

“十五”以来我国航空物探进展与展望

熊盛青

(中国国土资源航空物探遥感中心,北京 100083)

摘要:对“十五”以来我国国土资源系统航空物探的工作概况、主要技术进展与应用成果进行了简要回顾,并对今后我国航空物探的发展趋势进行了分析与预测。

关键词:航空物探;技术进展;应用成果;综述

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2007)06-0479-06

“十五”期间,在国际上,受国际经济发展对能源和矿产需求的拉动,对航空物探的需求一直保持在较高的水平。直升机时间域航空电磁测量和航空重力测量技术得到快速发展,在几年之内便趋于成熟,并得到广泛的应用。在国内,随着国民经济持续快速发展,对铁、铜、石油等战略性矿产资源的需求迅速增大,进口矿石和原油成倍增加,其价格大幅度上涨,迫切需要在国内采用快速有效的方法加速矿产资源勘查步伐,对航空物探的需求,尤其是寻找铁矿的需求明显增大。在此期间,国家加强了对海域地质调查与资源勘查工作,海域航空物探工作量迅速增加。国内航空物探技术也得到快速发展,尤其是直升机频率域航空电磁测量技术得到快速提升,航空重力测量工作在国内实现了零的突破。航空物探异常的地面查证得到一定程度的加强,通过对新编航空物探异常的查证发现10余处矿产地,对原有航磁异常的重新解释与评价新发现了数处大型铁矿。2006年《国务院关于加强地质工作的决定》的发布,给我国地质工作带来了新的春天,也给航空物探技术的发展带来非常好的机遇,尤其是国家863计划重大项目《航空地球物理勘查技术系统》的实施,将显著地提高我国航空物探的自主创新能力和勘查技术水平。笔者就“十五”以来我国国土资源系统航空物探的工作概况、主要技术进展、应用成果以及发展趋势做一简述。

1 航空物探工作概况

“十五”期间,受国内外矿业和石油市场需求的拉动,航空物探工作迅速得到加强。国内从事航空物探的单位除中国国土资源航空物探遥感中心(简

称航遥中心,下同)和核工业航测遥感中心外,中国地质科学院地球物理与地球化学研究所(简称物化探所,下同)利用其开发集成的航空电磁/磁测量系统承担了2个测区的地质调查任务,工作量约12 700 km。中国冶金地质勘查工程总局地球物理勘查院恢复了停止多年的航空物探工作。

“十五”以来,国内航空物探工作量有了较大的增加,其中航遥中心共完成182.5万km的航空物探测量任务,工作量创历史最高记录,见表1。承担国家和地方各类调查与科研项目316项,共获国家和部级成果奖、科技奖8项,其中国家二等奖1项,部级一等奖1项。

表1 国土资源系统航空物探工作量对比

时期	总工作量/测线 km
“七五”期间	1 064 711
“八五”期间	791,857
“九五”期间	14 773
“十五”期间	1 430 651(含物化探所)

2 航空物探技术主要进展

“十五”以来,通过研制开发、引进新一代航空物探系统和多种解释处理软件系统,大大提高了航空物探数据采集、存储、处理、解释与数据管理的技术水平与能力,航空物探勘查核心技术快速提升,促进了国土资源调查手段的现代化。

2.1 航空物探采集系统性能大幅度提高

航空物探采集系统向着高精度、数字化、小型化、智能化、集成化方向前进了一大步。

(1)自主创新研制出了多种具有国际先进水平的航空物探测量仪器。在“九五”研究的基础上^[1-3],“十五”以来,研制完成了HC-2000氦光泵

磁力仪、小型一体化多通道航磁梯度仪、多通道航空磁测数字自动补偿仪等,其主要技术指标达到国际先进水平。多通道航空磁测数字自动补偿仪和数据收录一体化系统的研制工作和航磁全轴梯度测量系统集成取得重大进展,近期将进行试验飞行。此外,还研制了新型磁化率仪和标准化的地面日变站测量系统^[4]。

(2)完成了2种航空物探测量系统的引进消化与吸收,在此基础上完成了相应软、硬件的配套开发与集成,形成了实际生产能力,并使我国在上述两方面的测量与解释技术达到国际先进水平。

顺利完成 GR-820 航空多道伽马能谱仪的引进、消化与试验生产,现已在国土资源大调查地质调查中发挥重要作用^[5];

完成了 IMPULSE 直升机六频航空电磁测量系统的引进与消化吸收,全面掌握了直升机航空电磁测量与解释技术,编制了相应的内部技术规程。通过国际合作、863 课题和地质调查项目的实施已形成了实际生产能力^[6-9]。该套系统在矿产勘查、煤火监测中应用效果突出,受到了多家国外矿业公司的青睐,为它们做了4个地区的测量,均受到好评。

(3)改装了3种测量飞机,新集成5套航空物探测量系统,大大提高了航空物探的勘查能力。根据工作需要,先后集成了2套 Cessna 208 飞机航磁测量系统、2套 Y8 飞机航空物探测量系统和1套硬架式直升机航磁/放系统,尤其是硬架式直升机磁/放测量系统的研制成功,进一步提高了航空物探适应不同测量条件的能力^[10]。

2.2 研发了具有自主知识产权的数据处理解释系统

自行研制了空中探针航空物探资料处理及成图软件系统(Airprobe)、基于 MAPGIS 的航空物探综合解释和成图系统(AGRSES V1.0),完善了数字制图与出版系统^[11-15]。在自主研制的软件系统中,集成了航遥中心原有的许多优秀的软件,并完成了一系列方法技术创新,给生产科研人员提供了强有力的工具和广阔的应用选择空间,均已推广应用。

引进了多套具有国际先进水平的 GeoSoft Oasis 地球物理数据处理系统和 EMIGMA 航电解释软件,在生产科研中得到广泛应用。

通过研发与引进并举,大大增强了航空物探数据处理解释能力。

2.3 方法技术研究取得新进展

(1)高分辨率航空物探测量与精细解释技术得到迅速发展,在危机矿山深部找矿与地下煤火探测中发挥了重要作用。

成功集成了硬架式直升机航磁/放射性测量系统。该套系统由高灵敏度氦光泵磁力仪、数字自动补偿仪、GR-820 高灵敏度航空多道伽马能谱仪、差分 GPS 导航系统等设备组成。具有飞行高度低、方式灵活、测量精度高等特点,是一种在复杂山区找矿的理想测量系统,已成功用于危机矿山找矿。

研制成功曲面位场处理系统,并应用于生产。

发展了重磁资料的精细反演技术,即完善了带地形的 2.5 维及 3 维重磁反演软件,研究了结合地质和钻孔资料进行航磁剖面精细反演、采用 SUR-PAC 技术对反演结果进行 3D 显示的方法。

精细反演技术大大提高了解释精度。例如,在内蒙乌达地区,依据航磁异常反演的地下燃烧体中 12 号模型体深度 21 ~ 20 m, ZK04 钻孔遇到烧变岩深度为 24 m,计算误差小于 15%。又如,对湖北大冶铁矿区面航磁异常的计算在离地 720 ~ 820 m 深处分布有一个强磁性体,推断为铁矿与夕卡岩体的综合反映。2006 年 11 月,中南地勘院大冶铁矿项目部布钻于 740 ~ 840 m 见到含矿砂卡岩体,其中铁矿体累计厚 14.6 m,铁的品位为 40% ~ 45%,铁矿体中还伴生有铜、金、银、钴等。上述 2 个实例表明,航磁精细解释结果与钻探结果吻合非常好。

(2)航空物探解释方法技术研究取得可喜进展^[16-27]。

在位场数据转换计算处理方面:进一步完善了测线数据样条插值网格化、低磁纬度变倾角化极软件,解决了数组内存动态开辟问题,计算网格数据量可由原来的常规数据量 2 048 点 × 2 048 点达到现在的 16 384 点 × 16 384 点;研制了离散数据光滑插值网格化方法与软件,该方法多用于离散随机数据的网格化计算,对测线数据的方向性不敏感;研制完成了剖面测线位场异常空间域非线性多频道带通滤波计算软件(空间域非线性曲率滤波方法通常还用于剖面数据区域和剩余异常的计算);完成起伏高度位场重磁异常的曲化平问题研究及软件的开发,采用空间域积分迭代方法实现曲线或曲面延拓计算,对下延计算的干扰压制效果比常规频率域 FFT 方法要好许多;

在场源位置及深度反演计算方面:基本完成航磁 ΔT 异常及其梯度反演解释处理软件系统的研制,主要包括:WINDOWS 系统下剖面测线 ΔT 异常总导数法自动计算磁源深度;基于 MAPGIS 的航磁异常切线法人机交互深度计算;利用平面网格磁异常梯度模极值圈定磁性体边界的方法研究及软件研制,主要实现了异常梯度带的连续搜索和追踪;平面

网格及剖面磁异常欧拉(Euler)褶积反演磁源位置及深度的方法研究及软件研制,主要实现了极值异常位置、范围及构造指数的自动确定、异常位置及深度的连续搜索追踪反演计算;初步完成平面网格及剖面磁异常梯度数据自动反演磁源参数(深度为主)的SPI(source parameter imaging)及ISPI(improved source parameter imaging)方法程序研制,主要实现了剖面异常场源构造指数、位置及深度的自动反演计算。

在重磁异常正反演可视化建模软件研制方面:开发了起伏地形剖面重磁异常半智能处理解释软件、重磁异常正反演可视化建模软件系统,并已逐步推广使用。

航空伽马能谱方法技术研究主要在以下取得进展:①地形改正方法研究,在进一步完善地形改正“比值法”的基础上,研究完成3类5种适用于复杂地形条件的航空伽马能谱地形改正方法,以及伽马能谱异常矩形反演方法,编制了适应复杂地形条件的航空伽马能谱数据处理软件,选择新疆东天山尾亚测区的能谱资料进行地形改正正试验,选择新疆底格尔测区的航空伽马能谱异常进行矩形反演方法的应用,均取得较好效果;②开展了航空多道伽马能谱测量全谱分析及环境辐射评价方法研究,系统分析了影响航空伽马能谱测量结果的因素,提出了GR-820航空伽马能谱测量系统测量精度评价方法。利用蒙特卡罗方法成功模拟了地面逸出理论伽马谱及GR-820伽马能谱测量系统空中实测伽马谱线。

2.4 航空物探基础和专题数据库建设的进展

近年来,航空物探数据库建设步伐加快,完成了全国航空物探遥感工作程度数据库、航电数据库管理系统和航空物探异常管理信息系统的建设,航空物探数据库建设取得重要进展。

全国航空物探遥感工作程度数据库针对航空物探和遥感信息特点,开发了相应的管理系统,并整理录入建国以来的各种航空物探和遥感技术资料信息,共收录航空物探信息4 272条,共收录航空遥感信息1 265条。航空物探(磁)异常管理信息系统^[28]以MAPGIS平台,对20世纪80年代以前的1万多份航磁异常查证登记表及检查卡片的相关信息进行了整理建库。全国航电数据库对全国30多万km的航电数据进行了整理,建立了基于SQL SERVER的数据库管理系统。

正在研建的航空物探数据库信息系统是一个以分布式网络共享数据、提供多种数据产品的综合服务为宗旨,集数据交换、处理、分析、存储、产品制作

与服务等功能为一体的信息系统,由数据采集系统和应用系统2部分组成。采用大型关系型数据库ORACLE作为其后台数据库,使用ArcGIS开发应用系统,通过ESRI的空间数据引擎ArcSDE对数据库进行管理。该系统已基本完成了软件系统的开发以及数据采集系统等的功能测试,正在进行应用系统集成与数据库实体建设。

3 航空物探主要应用成果

“十五”期间,我国国土资源航空物探取得一批高精度的勘查成果,为基础地质调查、矿产资源勘查以及环境地质调查与评价提供了重要的基础资料。

3.1 基础地质调查与研究取得重大成果

3.1.1 系列航磁图的编制与解释

开展系列航磁图的编制与解释,为加快区域地质调查的进度、提高地质填图的质量作出了贡献,为基础地质研究提供了重要的地球物理信息^[29-31]。

为配合1:25万区调,采用具国际先进水平的编图技术开展了全国航磁系列编图与解释工作,已编制140多个图幅的1:25万系列航磁图,对其中的部分图幅进行了初步地质解释,图件数据已在各图幅进行区调前及时提供给填图单位使用,收到了很好的效果。

编制出版了“中国及比邻海域1:500万航磁 ΔT 异常图”,该图系利用我国建国以来完成的432个航磁测区、1 204万测线km、2 002万km²测量面积的航磁测量数据,采用先进的数字编图技术编制而成,为社会提供了一份迄今为止覆盖中国国土面积最广的基础航磁图件。

3.1.2 覆盖区航空物探、遥感填图应用示范研究

开展覆盖区航空物探、遥感填图技术应用示范研究,在1:25万区调、特别是在1:25万区调前期准备中发挥了重要作用。

选择1:25万北京幅和内蒙四子王旗幅为示范区,以已有的航磁、航空伽马能谱、重力及遥感资料为主,集合新填图理论,采取了物探与遥感相结合、信息增强处理与目视解释(译)相结合、野外定点观察与剖面测量相结合的工作方法,侧重对资料的定性、定量推断解释,进行综合方法技术在覆盖广布区地质填图中的应用研究,为地质填图提供先验信息,并最终提供与区调地质图相配套的、可信赖度较高、内容丰富的推断地质图。通过研究,初步解决了覆盖广布区中区域构造及地质体(填图单元)边界的圈定、区域构造及地质体的空间特征和相互关系的分析、覆盖层厚度的计算等技术问题,形成了相应的方

法技术体系、工作流程,促进了1:25万航空物探遥感资料在基础地质调查工作中的规范化应用。

3.1.3 西藏—江两河地区、青藏铁路沿线航磁研究

在“九五”青藏高原中西部1:100万航磁概查取得重大成果的基础上^[32-39]，“十五”以来，在西藏—江两河地区和青藏铁路沿线面积约38万km²的范围内开展1:20万和1:25万的高精度航磁测量^[40,41]。通过综合解释分析：①新圈出隐伏岩体443处，其中基性-超基性岩体91处；②圈出隐伏断裂构造92条，其中：区域性断裂57条，一般性断裂35条。尤其是新发现的一组北西向断裂，为研究区域构造演化和雅鲁藏布江缝合带的构造变异具有重要意义，其中乌郁一路美断裂不仅切断了早期构造形迹，而且错移了雅鲁藏布江缝合带，构成两侧火山-岩浆活动、构造变异、地球化学场等截然不同的分界线，也是区内重要的控岩、控矿构造；羊八井—当雄大断裂南西抵谢通门，北东至巴青，控制了藏北地热田的分布。③圈出环形构造42处，主要为火山机构与穹隆构造组成；④对雅鲁藏布江双磁异常带提出了不同的认识，认为2条强磁异常带具有不同的成因机制，南带由伴随板块俯冲形成的超基性岩引起；北带是伴随缝合带和冈底斯构造带多期活动形成的中基性火山岩、中酸性-基性侵入岩和局部地段隐伏超基性岩的综合反映。

3.1.4 海域航磁解释研究成果

(从略)。

3.2 高精度航空物探在找矿中的新发现

“十五”以来，共发现航空物探异常3116处，圈定找矿远景区140个、找矿靶区102个。经部分异常的地面查证，在甘肃北山勒巴泉地区发现新的铜多金属矿，在大冶铁矿深部发现新的铁矿体，在沱沱河地区发现了新的铁矿，在广东某地发现了火山岩型铀矿等。据不完全统计，在航遥中心查证或踏勘的87处异常中，共发现铁、铜、金、铀等金属矿或矿化点十余处和许多找矿线索。

3.2.1 青藏铁路沿线1:20万航磁发现新铁矿

在青藏铁路沿线区内选编航磁异常1692个，其中新发现1362个，优选具有找矿意义的甲乙类异常574处，其中推断与铁矿有关异常105处。主要分布在岩体与围岩的侵入接触带或火山岩中，由南向北大致形成：雄马-谢通门、邦多-雄梅-嘉黎-赛那-下秋卡-唐古拉山口-仓来拉、沱沱河-查岗、东昆仓南缘等6条铁矿异常带。预测铁、铜等多金属找矿远景区101片，其中：一类找矿远景区37片、二类找矿远景区40片、三类找矿远景区24片，并在部分

找矿远景区内优选找矿靶区115处，为青藏铁路沿线矿产资源评价，提供了大量线索。目前已有35处异常已由首钢地勘院等多家单位办理了矿产勘查证。经有关单位地面查证在藏C-2000-3、藏C-2001-3、藏C-72-167、青C-2005-41和藏C-2003-116等异常发现了铁矿，规模达到大型或中型以上，藏C-2000-8异常发现铜矿化。

3.2.2 在甘肃勒巴泉地区发现铜及多金属矿

在北山一带开展了面积近4万km²的1:5万高精度航空物探综合站(磁、电磁、伽马能谱)勘查，获得了丰富的航空地球物理信息，完成了岩性构造填图和找矿远景预测工作，取得了明显的地质找矿效果。全区共新编航空物探异常695个，其中航磁异常563个，航电异常72个，航空γ能谱异常60个。划分出21个找矿远景区，其中一级找矿远景区9个、二级找矿远景区6个、三级找矿远景区6个。对其中34个异常检查和踏勘，发现了多处找矿线索，尤其是在勒巴泉铜及多金属一级找矿远景区(I6)内发现了勒巴泉铜及多金属矿。

通过对勒巴泉以东的甘C-2002-146、甘D-2002-55组合异常的查证，在勒巴泉一带中上志留统的安山岩内发现一条铜、金、银多金属矿带，取样化学分析铜元素高达3.45%，伴生的金、银接近工业品位。在该区域地质踏勘中，发现这一地区的地质特点与公婆泉铜矿区相似，中酸性斑岩体和断裂构造非常发育，具有形成斑岩型铜矿和火山热液型铜矿的良好地质条件。目前，该异常区已取得探矿权，地面勘探工作还在开展过程中，有望在寻找铜、银、金等矿床方面取得突破。

3.3 航空物探在油气勘查评价中有突出效果

“青藏高原中西部航磁概查”对区内油气资源远景进行了初步评价，圈出沉积盆地11个，其中新圈出4个；结合高原油气生、储、盖形成和集聚规律，认为羌塘盆地和羊湖—雪景湖盆地是区内含油气远景最有希望的盆地，并指出了可供进一步勘查的12个有利局部凸起。

在海域进行的高精度航磁测量发现数百处构造异常，几十处找油气远景区。在某海域1:5万高精度航磁发现的构造为该区确定井位提供了依据。

近年以来，先后承担了辽河油田、胜利油田、中石化南方油气勘探事业部等单位的油气新区勘查评价项目，勘查面积4万多km²，圈定出10多个有利的含油气构造。同时，利用已有航磁资料和最新的解释处理方法对部分油田周边地区重新进行了油气解释评价，扩大了找油远景，充分显示了航空物探在

油气勘查评价中的突出效果和不可或缺的作用。

3.4 扩大航空物探应用领域, 社会和经济效益显著

3.4.1 航空物探和遥感煤火探测技术重要成果

结合国家 863 计划课题和地质调查任务, 在国内首次开展 1: 5 000 高分辨率航空物探测量, 采用 IMPULSE 航电系统和航磁系统用于地下煤层自燃探测, 系统地研究了地下煤层自燃区岩石的磁、电、放等物性特征, 初步总结出处于不同燃烧阶段的岩石地球物理场的变化模式; 研究了磁异常 3 维反演、电性体反演、氧测量深度反演和温度场反演煤火深度的方法; 总结出主要基于航空物探和遥感方法的地下煤火探测的方法技术组合和工作流程; 圈定了乌达矿区煤火分布范围, 为矿区煤火的探测和灭火工程部署提供了科学依据。探测成果已应用于煤田防火灭火工程, 取得了较好的社会效益^[6,42]。

3.4.2 航空能谱测量用于区域放射性污染监测

在广东南部珠海—深圳地区完成航空物探综合测量取得了珠海、深圳等城市地面天然辐射测量数据和海面宇宙射线电离辐射剂量率, 查清了珠海—深圳地区的天然辐射水平及其对人文活动造成的影响程度, 进行了环境评价研究, 探索出一套适合于城市环境调查的测量技术、质量控制和解释方法。

3.5 航空物探成果社会化服务的进展

“十五”以来, 社会对航空物探资料的需求明显增大, 航空物探资料的社会化应用得到明显加强, 航空物探资料的潜在应用价值已得到社会的广泛认可。据不完全统计, 仅中国国土资源航空物探遥感中心资料室便向国内外 193 多家地勘、科研单位、公司等提供了航空物探资料、查询和编图等服务, 其中提供航空物探成果图件 6 000 多张、成果报告 399 份、数据光盘 153 套。另外, 向全国地质资料馆/中国地质调查局资料馆汇交航空物探成果资料 52 份, 全部获得资料汇交合格证书。

4 航空物探技术发展展望

“十一五”及今后一段时间, 我国航空物探将以国家 863 计划重大项目《航空地球物理勘查技术系统》的实施为技术发展主线, 以服务于矿产资源保障工程、海洋地质保障工程和地质环境保障工程等国家重大工程的需求为应用重点, 在技术水平与调查能力等方面得到快速发展。

(1) 航空物探对目标物的分辨能力将进一步提高, 探测深度进一步增大, 解决地质找矿问题的能力不断提高。

(2) 航磁全轴梯度测量和矢量测量与解释方法

将得到快速发展, 并实用化; 以直升机航空磁、电测量或直升机航空磁、伽马能谱测量为主的高分辨率航空物探测量及解释方法技术研究等, 将进一步推动相应的技术在找矿和地学研究中的应用。

(3) 时间域航空电磁测量技术将取得突破, 在消化吸收的基础上完成自主开发研制与创新, 探测深度将进一步增大, 为深部找矿和寻找盲矿提供更有效的服务。

(4) 航空重力测量技术将在国内得到迅速发展, 在引进航空重力测量系统的基础上进行自主创新研制。航空重力测量将在油气评价与基础地质研究等方面得到广泛应用, 并填补我国重力测量空白区。航空重力梯度测量的关键技术将在不久的将来得到突破。

(5) 航空物探解释技术将在各种反演技术、三维可视化等方面得到快速发展, 并实现工程化应用。

(6) 航空物探将在传统领域得到更大规模的应用, 应用领域将不断扩大。航空物探将在全国新一轮 1: 5 万矿产调查、全国重要矿产资源潜力评价、危机矿山找矿等工作中发挥重要作用; 航空重力与航磁综合测量将在能源矿产勘查在我国主要含油气盆地油气勘查中的应用将得到进一步加强; 将继续加强航空物探在地质灾害、环境、军事应用等多领域的应用研究, 为环境治理、城市规划和国防建设提供基础资料。同时为基础地学研究提供高精度航空物探数据资料及解释成果。

限于篇幅、信息来源和本人水平等因素, 笔者仅对我国国土资源系统遥感和航空物探信息系统建设情况做了初步介绍, 不妥之处敬请批评指正。本文编写过程中刘浩军、陈斌、王世林、范正国、薛典军、周坚鑫、郭志宏、于长春、王卫平、王德发、梁月明、王乃东、乔日新、郭建华、徐昆、姚正煦、吴其反、周锡华、周道卿等许多同志提供了资料和帮助, 在此谨表谢意!

参考文献:

- [1] 熊盛青. 航空物探“九五”科技进展综述[J]. 物探与化探, 2002, 26(1): 1.
- [2] 熊盛青. 抢占航空物探技术前沿[N]. 中国矿业报, 2002, 8月16日第1版.
- [3] 熊盛青. 国土资源遥感和航空物探信息系统建设进展[J]. 国土资源信息化, 2004, (4): 11.
- [4] 周锡华, 孟祥聪, 王金龙, 等. 智能化磁力率仪的研制[J]. 物探与化探, 2005, 29(5): 428.
- [5] 周锡华, 乔广志. 新一代航空多道伽马能谱仪的引进与初步应用[J]. 物探与化探, 2002, 26(4): 318.
- [6] 熊盛青, 陈斌, 于长春, 等. 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.

- [7] 王卫平,王守坦. 吊舱式直升机频率域电磁系统在北京红光铁矿的勘查效果[J]. 物探与化探, 2006, 30(5):420.
- [8] 王卫平,王守坦. 直升机频率域航空电磁系统在均匀半空间上方的电磁响应特征与探测深度[J]. 地球学报, 2003, (3):285.
- [9] 周道卿,谭捍东,王卫平. 频率域航空电磁资料 OCCAM 反演研究[J]. 物探与化探, 2006, 30(2):162.
- [10] 王乃东. 硬架式小型直升机磁放测量系统[J]. 地质与勘探, 2005, 41(增刊):155.
- [11] 刘浩军,薛典军,郭志宏,等. 航空物探软件系统研制[J]. 物探与化探, 2003, 27(2):146.
- [12] 薛典军,梁秀娟. 磁可变可视化编辑软件的开发[J]. 物探与化探, 2002, 26(2):148.
- [13] 陆素文,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其应用[J]. 物探与化探, 2004, 28(1):65.
- [14] 于长春,郭志宏,陆素文. 航空物探领域的 GIS 开发与应用[J]. 物探化探计算技术, 2003, (1):39.
- [15] 黄旭钊,梁月明,徐昆. GIS 在岩石物性信息管理和分析中的应用[J]. 地质与勘探, 2005, 41(增刊):167.
- [16] 郭志宏. 一种实用的等值线型数据网格化方法[J]. 物探与化探, 2001, 25(3):203.
- [17] 陆素文,安玉林,黄金明. 复杂条件下局部重磁场源全方位成像系统在云南某地的应用[J]. 物探与化探, 2002, 26(5):388.
- [18] 于长春,周坚鑫,郭志宏. 低磁纬度区 ΔT 剖面磁异常场源深度计算的切线法[J]. 物探与化探, 2003, 27(5):391.
- [19] 郭志宏,刘浩军,熊盛青. 平面网格位场数据的空间域非线性曲率滤波方法[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(1):134.
- [20] 于长春,熊盛青,郭志宏,等. 改进的非线性滤波方法及其在中高山地区的应用[J]. 物探与化探, 2003, 27(1):39.
- [21] 陆素文,于长春,熊盛青. 中高山区高精度航磁视磁化强度填图方法[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2):357-362.
- [22] 郭志宏,管志宁,熊盛青. 长方体 ΔT 场及其梯度无解折奇点理论表达式[J]. 地球物理学报, 2004, 47(6):1277.
- [23] 郭志宏,熊盛青,曹建平. 航磁异常总梯度模反演方法的实用化改进及软件研制[J]. 物探与化探, 2004, 28(6):518.
- [24] 熊盛青. 航空伽马能谱异常解释中地形影响及校正方法研究[J]. 地学前缘, 1998, 15(1):341.
- [25] 范正国,于长春. 航空伽马能谱地形改正新方法及应用[J]. 物探与化探, 2005, 29(1):28.
- [26] 黄旭钊,范正国,梁月明,等. 以先验地质资料为基础的放射性参数统计方法[J]. 物探与化探, 2004, 28(5):439.
- [27] 王南萍,熊盛青,周锡华,等. 航空伽马能谱仪对¹³⁷Cs点源响应特征及谱数据信息提取技术[J]. 核技术, 2005, 28(4):313.
- [28] 郭志宏,徐昆. 中国航磁异常管理信息系统开发与建设[J]. 地球物理学进展, 2002, (4):703.
- [29] 张文斌. 高精度航空物探综合测量在地质填图中的应用[J]. 物探与化探, 2004, (4):283.
- [30] 方迎尧,范正国,乔春贵,等. 北京南部地区地球物理特征与区域地质构造[J]. 物探与化探, 2005, 29(1):5.
- [31] 梁月明,黄旭钊,徐昆,等. 新疆康古尔塔格断裂带地球物理场及深部地质特征[J]. 中国区域地质, 2001, (4):398.
- [32] 熊盛青,周伏洪,姚正煦,等. 青藏高原中西部航磁调查[M]. 北京:地质出版社, 2001.
- [33] 周伏洪,姚正煦,薛典军,等. 航磁概查对青藏高原一些地质问题的新认识[J]. 物探与化探, 2001, 25(2):81.
- [34] 姚正煦,周伏洪,薛典军,等. 雅鲁藏布江航磁异常带性质及其意义[J]. 物探与化探, 2001, 25(4):241.
- [35] 周伏洪,姚正煦,刘振军,等. 青藏高原中北部北东向深部负磁异常带的成因及其意义[J]. 物探与化探, 2002, 26(1):12.
- [36] 姚正煦,周伏洪,薛典军,等. 青藏高原中西部板块缝合带航磁特征[J]. 物探与化探, 2002, 26(3):165.
- [37] 熊盛青,周伏洪,姚正煦,等. 青藏高原中西部航磁概查[A]. 学科发展蓝皮书 2004 卷[C]. 北京:中国科学技术出版社, 2004.
- [38] 王有学,姜枚,熊盛青,等. 西昆仑岩石圈的拆沉作用及其深部构造含义——地震层析成像及航磁异常证据[J]. 中国地质, 2006, 33(2):299.
- [39] 薛典军,姜枚,吴良士,等. 青藏高原区域重磁异常的东西向分布及其构造地质特征[J]. 中国地质, 2006, 33(4):912.
- [40] 王德发,周坚鑫,刘振军,等. 西藏—江两河地区高精度航磁勘查效果[J]. 地质通报, 2003, (11-12):912.
- [41] 王德发,刘英才,熊盛青,等. 西藏铬铁矿接替资源航磁勘查与找矿方向探讨[J]. 地质通报, 2007, 26(4):476.
- [42] 朱晓颖,于长春,熊盛青,等. 磁法在煤火探测中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(2):115.

THE ADVANCES OF AEROGEOLOGICAL SURVEY IN CHINA SINCE THE TENTH FIVE YEAR PLAN AND ITS DEVELOPMENT TREND

XIONG Sheng-qing

(China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper briefly recounted the general situation, the main technological development and the application results of airborne geophysical survey in national land and resources survey since the beginning of the 21st century, and made an analysis and prognosis of the development trend of airborne geophysical exploration in China.

Key words: airborne geophysical survey; technological development

作者简介: 熊盛青(1963-),男,博士,教授级高级工程师,博士生导师,政府津贴获得者,现任中国国土资源航空物探遥感中心副主任、总工程师,国家 863 计划重大项目专家组组长,长期从事航空物探和遥感技术研究和管理工作,曾独立或合作发表专著 5 部,论文 60 多篇。