第 23卷 第 3期
2008年 3月

地球科学进展
ADVANCES IN EARTH SCIENCE

Vol 23 No. 3
Mar., 2008

文章编号: 1001-8166(2008)03-0270-06

直升机大比例尺航空物探在深部找矿中的应用前景*

熊盛青,于长春,王卫平,范正国,王乃东,万建华,张洪瑞
(中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘 要:为克服深部及矿区外围地面物探工作难度大、勘探周期长等不利因素,探讨了利用直升机快速获取高分辨率航空物探资料的方法。以成功应用实例,总结了直升机航空物探方法技术的特点和优势,并针对目前深部找矿工作区的部署特点,展望了直升机物探利用磁、电、能谱综合信息,挖掘矿山深部及外围资源潜力,直接为地质找矿服务的应用前景。

关 键 词:直升机;物探;矿山;深部找矿
中图分类号: P631 **文献标识码**: A

国外许多大型矿山勘探开采深度已超过 1 000 m,如南非在 4 000 m以下的深度找到了金矿,澳大利亚在 3 000 m深度发现了储量大于 300万吨的富铜矿床[1]。我国绝大多数矿山的开采深度一般不足 500 m,考虑到现行勘探和开采技术在 500～1 000 m深度范围内的可行性,矿山无疑存在深部第二找矿空间、第三找矿空间。我国铜陵冬瓜山大型铜矿床的产出深度在 1 000 m左右[1],大冶铁矿在 1 000 m左右见到第三台阶厚大矿体[2]等,我国现有矿山的深部仍具有极大的找矿潜力。

用于深部隐伏矿勘查的地面金属矿物探方法主要有高精度重力勘查、高精度磁测、瞬变电磁法勘查、可控源音频大地电磁、三频激电、井中声波透视、地下电磁波、深穿透地球化学方法等[3]。由于重要金属矿区及外围大多地形复杂,地面物探工作效率很低,施工困难,多数地面物探测量工区分布面积偏小,在一定程度上影响了矿山深部及外围找矿效果。

2003年以来,采取引进和自行研制相结合的方针,成功地研制集成了吊舱式直升机频率域电磁、磁综合测量系统和硬架式直升机磁、放综合测量系统,投入生产并获得了良好的勘查效果。目前国内直升机最大勘探比例尺已达 1∶5 000,并且这两套直升机航空物探测量系统可以沿地形起伏飞行,探头离地高度最低可达 30～80 m,采样间隔可达 1～3 m左右,DGPS平面定位精度好于 1 m,尤其适合于地形复杂地区的矿产勘查工作。同地面物探相比,直升机测量具有速度快、测量精度高、信息丰富、异常分辨率高等优点。在矿区做较大的测量面积不仅可对矿区深部磁性地质体产生的弱缓异常反映完整,而且便于磁异常综合对比分析,有助于发现矿区周围未知矿床。大冶 1∶1万高分辨率航磁找矿成功经验表明,以直升机物探方法获取的高精度资料为基础,采用精细反演方法,可以实现深部找矿目的。

1 直升机航空物探方法

1.1 测量系统组成

1.1.1 吊舱式系统

吊舱式直升机频率域电磁、磁测量系统是我国在从加拿大引进的 MPULSE六频电磁仪和磁力仪基础上,自行集成的一套测量系统。该系统由 MPULSE频率域电磁系统、CS-3磁力仪、DS3数据收录系统、GPS导航定位系统、高度测量系统、模拟记录仪和电源系统组成,可同时测量电磁、磁 2种参数,其性能指标达到了世界同类产品的先进水平[4]。

MPLUSE电磁系统为新型的数字化和宽带系

* 收稿日期: 2007-09-30;修回日期: 2008-02-19.
*基金项目:国家危机矿山接替资源勘查项目"湖北省黄石市大冶铁矿接替资源勘查"(编号: 200442007)资助.
作者简介:熊盛青(1963-),男,湖南人,总工程师,博导,长期从事航空物探领域技术研究工作. E-mail: xsp@agrs.cn

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

统,有 2对发射和接收线圈 (水平共面线圈对和垂直同轴线圈对),每对线圈的发射磁矩为 800 A·m^2,发射 3个频率,频率范围 870～23 250 Hz,其中水平共面线圈对层状大地的导电率有较高的分辨率,而垂直同轴线圈对垂直导体分辨率较高。该系统记录 6个频率的电磁响应,采样率每秒 30次,在直升机时速 120 km/h时,相当于沿着飞行测线每 1 m一个采样。

2004年在内蒙古乌达煤矿区进行了国内首次吊仓式直升机航空磁、电磁综合测量[4]。测线飞行采用沿地形起伏飞行的方法,测网密度为 50 m × 250 m,测线间距 50 m。直升机吊舱 (探头)平均离地高度 49 m;导航定位精度好于 2.58 m;测线偏航距通常小于 20 m。

1.1.2　硬架式系统

硬架式直升机航磁测量系统是中国国土资源航空物探遥感中心新研制、具有国际先进水平的航空物探测量系统。

机载航空物探设备包括 HC—2000K航空磁力仪、DSC—1航磁补偿仪、GPS导航定位设备、GPS差分定位设备、数据显示设备等。

2005年在湖北黄石地区进行了硬架式直升机航空物探 (磁)测量工作①。测线飞行采用沿地形起伏飞行的方法,测线间距 100 m。导航定位精度好于 1 m;平均飞行高度为 144 m,测线偏航距通常小于 11 m,测量总精度小于 2nT。

1.2　系统机动灵活

在直升机爬升率允许的范围内,直升飞机升降自如,非常适合于目的性比较强的小规模精细探测;由于直升机转弯灵活,也可以多次重复飞行,直到得到满意结果为止。在一些地形陡峭的地区,甚至可以利用慢速和悬停功能,精细获取航空物探测量数据,这是固定翼飞机无法比拟的。

尽管在海拔高度 2 500 m以上的高原地区,直升机爬升率一般为 2.5 m/s左右,远低于其通常 5 m/s左右的爬升率,但是直升机水平飞行速度低的特点使其在相同的距离上赢得了更充足的爬升时间,一般可以赢得比 Y-12等固定翼飞机多一倍的爬升时间,因此直升机航空物探系统在山前和山后飞行高度也可以明显降低,真正实现随地形起伏飞行方式。图 1为湖北黄石地区硬架式直升机航空物探系统飞行高度 (50 m过山头)曲线和固定翼飞机最大低飞理论曲线对比图。固定翼最大低飞高度理论曲线设计依据主要是飞机地速 7.5 m/s,爬升率 5 m/s,过山头高度 100 m。由图可见,直升机航空物探系统在山前和山后等地区降低飞行高度方面具有明显的优势。

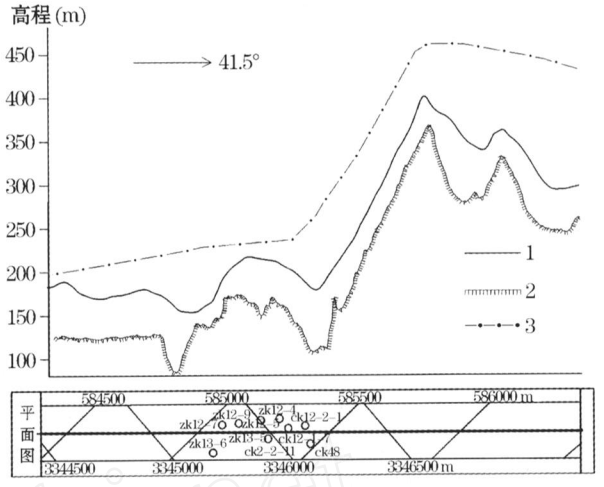


图 1　直升机实际与固定翼飞机理论的飞行高度对比曲线

Fig. 1　Contrast diagram about actual flying height of helicopter and theoretical flying height of fixed-wings aircraft

1. 直升机飞行高度曲线; 2. DTM曲线;
3. 理论计算的固定翼飞机飞行高度曲线

1.3　系统分辨率高

由于直升机航空物探系统灵活、飞行高度低,因此明显提高了系统对探测目标物的分辨率。图 2是黑龙江料甸地区硬架式直升机航空物探系统试验测量结果②。区内南部为华力西晚期中粒至斑状花岗岩、花岗闪长岩类;中部局部存在二叠系砂岩、厚层大理岩夹页岩和石灰岩,含石墨层;北部为白垩系中酸性和中基性火山岩。根据 DEM资料分析,在料甸试验区 7 km ×20 km范围内在 1960年进行过 1∶10万航磁测量,使用 25型仪器,目视领航,平均飞行高度 200 m。为了突出对比效果,我们截取了 1960年相同范围固定翼系统测量数据,并按照本次试验所采用的相同方法和网格距形成了等值线平面图 (图 2a)。图 2b和图 2c是利用硬架式直升机航空物探测量数据绘制的等值线图 (飞行高度分别为 100 m和 30 m)。对比新老资料,虽然磁场总体趋势基本一致,但老资料磁场信息较为平缓,没有反映出局部磁异常的分布特点。主要是当时的仪器精度低、测量高度大、收录方式等问题造成,部分原因也可能是

① 于长春,范正国,等. 湖北黄石地区 1∶1万航空物探 (磁)勘查成果报告[R]. 北京:中国国土资源航空物探遥感中心, 2006.

② 王卫平,王乃东,等. 直升机航空物探系统集成与测量方法技术研究[R]. 北京:中国国土资源航空物探遥感中心, 2004.

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

因为 40年来的矿产开改变了一些磁场形态;值得说明是,硬架式直升机航空物探 30 m飞行高度的测量结果比 100 m飞行高度的测量结果信息更为丰富,同时磁场值也相应增大,这进一步说明了直升机航空物探低高度飞行测量的高分辨率特性。

2005年硬架式直升机航空物探系统在湖北黄石地区开展的 1∶1万高分辨航空物探测量中,共新编航磁异常 97处,其中甲类矿致异常 13处,而 1993年该区曾开展 1∶2.5万航磁测量,仅选编异常 22处[5]。其主要原因是由于仪器测量精度、定位精度的提高,以及飞行高度的降低,提高了系统的分辨率[5],发现了一些原有被遗漏的弱小异常,异常信息量的增加为下一步找矿工作部署提供了依据。

1.4 精细反演方法

1.4.1 单剖面反演

精细反演是指利用直升机航空物探高精度测量数据,即通过详细测量或收集测区内地表及井下各类岩石的物性资料,采用二维[6]或三维正演方法去除已知地质体引起的物探异常,求取剩余异常和利用剩余异常反演地下地质体空间位置的方法技术。

1.4.2 多剖面联合反演

精细剖面反演可以依据航磁资料,结合地面勘探线位置,进行多剖面联合反演。此种反演特点是在综合考虑已知或推测矿体、磁性岩体在走向延伸情况,特别是剖面旁测磁性体的影响前提下来设计磁性体断面特征及走向延伸长度。因此,能够更加全面地推断地下磁性体空间展布特征。

2 深部找矿效果

直升机航空物探系统分辨率高、多参数测量,解释中可以互相印证,能够减少异常多解性,再加上测量面积较大,可以从区域上分析解释异常成因,因而可以提供较为可靠的找矿信息。

2004年航遥中心与加拿大 NCO公司合作在辽东—吉南成矿带的桦甸—和龙铜镍成矿远景地区的 3个区块开展了 1∶2.5万直升机电磁、磁综合测量取得了明显的效果,确定了多处对寻找铜镍矿有意义的找矿目标;2005年航遥中心在湖北黄石开展了 1∶1万硬架式直升机航磁测量,依据精细解释结果所布设的钻孔,已有三孔见矿,分述如下。

图 3是象鼻山矿段精细反演结果。Fe3和 Fe4是两个新推断的未知矿体。2006年 10月,在 Fe4矿体上布设的 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,矿石矿物主要为磁铁矿,磁黄铁矿、黄铜矿等,铁的品位目估为 20%～45%,铜的品位目估为 0.5%。采用同样的方法,在狮子山西侧布设了 ZK26-6孔于 732 m见矿,见铁矿体厚度为 4.44 m。

图 4是龙洞矿段 13勘探线反演结果。首先根据勘探线地质剖面图及勘探线经过区的岩相变化,对围岩进行计算,其基本能产生背景场的异常曲线;然后再将现有钻孔控制矿体(Fe1)、挂帮矿(Fe4)加入,得出计算曲线与异常主尖峰仍有较大剩余异常存在。观察异常曲线形态可以得出,异常主峰较陡,故推断强磁性体埋藏深度较浅,同时 Fe3所处位置均为年代较早钻孔,钻孔深度不大,并对应于主峰异常正下方,通过反演计算也在浅部得出强磁性体,故推断在海拔标高 -50～-120 m附近存在 Fe3铁矿体。增加 Fe3模型后,在剖面 9.4 km附近,仍存在部分剩余异常,结合成矿理论及相邻 12勘探线推断成矿位置,故推断得出在海拔标高 -580～-680 m上下存在 Fe2铁矿体。2007年 13线设计钻孔位置(JY13-1)附近布设的 ZK13-8于孔深 703.49～732.66 m之间见到 3层铁矿,总厚度为 11 m。

ZK21-8、ZK26-6、ZK13-8孔见矿,实现了大冶铁矿深部找矿的又一次重要进展,进一步证实了大冶铁矿龙洞—象鼻山地段深部存在 3个台阶成矿的认识,增强了在深部找矿的信心。

3 应用前景

由于直升机航空物探系统灵活、分辨率高,在国际上大多用于矿区、矿区外围,以及重点成矿靶区的精细测量工作,并且在铁矿、及多金属深部找矿方面取得了明显的效果;目前,国内已经完成了几个测区的直升机航空物探测量工作,也取得了显著的勘查效果,并在大冶铁矿的深部找矿中取得了突破。由于我国的铁矿、多金属矿区,以及重点成矿靶区大多地形复杂,地面施工困难,矿区及外围的区域性物探研究程度并不高,为了提高资源评价进程,开展直升机航空物探测量是十分必要的。

3.1 铁矿

我国铁矿资源勘探程度总体呈现东高、西低,鞍本、邯邢、宁芜、鲁中、鄂东等铁矿区,勘探和详查矿区可达 87%;勘探程度较低的辽西、五台、密怀、蒙中,以及西部地区的祁连山、阿尔泰山、东西天山等,多数矿区仅达到普查阶段。我国铁矿床勘探深度,绝大部分在 250～700 m之间,平均 500 m,其中东部地区部分矿区大于 700 m,个别达 1 000 m,西部

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

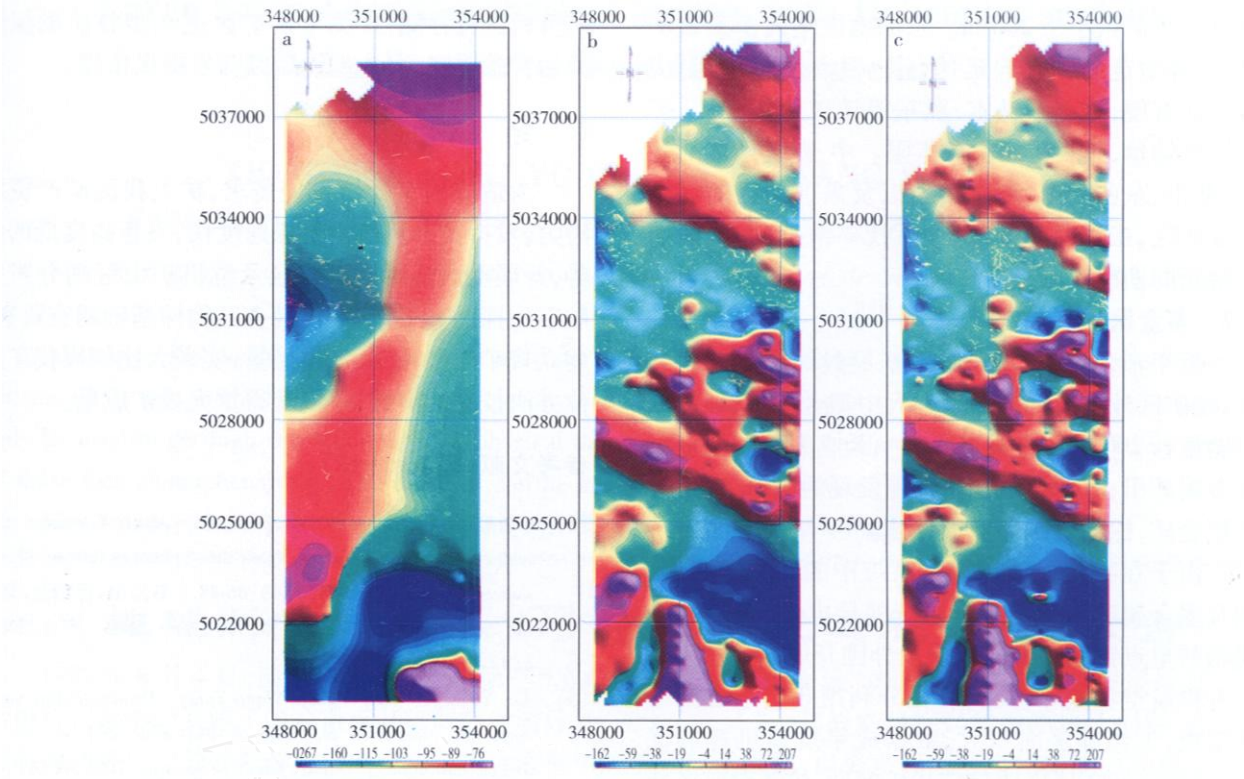


图 2　固定翼飞机与直升机在不同高度上获得的 ΔT磁场结果对比

Fig. 2　Contrast diagram of ΔT magnetic fields on different flying heights from helicopter and fixed-wings aircraft

a 固定翼飞机磁测结果 (200 m); b. 直升机磁测结果 (100 m); c 直升机磁测结果 (30 m);坐标单位 m 磁场单位 nT

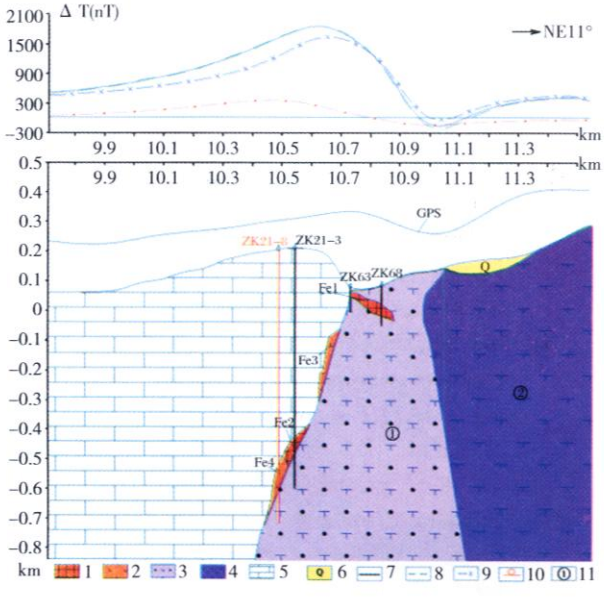


图 3　象鼻山 I号剖面航磁异常精细反演结果

Fig. 3　The precise inversion results of aeromagnetic anomalies on No. Ⅰ profile of Xiangbi mountain

1. 已知矿体; 2. 推断矿体; 3. 细斑含石英闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 大理岩; 6. 第四系覆盖; 7. 实测 △T磁异常曲线; 8. 计算磁异常曲线; 9. 已知岩体及矿体异常曲线; 10. 剩余异常曲线; 11. 模型体序号; 12. 黑云母透辉石闪长岩; 13. 矽卡岩

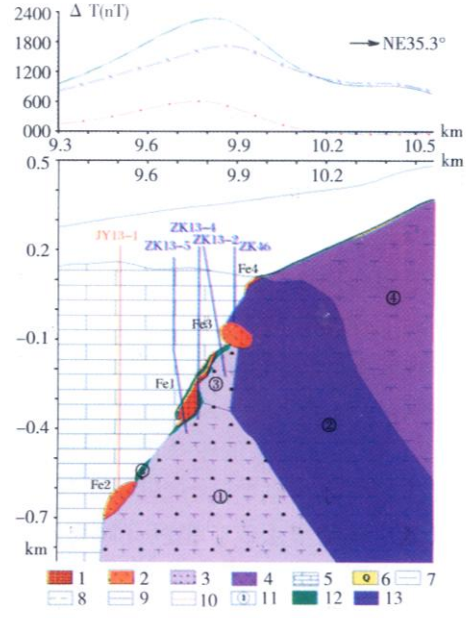


图 4　13勘探线航磁异常反演计算结果

Fig. 4　The inversion results of aeromagnetic anomalies on surveying line No. 13

1. 已知矿体; 2. 推断矿体; 3. 细斑含石英闪长岩; 4. 闪长岩; 5. 大理岩; 6. 第四系覆盖; 7. 实测 △T磁异常曲线; 8. 计算磁异常曲线; 9. 已知岩体及矿体异常曲线; 10. 剩余异常曲线; 11. 模型体序号; 12. 黑云母透辉石闪长岩; 13. 矽卡岩

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

地区不少矿区小于 200 m。东部地区绝大多数铁矿床,矿体沿走向和倾向延伸(深)很大,外围和隐伏区找矿有望,重点是鞍本、冀东等铁矿化集中区,扩大铁矿储量,延长矿山服务年限。中、西部地区的五台、蒙中、东西天山、阿尔泰山以及东部地区的辽西等成矿区,工作程度低,是今后找矿重点,有望发现一批新的铁矿资源基地。

3.2 多金属矿

近年来,辽宁青城子铅锌矿经过综合研究和勘查,在矿区外围发现了一系列大中型金矿床,累计探明储量近 200 t,使青城子地区一跃成为超大型金银多金属矿田;江西德兴铜矿外围发现的金山、银山等大型金矿,探明资源储量近百吨。

由于在我国的成矿远景区带中的矿化蚀变带、铜及多金属矿床通常具有一定的导电性,若能够在我国的重点铜及多金属矿山及外围开展高分辨率的直升机航空物探综合测量,充分利用航空电磁测量速度快,工作部署面积大,数据成果反馈迅速的优势,结合已知矿区电磁异常找矿模型,快速对矿区外围及有利矿带的延伸区域开展评价,就有可能发现新的矿产资源基地。

3.3 找矿靶区

中国地调局确定的 16个重点金属找矿区带中划分的许多成矿远景区及靶区,由于地形复杂、地质和物探研究程度受到限制。航空物探勘查多为 20世纪 70年代前后开展的固定翼航空磁测、定位精度较低、测量比例尺多为 1∶20万,少数为 1∶5万,且飞行高度较大,很可能遗漏许多有找矿意义的异常。并且受当时技术条件限制,物探异常评价较粗略,精细反演工作很有限。另外在“16个重点区片”中有许多重要铜、及多金属矿床,如长江中下游成矿带的铜陵铜矿、德兴大型铜矿,南岭成矿带的水口山铜矿,以及豫西成矿区的中条山大型铜矿等,川滇黔相邻成矿带的东川铜矿、大理铜锡矿等;因此,在 16个重点区片中的重点成矿靶区开展直升机航空物探测量十分必要。

值得说明的是,新发现矿区未开采前工业设施等人文干扰较少,此时若能够开展高分辨率航空物探测量,有利于提取深部或盲矿体相关异常信息和外围找矿预测工作。同时将其测量结果作为基础地质资料进行存储,作为今后矿区进一步找矿勘探的原始背景资料,可为矿山后续开发提供依据。

4 结 论

为适应国家经济发展需求,扩大我国矿产资源潜力,发挥直升机航空物探速度快,飞行高度低的优势,开展重点金属成矿靶区及危机矿山区高分辨率航空物探勘查工作,提供勘查区物探基础调查资料,建立找矿模型,扩大矿山储量,实现大比例尺找矿定位方法技术的突破,争取获得重大找矿成果。

参考文献(References):

[1] Wei Changshan, Zeng Shaojin, Zheng Dayu, *et al*. Resources crisis mines still have potential to exploit their resources further[J]. *Resources & Industries*, 2004, 6(4): 46-48. [韦昌山,曾绍金,郑大瑜,等. 资源危机型矿山还有潜力可挖[J]. 资源·产业, 2004, 6(4): 46-48.]

[2] Liu Yucheng, Yang Yihua, Wang Yongji. Ore-controlling structures and orientation prognosis of deep concealed ores in the DAYE iron mine[J]. *Geology and Prospecting*, 2006, 42(6): 10-16. [刘玉成,杨艺华,王永基. 大冶铁矿控矿构造研究及深部隐伏矿体定位预测[J]. 地质与勘探, 2006, 42(6): 10-16.]

[3] Lü Zhicheng, Dai Zixi, Lin Zhiyong, *et al*. The mineralization theories and techniques related to the exploration for continued resources of the crisis mines[J]. *Geology and Prospecting*, 2005, 7(3): 80-83. [吕志成,戴自希,蔺志永,等. 危机矿山接替资源找矿勘查相关成矿理论与技术方法[J]. 资源·产业, 2005, 7(3): 80-83.]

[4] Xiong Shengqing, Chen Bin, Yu Changchun. Remote Sensing and Geophysical Detection Technology of Underground Coal Spontaneous Combustion[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006. [熊盛青,陈斌,于长春. 地下煤层自燃遥感与地球物理探测技术[M]. 北京:地质出版社, 2006.]

[5] Yu Changchun, Fan Zhengguo, Wang Naidong, *et al*. High-resolution aeromagnetic exploration methods and their application in daye iron mines[J]. *Progress in Geophysics*, 2007, 22(3): 979. [于长春,范正国,王乃东,等. 高分辨率航磁方法及其在大冶铁矿区的应用[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(3): 979.]

[6] Sui Suwen, Yu Changchun, Yao Changli. The semi-intelligent processing and interpretation software for gravity and magnetic anomalies[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 28(1): 65-68. [眭素文,于长春,姚长利. 起伏地形剖面重磁异常半智能处理解释软件及应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(1): 65-68.]

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

Large Scale Aero Geophysical Survey with Helicopter and Its Application to Deep Ore Prospecting

XIONG Shengqing, YU Changchun, WANG Weiping,
FAN Zhengguo, WANG Naidong, WAN Jianhua, ZHANG Hongrui
(China Aero-geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: Due to the difficulty and the need for deep ore prospecting and ore prospecting in the periphery of old mines, a new method of large scale aero geophysical survey with helicopter is put forward. The method can not only be used to get high-resolution aero geophysical data in short time but can predict the ore potential by analysis of these data comprehensively. Therefore, it can be applied to ore prospecting directly.

Key words: Helicopter; Geophysical survey; Mine; Deep ore prospecting

《地球科学进展》"973项目研究进展"专栏公告

1997年 6月 4日,国家科技领导小组第三次会议决定要制定和实施"国家重点基础研究发展规划",随后由科技部组织实施了国家重点基础研究发展计划(亦称"973")。其战略目标是加强原始性创新,在更深的层面和更广泛的领域解决国家经济与社会发展中的重大科学问题,以提高我国自主创新能力和解决重大问题的能力,为国家未来发展提供科学支撑。

自 1998年起至 2006年,围绕农业、能源、信息、资源环境、人口与健康、材料、综合交叉和重要科学前沿等领域,已先后批准了 297个项目,其中资源环境领域有 44项,此外,其他方面含有资源环境和全球变化范畴的项目约有 28项,合计达 72项,占总项目的 24.2%。

为了更好地宣传、交流我国"973"原创性项目的研究成果,提升这些项目的科学价值,《地球科学进展》编辑部自 2005年第 11期开辟"973项目研究进展"专栏以来,到 2006年第 12期已刊登了 13项的 15篇综述论文,得到了广大读者的好评和积极关注,普遍认为增进了对"973"项目的了解,有利于项目之间的交流。为此,我们希望继续不断得到广大"973"项目首席科学家的大力支持和踊跃投稿,扩大刊登"973"项目中有关资源环境和全球变化方面的项目介绍、最新研究成果和进展。该专栏文章可包括以下几方面内容:

(1)对已结题的项目,主要围绕该项目取得的研究成果及其应用价值、发展前景、与国际水平的差距等内容。

(2)对正在进行的项目,主要就项目研究的现状、进展、新成果及发展前景等内容。

(3)对刚申请批准的项目,围绕该项目研究的目的、意义、关键科学问题及其要达到的目标等内容。

凡是无项目首席科学家署名的来稿,最好经首席科学家的同意和认可,并签署意见。撰写的文章要求客观、公正、实事求是,内容完整,数据翔实,应有必要的文献、英文文摘等内容。具体格式要求参阅《地球科学进展》的投稿须知。

专栏负责人:林海　教授　**联系方式**: linhai@mail.nsfc.gov.cn; linh@igsnrr.ac.cn

编辑部地址:兰州市天水中路 8号　730000　**电　话**: 0931 - 4968256

E-mail: adearth@lzb.ac.cn　**网　址**: http://www.adearth.ac.cn

投稿时请注明"973项目研究进展"栏目,栏目稿件经审核达到发表要求的将尽快刊出,免收审稿费,酌收一定的版面费并致稿酬,同时免费赠送全年期刊一套(1～12期)。

欢迎从事"973"项目研究的科学家、学者赐稿;谢谢对我们工作的支持和帮助。

《地球科学进展》编辑部
2008年 3月

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