

doi: 10.11720/wtyht.2021.1322

李敬敏,米耀辉,骆遥.NURE 航空计划回顾与新时代航空  $\gamma$  能谱勘查启示[J].物探与化探,2021,45(2):394–402.<http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1322>

Li J M, Mi Y H, Luo Y. A review of NURE airborne program and suggestions on airborne gamma-ray spectrometry survey in the new era[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2): 394–402. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2021.1322>

# NURE 航空计划回顾与新时代航空 $\gamma$ 能谱勘查启示

李敬敏,米耀辉,骆遥

(中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083)

**摘 要:** 国家铀资源评价(NURE)计划实现了覆盖美国本土和阿拉斯加的 1:250 000 NTMS 图幅航空  $\gamma$  能谱测量和航磁测量,通过简要回顾该计划历程,重点针对 NURE 中航空地球物理勘查(航空  $\gamma$  能谱和航磁测量),讨论了航空地球物理勘查中测量技术、数据处理及解释方法等。NURE 航空测量在铀矿勘查和辐射环境评价、洲际航空地球物理编图等领域发挥了巨大作用,产生了意义深远的影响。在总结 NURE 航空测量经验和做法的基础上,针对我国航空  $\gamma$  能谱测量勘查现状,建议从国家层面进行顶层设计,尽快实施我国陆域范围内的航空  $\gamma$  能谱和航磁框架性测量,实现对我国陆域航空  $\gamma$  能谱测量全覆盖,建设具有中国特色的航空  $\gamma$  能谱测量与监测体系。

**关键词:** NURE 计划;航空  $\gamma$  能谱;铀矿勘查;航空地球物理;放射性

**中图分类号:** P631

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2021)02-0394-09

## 0 引言

铀是重要的战略资源和能源矿产,是保障核工业发展的主要原料,事关我国核安全的根本。《国务院关于加强地质工作的决定》明确提出“加强铀矿勘查,尽快探明一批新的矿产地”,《找矿突破战略行动纲要(2011~2020 年)》则指出了我国铀矿找矿和勘查方向。2006~2014 年由原国土资源部规划、中国地质调查局组织实施了《全国矿产资源潜力评价》专项,专项历时 8 年,完成了我国陆域 25 种重要矿产资源潜力评价工作,提交了完整的全国矿产资源潜力评价成果<sup>[1]</sup>。《全国矿产资源潜力评价》专项下设“全国铀矿资源潜力评价”项目,由中国核工业地质局具体组织实施,通过对铀矿成矿预测评价、物化遥数据处理与综合研究、全国铀矿成矿规律总结及成矿区划等研究,圈定、优选出一批成矿远景区和预测区,预测全国 1 km 以浅铀矿资源量超过 2 000 000 t<sup>[2]</sup>,有利推动了我国铀资源评价工作。

岩石、土壤中赋存的天然放射性核素包括钾(<sup>40</sup>K)、铀(<sup>238</sup>U)、钍(<sup>232</sup>Th)等,可以使用航空  $\gamma$  能谱方法(airborne gamma-ray spectrometry, AGRS)测量其放射性衰变产生的  $\gamma$  射线<sup>[3]</sup>,AGRS 在铀矿找矿和勘查中具有极重要的作用。我国航空  $\gamma$  能谱测量直接发现铀矿床 53 个,占铀矿床总数的 16%,但相对航空磁测而言,我国航空放射性测量整体工作程度仍不高<sup>[4]</sup>。全国铀矿资源潜力评价中虽然开展了航空  $\gamma$  能谱数据处理与异常提取工作,但期间实施的航空  $\gamma$  能谱测量十分有限,没有将航空放射性测量的效能充分发挥。进入新时代,地质调查工作对航空地球物理勘查技术提出了更高的要求,特别是在铀矿等关键性矿产资源方面。20 世纪 70~80 年代,美国曾实施国家铀资源评价(NURE)计划,圈定资源有利区并评估铀资源,使得美国 U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 资源总量从 1968 年的 1 440 000 t 增加到 1980 年的 4 030 000 t,铀精矿产量在 1980 年达到巅峰,航空  $\gamma$  能谱测量发挥了重要效果。然而,国内关于 NURE 的介绍几乎空白,为此笔者通过回顾这一国际上最

收稿日期:2020-06-23;修回日期:2020-12-30

基金项目:国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项项目(2017YFC0602100、2017YFC0602000);中国地质调查局地质调查项目(DD20191001、DD20189410、DD20190436)

作者简介:李敬敏(1983-),女,高级工程师,长期从事航空物探/遥感信息化建设及地图制图学研究工作。Email:jingminl@163.com

通讯作者:骆遥(1982-),男,教授级高级工程师,长期从事航空地球物理勘查工作。Email:geophy@vip.qq.com

大规模的航空  $\gamma$  能谱测量(含航磁测量),在总结 NURE 中航空地球物理勘查的同时,阐述了关于发展我国航空  $\gamma$  能谱的思考,以期为新时代发展中国特色的航空地球物理勘查理论、方法、技术提供借鉴。

## 1 NURE 计划

1973 年第四次中东战争(十月战争)爆发,石油输出国组织(Organization of the Petroleum Exporting Countries, OPEC)宣布石油禁运,原油价格从每桶 3 美元飙升到每桶近 12 美元,第一次石油危机由此爆发。应对石油危机,美国政府采取了刺激铀资源勘探的措施。1973 年美国原子能委员会(Atomic Energy Commission, AEC)发起了国家铀资源评价(National Uranium Resource Evaluation, NURE)计划<sup>[5]</sup>,旨在评价美国的铀资源;1974 年 10 月 11 日,美国国会通过《能源重组法案》(Energy Reorganization Act of 1974),AEC 一分为二,成立美国能源研究与开发管理局(Energy Research and Development Administration, ERDA),NURE 计划随之移交;1977 年,ERDA 同联邦能源管理局(Federal Energy Administration, FEA)合并,成立了美国能源部(United States Department of Energy, DOE),DOE 正式主导 NURE 计划<sup>[6]</sup>。卡特政府曾要求 DOE 加速 NURE 计划,使之能为 1980 年底或 1981 年初制定政策提供依据。1984 年美国国会停止拨款,NURE 计划最终完成。

NURE 计划具体由设在科罗拉多州大章克申(Grand Junction, Colorado)的办公室(Grand Junction Office, GJO)管理,总承包商为著名的 Bendix Field Engineering Corporation(BFEC)。NURE 计划主要包括:航空  $\gamma$  能谱和航磁测量、全国水文地球化学和河流沉积物调查(National Hydrogeochemical and Stream Sediment Reconnaissance, HSSR)、地下地质调查等 7 个部分<sup>[7]</sup>,也有报告称 NURE 分为 9 个部分<sup>[8]</sup>。

航空  $\gamma$  能谱与航磁测量、HSSR 以及地下地质调查属于 NURE 计划的 3 个独立部分。航空  $\gamma$  能谱与航磁测量、HSSR 均是按  $1^\circ \times 2^\circ$  的 1:250 000 美国国家地形图(national topographic map series, NTMS)进行调查,航空地球物理勘查由多家商业承包商分包,HSSR 则由 DOE 所属国家实验室负责,包括:劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory)、洛斯阿拉莫斯国家实验室(Los Alamos National Laboratory)、橡树岭国家实验室(Oak Ridge

National Laboratory)、萨凡纳河国家实验室(Savannah River National Laboratory)<sup>[8]</sup>。每个实验室都研发了样品采集、分析和数据管理方法,并请分包商协助工作。地下地质调查主要利用以往  $\gamma$  测井资料提供资源量估计数据,某些地区 DOE 则自行钻探,评估铀资源量,提高评价的可靠性。NURE 计划绝大部分数据已提供给美国地质勘探局(U.S. Geological Survey, USGS),目前,USGS 网站(<https://pubs.er.usgs.gov/>)以公开报告形式公布了大部分数据。USGS 公布了美国本土(48 个州) $1^\circ \times 2^\circ$  图幅 459 幅和阿拉斯加  $1^\circ \times 2^\circ$  图幅 98 幅的航空地球物理勘查数据<sup>[6]</sup>,USGS 还持有 HSSR 约 380 000 个原始沉积物样本,并公布了含 397 625 条记录的沉积物地球化学和水的地球化学分析数据<sup>[8]</sup>。

## 2 航空地球物理勘查

航空地球物理勘查是 NURE 最重要的组成部分之一,包括航空  $\gamma$  能谱测量和航空磁测两种技术手段,采用联合作业的方式进行勘查。主要目标是通过航空地球物理勘查快速测量并评估国家和区域尺度的天然放射性核素分布及不同地质单元的含量分布;为地球化学和地质采样提供相对有利区信息,结合其他调查数据和地质建模,确定后续详查区域及工业勘探区块;为新区块或勘探程度较低的区域提供前期勘探,以减少工业部门的重复勘探工作<sup>[9-21]</sup>。航空地球物理勘查从 1974 年开始,持续到 1981 年终结,每个调查区范围为 1:250 000 NTMS 图幅,即纬度为  $1^\circ$  经度为  $2^\circ$  的四边形,覆盖范围为美国本土和阿拉斯加,总计达 557 个图幅,基本覆盖了整个美国。每个调查区设计的飞行高度 122 m(真高),测线方向为 EW 向,间距约 5~10 km,个别区加密约 2 km,美国西部地区的调查大多以 5 km 间隔飞行,东部地区的调查大多以 10 km 间隔飞行<sup>[6]</sup>;切割线方向为 SN 向,间距约 15~30 km。具体执行航空地球物理勘查的承包商包括 Texas Instruments Inc、Aero Service、Geodata International Inc、LKB Resources Inc、Geometrics、High Life Q.E.B. Inc、GeoLife Inc、Carson Geoscience 等公司。为了较为详细地讨论 NURE 具体的航空  $\gamma$  能谱和航磁勘查情况,笔者将以美国新墨西哥州 NURE 区块调查情况进行分析和讨论。

新墨西哥州(New Mexico, NM)属美国西南部 4 州之一,与犹他州、科罗拉多州和亚利桑那州共享四角区域,北接科罗拉多州,西接亚利桑那州,东北邻

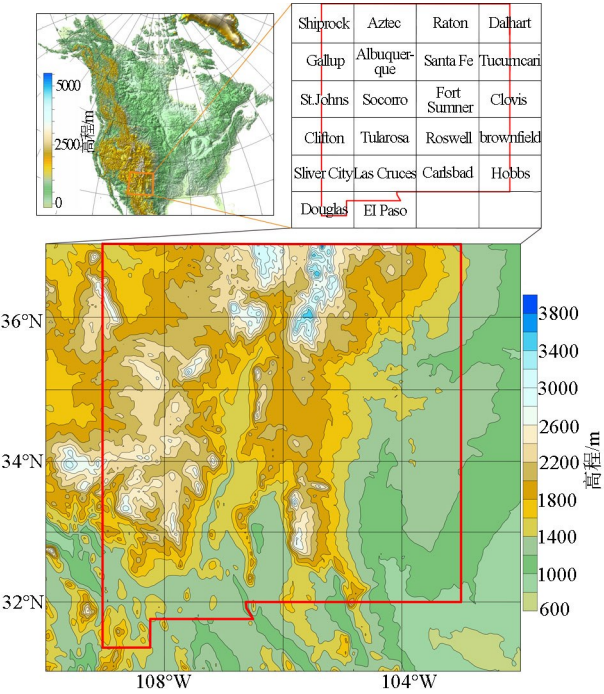


图 1 新墨西哥州区块 1°×2°图幅及地形

Fig.1 Quadrangles of New Mexico and digital topography

俄克拉何马州,东部和南部与得克萨斯州毗连,西南与墨西哥接壤。新墨西哥州共涉及 22 个 1°×2°图幅范围(图 1)。

2.1 测量方法技术

新墨西哥州海拔最高 4 013 m 为惠勒峰(Wheeler Peak),海拔最低 618 m 为红崖水库(Red Bluff Reservoir)地区(德克萨斯州边界附近),落基山脉南部延伸至此,属中高山区。为了保证航空 γ 能谱测量的有效性,除固定翼飞机外,还采用了直升机,以降低测量高度。新墨西哥州区块(图 1 红框内)测量中实际使用的直升机有西科斯基 Sikorsky S-58T、

贝尔 Bell 212、法国宇航 Aérospatiale SA 315B LAMA;使用的固定翼飞机为道格拉斯 Douglas DC-3 (1935 年 DC-3 飞机首飞,在第二次世界大战中广泛使用,目前 DC-3 仍在世界范围内服役,中国南极科考执行航空地球物理调查的“雪鹰 601”飞机就是由 DC-3 改装而来)、格鲁曼 Grumman S2F Tracker。实际测量中测线间距约 4.8 km 或 9.6 km,切割线间距约 19.2 km 或 38.4 km,测量的平均离地飞行高度为 134 m<sup>[9-21]</sup>。

图 2 给出的新墨西哥州区块测网和飞行高度表明 NURE 航空地球物理测量的复杂性,各 1°×2°区块测量中比例尺或测线间距不尽相同,例如拉顿(Raton)图幅和圣菲(Santa Fe)图幅,拉顿幅测线间距约 9.6 km,而圣菲幅测线间距约 4.8 km,后者比例尺比前者大 1 倍;同一 1°×2°区块测量中测量比例尺或测线间距可能也不尽相同,例如图拉罗萨(Tularosa)图幅中西北和东南部分的测线间距为 9.6 km,东北和西南部分的测线间距为 4.8 km,后者比例尺比前者大 1 倍;同一 1°×2°区块测量中测线方向存在不同,尽管整体设计中测线方向为 EW 向,但个别区块部分测线方向进行了调整,例如道格拉斯(Douglas)图幅和银市(Silver City)图幅西部测线方向为 SN 向,同图幅东部不同;同一 1°×2°区块测量中使用机型或飞行高度可能不同,例如圣菲(Santa Fe)图幅内西北部(106°W~105°W,35.5°N~36°N)飞行高度(真高)明显较该图幅其他区域低,该部分属落基山脉由 Aérospatiale SA 315B LAMA 直升机执行测量,SA315B LAMA 是目前升限最高的直升机,而圣菲幅其他部分则是由 Grumman S2F Tracker 固定翼飞机执行测量的,直升机测量区域的地形条

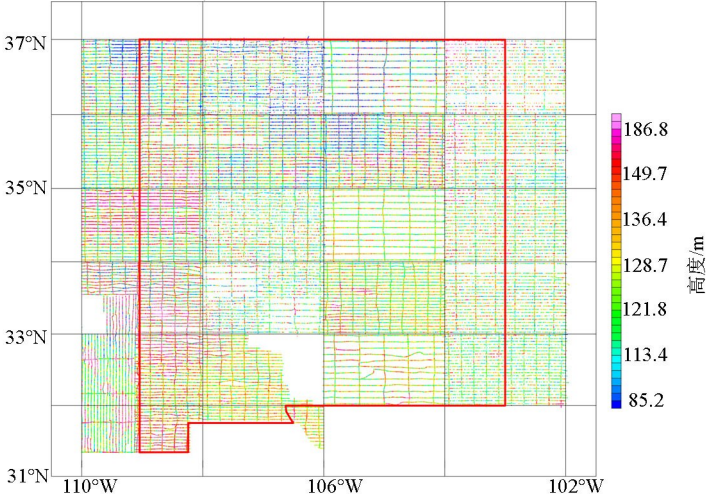


图 2 新墨西哥州区块测网和飞行高度<sup>[9-21]</sup>

Fig.2 Flight height of New Mexico NURE aeromagnetic and aeroradiometric data<sup>[9-21]</sup>



件虽更差,但测量高度却较同一图幅中固定翼飞机显著降低<sup>[18]</sup>;不同的  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  区块可能由同一承包商连续飞行测量,例如船舰岩(Shiprock)、盖洛普(Gallup)和阿尔伯克基(Albuquerque)图幅的航迹和高度均较为一致,实际上这 3 个区块均是由乔美特利(Geometrics)公司执行测量<sup>[17]</sup>;部分  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  区块测量中存在测量空白,例如,拉斯克鲁塞斯(Las Cruces)图幅,由于历史原因测量空白,也造成了后续编图中部分数据空白;部分  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  区块测量中存在部分测量数据无效,阿尔伯克基(Albuquerque)图幅,仪器原因造成部分数据缺失;部分  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  区块测量中测线偏航较大,例如卡尔斯巴(Carlsbad)图幅。因此,NURE 航空地球物理勘查中各  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  区块测量中尽管都遵从了 BFEC 的技术要求,但实际上却根据各个区块的具体情况进行了有针对性的飞行测量,最大程度上保证了测量的系统性、整体性、协同性。

测量使用的仪器包括航空  $\gamma$  能谱仪、磁力仪、导航定位系统、气压高度计、雷达高度计、温度传感器、数据收录系统、模拟记录仪、35 mm 跟踪照相机等。航空  $\gamma$  能谱仪采用了多道谱仪,例如 GR-800 能谱仪;能谱仪采用 NaI(Tl) 晶体探测晶体,并配备了上视晶体监测大气氦( $^{214}\text{Bi}$ );固定翼飞机采用的探测晶体体积更大,例如拉顿(Raton)图幅和圣菲(Santa Fe)图幅测量中固定翼飞机采用的晶体体积为  $4\,096\text{ in}^3$ (含上视晶体  $512\text{ in}^3$ ),而直升机晶体体积仅为  $2\,304\text{ in}^3$ (含上视晶体  $256\text{ in}^3$ )<sup>[18]</sup>;飞行速度同晶体体积对应<sup>[22]</sup>,NURE 中规定下视晶体体积与飞行速度比(V/V)应高于 20(比值中,晶体体积单位采用立方英寸,速度单位采用英里每小时)<sup>[9-21]</sup>。航空  $\gamma$  能谱测量进行了系统标定,飞行开始前和飞行结束后均测定了探测器能量分辨率和能谱峰漂情况,测量中实施了相应的前校测量和后校测量,并进行能量分辨率和能谱峰漂监控。航空  $\gamma$  能谱测量系统标定分别在科罗拉多州大章克申的 Walker Filed 机场的标准标定设施(即放射性模型坪,图 3)<sup>[23]</sup>和亚利桑那州米德湖(Lake Mead, Arizona)动态带<sup>[24]</sup>进行,标定内容包括飞机本底标定、宇宙射线系数标定、大气氦影响系数标定、康普顿散射系数标定、高度衰减系数标定、空中灵敏度标定。

航磁测量采用吊挂模式,无需磁干扰场补偿,使用的航空磁力仪包括磁通门磁力仪、质子旋进磁力仪,磁力仪灵敏度为 0.1 nT 或 0.25 nT。航空磁测时,地面设有基站,用以测量地磁场随时间变化(磁日变)。那时,全球卫星导航系统(Global Navigation

Satellite System, GNSS) 尚未广泛应用,导航定位系统使用了甚低频导航系统、多普勒导航系统、惯性导航系统等,航迹恢复采用 35 mm 跟踪照相进行判图。数据收录主要采用磁带记录,但不同设备的采集数据经模数转换后分别记录在不同的磁带上,后续数据处理中需要对收录的不同设备数据进行合并。

## 2.2 数据处理方法

数据处理部分包括磁带数据导出、航迹恢复、原始数据编辑、合并等,由于当时还没有应用数字技术和 GNSS 技术,这部分例行的数据处理极繁琐,特别是利用照片判图进行航迹恢复,只能采用核对照片和地图的方式进行手工定位。航空  $\gamma$  能谱数据处理主要是通过各项校正来确定 $^{40}\text{K}$ 、 $^{238}\text{U}$ 、 $^{232}\text{Th}$  的核素含量,其中各项校正包括活时间(live time)校正、飞机本底和宇宙射线校正、康普顿散射校正、大气氦校正、高度校正、含量换算等,这部分校正处理包括对系统标定的数据处理基本同国际原子能机构(International Atomic Energy Agency, IAEA)323 技术报告<sup>[3]</sup>或《航空伽玛能谱测量规范》(EJ/T1032-2018)<sup>[22]</sup>相一致或类似,关于标定具体实例和数据处理细节可以参考近年来对 AGS—863 航空  $\gamma$  能谱勘查系统的标定<sup>[25]</sup>,这里不再进行讨论。航磁数据处理主要进行磁日变校正和正常地磁场校正,其中正常地磁场校正使用了国际地磁参考场(International Geomagnetic Reference Field, IGRF)。数据处理还包含了质量控制部分,包括对能谱数据的统计分析等,同时也对飞行高度、飞行速度进行统计,并绘制有相应的直方图等。

## 2.3 解释及成果表达

根据 NURE 计划航空地球物理勘查中评价铀矿的目标,铀异常选编是解释的核心。航空  $\gamma$  能谱数据解释主要以数据统计为基础,按照对应的地质构造单元对 K、U、Th 含量及 K、U、Th 比值等进行统计,为了阐明核心的解释方法,笔者以阿尔伯克基(Albuquerque)图幅中格兰茨(Grant)铀矿带中 77 号铀异常进行讨论。阿尔伯克基幅 77 号异常为该图幅中幅度最大的铀异常,U 含量达到  $236\times 10^{-6}$ ,异常所处的地质单元属第四系冲积物( $Q^{al}$ ),局部包括一些阶地砾石、崩积层<sup>[17]</sup>。航空  $\gamma$  能谱解释的基础是对地质单元统计,解释中按地质单元对能谱数据进行了平均值和方差统计,并绘制了相应的直方图,包括 Th、U、K 和 U/K、U/Th、Th/k 统计直方图;例如,图幅中第四系冲积物

对应 U 的均值为 $27.500\ 0\times 10^{-6}$ , 方差为 $5.224\ 0\times 10^{-6}$ , Th 的均值为 $57.100\ 0\times 10^{-6}$ , 方差为 $7.556\ 5\times 10^{-6}$ , U/Th 均值为 0.488 7, 方差为 0.699 1。异常选编中, 异常的 U 含量要高于均值的 1 倍方差, Th 含量高于均值的-1 倍方差, U/Th 要高于均值的 1 倍方差; 于是, 第四系冲积物中 U 异常选编要求满足 U 含量大于 $27.500\ 0\times 10^{-6}+5.224\ 0\times 10^{-6}$ , Th 含量大于 $57.100\ 0\times 10^{-6}-7.556\ 5\times 10^{-6}$ , 且 U/Th 大于 $0.488\ 7+0.699\ 1$ 。根据满足 U 含量、Th 含量及 U/Th 含量要求, 选编 77 号 U 异常的中心坐标为( $33.2406^{\circ}\text{N}$ ,  $107.8611^{\circ}\text{W}$ ), 该异常与铀矿有关, 根据现在的遥感影像资料, 该异常应为铀矿尾矿堆。

NURE 航空地球物理勘查中所有地图数据和数字数据都是按美国 1:250 000 NTMS 标准图幅进行组织和表达的, 其中地图数据按照 1:250 000 NTMS 生产, 最后按 1:500 000 印刷附于最终成果报告。最终成果表达主要是异常分布图、等值线图、剖面图, 各种统计直方图、异常登记表及相关异常解释, 此外还通过数据表公布了 NURE 航空地球物理勘查的主要数据, 包括测量坐标、计数率、磁场、比值、地质单元类型等。

3 主要成果与启示

3.1 主要成果

通过 NURE 航空地球物理勘查, 形成了对美国本土的航空  $\gamma$  能谱测量快速覆盖, 按  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  的 1:250 000 NTMS 图幅形成了完整的报告产品、图件产品、数据产品等, 为 NURE 计划顺利实施提供了基础性保障。NURE 的航空地球物理勘查形成的报告主要按  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  图幅测量飞行的技术报告, 通

常是分包商几个  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  图幅一并飞行测量, 形成几个  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  图幅的总技术报告, 技术报告记录了主要航空地球物理勘查工作、测量技术方法、数据处理细节、解释技术方法等。按  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  图幅形成了相应的解释报告, 这部分报告附于对应的技术报告后, 称为第二卷, 包括各种成果图件(比例尺约 1:500 000)、异常登记表、统计直方图等; 同时, 还针对测量数据形成了完整的测量数据表、磁带拷贝等。NURE 航空地球物理勘查形成了技术报告、图件、数据三位一体的标准化产品, 这些标准化的产品没有束之高阁, 均可为公众直接获取。20 世纪 80 年代, 地矿部地质情报研究所崔林沛在美国访问, 曾从 DOE 的 GJO 买到了 NURE 的全部原始数据, 包括航空  $\gamma$  能谱测量、航空磁测和水文地球化学测量数据的所有拷贝, 总共 100 多盘高密度磁带<sup>[26]</sup>, 这些产品供大学、研究所和私人公司广泛利用, 充分发挥了其应有的作用。

除技术报告、图件、数据三位一体的标准化产品外, NURE 航空地球物理勘查还建立了一系列的标准化程序和以模型坪为代表的大型基础科学装置。NURE 航空地球物理勘查按  $1^{\circ}\times 2^{\circ}$  的 1:250 000 (NTMS) 图幅飞行测量, 很难想象如果没有统一的标准, NURE 超过 500 个图幅的资料最终将如何拼接。NURE 航空地球物理勘查甚至整个 NURE 计划形成了一系列的标准化程序<sup>[8, 27]</sup>, 每年均编制有 NURE 年报。NURE 航空  $\gamma$  能谱测量成功的最大秘诀也在于实施了统一标准的标定程序, 建立了 DOE 的航空放射性标定装置(图 3)。标定大幅提升了航空  $\gamma$  能谱测量的精度<sup>[28]</sup>, 模型坪建立前的数据也通过标定、校正进行了标准化处理。NURE 形成的标准化标定程序后续为 IAEA 形成航空  $\gamma$  射线能谱测量标准(技术报告系列 323

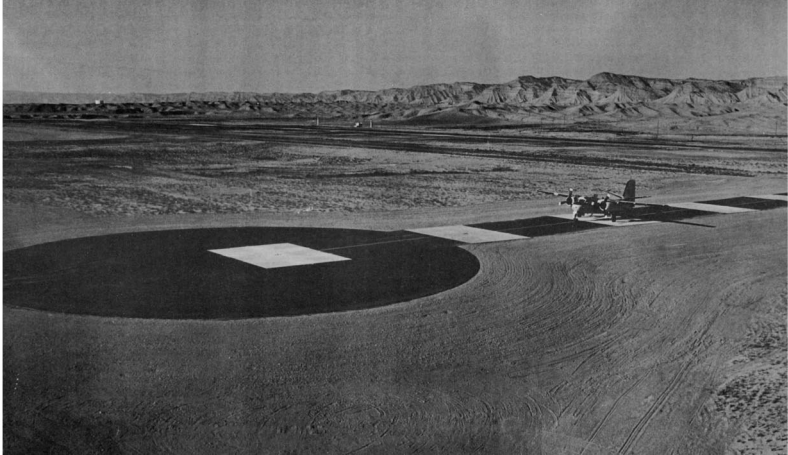


图 3 美国能源部的航空放射性标定装置<sup>[23]</sup>

Fig.3 Airborne radioactivity Calibration device of the U.S. Department of Energy<sup>[23]</sup>



号)等提供了基础。同时,NURE 开展了 DC-3 飞机飞越整个美国的超级“十”字剖面测量(EW 向从123.75°W~74.3°W,纬度39.5°N;SN 向从 26.3°N~49.0°N,经度 99.0°W)<sup>[29]</sup>,最大程度上统一了航空  $\gamma$  能谱的测量水平,为美国航空  $\gamma$  能谱编图、美国航磁编图以及北美航空  $\gamma$  能谱编图、北美航磁编图提供了基础性素材。

NURE 航空计划大幅提升了美国甚至整个北美的区域地球物理测量工作程度,获取的铀异常资料为铀资源评价提供了重要依据。以快速实施航空地球物理勘查来应对石油危机,铀储量和资源量持续扩大,成为地球物理成功应用的又一典范。航空  $\gamma$  能谱测量不仅在铀资源勘查方面发挥了重要作用,还可支撑辐射环境评价。在 NURE 航空  $\gamma$  能谱测量成果的基础上,美国和加拿大合作编制了反映环境辐射水平的北美  $\gamma$  射线空气吸收剂量率图(图 4),也为整个辐射环境监测评价

提供了重要的本底依据<sup>[6]</sup>。尽管 USGS 长期以来进行了大量的航空磁测工作,但 NURE 航磁数据一定程度上仍然填补了部分空白区,并改善了部分测区的精度,利用 NURE 均匀覆盖的航磁框架,包括 NURE 的超级“十”字剖面,极大提升了美国本土的磁场水平特别是改进了磁场的长波长部分。NURE 航空地球物理勘查的相关理论、方法、技术、成果、数据等仍在今天发挥着重要作用。

3.2 启示与思考

NURE 航空地球物理勘查取得巨大成功的同时,也给我国航空地球物理工作者以深刻的反思。中国航磁测量初创于 1953 年,至 21 世纪初,原中国国土资源航空物探遥感中心及原地质矿产部相关单位共获得了 432 个测区的航磁测量数据,累计 12 040 000 km,测量面积累计达 20 020 000 km<sup>2</sup>,约占陆域面积的 97%<sup>[30]</sup>;中国航空放射性测量初创于1955年,至21世纪初,核工业及及原地质矿

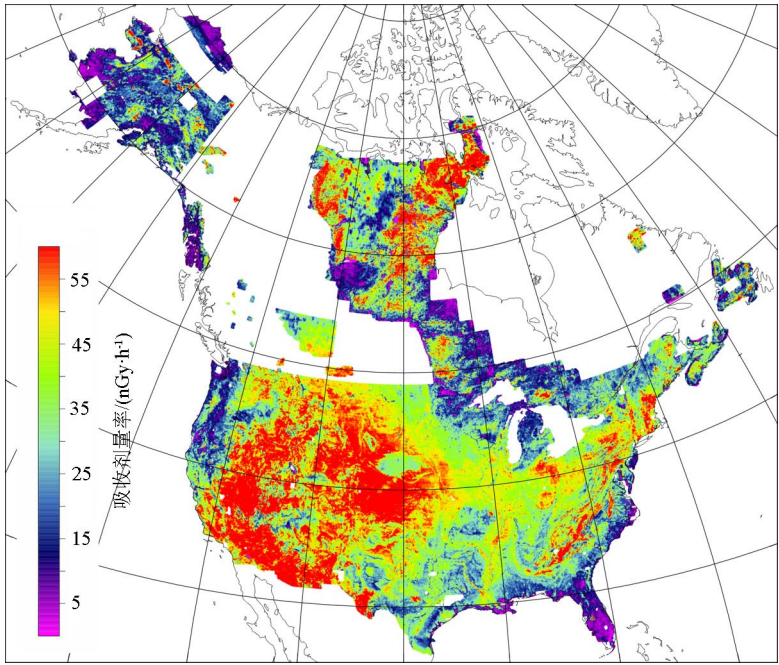


图 4 北美  $\gamma$  射线空气吸收剂量率<sup>[5]</sup>

Fig.4 Map of Gamma-ray absorbed dose in the United States and Canada<sup>[5]</sup>

产部等单位共获得了 372 个测区的航空放射性测量数据,累计约 12 385 000 km,测量面积累计约 6 228 000 km<sup>2</sup>。仅从数据上看,我国航空放射性测量工作程度是接近航空磁测的,但实际上有 16 个铀成矿区带没有覆盖,全国高精度大比例尺航放测量覆盖面积仅 1 870 000 km<sup>2</sup><sup>[4]</sup>,GR-800 多道航空  $\gamma$  能谱仪引进之前的数据多不可用,据此估算实际仅覆盖陆域范围的 20%左右,还不能像航空磁测那样形成全国性的基础图件。中国航空磁测

形成了 1:5 000 000 比例尺的全国性图件,开展了 1:250 000 航磁编图,已取得显著成效,但也应清醒地认识到,全国性磁场水平特别是长波长部分仍没有好的解决方法<sup>[30]</sup>,部分 1:250 000 图幅航磁编图的数据精度,特别是导航定位精度较差<sup>[31]</sup>。因此,无论是航磁,还是航空  $\gamma$  能谱测量,都亟待开展大区域、高精度、快速覆盖的框架性测量。航空  $\gamma$  能谱工作程度主要受制于测量技术方法和后续应用。长期以来,国内认为在中高山地

区由于不能有效降低飞行高度,航空 $\gamma$ 能谱测量难以突破,航空磁测也同样面临高度问题<sup>[32]</sup>。中高山区航测的关键在高度控制,飞机选型是基础,王乃东等在中高山区高精度航磁方法技术研究中曾指出中高山区最佳直升机机型为西斯科 Sikorsky UH-60 Black Hawk 和法国宇航 Aérospatiale SA 315B LAMA,并详细列举了 SA 315B LAMA 的性能<sup>[33]</sup>。NURE 在落基山脉选用 SA 315B LAMA 进行航空 $\gamma$ 能谱测量的成功实例同样证明了机型的重要性。目前,我国航空地球物理勘查中主要使用的固定翼飞机为航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司生产的 Y-12 飞机,进口的有塞斯纳 Cessna 208 Caravan 飞机、豪客比奇 Beechcraft King Air 350(如“航空地质一号”),直升机主要为欧洲直升机公司 Eurocopter AS350 B3;近年来,虽然改装了“航空地质二号”、“航空地质三号”直升机平台(国产 AC312E 和 AC-311 直升机),但飞行平台仍是制约航空 $\gamma$ 能谱测量的关键之一。此外,在测量理论上仍有待突破,特别是在全国性航空地球物理基准控制网测量上要有所突破,亟须在我国陆域范围内开展综合性的航空地球物理框架性测量或超长剖面测量,以控制 $\gamma$ 场、地磁场或重力场基准,这是解决全国性—区域性航空地球物理资料水平的唯一途径。

在航空 $\gamma$ 能谱应用方面,虽然在基础地质调查、铀矿勘查、辐射环境评价、核应急等方面取得了一系列成效,但其应用广度和深度仍显不足,航空地球物理勘查资料的社会化利用程度仍不高。在辐射环境监测方面,国家辐射环境监测网通过分布于全国各地的辐射环境监测站来开展 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率监测,但辐射环境监测站数量有限且分布不均,还未建立全国面积性的天然 $\gamma$ 辐射空气吸收剂量率本底,全国性、面积性的 $\gamma$ 辐射环境本底监测评价仍属空白。生态环境部、自然资源部、中核集团等多个相关部门应建立协同合作机制,凝聚航空 $\gamma$ 能谱测量力量,共同谋划全国陆域范围的航空 $\gamma$ 能谱测量,将基础地球物理调查同环境评价、常态化监测与核应急等有机结合,摸清辐射环境本底,共同构建具有中国特色的航空 $\gamma$ 能谱测量和监测体系。

航空 $\gamma$ 能谱测量与应用的基础是仪器设备及方法技术,为此《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》将发展航空地球物理勘查技术作为优先支持领域。通过两轮国家高技术研究发展计划(“863”计划)攻关,成功研制了包括

航空 $\gamma$ 能谱测量系统在内的一大批航空地球物理装备<sup>[34]</sup>,但航空 $\gamma$ 能谱仪所采用的大体积 NaI(Tl)晶体仍主要依赖进口,探测器“卡脖子”问题仍待解决。在技术方法方面,近年来,大力发展了山区直升机航空 $\gamma$ 能谱测量,作业量占比大幅提高,但地形影响校正等仍未根本解决;此外,航空 $\gamma$ 能谱地质填图的自动化程度仍不高,过多依靠人工解释,航空 $\gamma$ 能谱测量技术仍待进一步发展。面对“百年未有之大变局”,必须把事关核安全的航空 $\gamma$ 能谱测量技术发展的主动权牢牢掌握在自己手里,在技术标准、仪器研发、方法技术创新上继续加大攻关力度,着力破解探测器国产化等关键问题,将无人机、北斗导航定位、人工智能、5G、物联网等新兴技术用好,力争在智能化航空 $\gamma$ 能谱地质填图、无人机核应急、航空 $\gamma$ 能谱联网监测等方面起到示范引领作用。

#### 4 总结与建议

应对石油危机,美国政府在 20 世纪主导了 NURE 计划,开展了投资超过 3 000 万美元覆盖美国本土和阿拉斯加的超级规模的航空地球物理勘查,笔者针对该航空地球物理勘查进行了回顾和讨论。NURE 航空地球物理勘查的实施,实现了美国航空 $\gamma$ 能谱测量的快速覆盖和快速解释,有力推动了 NURE 目标的实现,取得了一大批成果。NURE 航空地球物理勘查实施的同期,我国也在进行一项最大规模的航空地球物理勘查计划——中国沿海大陆架航磁测量,总体来讲我国当时的航磁测量是接近 NURE 实际水平的。进入 20 世纪 80 年代,我国开展了“第二代航空物探”工作,通过引进 GR-800 航空 $\gamma$ 能谱仪,建立航空放射性测量标准模型装置,航空 $\gamma$ 能谱测量基本达到了 NURE 的水平。但是,截止到目前,我国航空 $\gamma$ 能谱测量工作程度相对不高,我国航空 $\gamma$ 能谱测量工作程度与经济社会发展极不适应,亟待进一步完善中国特色的航空放射性测量理论、方法、技术。即将进入“十四五”开局之年,航空地球物理工作者必须有所作为,笔者建议尽快开展我国陆域范围内的航空 $\gamma$ 能谱调查与监测计划(同时搭载航空磁力仪进行航磁调查),按 1:100 000~1:1 000 000 图幅在工作程度低的地区和空白区优先开展普查性测量,部分铀矿找矿有利区开展 1:25 000~1:50 000 的详细测量;同时,在全国范围内开展“几横几纵”的超长剖面测量,形成本底格架,

尽快实现我国陆域范围内的航空  $\gamma$  能谱测量全覆盖;以总体国家安全观为指导,立足核辐射相关的资源和环境评价,创建“统一布局、统一测量、统一处理、统一编图、统一评价”的航空  $\gamma$  能谱“五统一”勘查和监测体系,面向社会提供航空  $\gamma$  能谱异常评价产品和辐射环境评价产品,助力经济社会发展、支撑生态文明建设。

参考文献 (References):

[1] 牛翠祎,卿敏,白万成,等.中国金矿资源潜力预测评价[M].北京:地质出版社,2017.  
Niu C W, Qing M, Bai W C, et al. Prediction and evaluation of potential gold resource in China[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2017.

[2] 张金带,李子颖,蔡煜琦,等.全国铀矿资源潜力评价工作进展与主要成果[J].铀矿地质,2012,28(6):321-326.  
Zhang J D, Li Z Y, Cai Y Q, et al. The main advance and achievements in the potential evaluation of Uranium resource in China[J]. Uranium Geology, 2012, 28(6): 321-326.

[3] International Atomic Energy Agency. Airborne gamma ray spectrometer surveying[R]. IAEA Technical Reports Series, 1991.

[4] 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.  
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.

[5] Duval J S, Carson J M, Holman P B, et al. Terrestrial radioactivity and gamma-ray exposure in the United States and Canada[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1413, 2005.

[6] Hill P L, Kucks R P, Ravat D. Aeromagnetic and aeroradiometric data for the conterminous United States and Alaska from the national uranium resources evaluation (NURE) program of the U.S. department of energy[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1129, 2009.

[7] Ferguson R B, Price V J. National uranium resource evaluation (NURE) program-hydrogeochemical and stream sediment reconnaissance in the eastern United States[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1976, 6(1-2): 103-117.

[8] Smith S M. National geochemical database-reformatted data from the national uranium resource evaluation (NURE) hydrogeochemical and stream sediment reconnaissance (HSSR) program[R]. U.S. Geological Survey Open-File Report 1997-492, 1997.

[9] Carson Geoscience Inc. NURE aerial gamma-ray and magnetic reconnaissance survey of portions of New Mexico, Arizona and Texas; Carlsbad, El Paso, Fort Sumner, Holbrook, Las Cruces, and Roswell Quadrangles[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-412-81, 1981.

[10] Geodata International Inc. Aerial radiometric and magnetic survey of the Tucumcari national topographic map, NI-13-3, Texas and

New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-33-76, 1976.

[11] Geodata International Inc. Aerial radiometric and magnetic survey of the Clovis national topographic map, NI 13-6, Texas and New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-33-76, 1976.

[12] Geodata International Inc. Aerial radiometric and magnetic survey of the Brownfield National topographic map, NI-13-9, Texas and New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-33-76, 1976.

[13] Geodata International Inc. Aerial radiometric and magnetic survey, Tularosa national topographic map, New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-67-79, 1979.

[14] Geodata International Inc. Aerial radiometric and magnetic survey, Socorro national topographic map, New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-163-79, 1979.

[15] Geodata International Inc. Aerial radiometric and magnetic survey, Aztec national topographic map, New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-65-80, 1980.

[16] Geodata International Inc. Aerial radiometric and magnetic survey, Hobbs national topographic map, Texas, New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-228-80, 1980.

[17] Geometrics. Aerial gamma ray and magnetic survey Raton basin project, Shiprock & Gallup quadrangles, Arizona/New Mexico, and Albuquerque Quadrangle, New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-116-79, 1979.

[18] Geometrics. Aerial gamma ray and magnetic survey, Raton basin project the Raton and Santa Fe quadrangles of New Mexico[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-9-80, 1980.

[19] Texas Instruments Inc. Aerial radiometric and magnetic reconnaissance survey of portions of Arizona-New Mexico; Clifton, Douglas, Mesa, Nogales, Silver City, and Tucson Quadrangles[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-23-79, 1979.

[20] Texas Instruments Inc. Aerial radiometric and magnetic reconnaissance survey of portions of Arizona, Idaho, Montana, New Mexico, South Dakota and Washington (Cut Bank, Shelby, Havre, Choteau, Great Falls, Lewistown, Butte, Pocatello, Twin Falls, Ritzville, Hot Springs, and Saint Johns Quadrangles)[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-126-79, 1979.

[21] Texas Instruments Inc. Aerial radiometric and magnetic reconnaissance survey of portions of New Mexico, Oklahoma, and Texas, Dalhart Quadrangle[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-46-80, 1980.

[22] EJ/T1032—2018 航空伽玛能谱测量规范[S].北京:核工业标准化研究所,2018.  
EJ/T1032—2018 Specification for airborne gama-ray spectrometry survey[S]. Beijing: Institute for Standardization of Nuclear Industry, 2018.

[23] Ward D L. Construction of calibration pads facility, Walker



Field, Grand Junction, Colorado[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-37(78), 1978.

[24] L.K.B. Resources, Inc. Dynamic test range I-follow-on narrative report[R]. U. S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-110-81, 1981.

[25] 骆遥, 米耀辉. 航空伽玛能谱测量系统标定技术与标定程序[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(5):590-597.

Luo Y, Mi Y H. Calibration for airborne gamma-ray spectrometric survey and its procedure[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2014, 34(5): 590-597.

[26] 崔林沛. 对美国物探的几点认识[J]. 国外地质勘探技术, 1989(7): 15-19.

Cui L P. Some understanding of American geophysical prospecting[J]. Foreign Geoexploration Technology, 1989(7): 15-19.

[27] Purvance D, Novak E. National uranium resource evaluation, general procedure for calibration and reduction of aerial gamma-ray measurements; Specification BFEC 1250-B[R]. U.S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-16-83, 1983.

[28] Duval J S. Radioactivity method[J]. Geophysics, 1980, 45(11): 1690-1694.

[29] Aero Service. National uranium resource evaluation, airborne gamma-ray spectrometer and magnetometer survey; North/South Tieline[R]. U. S. Department of Energy, Open-File Report GJBX-386-81, 1981.

[30] 中国自然资源航空物探遥感中心. 中国及毗邻海域航空磁力  $\Delta T$  异常图(1:500 万)[M].北京:地质出版社, 2004.

China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural and Resources. Aeromagnetic anomaly map of China and adjacent sea areas 1:5000000[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004.

[31] 王乃东. 有关 1:25 万航磁系列图的几个问题[J]. 物探与化探, 2007, 31(5): 459-464.

Wang N D. Some problems concerning 1:250000 areomagnetic series maps[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(5): 459-464.

[32] DZ/T 0142—2010 航空磁测技术规范[S]. 北京:中国标准出版社, 2010.

Z/T 0142—2010 Criterion of aeromagnetic survey[S]. Beijing: China Standard Press, 2010.

[33] 熊盛青, 于长春, 眭素文, 等. 中高山区高精度航磁方法技术[M]. 北京:地质出版社, 2009.

Xiong S Q, Yu C C, Sui S W, et al. High-precision aeromagnetic method technology in the mid-high mountain area[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2018.

[34] 熊盛青, 周锡华, 薛典军, 等. 航空地球物理综合探测理论技术方法装备应用[M]. 北京:地质出版社, 2018.

Xiong S Q, Zhou X H, Xue D J, et al. Theory technology method instruments and application of comprehensive airborne geophysical exploration[M]. Beijing: Geology Publishing House, 2018.

A review of NURE airborne program and suggestions on airborne gamma-ray spectrometry survey in the new era

LI Jing-Min, MI Yao-Hui, LUO Yao

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

**Abstract:** This paper briefly reviews the history and the overall work deployment of the U.S. National Uranium Resource Evaluation (NURE) program, with emphasis placed on the key techniques of airborne exploration. The airborne exploration included airborne gamma-ray spectrometry (AGRS) and aeromagnetic survey, which collected radiometric and magnetic data over the conterminous United States and Alaska. The airborne program systematically covered each 1° by 2° national topographic map series (NTMS) quadrangles, which were used to locate potential radioactive mineral deposits. The program played an important role in uranium resource and environmental radiation level evaluation, which has far-reaching definition and meaning. The experience and practices of the program should be used for reference. According to the current status of China’s survey, top-level design for AGRS should be strengthened. This paper also proposes a national program of AGRS surveys for achieving coverage of terrestrial radioactivity and building a measurement and monitoring system with Chinese characteristics.

**Key words:** U.S. National Uranium Resource Evaluation (NURE) program; airborne gamma-ray spectrometry; uranium prospecting; airborne geophysical surveys; radioactivity

( 本文编辑:王萌)