

doi: 10.11720/wtyht.2018.1482

李怀渊,江民忠,陈国胜,等.我国航空放射性测量进展及发展方向[J].物探与化探,2018,42(4):645–652.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1482>

Li H Y, Jiang M Z, Chen G S, et al. The brilliant achievements and technological innovation of airborne radioactivity survey in China[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(4): 645–652. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2018.1482>

我国航空放射性测量进展及发展方向

李怀渊¹, 江民忠¹, 陈国胜², 全旭东¹, 常树帅¹

(1.核工业航测遥感中心 中核集团铀资源地球物理勘查技术中心重点实验室, 河北 石家庄 050002; 2.中国核工业地质局, 北京 100013)

摘 要: 简要回顾了我国航放测量技术的发展历史, 分析了航放测量的技术现状, 指出已经形成了完整的航放测量技术体系。对 60 年来我国航放测量取得的重大进展和技术创新成果进行了较为系统全面的总结, 认为我国航放测量仪器设备研发和技术水平达到了国际先进水平, 技术创新成果从矿产勘查拓展到了工程地质、水文地质调查和环境调查与监测等领域。探讨了今后航放测量技术发展的 7 个主要方向: 高精度大比例尺方向、放、重、磁、电综合集成化方向、无人值守和无人机方向、高原和高山无人区方向、成矿预测向多元信息综合方向、由地质找矿向环境调查方向扩展、科技创新和自主研发方向; 梳理了航放测量工作中存在的 6 个主要问题, 提出了今后的工作建议。

关键词: 航放测量; 重大进展; 技术创新; 发展方向

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2018)04-0645-08

0 引言

航空放射性测量又称为航空 γ 测量、航空 γ 能谱测量, 简称为航放测量, 是航空物探测量的重要方法之一, 它是将航放测量系统安装在飞行器上, 在飞行器航行过程中探测空中 γ 射线强度变化、并据此获取地面放射性地球物理场信息研究地质规律, 进行地质调查、矿产与油气资源勘查和环境调查评价等的一种地球物理勘查方法^[1-3]。航放测量以其快速、高效、成本低、覆盖面广、信息量大、找矿效果明显等优势在国内外铀及其他矿产勘查、远景评价及各项地质研究中占有重要的位置, 起着先行作用。

随着航放测量仪器的数字化程度及探测精度的提高和勘探技术的发展, 航放测量技术已在区域地质调查、多金属和非金属矿勘查、石油天然气勘查等领域得到广泛的应用, 并拓展到环境监测、城市环境基础调查、国家重要设施建设的选址调查、防灾减灾、农业土壤调查和环境保护等方面。航放测量技

术的应用在国民经济发展的各个领域发挥了十分重要的作用。

1 航放测量技术发展历史回顾

1923 年, 前苏联 Л.Н. 鲍戈亚夫连斯基著《放射性测量》一书, 论述了在地质勘查中开展放射性勘查的原理和方法, 从而诞生了放射性测量方法。1944 年, 加拿大使用盖革计数器开始航放测量试验性飞行, 1948 年航放测量试验取得成功。1949 年, 美国、加拿大、前苏联和英国开始设计航空闪烁辐射仪。从 1950 年开始, 这些国家在铀矿勘查中大面积开展航放测量工作^[1-2]。我国于 1954 年开始进行放射性普查工作, 1955 年开始航放测量, 早期由中国和前苏联合营, 后来由各个地区分别组队开展工作, 1963 年以后由核工业航测遥感中心(简称核航遥中心)前身——核工业部北京七〇三航测队统一承担全国的航放测量任务。在后续的发展中, 中国国土资源航空物探遥感中心(简称国土航遥中心)、

收稿日期: 2017-06-05; 修回日期: 2017-09-08

作者简介: 李怀渊(1965-), 男, 研究员级高级工程师, 2002 年毕业于中国地质大学(北京)地球探测与信息技术专业, 获博士学位。

中国冶金勘查总局物探勘查院物化探中心(简称冶金航测队)和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所(简称地科院物化探所)先后开展了部分区域的航放测量工作。整个技术发展大致经历了组建航空物探队伍,掌握航空物探技术;自力更生发展航放测量技术;引进航放测量仪器设备,提高航放测量技术和以铀矿勘查为主扩大航放测量技术应用领域四个阶段^[4-5]。通过这四个阶段的发展,技术水平得到了不断提高。60年来先后使用十几种不同类型的飞机,12种型号的仪器,2种技术方法,在全国除台湾省、香港和澳门外的所有省区陆地部分开展了航放测量工作。

2 航放测量现状

2.1 航放测量工作程度

截至2014年底,全国从事航放测量的4家单位共完成航放测量测区372片,累计完成测线约 123.85×10^4 km,不同时期、不同比例尺航放测量覆盖面积约 622.8×10^4 km²,共发现航放异常6600多个。其中国土航遥中心完成航放测区72片,完成测线约 106.6×10^4 km,覆盖面积约 66.4×10^4 km²,发现异常不详;冶金航测队完成航放测区14片,完成测线约 136.5×10^4 km,覆盖面积约 45.0×10^4 km²,发现异常1515个;地科院物化探所航测队完成航放测区6片,完成测线约 79.2×10^4 km,覆盖面积约 38.2×10^4 km²,发现异常507个;核航遥中心完成航放测区280片,完成测线约 916.2×10^4 km,覆盖面积约 473.2×10^4 km²,发现异常4600多个。前三个单位由于行业分工的不同,对于发现的航放异常只进行了选编,未开展地面查证和进一步研究工作;核航遥中心对发现的绝大多数航放异常开展了地面查证和进一步的揭露、勘探。经初步统计,航放直接发现铀矿床53个,占全国铀矿床总数的16%^[5]。中国最大的相山铀矿田就是航放测量时发现的。

已完成航放测区覆盖全国49个铀成矿区带中的33个区带,尚有16个铀成矿区带缺少航放测量数据。全国陆域航放测量工作程度较高的铀成矿区带主要有桃山—诸广铀成矿带、武夷山铀成矿带、赣杭铀成矿带、沽源—红山子铀成矿带、额尔古纳—满洲里铀成矿带、二连盆地铀成矿区、鄂尔多斯盆地铀成矿区、吐哈盆地铀成矿区等。

目前全国高精度大比例尺(采用卫星导航定位且测量比例尺大于等于1:5万)航放测量覆盖面积仅 187×10^4 km²。其中,主要铀成矿带上高精度大

比例尺航空物探完成面积仅 70.8×10^4 km²,还有约 271×10^4 km²铀成矿带属于待勘查区域。我国西部和南部的高海拔复杂山区等铀成矿有利地区大多仍是航放测量的空白区。

2.2 航放测量技术现状

经过几代航空物探人的不断努力,我国的航放测量仪器设备和技术水平已达到了国际领先水平。目前国内拥有多套加拿大制造的RS-500和GRS-10S型,美国制造的GR-820型,我国自主研发的703-I型、AGS-863型、AGRSS-15型等国际领先水平的航放测量系统及配套的数据处理软件;引进了俄罗斯利用航放测量的数据求得放射性化学特征参数(RGS)的方法和软件,并经过多年的生产实践,先后研制了航空物探数据地面预处理系统、CDAS-1、ADAS^{NT}航测数据收录系统、高精度数字控制全自动稳谱装置、ARCN航空数据预处理应用软件等软硬件,掌握了先进的航放测量技术和软硬件开发技术,开发的部分软硬件具有自主知识产权。同时,还成功研制出了具有自主知识产权、达到国际先进水平的高性能航空伽马能谱仪,研究开发了四大类型铀矿成矿信息提取与预测技术;编制了我国《航空伽马能谱测量技术规范》;研建了航空伽马能谱仪校准模型标准装置,形成了完整的航放测量技术体系。

3 航放测量重大技术进展

航放测量历经60年的发展,在仪器设备、方法技术、勘查成果等方面取得了一系列重大进展与技术创新。

3.1 仪器设备方面的进展与创新

3.1.1 仪器设备更新换代

1955年以铀矿勘查为目的的航放测量刚刚起步,当时使用的仪器为前苏联生产的CFM-10型航测仪(仅用半年)和ACFM-25型综合航空物探测量站(航放总量仪、航空磁力仪集成)。ACFM-25型综合航空物探测量站伽马总量测量仪探测器为盖革米勒计数管,灵敏度约为39 cps/Ur。1967年国产FD-115型闪烁航空伽马测量仪投入生产,其灵敏度约为70 cps/Ur。1972年国产FD-123型四道航空伽马能谱仪研制成功投入生产,其总量灵敏度约为118 cps/Ur,但可用于能谱测量,从而使中国航放测量工作由伽马总量测量进入到伽马能谱测量的新阶段^[4,6]。1977年FD-123单探头四道伽马能谱仪改装成双探头,使晶体体积增加了一倍,与原来单探头FD-123航空伽马能谱仪相比,总道计数率提高

30%,钾、铀、钍窗计数率提高 95%,探测效率得到了明显改善。

20 世纪 70 年代末到 80 年代初,先后从国外引进多套先进的高灵敏度航放测量设备和数据处理用的计算机系统,如多套美国 GEOMETRICS 公司生产的 GR-800D 航放测量成套设备和一套 PRIME 公司生产的电子计算机系统,其总量灵敏度约为 168 cps/Ur,同时配套引进两架贝尔 212 型直升机。1986 年建成了航空伽马能谱仪校准模型标准装置,为航空伽马能谱测量系统的标定校准提供了标准设施^[7]。1990 年开始相继从加拿大、美国引进 TANS-II 型、TNL-2000 型、TNL-2100 型 GPS 接收机应用于航放测量定位,使得航放测量定位精度大大提高^[8]。2002 年将 GR-800D 升级为 GR-820 航测系统,实现了测量数据的磁盘记录,取代了磁带记录。2004 年后从加拿大 PICO 公司引进了 GRS-16、GRS-10S 和 RS-500 等型号的航放测量系统,实现了航放测量无源自动稳谱和数据磁盘记录。引进的航放设备技术水平先进,能谱仪可测到 $(1\sim 2)\times 10^{-6}$ 级放射性元素含量,仪器稳定性好,自动化程度高。我国的航放测量设备的更新换代,一直紧跟国际先进水平。

3.1.2 仪器设备的引进消化吸收和再创新

1999 年,核航遥中心技术人员在生产实践中对早期引进的设备及配套软件进行改造、升级使之接近国际先进水平。如对早期引进的数据处理用的 PRIME-550 计算机升级为 PRIME-4050,然后移植到微机系统上;完成了航放设备空中收录系统改进,对早先引进航放设备中的 G-725 地面基站经过研究改造,由“航空物探数据地面预处理系统”予以取代,整体性能达到国际同类产品水平。2001 年研制成功 CDAS-1 航放数据收录系统,2009 年研制出功能更加强大的 ADAS^{NT} 数据收录系统,实现了电子存储、硬盘和光盘数据存储,2002 年正式应用到航放测量生产中,代替了早先的纸带、磁带记录。为了减少航空伽马能谱仪峰位漂移、提高数据质量,2002 年研制成功高精度数字控制全自动稳谱装置,能谱仪峰位漂移从 ± 3 道提高到 ± 1 道,能谱数据质量显著提高,同年还成功研制出了我国新一代 703-I 型核应急航空监测系统,具有国际先进水平,拥有放射性烟羽追踪和定向探测放射性功能。

2000~2002 年,核航遥中心和国土航遥中心先后引进了 GR--820 航空伽马能谱仪^[9]。通过几年的应用,为了进一步提升收录系统智能化等功能,核航遥中心又先后解决了航放系统升级后预处理软件不配套、数据格式不统一等问题。2005 年研制成功

GR-820 航放系统配套应用软件。2009 年对软件进行了升级和功能扩展,研制成功 ARCN 航空数据预处理应用软件,其中质量控制模块、智能化的浏览模块具有自主知识产权,实现了功能模块化、应用菜单化、不同型号设备数据处理和格式的统一。

2012 年成都理工大学联合国土航遥中心和核航遥中心共同研制出了 AGS-863 全数字化航空伽马能谱测量系统^[10-11],实现了多项关键性技术突破,打破了国际市场的技术和产品垄断。2013 年核航遥中心研制出具有自主知识产权的 AGRSS-15 型适合直升机装载的小型化航放、航磁测量系统,并成功应用于航空物探生产,解决了航空伽马能谱测量系统集成与测试中的抗振技术、多信号控制技术、可存储技术、系统集成技术、测试技术等多项关键技术难题。2015 年核航遥中心和地科院物化探所联合研制了无人机航放航磁测量系统并成功应用于示范区测量。2016 年核航遥中心在国内首次将航放系统与航磁、时间域航电系统集成并试验成功。通过引进消化吸收和再创新,我国航放测量仪器设备和技术水平达到了国际先进水平。

3.2 航放生产方面的进展与成果

3.2.1 航放测量完成的工作量及直接成果

1955~1960 年,航放测量分队先后使用 56 架安-2 型飞机主要搭载前苏联生产的 ACFM-25 型综合航空物探测量站,采用纸带记录数据、领航员目视领航、空投石灰包进行空中定位的方式开展了航空伽马总量测量。在全国 17 个省区共飞行 24 218 h 42 min,完成不同比例尺的测量面积 651 798 km²,发现航放异常 2 486 个^[4]。经过地面揭露勘探,湖南大浦 A₅₅-10 号异常发展成汪家冲(大型)、浦魁堂(小型)和学陶岭(小型)3 个铀矿床;湖南郴州 A₅₅-15 号异常发展成金银寨大型铀矿床;江西上饶 A₅₆-20 号异常发展成坑口中型铀矿床;1957 年在江西乐安发现的 903 号异常经揭露勘探逐步发展成为横涧、岗上英、红卫、邹家山等 20 多个铀矿床,从而形成中国最大的相山火山岩型铀矿田。此外,在此期间通过航放测量还先后发现湖南老卧龙、湖南宁乡黄材、江西飞阳招宾 60 号、江西贵溪余家 65 号、江西峡江天长寿 632 号、广西平南马鞍肚、河南遂平尖山和内蒙古昭乌达盟红山子等 25 个异常,经过揭露勘探发展成为 25 个大、中型铀矿床。

1961~1962 年由于油料缺乏致使航放测量生产中断了 2 年。1963~1979 年,使用运五、直五、云雀三种机型共 65 架飞机,领航员目视领航,空中定位方式由空投石灰包过渡到照相航迹恢复,定位精度

有所提高。在全国 18 个省区,共飞行 17 898 h 5 min,完成不同比例尺测量面积 423 177 km²,共发现航放异常 944 个,从中找到航放好点 18 处。其中 1973 年发现的湖南怀化麻池寨 HF-3 号、1976 年发现的湖南嘉禾县坳头 HF-3 号、1978 年发现的海南雷鸣盆地 HF-3 号等好点均已发展成铀矿床。

1979~1988 年,使用运五、运十一、运十二、双水獭等 4 种固定翼飞机和贝尔直升机共 65 架,领航员目视领航,空中定位方式由照相航迹恢复过渡到航迹录像,定位精度明显提高。在全国 19 个省区飞行 23 360 h 9 min,完成不同比例尺的测量面积 846 347 km²,共发现航放异常 747 个,找到航放好点 26 个,取得了较好的找矿成果^[12]。

1988~2000 年,使用运五、运十二飞机 55 架,飞行 17 966 h 6 min,领航员被 GPS 取代,空中定位方式由航迹录像过渡到 GPS 同步位置测量,定位精度达 10 m 左右。完成不同比例尺测量面积 1 709 451 km²,发现航放异常 251 个,航放好点 13 个。

2000~2014 年,使用运五、运十二、小松鼠 B3 飞机 39 架,飞行 12 451 h,GPS 同步差分定位测量,定位精度达到亚米级,完成测线约 195×10⁴ km²,控制测量面积约 238 ×10⁴ km²,发现航放异常 660 多个,航放好点 6 个。大兴安岭地区航放异常查证有一个航放好点发展成为小型铀矿床,一个航放异常发展成为中型铀矿床。

冶金航测队 1967 年、国土航遥中心 1972 年、地科院物化探所 2006 年分别开始进行航放测量,先后使用不同型号的仪器设备完成了大量航放测量任务,也积累了丰富的航放测量资料,但由于行业分工的不同,对于发现的航放异常只进行了选编,未开展地面查证和研究工作,所获资料有待于进一步开发和利用。

3.2.2 航放测量获得的间接成果

60 年来,航放测量完成测区 372 片,飞行测线约 1 238.5 ×10⁴ km,不同比例尺航放测量覆盖面积约 622.8×10⁴ km²,发现了大量的航放异常,获得了覆盖区域内可靠翔实的海量航放测量数据,对于覆盖区域内的构造、岩浆岩、地层等地质环境要素的分布进行了分析研究,预测铀及多金属成矿远景区 600 多片。据不完全统计,我国已发现的铀矿床 90%多都分布在依据航放测量资料圈定的远景区内或其附近,如皂火豪、纳岭沟、大官厂、努和廷、十红滩等铀矿床。这进一步证明了航放测量工作的重要性及航放测量资料在铀及其他矿产勘查中的重要应用价值。

3.3 航放测量技术开发研究方面的进展与成果

1) 航放测量资料的开发及应用。为了充分发挥航放测量资料在铀矿战略选区中的作用,对以往取得的资料进行整理,于 1988 年完成 1 : 100 万、1 : 200 万和 1 : 400 万“中国航空伽马射线强度等值图”的编制任务;1989 年完成 1 : 100 万“中国航空放射性测量工作程度和异常点成果图”;1995 年内部出版了 1 : 100 万“中国伽马辐射照射量率图”;2002 年开展了中国北方地区航空物探资料二次开发和全国航放测量数据库的建立;2006 年至今为全国铀资源潜力评价项目提供了齐全丰富的航放测量资料等。这些资料的开发利用,为铀及其他矿产的勘查和放射性环境评价提供了十分丰富的资料支持。

2) 从 1990 年开始了航放航磁与遥感同步调查的试点工作,探索航放测量技术在可地浸砂岩型铀矿找矿中的作用,同时开展对已有资料的开发和研究工作^[13]。先后在伊犁盆地、吐哈盆地、准噶尔盆地、二连盆地发现了大量航放异常点带,圈定了多片铀成矿远景区带,经进一步勘探发现的铀矿床大多都处于所圈定的远景区内或远景区附近,与航放异常点带有直接或者间接的联系。这也证明了航放测量在砂岩型铀矿的直接找矿和远景区预测中的重要作用。

3) 80 年代后期,核航遥中心开始了伽马能谱勘查油气的试验研究工作,先后采用航放和航磁测量方法为大庆、辽河、大港、华北、玉门、长庆等油田以及青藏、南方新区、西北等项目经理部在陕西、青海、新疆、甘肃、内蒙、辽宁、黑龙江、吉林、云南、西藏等省区飞行 4 290 h,完成不同比例尺面积覆盖 657 603 km²。同时也应用铀矿普查时在一些盆地获得的资料,重新进行数据处理和解释,其面积达 37×10⁴ km²。其探测效果据油田不完全统计,与已知油田符合率达 70%左右。在大面积油气勘查早期,应用航放航磁技术勘查油气田具有速度快、效率高、成本低等特点,可加快勘探步伐,节约投资。

4) 80 年代中后期,航放测量成功应用于多金属找矿,取得了令人满意的找矿效果。如在额尔古纳多金属成矿带试验中,伽马能谱资料圈定的多金属成矿区与已知矿床、矿点符合率达 80%左右。预测铜银—多金属找矿靶区 36 处,其中 I 类靶区中都分布有化探异常,而靶区范围较化探异常区缩小了很多,并经钻探查证见到了工业矿体^[14];在粤北地区,伽马能谱资料圈定的多金属成矿区与斑岩型铜铅锌矿床符合率大于 75%,与矽卡岩型铜铅锌矿床符合

率达 83%;在河北承德—平泉地区找金工作中,利用伽马能谱资料在深平县境内找到金矿产地一处,矿化点 25 处,预测远景区 12 片。因此,航放测量方法是多金属找矿中一种较为快速且经济的方法。而且航放测量往往同航磁测量同时进行,资料综合解释应用找矿效果会更好。同时航放测量资料还可用于钾盐、磷矿等矿产的勘查。

5)航放测量技术可用于工程地质、水文地质调查,确定重要工程场址的稳定性,预测地下水资源的分布范围;也可用于城市环境调查,了解城市辐射剂量、放射性污染源分布等情况,以便为城市规划和建设提供依据。核航遥中心从 1988 年开始分别在石家庄、云南红河州、上海市、秦山核电站等地区开展过城市环境调查工作^[15]。

6)航放测量技术可应用于环境辐射本底及核应急检测。随着秦山、大亚湾核电站的运行,田湾核电站的兴建,我国核电发展进入一个新的阶段。核电站的运行是否对周围环境造成放射性污染,是人们迫切关心的问题。核航遥中心于 1994 年初对秦山核电站和上海地区的天然放射性水平进行调查。2009 年参加了“神盾-2009”我国首次联合核应急演练,按时将航空监测数据和图像实时传输到地面。2012 年在建的三门核电站实施了环境辐射本底航空测量调查,这是我国首个在建核电站启动环境辐射本底航空测量调查。航空伽马能谱测量可以监测核电站运行是否存在核泄漏问题,同时一旦周边国家发生核泄漏事故时,可及时监测对我国环境造成的影响情况。

7)开展航放弱信息的研究及其提取技术。建立了航放弱信息的形成机理模式;开发了一套航放弱信息提取方法和干扰信息的抑制技术;建立了航放弱信息显示区和航放弱信息尖峰显示区的识别准则;建立了铀矿找矿靶区的综合评价准则;在应用试验方面,已经在新疆伊犁盆地、内蒙古二连盆地以及新疆吐哈盆地开展了应用试验研究,都取得了明显的找矿效果^[16]。1997 年在伊犁盆地南缘地区预测的一个二级找矿靶区内发现了 513 大型层间氧化带砂岩型铀矿床,应用效果明显。

8)进行航空伽马射线全能谱分析方法的研究。通过航空伽马射线全能谱分析方法的理论与实验研究,建立了航空伽马射线全能谱分析方法的数学计算模型;建立了较为系统的航空伽马射线全能谱分析方法的刻度方法。通过航空伽马射线全能谱分析方法,能够计算大气氡浓度,这样不需要附加上测探测器,就可直接解决大气氡修正问题。开发了 AGF-

SA 航空伽马射线全能谱分析专用软件,在新疆伊犁航测区的应用试验表明,全谱法的航测钾、铀、钍和大气氡图,与“标准三窗法”的航测图相比,对地质构造信息的显示有所增强,在已知铀矿床、矿点、矿化点和异常上均有明显的信息增强显示^[16]。

9)人工放射性核素航空测量理论与实验研究获得优秀成果。采用大型航模上木板模拟以及小面源模拟大面源的刻度实验方法,对人工放射性核素航空测量理论与实验进行研究,解决了人工核素的刻度技术难题,在人工核素的航空检测能力、方法探测限、不确定度评价等方面取得了优秀的研究成果,并将理论与实验研究成果及时应用于大面积核试验场区的环境辐射航放测量调查中,获得军队科技成果一等奖^[17]。

10)1995 年编制了我国《航空伽马能谱测量技术规范》。为了全国航空伽马能谱测量工作有章可循,核工业总公司地质局、核航遥中心组织技术人员参考了国内及前苏联地质部物探局颁布的“中小比例尺航空伽马能谱测量规范”和联合国国际原子能机构 1991 年的第 323 号技术报告“航空伽马能谱测量”等资料,编写了行业技术标准《航空伽马能谱测量规范》。该规范于 1996 年由核工业总公司作为行业标准首次颁布,并于 2005 年和 2016 年两次修订。1986 年研建了航空伽马能谱仪校准模型标准。研究开发了四大类型铀矿成矿信息提取与预测技术;引进了俄罗斯利用航放测量的数据求得放射性化学特征参数(RGS)的方法和软件。

11)航放测量技术研究取得了丰硕的成果。近十多年来在完成铀矿勘查任务的同时,开展了大量科研工作,科研项目绝大部分是和航放测量生产密切相结合的生产中科研。通过科研项目的开展,提高了核航遥中心航放测量技术的整体水平,锻炼培养了一大批航放专业技术人员,取得了高质量的科研成果。先后共计完成 50 多个科研项目,其中“受损航测数据磁带档案恢复与光盘转储”项目成果获国家科技进步三等奖和部级科技进步一等奖,“秦山地区放射性水平及相关环境要素航空检测”项目成果也获部级科技进步一等奖,《地浸砂岩型铀矿快速评价技术及应用研究》项目成果获国家科学技术进步二等奖。此外,尚有 11 项获部级科技进步二等奖,15 项获部级科技进步三等奖。4 个航空物探测量项目成果获核集团公司优秀铀矿地质报告二等奖,7 个航空物探测量项目成果获核集团公司优秀铀矿地质报告三等奖。

12)核航遥中心与美国、俄罗斯、加拿大、法国、

德国、澳大利亚、韩国、蒙古、伊朗、巴基斯坦等十几个国家建立了技术交流合作关系。为埃及、伊朗、印度尼西亚、巴基斯坦等国家培训航空物探测量技术骨干十多名,同埃及、柬埔寨、尼日尔、印度尼西亚、蒙古、赞比亚等国家开展项目合作。

4 航放测量技术发展方向

航放测量技术的发展,是随着当代经济快速增长对资源需求快速增长而发展的。对铀资源的需求迫切要求发展航放测量,在放射性矿产勘查方面,内地勘查区的工作已达到了较高程度,未来的勘查方向将逐步转向高原和高山空白区、转向复杂地质构造区。作为一种快速、经济的前期勘查方法,航放测量面临着前所未有的机遇^[18]。然而,航放测量今后的发展重点应是进一步提高解决复杂地质问题的能力,提高对探测目标的分辨率。基于此,我国航放测量技术应向以下几个方面发展。

4.1 向高精度大比例尺方向发展

我国过去开展了1:10万、1:5万、1:2.5万等多种比例尺的航放测量工作,取得了重要的找矿成果。随着找矿难度的进一步增大和综合信息找矿对于航放测量资料的需求,未来我国航放测量要向高精度、大比例尺($\geq 1:5$ 万)方向发展。尤其是在地形复杂的山区、高原和沙漠地区,以代替地面放射性测量工作。

4.2 向放、重、磁、电综合集成化方向发展

受多种因素制约,航放测量与其他航空物探方法的集成化发展步伐相对较慢,测量方法相对单一。目前集成较好的是航磁和航放综合测量,无论是固定翼飞机,还是直升飞机,航放、航磁综合测量使用较为普遍^[19]。而航电、航重技术因发展较慢,在我国的应用也较晚,它们与航磁、航放之间的集成还不成熟,不仅在国内,国外也是如此。为了节约测量成本,提高工作效率,航放与航重、航磁、航电综合集成测量是今后的重要发展方向。

4.3 向无人值守和无人机方向发展

随着测量仪器的智能化,以及远程控制和数据传输技术的发展,无人值守航放测量系统在国内已经开始研发,并部分运用于生产,但目前仅限于单一方法,多方法集成的无人值守航放测量系统仅处于研发阶段。另外,随着无人机功能不断完善,载荷不断增加,无人机航放测量系统近几年在国内也陆续开始研制,并取得了显著的成果。

发展无人值守和无人机航空物探测量的目的,

一是提高工作效率,更重要的是降低航空物探测量的安全风险。目前的困难是,对无人值守航空物探测量系统,远程控制和数据传输的稳定性、作业半径受限;对无人机航空物探测量系统,主要受无人机载荷和低空跟随地形飞行制约。在地形复杂地区,无人机低空作业仍是难点。另外,多方法集成也是难点。但无论如何,未来无人值守航空物探测量和无人机航空物探测量是今后的发展方向之一。

4.4 向高原和高山无人区方向推进

目前,国内找矿主要向两个方向发展,一是向深部,另一个是向高原空白区和高山区发展。由于高原区和高山区环境恶劣,地面物化探工作十分困难,安全风险高,为了配合高原空白区和高山区找矿,航空物探势必要先行。另外近几年来,随着高性能直升飞机的引进和卫星定位技术的发展,给高原和高山区航空物探测量提供了契机。直升机高原航磁已在西藏、青海等省区开展了一定量的测量工作,但综合航空物探测量尚处于应用试验和示范阶段。为了推进高原和高山空白区的矿产资源勘查,今后航空物探测量势必首当其冲。

4.5 成矿预测向多元信息综合方向发展

众所周知,航放测量是寻找铀矿最直接、最有效的技术手段,国内外的绝大多数铀矿都是首先通过航放异常发现而发现的。但对其他矿产如多金属矿、油气藏、隐伏铀矿等,航放异常往往是间接找矿信息,对已知矿床上方航放异常信息的研究表明,这些间接信息对这类矿产的前期研究和预测具有十分重要的指导意义^[19]。前人在这方面做过大量的研究工作,并取得了许多重要找矿成果。因此,航放及其他航空物探综合异常信息研究仍然是今后多金属矿、油气藏、隐伏铀矿等矿产前期勘查的重要技术手段,不仅是航空物探多元信息的综合,航空物探和遥感综合信息融合研究也是应加强的研究领域。

4.6 由地质找矿向环境调查方向扩展

除在地质找矿方面之外,航放测量在环境调查方面同样是一种快速、有效的手段。航放测量在环境辐射评价方面的优势是其他方法不能比拟的。但目前国内的应用比较局限,仅对核设施的环境本底做过少量的调查评价工作。随着国家和民众对环境的日益重视,航放测量将在环境调查领域大显身手。

4.7 向科技创新和自主研发方向发展

一直以来,我国航放测量的技术水平与发达国家相比存在一定差距,主要表现在测量仪器方面,虽然目前航放测量仪器研发已接近国际先进水平,但还是在仪器稳定性、集成性、适应多平台、适应于综

合测量等方面及数据综合处理解释软件方面存在不足^[20-21]。相信随着我国科学技术的不断进步,经过我国技术人员的不断自主研发,超过国际先进水平的中国航放测量系统一定在不久的将来应用于国内乃至国际的放射性测量领域。

5 航放测量工作中存在的主要问题及建议

对比上述航放测量未来发展方向与目前的技术现状,可以看出目前存在的主要问题是:

1) 勘查地区以环境恶劣的高原和高山区、复杂地形及地质环境区为主,勘查的技术难度和风险显著增大;

2) 要求航放测量不断提高探测精度,提高对探测目标的分辨率,提高复杂地质问题的解决能力^[16]。但目前多因探测器体积小、飞行高度大、测量比例尺小等,要实现上述的三个提高仍需时日;

3) 目前无人值守和无人机航放测量系统尚处于示范测量阶段,要完全投入生产应用,仍需加紧努力;

4) 大气氦修正、高度修正及多种因素对航放测量结果的影响等技术问题仍需进一步深入研究;

5) 对航放异常的查证和揭露的力度不够,一定程度上会影响到航放测量成果的落实;

6) 航放测量和其他航空物探测量及遥感技术结合的深度和广度还不够。

在信息技术发达的今天,航放测量在矿产勘查、环境调查等方面作用凸显,随着无人值守和无人机航放测量平台的研发和应用,航放测量方法不仅在大区域矿产勘查方面优势明显,而且今后在小面积区块勘查中,特别是高原和高山区的矿产勘查中将发挥更大作用。

为了保障军民两用战略铀资源的充足自给,以及更紧密地配合全国区域地质调查、1:5 万矿调、重要矿产资源潜力评价,对今后航放测量工作部署提出如下建议:

1) 在西部高原和高山区适当部署 1:5 万高精度航放测量扫面工作;

2) 对重要铀成矿区带,一方面加强已有航空物探资料的综合研究或有步骤更新低精度老资料,另一方面,对空白区开展不小于 1:5 万高精度航空物探综合测量;

3) 进一步完善无人值守系统和无人机航放测量系统功能;

4) 加强小型化、高度集成、大探测效率适合多

种平台使用的航空伽马能谱仪及配套数据处理解释软件的研发;

5) 加强航放异常的地面查证,对重点异常实施钻探验证揭露;

6) 继续加强航放测量和其他航空物探方法及遥感技术的有效结合和综合信息分析利用。

回顾过去,硕果累累;展望未来,前程似锦。航放测量技术一定会在各级组织、各级领导的关心、支持和帮助下,在全体航空物探技术人员共同努力下,攻坚克难,再创辉煌,赶超国际先进水平,迎来更加美好的明天。

致谢:本文在撰写过程中得到了中国国土资源航空物探遥感中心熊盛青教授、范正国教授、周锡华教授及冶金航测队郭玉峰教授和地科院物化探所孟庆敏教授的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] Morse J G. Nuclear methods in mineral exploration and production [M]. Amsterdam:Elsevier Scientific Publishing Company, 1977.

[2] 成都地质学院三系.放射性勘探方法[M].北京:原子能出版社,1978.

[3] 刘裕华,韩长青,蔡文良,等.航空伽玛能谱测量规范(EJ/T 1032-2005)[S].国防科学技术工业委员会,2005.

[4] 蔡文良,韩长青,于百川,等.核工业航空物探勘查技术回顾与展望[R].中国核工业地质局, 2001.

[5] 李怀渊,江民忠,韩长青,等.航空物探测量的重大进展和技术创新[A]//张金带,李子颖,徐高中,等.我国铀 5 勘查的重大进展和突破——进入新世纪以来新发现和探明的铀矿床实例[G].北京:地质出版社,2015:42-53.

[6] 于百川.中国和世界几个主要国家航空 γ 能谱测量评述[J].国外铀金地质,1992(4):64-72.

[7] 于百川.中国建成标定航空 γ 能谱仪的校正模型[J].铀矿地质,1989,5(6):350-361.

[8] 线纪安.航空物探的技术现状及其应用[J].地质找矿论丛,2003,18(s):191-195.

[9] 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.

[10] 熊盛青.发展中国航空物探技术有关问题的思考[J].中国地质,2009,36(6):1366-1374.

[11] 葛良全,曾国强,赖万昌,等.航空数字 γ 能谱测量系统的研制[J].核技术,2011,34(2):156-160.

[12] 于百川."七五"期间航空放射性测量取得重大成果[J].铀矿地质,1994,10(1):40-45.

[13] 韩长青.航空物探方法在寻找可地浸砂岩型铀矿中大有可为[J].航测与遥感,2000(1-2):3-7.

[14] 张德华.满洲里一新右旗铜多金属成矿带伽玛能谱综合找矿研究及成果[R].核工业航测遥感中心,1995.

[15] 顾仁康,侯振荣,沈恩升,等.秦山核电站周围及上海地区放射性水平航空检测[J].辐射防护,1997,17(3):167-187.

[16] 倪卫冲.层间氧化带砂岩型铀矿床上航磁弱信息形成机理的初探[J].航测与遥感,1998(4):3-7.

[17] 倪卫冲.航空伽玛射线全能谱分析方法的的理论研究[J].铀矿地质,2011,27(4):231-241.

[18] 于百川.近年来核工业航空放射性测量工作的进展及评述 [A]//全国第二届航空物探学术研讨会论文集 [C].1994.

[19] 熊盛青.“十五”以来我国航空物探进展与展望 [J].物探与化探,2007,31(6):479-484.

[20] 张洪瑞,范正国.2000 年来西方国家航空物探技术的若干进展 [J].物探与化探,2007,31(1):1-8.

[21] 万建华,熊盛青,范正国.航空伽马能谱测量方法技术现状与展望 [J].物探与化探,2012,36(3):386-391.

The brilliant achievements and technological innovation
of airborne radioactivity survey in China

LI Huai-Yuan¹, JIANG Min-Zhong¹, CHENG Guo-Sheng², QUAN Xu-Dong¹, CHANG Shu-Shuai¹
(1. Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Uranium Geophysical Exploration Center of Nuclear Industry (Key Laboratory), Shijiazhuang 050002, China; 2. China Nuclear Geology, Beijing 100013, China)

Abstract: Based on a brief review of the development history and an analysis of the present situation of airborne radioactivity survey technology in China, this paper points out that a complete system of airborne radioactivity survey technology has been formed in China. By making a systematic and comprehensive summary of the major progress and technological innovation achievements of airborne radioactivity survey in China over the past 60 years, the authors believe that the research and development of airborne radioactivity instrument and the technical level have reached the international advanced level, and the technological innovation achievements have been expanded from mineral exploration to engineering geology, hydrogeological survey, environmental investigation, monitoring and some other fields. This paper discusses the main directions of airborne radioactivity survey technology development, summarizes the main problems that are exposed in practical work, and puts forward some suggestions for further work which have a certain guiding significance for uranium exploration based on airborne radioactivity survey as well as for investigation and planning of basic geological and environmental work in China.

Key words: airborne radioactivity survey; significant progress; technological innovation; development direction

(本文编辑:沈效群)