对天然场源或人工场源的电磁响应,并经相应处理建立地下电性结构,其有效探测深度达 1 km 以上[58,59]. 由于以往Ⅰ号矿体的钻孔深度一般小于 200 m,深部工程控制程度不高,但在大理岩残留体之下见到花岗闪长斑岩,在两者的接触带易形成多层斑岩体与大理岩接触带构造,对成矿极为有利. 图 16 是在穿过铜绿山Ⅰ号矿体 28 线上完成的 EH-4 二维反演解释剖面,发现了多个异常,其中,在 16~17 点间 -600~ - 750 m 标高部位发现了较好的低阻异常,其宽度约 120 m,通过钻孔验证(ZK3),在 - 650 m 出打到厚 20 m、铜最高品位 3.54 %、铁最高品位 58.26 %的矿体,说明该异常为矿致异常. 根据钻孔打到实际矿体情况分析,28 线 23 点以西未封闭的异常为矿致异常的可能性极大. 在铜绿山其他矿体上进行的 EH-4 探测,亦取得了较好的效果[60].

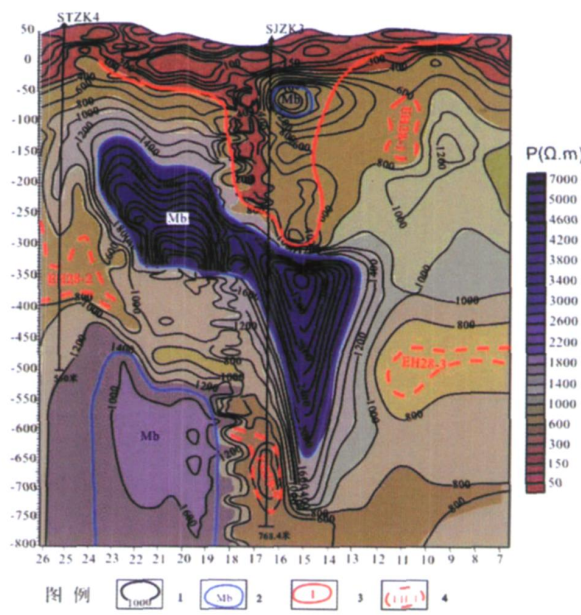


图 16 28 线 EH-4 反演解释剖面图

1. 电阻率等值线;2. 大理岩;3. 已知矿异常;4. EH-4 推测矿致异常

Fig. 16 EH-4 inversion and interpretation section of line 28

在铜绿山矿区,用 EH-4 探测数据反演确定的异常,在已知矿体部位均有明显地反映,同时又发现了多个矿致异常,这些异常多伴随构造产出. 因此,用物探方法探测断裂-接触带构造或构造交汇部位,

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是在铜绿山矿区进行深部找矿行之有效的方法.

3.3　辽宁红透山矿床

3.3.1　矿区概况及地质背景

辽宁清原地区太古宙花岗绿岩地体发育,是我国最早界定的太古宙绿岩带.红透山矿床就产出在该绿岩带中,该矿床为海底火山喷发型块状硫化物铜、锌矿床(图 17)[61].它赋存于太古代变质岩系中,矿床的空间展布严格受一定的层位控制.矿床和变质岩系一样,曾遭受过多期变质变形作用和某种程度的混合岩化作用的强烈改造,使该矿床原有的面貌发生了极为深刻的变化.红透山矿床属层控类型,由于矿体所处的构造部位和空间位置不同,以及在多期复杂的变质作用下产生部分塑性流变、重熔、迁移、富集,部分形成了脉状、桶状、扁豆状、脉群状等形状矿体[62].红透山矿床具有延深大于延长的特点,目前矿山的开采深度已大于 1300 m[63],是一个典型的深部矿床.具有 50 年开采历史的红透山铜矿曾形成四个生产坑口,但目前仅有红透山坑口在维持生产,矿山陷入"硐老山空"的局面,已属于资源危机矿山,进行深部找矿已势在必行.

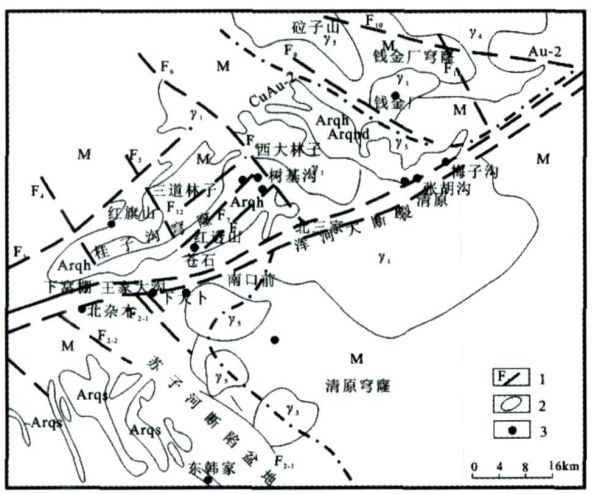


图 17　红透山矿区地质简图(据杨福田[64]修改)

γ_5.燕山期花岗岩;γ_4.似斑状花岗岩;γ_1.太古代花岗岩;Arqna.南天门组绿岩;Arqh.红透山组绿岩;Arqs.石棚子组绿岩;M.混合岩类;1.断裂;2.花岗岩穹窿;3.金、铜矿床

Fig. 17　Sketch geological map of Hongtoushan ore deposit area (after Yan[64])

3.3.2　地球物理方法在深部找矿中的效应

红透山地区历年来均投入过大量地球物理勘探工作,其中自然电场法在红透山矿床发现初期曾经发挥过重要作用[65].铜、锌矿体具有稳定的自然电位异常,其异常值一般在 - 65～ - 360 mV.把红透山矿床的地面、测井和坑道内的自电异常综合起来,根据矿床不同部位出现不同符号的异常和垂向变化规律,得到了该区矿床自然电场空间的分布模式(图 18).该模式说明:矿体在地表出现自然电位的负异常,极值在矿体的上方,在异常中心处,随深度增加异常强度增大,在矿体的氧化带上出现负异常,原生矿石带出现正异常,其交界面为矿体氧化带的下界面.

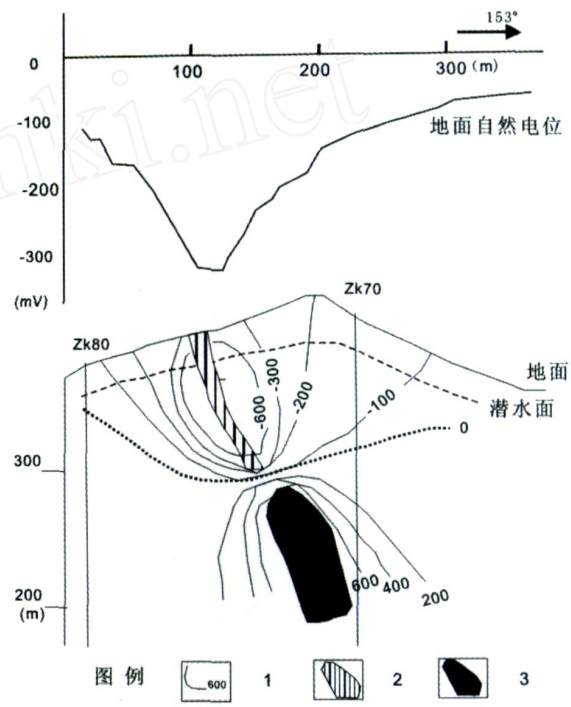


图 18　红透山矿床自然电场空间分布模式

1.自然电位等值线;2.氧化矿带;3.原生矿带

Fig. 18　Self-potential electrical field space distribution model of Hongtoushan ore deposit

由于自然电位法的探测能力较浅,随着找矿程度的不断提高,找矿难度越来越大,勘探方法也由浅部向深部转变.因此,需要勘探深度更大、穿透性更强的方法,如大功率 TEM 和 CSAMT 在红透山相继开展探测.在红透山矿区东部的小西堡、果园和树基沟等区进行的 TEM 工作[66],使用加拿大 Geonics 公司生产的 TM67 大功率瞬变电磁系统,配有 3D 接受线圈,最大发射功率可达 4500 W,采用定源回线装置,大大增加了探测深度,最深可达 1000 m.图 19 为小西堡 52 线 TEM 视电阻率-拟深度断面图,在 15 号点下 950 m 深处,存在明显低阻异常,由于红透山矿体具有明显的"低阻高极化率"特征,该

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

异常与已知矿段有类似特征,显示出良好的矿致异常信息,故推测有可能在深部赋存有低阻的铜、锌矿体.此外,在 56 线埋深 800 m、1000 m 处也发现了两个局部低阻异常体,反映出矿化程度较为强的地段.在小西堡 52、54 等各条 TEM 测线异常位置分别部署了钻孔进行验证,各孔在不同深度处均见到了浸染状黄铁矿、黄铜矿化,所见矿化地段均与 TEM 异常相吻合.在红透山外围开展的 TEM 工作也发现了多个低阻异常,其中果园 TEM 异常与 CSAMT 异常吻合程度较好,经钻探验证,已经见到工业品位矿体,铜品位 0.9～2.1 %,锌品位 3.23～4.39 %.外围和深部发现的矿体使红透山铜锌储量翻了两番,大为缓解了资源危机.

TEM 所获得的异常可以作为寻找红透山式块状硫化物铜、锌矿床的一个重要找矿标志,尤其适宜于埋深较大的矿体.同时,结合 CSAMT 测量结果,为该地区深部找矿提供了更加可靠的依据和信息.这就表明:对于埋深在 1km 左右的大深度矿体,瞬变电磁可以发挥重要作用[67],对于老矿区深部找矿来说是一个有效的手段.



图 19 红透山小西堡区 52 线 TEM 视电阻率拟断面图

Fig. 19 TEM resistivity section of line 52 in Xiaoxipu area in Hongtoushan ore deposit area

3.4 八家子银铅锌多金属矿床

3.4.1 矿区概况及地质背景

八家子银铅锌矿床位于华北地台北缘燕辽沉降带南段,为一典型夕卡岩型银、铅、锌多金属矿床.北西向成矿断裂带是矿区内最重要的控矿构造,它从北山矿段沿北西向延伸近 5 km 左右,直到冰沟矿段,总体走向 310°～330°,向北东倾斜,倾角 35°～60°.赋存于这组断裂系中的矿体,其产状与断层基本一致,矿体呈透镜体、脉状、团块状产于燕山期石英二长岩与中元古界高于庄组白云质大理岩外接触带及北西向延伸的白云质大理岩断裂破碎带中.矿区包括北山、红旗、炉沟、东风和冰沟等五个矿段(图 20)[68,69].该矿山已开采了四十多年,资源已近枯竭,已被国家经贸委宣布为闭坑矿山.矿山有上千职工,闭坑后职工的工作和生活出路将影响到社会的稳定.面对如此严峻的局面,必须进行接替资源勘查.而以往的勘探和开采深度均不超过 300 m,但实际上矿体呈串珠状延伸较大,即定会超过工程控制深度,在深部仍具有赋存矿体的可能.据此认为:在八家子矿区沿主干断裂及其两侧 300 m 深度以下,存在发现新的深部隐伏矿体的可能[70].

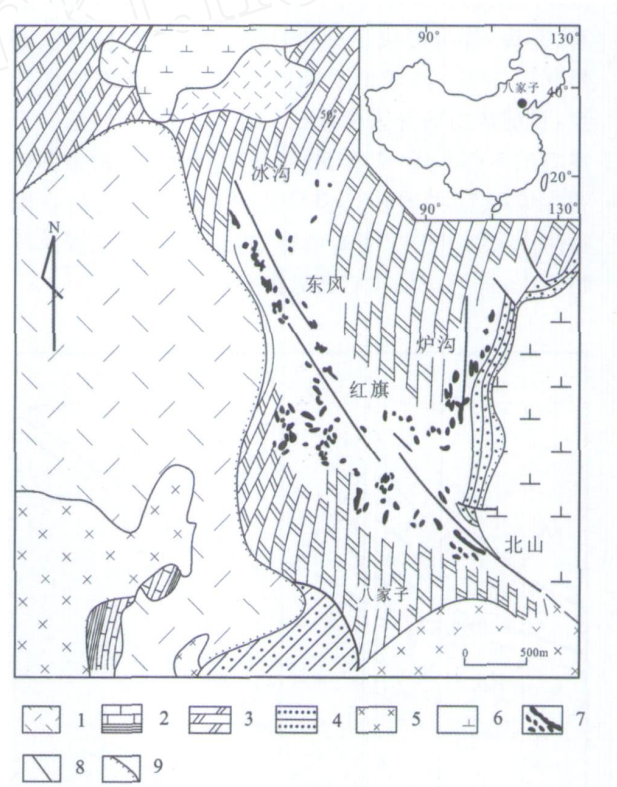


图 20 八家子银铅锌矿床地质略图

(据原八家子矿山地质科资料修改)

1.侏罗-白垩纪火山岩;2.寒武纪灰岩和砂岩;3.中元古白云质大理岩;4.中元古砂岩;5.燕山期花岗岩;6.燕山期石英二长岩;7.矿体;8.断层;9.不整合面

Fig. 20 Sketch geological map of Bajiazi Ag, Pb and Zinc deposit

3.4.2 地球物理方法在深部找矿中的效应

作为老矿区,八家子铅、锌矿床的地质工作程度较高,但一直缺乏新方法、新技术尤其深穿透方法与技术的应用.为此,基于频率域电阻率测深方法在寻

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

找隐伏矿床中的有效性[71],即当矿体体积较大、品位较高,其异常特征较为明显,该方法的找矿效果较好.结合矿区实际情况,在八家子开展了可控源音频大地电磁(CSAMT)工作③,在八家子矿区布置了11条综合剖面,完成了500个测点的测深工作.结果发现:地下深处存在有与已知矿体相对应的异常,这种新的认识为进一步找矿和有效异常识别起到了重要作用.在八家子红旗、东山矿段实施了5条CSAMT测深剖面,图21是红旗2号线的电阻率反演断面,在该断面西段内出现了3处电阻率的横向间断现象,这3处电阻率间断分别由F13、F14断层和两断层间向斜轴部破碎带产生,F13和F14断层产状较陡,倾向相反,在1400 m深处两断层相交.东段在800 m以上F12断层附近的矿体已基本开采完毕,其开采巷道反映出相对高电阻率,800 m以上F12断层为按实际情况确定,而800 m以下则按电阻率分布情况推断.此外,还推断出两处断层(编号为F3和F4断层),F3和F4断层分别在800 m和1000 m处与F12断层交汇.对比已知地质剖面可知F12断层与F3和F4断层的交叉部位为赋矿地段,其间出现相对低阻异常反映.通过钻孔验证表明,在1000 m深处发现视厚度达30 m左右的已知矿体产于F_{12}与F_4交汇处,并与CSAMT异常基本重叠.正在开采的800 m深处的矿体(产于F12与F3交汇处)也与CSAMT异常吻合,故证实已发现的两个异常为致矿异常.对东山矿段CSAMT异常也进行了验证:东山矿段的14线ZK0401孔,孔深537.63 m,在预计的见矿深度范围380.55～383.05 m处见到了铅、锌矿体,其矿体厚度为2.50 m,Pb+Zn平均品位为3.21%,但岩性较破碎,表明矿体产于F_{12}断层中的特征.

基于上述认识可见,采用可控源音频大地电磁测深方法在八家子矿区能够取得较好的找矿效果:其中北部成矿段区内岩性较为单一,围岩(白云岩)电阻率相对较高,岩层及断层内含水量较低,矿体与围岩存在明显的电阻率差异.显然,利用电法寻找深部金属矿床必须要以存在充分的电性差异为前提.虽然矿体埋深较大(>800 m),而上述异常验证结果再次证实,可控源音频大地电磁测深方法在寻找深部隐伏矿床中,其定位预测作用的效果非常明显[72].虽然南区地质情况比较复杂,但是电阻率分布与地下地质情况具有较好的对应关系,浅部矿致异常特征明显,电阻率测深方法找矿效果较好.结合其他资料进行综合分析研究,表明:可控源音频大地电磁测深法在该区深部找矿工作中能够起到应有的效果.

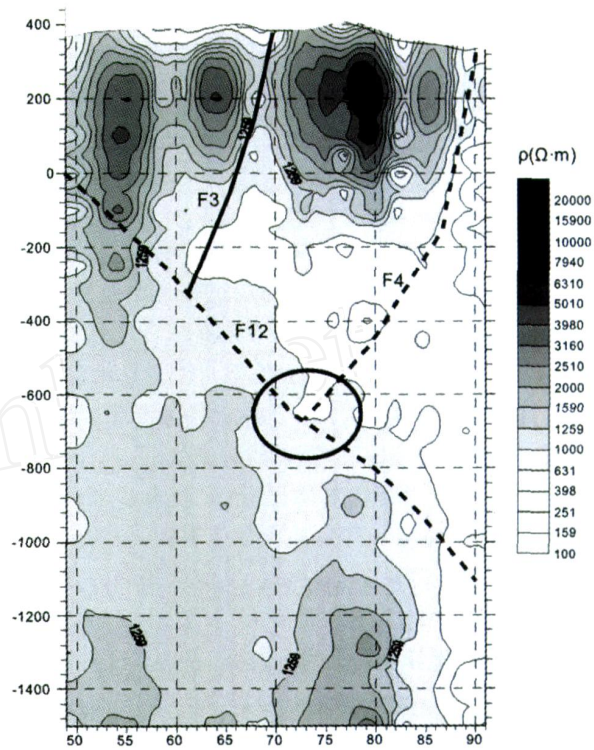


图21　红旗矿段2号线CSAMT断面图

Fig. 21　CSAMT section of line 2 in Hongqi mineral segment

4　结　论

金属矿产资源是深部物质与能量的交换和其深层动力过程的产物.因此,无论在理论上,还是在实践上,在地壳内部第二深度空间找矿勘探和发现大型、超大型矿床和多金属矿床都是当今21世纪找矿勘探的必由之路,特别在我国加速工业化和经济腾飞之际,必须消耗大量的矿产资源.因此,我国在多元化共享世界资源的同时,必须立足于本土,并建立起安全的、可靠的,且能长期持续供给的战略后备基地[1,10,11].尽管深部找矿勘探存在着巨大的潜力,但是,不可否认的事实是传统的地质方法,即仅靠人的肉眼或浅部勘探的方法(包括槽探和浅孔)已很难奏效,而必须通过地球物理场响应穿越地平线深入到

③　张光弟,黄力军,刘光海.辽宁八家子银铅锌矿等大型危机矿山找矿示范研究阶段性总结报告.中国地质科学院矿产资源研究所,2005年.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

地下深处去探寻隐伏的和潜在的深部矿藏[2,6]. 本文通过对以上国内、外深部找矿勘探实践分析说明: 具有大探测深度、高精度的地球物理方法是进行深部找矿勘探的重要途径. 地球物理勘探不仅能够圈定深部找矿靶区,研究深部控矿构造和导矿通道,为深部找矿提供间接与直接信息,并能刻画出精细的地下结构,甚至直接给出赋矿部位[9]. 因此,在深部找矿中,地球物理勘查方法和各项技术具有不可替代的关键作用.

当然,在深部找矿中,没有哪一种方法是万能的,因为控矿介质与结构和深层过程是千差万别的. 为此,必须针对不同探测目标,开展综合地球物理研究,集成各种地球物理方法的效应[10],且地球物理应与地质、化探相配合,综合分析各类异常,取得最逼近于实际的认识以资提高找矿成效.

面对探测深度越来越大,精度要求越来越高的新形式,必须完善和开发勘探深度更大、分辨率更高的地球物理仪器设备,加强正、反演理论和深部找矿信息的提取与处理技术的研究,开发对深部找矿具有针对性的软件系统[73,74]. 因此,应从深部找矿的实际需求出发,当今应该加强以下六个方面的研究和控矿介质与构造环境的理论与方法研究:

(1) 大深度、高分辨率、多功能电磁探测技术和设备研发;

(2) 金属矿地震(二维、三维)探测技术和装备研发;

(3) 高精度、高分辨率的井中地球物理探测技术和设备研发;

(4) 加强重、磁、电二维、三维反演与解释技术和多元地球物理数据集成的综合研究;

(5) 深化研究非均匀性、各向异性和 组合介质结构的地球物理正、反演理论方法和应有软件的研究;

(6) 健全深部找矿勘探的数据库和软件模块.

致 谢 本文撰写过程中查阅了大量网上资料,部分文字和图件未记录成果提供单位,因而在本文中没能注明出处,特此致歉,请予以谅解,并致以深深的感谢!

参 考 文 献 (References):

[1] 滕吉文. 强化开展地壳内部第二深度空间金属矿产资源地球物理找矿、勘探和开发[J]. 地质通报,2006,25(7):767～771.
Teng J W. Strengthening geophysical exploration and exploitation of metallic minerals in the second deep space of the crustal interior [J]. Geological Bulletin of China,2006,25(7):767～771.

[2] 滕吉文. 地球深部物质和能量交换的动力过程与矿产资源的形成[J]. 大地构造与成矿学,2003,27(1): 3～21.
Teng J W. Dynamic process of substance and energy exchanges in depths of the earth and formation fo mineral resources [J]. Geotectonica Et Metallogenia,2003,27(1): 3～21.

[3] 翟裕生,邓军,王建平,等. 深部找矿研究问题[J]. 矿床地质,2004,23 (2):141～148.
Zhai Y S, Deng J, Wang J P, *et al*. Researches on deep ore prospecting [J]. Mineral Deposits,2004,23 (2):141～148.

[4] 裴荣富,翟裕生,张本仁. 深部构造作用与成矿[M]. 北京:地质出版社, 1999.
Pei R F, Zhai Y S, Zhang B R. Deep structure action and mineralization [M]. Beijing: Geological Publishing House,1999.

[5] 侯满堂,齐文. 陕西深部找矿进展及找矿建议[J]. 陕西地质,2007,25(2):1～10.
Hou M T, Qi W. Recommendations for further ore prospecting at depth in Shanxi province[J]. Geology of Shanxi,2007, 25(2):1～10.

[6] 汪民. 在全国深部找矿工作研讨会结束时的讲话[J]. 国土资源通讯,2007,22:16～19.
Wang M. The concluding speech on the countrywide proseminar of deep metallic exploration [J]. National Land & Resources Information,2007,22:16～19.

[7] 王庆乙,胡玉平. 金属资源的紧缺与隐伏矿找矿的思考[J]. 地质与勘探,2004,60(4):75～79.
Wang Q Y, Hu Y P. Thought on the short supply of metal resources and prospecting concealed ores[J]. Geology and Prospecting,2004,60(4):75～79.

[8] 滕吉文. 中国地球物理学研究面临的机遇、发展空间和时代的挑战[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1101～1112.
Teng J W. The developmental opportunity and challenge of geophysics in the present age in China[J]. Progress in Geophysics (in Chinese) , 2007,22(4):1101～1112.

[9] 滕吉文. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害[J]. 地学前缘,2001,8(3):1～8.
Teng J W. The exchange of substance and energy, different sphere coupling and deep dynamical process within the earth [J]. Earth Science Frontiers,2001,8(3):1～8.

[10] 滕吉文,杨立强,姚敬金,等. 金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程[J]. 地球物理学进展,2007,22(2): 317～334.
Teng J W, Yang L Q, Yao J J, *et al*. Deep discover ore, exploration and exploitation for metal mineral resources and its deep dynamical process of formation [J]. Progress in Geophysics,2007,22(2):317～334.

[11] 滕吉文,刘建明,刘财,等. 第二深度空间金属矿产探查与东北战略后备基地的建设和可持续发展[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2007,37(4): 637～651.
Teng J W, Liu J M, Liu C, *et al*. Prospecting for metal ore deposits in second deep space of crustal interior, the building of strategy reserve base of northeast china[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition) , 2007, 37(4): 637～651.

[12] 丁万烈. 沃罗涅日结晶地块和下莫斯科褐煤盆地的含铀远景[J]. 世界核地质科学,2003,20(4):206～209.
Ding W L. Воронежская область crystal plane and uranium contain perspective of down Moscow lignite basin[J]. World Nuclear Geoscience,2003,20(4):206～209.

[13] Mikhail T Krupenin. Y/ Ho ratio as genetic indicator of sparry

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

magnesites in south Urals, Russia[J]. Acta Petrologica Sinica, 2004,20(4):803～896.

[14] 赵省民,聂凤军,江思宏. 美国内华达卡林成矿带的金矿地质特征[J]. 内蒙古地质,2000,2:12～20.
Zhao X M, Nie F J, Jiang S H. Geological features of the carlin gold trend in nevada, USA[J]. Geology of Inner Mangolia, 2000, 2:12～20.

[15] Peters S G, Ferdock G C, Woitsekhowskayal M B, *et al*. 美国内华达 Goldstrike 矿区卡林型贝茨金矿同变形的富矿分带[J]. 地质找矿论丛,2000,15(1):1～16.
Stephen G. Peters, Gregory C. Ferdock, Maria B. Woitsekhowskayal, et al. Oreshoot zoning in the carlin-type betze orebody, goldstrike mine, eureka county, Nevada[J]. Conributions to Geology and Mineral Resources Research, 2000,15(1):1～16.

[16] 刘树臣. 发展新一代矿产勘探技术—澳大利亚玻璃地球计划的启示[J]. 地质与勘探,2003,39(5):53～56.
Liu S C. Towards the next generation of giant minerals exploration techniques: some considerations about the glass earth[J]. Geology and Prospecting,2003,39(5):53～56.

[17] Graham Carr. "玻璃地球"—穿透覆盖层勘查的地球化学前沿[J]. 国土资源情报,2002,12:46～50.
Graham Carr. Glass earth- the geochemical front of penetrate overcast layer[J]. Land and Resources Information,2002,12:46～50.

[18] 朱日祥. 固体地球物理地球内部结构探测研究——以华北克拉通为例[J]. 地球物理学进展,2007,22(4):1090～1100.
Zhu R X. Deep Earth exploration—A case study from the North China Craton[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007,22(4):1090～1100.

[19] 滕吉文. 当今中国地球物理学发展的机遇、空间和挑战[J]. 物探与化探,2007,29(s1):1～12.
Teng J W. The opportunity, space and challenge for the development of geophysics in china of today[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007,29(s1):1～12.

[20] 于长春,范正国,王乃东,等. 高分辨率航磁方法及在大冶铁矿区的应用[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):979～983.
Yu C C, Fan Z G, Wang N D, *et al*. High-resolution aeromagnetic exploration methods and their application in daye iron mines[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(3):979～983.

[21] 施俊法,姚华军,李友枝,等. 信息找矿战略与勘查百例[M]. 北京:地质出版社,2005.
Shi J F, Yao H J, Li Y Z, *et al*. 100 examples for strategy of informational exploration and exploitation[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2005.

[22] 崔霖沛,吴其斌,熊寿庆,等. 寻找以铜为主的隐伏矿床的物探方法[R]. 北京:中国地质矿产信息研究院,1994,129～133.
Cui L P, Wu Q B, Xiong S Q, *et al*. Geophysical method for concealed copper deposits[R]. Beijing: Chinese academy of geology and mineral information, 1994,129～133.

[23] Milkerit B, Green A. Deep geometry of sudbury structure from seismic reflection profiling[J]. Geology,1992,20:807～811.

[24] King A. Deep drillhole electromagnetic surveys for nickel/copper sulphides at Sudbury, Canada[J]. Geophysics, 1996, 27(1):971～986.

[25] Hitzman M W, Oreskes N, *et. al*. Geological characteristics and tectonic setting of Proterozoic iron oxide (Cu-U-Au-REE) deposits[J]. Precambrian Research, 1992, 58: 241～287.

[26] 吴健民,黄永平. 稀矿山式铁铜矿床与奥林匹克坝式铜多金属矿床的对比研究[J]. 矿产资源与地质,1998,12(64):79～85.
Wu J M, Huang Y P. Comparison study for the iron-copper deposits of xikuangxhan type and the copper polymetallic deposits of olympic dam type[J]. Mineral Resources and Geology,1998,12(64):79～85.

[22] 张兴春. 国外铁氧化物铜—金矿床的特征及其研究现状[J]. 地球科学进展,2003,18(4):551～560.
Zhang X C. The characteristics of the overseas iron-oxide cu-au deposits and the present situation of the studies[J]. Advance in Earth Sciences,2003,18(4):551～560.

[28] Haynes D W, Cross K C, Bills R T, *et al*. Olympic Dam ore genesis: A fluid mixing model[J]. Economic Geology, 1995, 90: 281～307.

[29] Jones A G. Electromagnetic images of modern and ancient subduction zones[J]. Tectonophysics, 1993,219: 29～45.

[30] Cross K C, Daly S J, Flint R B. Mineralisation associated with the GRV and Hiltaba suite granitoids[J]. Geological Survey of South Australia Bulletin, 1993,54: 132～139.

[31] Vielreicher N M, Groves D I, Vielreicher R M. The Phalaborwa (Palabora) deposit and its potential connection to iron oxide copper-gold deposits of Olympic Dam type, in Porter, T. M., ed., Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective (Volume 1)[M]. Adelaide, Australia: PGC Publishing, 2000, 321～329.

[32] Johnson J P, McCulloch M T. Sources of mineralizing fluids for the olympic dam deposit (South Australia): Sm-Nd isotopic constraints[J]. Chemical Geology, 1995, 121: 177～199.

[33] Heinson G S, Direen N G, Gill R M. Magnetotelluric evidence for a deep-crustal mineralizing system beneath the Olympic Dam iron oxide copper-gold deposit, southern Australia[J]. Geological Society of America, 2006, 34(7): 573～576.

[34] Rodi W, Mackie R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. Geophysics, 2001, 66: 174～187.

[35] 王文. 国外矿产勘查实例分析及政策研究[M]. 北京:中国大地出版社,2004.
Wang W. Overseas mineral resources exploration example analysis and policy research[M]. Beijing: Chinese Mother Land Publishing House,2004.

[36] 王绍伟,刘树臣. 21 世纪初期国外矿产勘查形式与发现[M]. 北京:地质出版社,2006.
Wang S W, Liu S C. Overseas mineral resources exploration circs and discover at the begin of 21 century[M]. Geological Publishing House, Beijing,2006.

[37] Minter W E L. Detrital gold, uranium, and pyrite concentrations related to sedimentology in the Precambrian vaal reef placer, Witwatersrand, South Africa[J]. Econ. Geol., 1976,71: 157～176.

[38] Barnlcoat A C, Henderson I H C, Knlpe R J, *et al*. Hydrothermal gold mineralization in the Witwatersrand basin[J].

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Nature ,1997 ,386 :820～824.

[39] Frimmel H E. Archaean atmospheric evolution: evidence from the Witwatersrand gold fields , South Africa[J]. Earth Science Reviews ,2005 ,70 :1～46.

[40] Stuart G W, Jolley S J. Application of 3-D seismic attributes analysis to mine planning: Target gold deposit , South Africa [J]. The leading eadeg ,2005 ,7 :736～739.

[41] Chusili , Ripley E M , *et al*. Compositional variations of olivine and sulfur Isotopes in the noril′sk and talnakh intrusions , siberia : Implications for ore-forming processes in dynamic magma conduits[J]. Economic Geology , 2003 , 98 : 69～86.

[42] 罗照华, A. A 马拉库舍夫, H . H 娅潘妮,等. 铜、镍硫化物矿床的成因 —以诺里尔斯克(俄罗斯)和金川(中国)为例[J]. 矿床地质,2000 ,19(4) :330～339.
Luo Z H , Marakushev A A , Paniakh H H , *et al*. The origin of copper-nickel sulfide deposits-exemplified by Norilsk (Russia) and Jinchuan (China) [J]. Mineral Deposits , 2000 , 19 (4) :330～339.

[43] Naldrett A J , Lightfoot P C. Ni-Cu-PGE deposits of the Norilsk region , Siberia : Their formation in conduits for flood basalt volcanism. Geological Association of Canada Short Course Notes , 1999 , 13 : 195～250.

[44] 崔霖沛. 地球物理方法在诺里尔斯克铜、镍矿床普查勘探中的应用[J]. 国外地质科技动态,1973 ,2 :26～30.
Cui L P. Geophysical method application in Norilsk (Russia) copper and nickel deposit exploration[J]. Overseas Geology and Technic Trends 1973 ,2 :26～30.

[45] 常印佛,刘湘培,吴言昌. 长江中下游铁铜成矿带[M]. 北京: 地质出版社, 1991 ,377～379.
Chang Y F , Liu X P , Wu Y C. The copper_Iron belt of the lower and middle reaches of the Changjiang River[M]. Beijing : Geological Publishing House ,1991 ,377～379.

[46] 曾普胜,裴荣富,候增谦,等. 安徽铜陵矿集区冬瓜山矿床:一个叠加改造型铜矿[J]. 地质学报, 2005 , 79(1) :106～113.
Zeng P S , Pei R F , Hou Z Q , *et al*. The Dongguashan deposit in the Tongling mineralization cluster area , anhui : a large-sized superimposition-type copper deposit [J]. Acta Geologica Sinica , 2005 , 79(1) :106～113.

[47] 黄许陈,储国正. 铜陵狮子山矿床多位一体("多层楼")模式[J]. 矿床地质, 1993 ,12(3) :221～230.
Huang X C , Chu G Z. Multistory metallogenic model of the shizishan orefield in tongling ,anhui province[J]. Mineral deposits , 1993 , 12(3) :221～230.

[48] 李红阳,杨秋荣,李英杰,等. 安徽冬瓜山铜矿床的地球化学特征[J]. 地球学报, 2006 , 27(6) :551～556.
Li H Y , Yang Q R , Li Y J , *et al*. Geochemical characteristics of the Dongguashan copper deposit in Anhui Province[J]. Acta Geoscientica Sinica ,2006 , 27(6) :551～556.

[49] 陈邦国,姜章平,张卫平, 等. 安徽冬瓜山叠生式层状铜矿热液改造型流体研究[J]. 江苏地质,2002 ,26(2) ,65～69.
Chen B G , Jiang Z P , Zhang W P , *et al*. Study on Altered fluids of diplogenetic stratified copper hydrothermal solution in Dongguashan , Anhui Province[J]. Jiangsu Geology ,2002 , 26(2) ,65～69.

[50] 严加永,吕庆田,孟贵祥,等. 三维可视化及物探新技术在矿山接替资源勘查中的应用[J]. 地球学报, 2008 ,29(1) :116～120.
Yan J Y , L üQ T , Meng G X , *et al*. Application of 3D visualization technique for ore deposit and new geophysical technology to exploration of mine substitution resources : a case study of Tongling – shizishan ore field[J]. Acta Geologica Sinica , 2008 ,29(1) :116～120.

[51] 吕庆田,侯增谦,史大年,等. 铜陵狮子山金属矿地震探测结果及对区域找矿的意义[J]. 矿床地质, 2004 ,23(3) :390～398.
L üQ T , Hou Z Q , Shi D N , *et al*. Tentative seismic reflection study of Shizishan orefield in Tongling and Its significance in regional exploration[J]. Mineral deposits , 2004 ,23 (3) :390～398.

[52] 吕庆田,杨竹森,严加永,等. 长江中下游成矿带深部成矿潜力、找矿思路与初步尝试 —以铜陵矿集区为实例[J]. 地质学报,2007 ,81(7) :865～881.
L üQ T , Yang Z S , Yan J Y , *et al*. The metallogenic potential , prospecting idea and primary attempt in depth of the ore belt of the middle and lower reach of the Yangtze river-a case study of Tongling ore district[J]. Acta Geological Sinica , 2007 ,81(7) :865～881.

[53] 吕庆田,史大年,赵金花,等. 深部矿产勘查的地震学方法:问题与前景 —铜陵矿集区的应用实例[J]. 地质通报,2005 ,24 (3) :211～218.
L üQ T , Shi D N , Zhao J H , *et al*. Seismic method for deep mineral exploration : problems and prospects-A case study of the Tongling ore district[J]. Geological Bulletin of China , 2005 , 24(3) :211～218.

[54] 刘继顺,马光,舒广龙. 湖北铜绿山矽卡岩型铜铁矿床中隐爆角砾岩型金(铜)矿体的发现及其找矿前景[J]. 矿床地质, 2005 ,24(5) :527～536.
Liu J S , Ma G , Shu G L. Discovery of cryptoexplosive breccia type Cu (-Au) orebodies in Tonglushan skarn-type Cu-Fe deposit of Hubei Province and ore-searching vista[J]. Mineral Deposits ,2005 ,24(5) :527～536.

[55] 薛迪康,余元昌. 铜绿山矿田构造及其控矿特征[J]. 地质论评,1983 ,29(2) :121～126.
Xue D K , Yu Y C. The structure of the tonglushan ore field and its ore-controlling features [J]. Geological Review ,1983 , 29(2) :121～126.

[56] 刘治国. 铜绿山铜铁矿床地质特征及岩浆岩与成矿关系探讨[J]. 化工矿产地质,2002 ,24(4) :207～214.
Liu Z G. The geological feature and the relation of ore-formation to magmas of the Tonglushan Cu-Fe deposit [J]. Geology of Chemical Minerals ,2002 ,24(4) :207～214.

[57] 傅国平. 铜绿山铜铁矿床边深部找矿前景分析[J]. 采矿技术, 2007 ,7(3) :6～7.
Fu G P. The perspective analyses of Tonglushan Cu-Fe deposit [J]. Mining Technology ,2007 ,7(3) :6～7.

[58] 申 萍,沈远超,刘铁兵,等. EH4 连续电导率成像仪在隐伏矿体定位预测中的应用研究[J]. 矿床地质,2007 ,26(1) :70～78.
Shen P , Shen Y C , Liu T B , *et al*. Application of stratagem EH4 system to prediction of hidden ore bodies[J]. Mineral Deposit ,2007 ,26(1) :70～78.

[59] 陈庆凯,席振铢. EH4 电磁成像系统的数据处理过程研究[J]. 有色矿冶,2005 ,21(5) :7～9.
Chen Q K , Xi Z Z. Study of data processing procedure of EH4 electromagnetic imaging system[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy ,2005 ,21(5) :7～9.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[60] 马光. 鄂东南铜绿山铜铁金矿床地质特征、成因模式及找矿方向[D]. 长沙:中南大学,2005.
Ma G. Geological characters, cause of formation mode and explore direction of Tonglushan gold mine deposit in the southeast of Huibei Province[D]. Changsha: Middle South University, 2005.

[61] 于凤金,王恩德,闫鹏仁,等. 红透山式块状硫化物铜锌矿床地球化学特征及找矿意义[J]. 矿产与地质,2005,19(2):118～222.
Yu F J, Wang E D, Yang P R, *et al*. Geochemical characteristics and prospecting significance of Hongtoushan massive sulfide Cu-Zn deposit [J]. Mineral Resources and Geology, 2005, 19(2): 118～222.

[62] 王锡华,李伟. 红透山矿床变质岩系褶皱构造特征浅析[J]. 矿产与地质,2004,18(3):245～248.
Wang X H, Li W. Fold structure characteristics of metamorphic rock series in Hongtoushan deposit [J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18(3): 245～248.

[63] 刘孟德. 红透山铜矿二轮找矿成果及远景分析[J]. 有色矿冶,1994,2:1～8.
Liu M D. The second round exploration progress and perspective analyses of Hongtoushan deposit [J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 1994, 2: 1～8.

[64] 杨福田,张永红,杨铁军,等. 辽宁清原红透山式铜、金多金属矿集区资源潜力预测与勘查思路[J]. 矿产与地质,2003,17(增刊):324～327.
Yang F T, Zhang Y H, Yang T J, *et al*. The potential resources prediction and exploration ideas of hongtoushan-type copper gold and polymetallic ore-accumulation areas in Qingyuan, Liaoning [J]. Mineral Resources and Geology, 2003, 17(supplement): 324～327.

[65] 高扬,宋晓军. 矿床自然电位的空间分布与在找矿中的应用[J]. 物探与化探,1989,13(1):149～152.
Gao Y, Song X J. The space distributing of nature electricity potential of deposit and its application in mineral resources prospecting [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1989, 13(1): 149～152.

[66] 于凤金. 红透山式块状硫化物铜锌矿床地球化学特征及找矿意义[D]. 沈阳:东北大学,2005.
Yu F J. The geological characters and prospecting meaning of Hongtoushan massive sulfide copper zinc deposit [D]. Shenyang: Northeast University, 2005.

[67] 李貅,薛国强,郭文波. 瞬变电磁法拟地震成像研究进展[J]. 地球物理学进展,2007,22(3):811～816.
Li X, Xue G Q, Guo W B. Research progress in TEM pseudo-seismic imaging[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(3): 811～816.

[68] 姚富强. 辽西八家子斑岩成矿分带系列的应用及其找矿效果[J]. 矿产与地质,2004,18(3):252～255.
Yao F Q. Application study and ore exploration of Bajiazi lead-zinc ore series, western Liaoning[J]. Mineral Resources and Geology, 2004, 18(3): 252～255.

[69] 朱建华. 辽宁西南部矿集区与成矿元素分带性[A]. 见:"九五"全国地质科技重要成果论文集[C]. 北京:地质出版社,2000,118～121.
Zhu J H. Ore district and metallogenic elements distributing in the southwest of Liaoning[A]. In: The dissertation corpus of important geological fruit during "9th five plan"[C]. Beijing: Geological Publishing House, 2000, 118～121.

[70] 潘厚满. 八家子银金属矿矿田成矿规律与成矿预测[J]. 矿产与地质,2001,15(5):322～323.
Pan H M. The ore-forming law of bajiazi silver polymetallic ore field and its forecasting for ores-forming[J]. Mineral Resources and Geology, 2001, 15(5): 322～323.

[71] 王若,王妙月,卢元林. 三维三分量 CSAMT 法有限元正演模拟研究初探[J]. 地球物理学进展,2007,22(2):579～585.
Wang R, Wang M Y, Lu Y L. Preliminary study on 3D3C CSAMT method modeling using finite element method[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(2): 579～585.

[72] 黄力军,陆桂福,张强,等. 八家子铅锌矿电阻率异常特征及深部和外围找矿[J]. 物探与化探,2005,29(2):119～121.
Huang L J, Lu G F, Zhang Q, *et al*. Resistivity anomaly characteristic and deep and peripheral prospecting in the Bajiazi lead-zinc mine[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2005, 29(2): 119～121.

[73] 滕吉文. 中国地球物理仪器和实验设备研究与研制的发展与导向[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):276～281.
Teng J W. The development and guide direction of Research and manufacture of Geophysical instruments and experimental equipments in China [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(2): 276～281.

[74] 滕吉文. 中国地球物理仪器的研制和产业化评述[J]. 石油物探,2006,45(3):209～216.
Teng J W. The development guide direction and locus of research manufacture and industrialization for the geophysical instruments and experimental equipments in China. [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(3): 209～216.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net