

国外铀矿普查、勘探 方法和仪器的发展现状

(调研报告)

于 铭 强

北京铀矿地质研究所

一九八一年

国外铀矿普查、勘探 方法和仪器的发展现状

铀在国防和民用两个方面具有重要的作用,三十多年来铀作为一种特殊矿种受到越来越多的国家所重视。一公斤 ^{235}U 的裂变能量相当于3000吨煤。美国1976年用4800短吨 U_3O_8 发电1910亿度,相当于九千万短吨煤的发电量,或者说一吨 U_3O_8 相当于18750吨煤。我国1978年的发电量为2560亿度,如果用铀来发这样多的电,约需6400短吨 U_3O_8 ,而用煤来发电则需多达一亿两千万吨煤。如果我们有64万吨 U_3O_8 的储量,就能满足100年的发电需要(按1978年的发电量计算),由此可见铀对于解决能源问题的重要性。

随着经济的发展和能源问题的出现,从事铀矿普查、勘探的国家日渐增多,近十余年来有许多第三世界的中、小国家也相继开展铀矿普查、勘探工作。一些工业比较发达的资本主义国家仍在继续进行铀矿普查、勘探和资源评价工作。美国1978年对铀矿勘探的总投资为三亿一千四百万美元。1978年美国20家公司在国外勘探铀矿的总投资为三千五百万美元,国外公司对美国铀矿勘探的投资为三千九百万美元。

铀矿普查、勘探规模的扩大,促进了探矿方法和探矿仪器的发展和改进。目前用于铀矿普查、勘探的各种方法已达40余种之多,各种方法所使用的仪器型号更是花样百出。就单矿种来说,在铀矿普查、勘探中所用方法和仪器种类型号之多,可能是其它任何一个矿种都不能与其相比的。特别是近7—8年来,为了深部找矿的需要,许多国家对于深部找矿方法和高灵敏度、高精度仪器的研究倍加重视,相继研究成功多种有效的、简单易行的攻深方法和许多其它新方法,老方法也有许多改进和发展。

国际原子能机构对于研究和发展找铀矿的新方法也较为重视。经济协作开发组织(OECD)的核能机构(NEA)和国际原子能机构(IAEA)于1976年建立了一个以研究和发展铀矿勘探方法为目的的联合专家小组,分专题进行国际联合研究。1978—1980年各专题研究小组相继召开了多次会议,1981年—1982年将召开12次国际讨论会,介绍和讨论研究成果,并出版会议文集。预计今后几年铀矿普查、勘探方法和仪器还会有一些新的进展。

为了使我国从事铀矿普查、勘探的人员对国外铀矿普查、勘探方法和仪器的发展有一个概括的了解,本文特对某些新方法和新仪器作重点介绍。下面首先以表格形式列出用于铀矿普查、勘探的各种物化探方法,其中包括普遍采用的常规方法、新方法和深部找矿方法(表1)。表2所列是国际联合研究的铀矿普查、勘探方法。

表 1 用于铀矿普查、勘探的各种物化探方法

(1)

方 法	简 单 说 明	仪 器
1	2	3
1. 航空 γ 或 γ 能谱法: ①单一 γ 或 γ 能谱仪 ②高灵敏度航空 γ 能谱测量和磁测	高灵敏度航空 γ 能谱测量是近几年逐渐推广的高效率找铀方法	高灵敏度 γ 能谱航测采用256/512道 γ 能谱仪
2. 地面 γ 或 γ 能谱法 ①以找异常为目的的报警器测量 ②网格定点测量 ③固定高度测量(齐膝, 齐腰, 齐肩或一米高度) ④冬季雪层测量 ⑤浅孔和深孔测量 ⑥犁耕测量 ⑦ γ 取样: A. 两次差示取样; B. 一次定向取样	普遍采用的最基本的方法⑤和⑥是深部找矿法 能增大探测面积和减少微地形影响 有效的深部找矿方法 适用F平坦复盖区	轻便 γ 辐射仪和4—6道轻便 γ 能谱仪
3. 车载 γ 或 γ 能谱测量: ①单一 γ 或 γ 能谱测量 ② γ 或 γ 能谱与磁测的综合测量 ③冬季雪车 γ 或 γ 能谱测量	机动性较大的高效率地面测量方法	使用轻便仪器配用大探头、薄片的航测仪或专用仪器
4. 水下 γ 或 γ 能谱测量: ①海底 γ 能谱测量 ②湖底 γ 能谱测量	地质填图(英国) 找铀矿(加拿大)	四道 γ 能谱仪配用特殊结构的探头
5. 测井方法: ①常规三参数测井(γ 、R、SP) ②多参数测井(γ 、R、SP、中子—中子、 γ — γ 等) ③四道 γ 能谱测井 ④512道 γ 能谱测井 ⑤直接测铀的测井方法: A. 缓发中子法 B. 瞬发中子法 C. 直接子代产物法	普遍采用的基本测井方法 车载测井系统, 能测8—9种参数 正在推广的有用测井方法、正在试验的、利用反褶积法的 γ 能谱测井 利用 ^{252}Cf 源或中子发生器的裂变中子法, 不受平衡破坏影响, 直接测铀 用高分辨率半导体探测器测量半衰期短的铀的直接子代产物	轻便测井仪 带微处理机或计算机的复杂测井系统 轻便 γ 能谱仪配用测井探头 带微处理机的512道 γ 能谱仪 复杂的车载测井系统 车载测井系统

1	2	3
6. 间接找铀测井方法: A. 激发极化法 B. 磁化率法	利用铀矿体或伴生物质的非放射性特性间接找铀	适当的仪器
6. 土壤层瞬时测氦法: A. 浅孔法 B. 深孔法	至今仍在使用的常规找铀方法, 探矿深度100米左右; 近几年来方法和仪器均有改进	多用型轻便测氦仪
7. 水中测氦法	利用河、湖、泉、塘, 并取水样测氦	多用型轻便测氦仪
8. 泥浆测氦法	测量孔中泥浆从深部带上来的氦, 用于监测勘探过程和发现两孔之间的盲矿体	专用仪器
9. 无水钻孔中测氦法	利用皮管从孔中抽气测量	氦气仪及辅助抽气装置
10. 径迹蚀刻法	经过广泛试验而肯定的有效深部找矿方法	胶片和显微镜或径迹自动计数仪器
11. α 仪法	用小型仪器在浅孔中累积测量氦的有效深部找矿方法	α 仪
12. α 卡法	利用聚酯镀膜薄膜收集氧子体, 然后测量氧子体 α 强度的方法, 是一种可以消除钍射气干扰的深部找矿方法	测量 α 粒子的仪器
13. 活性炭吸附法: ① 土壤层氦气吸附法 ② 地表层挖孔埋设法 (累积吸附) ③ 地表面局部加热累积吸附法	有效的深部找矿方法, 可以消除钍射气干扰此法可代替土壤层瞬时氦 ⁴ 测量 将活性炭吸附器埋于浅孔中, 然后测量氧子体的 β 强度或 γ 强度 活性炭吸附器置于地表, 上面罩以半透明罩, 利用阳光加热, 加速深部氦向上运移	抽气取样装置和活性炭吸附器 相应的探头和定标器 相应的探头和定标器
14. 钍-210 法: A. 地表层取样法 B. 孔中深部取样法	是一种利用钍的长寿命衰变产物的深部找矿方法	α 测量仪器
15. 氦法 ① 土壤层抽气分析法 ② 土壤取样分析法 ③ 水样分析方法	在有利条件下利用三种介质取样分析氦均可圈定铀矿体, 是一种深部找矿方法	不同的取样器、样品容器和质谱仪; 车载仪器或实验室固定型仪器
16. 本法: A. 土壤层抽气法 B. 室内样品分析法	适用于有汞伴生的铀矿床, 是一种深部找矿方法	野外轻便仪器和室内原子吸收谱仪
17. 热释光法: ① γ 热释光法	用 LiF 剂量计累积测量 γ 辐射	适当的剂量计和热释光测量仪器

1	2	3
② α 热释光法 ③天然热释光法: A. 地表取样法 B. 孔中深部取样法	用 CaSO_4 剂量计累积测量氡的 α 粒子, 是有效的深部找矿方法 利用天然物质或矿物颗粒的热释光	
18. 土壤层取样测铀法	取土壤样品, 水溶密封, 通过测氡计算铀含量	多用型轻便测氡仪
19. 水中测铀法	利用地下水取样分析铀是一种简单易行的深部找矿法	多用型轻便测氡仪
20. 水中测铀及伴生元素法 (10余种元素)	国外普遍采用的铀矿化探法	采用多种实验室分析方法
21. 水底沉积物测铀及多元素分析法(数十种元素)	国外普遍采用的铀矿化探法	
22. $^{231}\text{U} / ^{235}\text{U}$ 比值法 ①水中取样分析法 ②土壤层取样分析法 ③孔中取样分析法	正在研究、试验的新方法, 是一种有希望的深部找矿和地质研究方法	α 谱仪
23. 铅法	正在进一步研究和完善的方法	适当的实验室仪器
24. 地植物法: A. 指示植物法 B. 生物地球化学法	仍在小规模使用的方法, 有待进一步研究和完善	适当的实验室仪器
25. 卫星遥感法	是一种正在研究、试验的新方法	室内图像处理仪器设备
26. 热红外法	已经过有限范围试验的找铀新方法	机载仪器
27. 微迹取样分析法	用轻便、车载或机载系统取地表微粒样品, 用裂变径迹法分析铀	
28. 普通物探法: 磁法、电法、地震法、重力法等	在铀矿勘探中应用规模逐渐扩大, 在有利条件下效果良好	适当的仪器

表2 国际联合研究的铀矿普查、勘探方法

项 目	参 加 的 国 家	协 调 机 构 及 负 责 科 学 家
1	2	3
1. 铀矿勘探实例 邀请各国发现矿床有经验人员介绍经验: 1979年11月召开了会议, 1981年出版会议专辑		NEA/IAEA
2. 利用矿物分析方法圈定找铀远景区的研究	加、法、西德、西班牙、 瑞典、英、美共七国	美国能源部 D. Dahm博士

1	2	3
3. 气体找矿方法 (氦和氩) 已用多种方法和仪器进行了试验	比利时、加、法、西德、意大利、南非、瑞典、英、美共9国	NEA (OECD)
4. 天然 γ 辐射测量方法的改进	澳大利亚、奥地利、加、丹麦、芬兰、法、南非、瑞典、英、美共10国	丹麦里索实验室 L. L. Øyberg 博士
5. 测井方法	澳大利亚、加、法、西德、南非、瑞典、英、美共8国	加拿大地调局 P. Killien 博士
6. 花岗岩中的铀 1980年11月在加拿大召开过讨论会, 报告22篇	澳大利亚、加、法、西德、西班牙、瑞典、英、美共8国	美国地调局 T. Nash 博士
7. 铀成矿省的识别, 分5个专题小组研究 A组—卫星图象 B组—地球化学数据分析 C组—铀成矿省的成因 D组—普通岩石类型中的铀含量 E组—成岩和变质过程中的铀性状	澳大利亚、奥地利、加、丹麦、法、西德、爱尔兰、意大利、荷兰、葡萄牙、西班牙、瑞典、英、美共14国	美国地调局 T. Offield 英国地科院 P. R. Simpson 加拿大地调局 V. Ruzicka 瑞典地调局 M. R. Wilson 加拿大 Regina 大学 G. R. Parslow
8. 生物地球化学法	加、芬兰、法、瑞典、英共5国	瑞典地调局 J. Byman
9. 非放射性方法		待定

一、放 射 性 航 测

放射性航测是找铀的一种高效率方法, 在中外铀矿普查、勘探历史中, 用航测方法发现了许多铀矿床, 近十多年来澳大利亚和加拿大等国用航测发现了不少大矿。自从出现了航空 γ 能谱测量以来, 特别是高灵敏度航空 γ 能谱测量的发展和应用, 使航测方法更趋完善, 航测数据对于找矿和地质研究及解释更为有用。铀、钍、钾丰度及 U/Th/K 比值的变化, 不仅在铀矿勘探中对鉴别真假异常有用, 对于寻找某些其它非放射性矿床同样是很有用的参数。

1. 航测的效率

航测方法的生命力在于它的快速和有效。利用航测方法, 可以对不知从何下手的大面积地区进行快速普查, 能较快地取得战略性数据或资料, 根据所得资料便可选出值得进一步详测或地面研究的远景区, 从而可以加快找矿速度和缩短找矿周期, 也有利于做出或进

或退的战略决策。因此许多国家的政府地质机构和私人探矿公司在铀矿普查和勘探的开始阶段多以航测为先导。航测初始而一举奏效的实例也不少。

航空 γ 测量或 γ 能谱测量与地面 γ 或 γ 能谱测量的原理是一样的,但航测的效率为地面测量的2500倍。在地形平坦条件下,按适当线距和高度进行航测,可以对较大面积进行饱和测量(无空白区),而地面测量要做到这一点则比较困难。当然地面测量也有它自己的一系列优点。

如果进行以圈定远景区为目的的大面积区测,用5公里的线距进行航测,60个飞行小时即可完成4—5万平方公里的面积。采用这种方法对大面积进行区域评价无疑是快速和有利的。

同样,对于以寻找异常为目的的小面积详测来说,以较密的线距进行航测,既有战略意义,又有战术意义;把整个测区内发现的异常进行比较和鉴别,能较正确地选出值得优先进行地面研究和追索的有价值异常。

2. 航测的效果和应用规模

航测对于圈定远景区和探测单一的放射性异常都是有效的。澳大利亚的纳巴勒克铀矿床和兰杰铀矿床分别是由英国和美国的航测服务公司在承包小面积详测时发现的;赞比亚的一个铀矿床是在进行全国航空 γ 能谱测量时发现的;1976年8—10月加拿大7家石油公司联合对加拿大阿萨巴斯卡盆地进行了航测,航测线距3.2公里,总共完成27200测线公里。航测发现了近40个值得进行地面检查的异常,在当时尚未发现的凯湖和克勒夫湖铀矿床上均有明显的异常。

最近5—6年来苏联地质机构对航空 γ 能谱测量更加重视,先后于1977年和1980年出版了两本有关航空 γ 能谱测量的指导手册,总结了苏联应用航测找铀和其它矿种的经验。在1980年出版的“预测铀矿床的航空地球物理方法”一书中展示了在铀矿床和铀矿点上测得的典型的航空 γ 能谱强异常和弱异常。他们对不同地形和地质条件下的65个铀矿床和矿点进行了研究对比,取得了较多的数据。图1—1是苏联在65个铀矿床和矿点测到的典型异常。

国际原子能机构曾对各种方法所发现的铀矿床按国家(21个国家)进行过调查,用航测发现的铀矿床占相当大的比例。总之,不管从历史上来看,还是从近10年的情况来看,在铀矿普查、勘探中,在一切可能条件下采用航测方法是快速、有效和有利的,这是肯定无疑的。当然,要使航测获得预期效果,还取决于一系列其它因素,如航测仪器设备的可靠性(灵敏度、精度和稳定性)、工作方法的科学性、解释水平的高低和地面检查追索的及时性等。

在铀矿普查、勘探中,西方国家的政府地质机构和私人探矿公司均把航测放在很重要

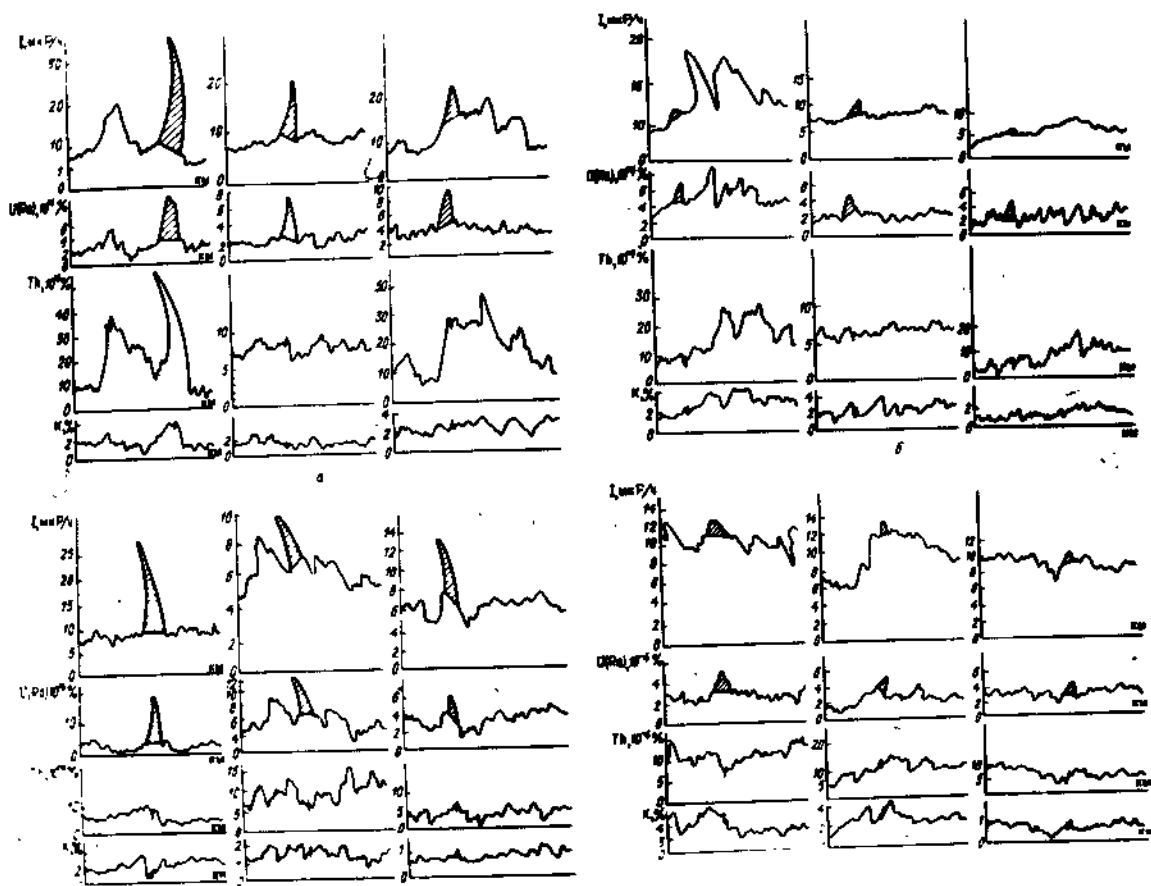


图 1—1 苏联在铀矿床和矿点上测到的典型 γ 能谱异常: a、b—明显异常; u、t—弱异常

的位置上。政府地质机构之所以需要航测,是因为他们需要利用航测进行大面积区域研究和评价;私人探矿公司之所以需要航测,是他们需要根据航测资料选择矿产勘探地或在已选定的勘探地进行快速详测。美国在进行全国铀资源评价计划过程中要对所有 621 块 2×1 图幅区进行高灵敏度航空 γ 能谱测量,包括多山的阿拉斯加。美国能源部 1979 年完成的航测工作量为三十多万测线公里。美国的私人探矿公司每年都使用相当多的航测工作量。从表 1—1 中所列数字可以看出,1978 年 44 家公司共使用 57 万测线英里的航测,平均每家公司进行了一万三千多测线英里。

表 1—1 美国私人探矿公司 1972—78 年的航测工作量

年	公 司 数	完成航测总数 (测线英里)	γ 能谱航测 所占比例(%)	总计数率航测 所占比例(%)	测 线 间 距 (英 里)
1972—76	30	910000	57	43	0.25—1 平均 0.67
1977	29	435000	68	32	0.1—2.6 平均 0.78
1978	44	570000	58	42	0.1 和 2 平均 0.39

3. 放射性偏高区找矿观点

加拿大地调局在六十年代对铀矿勘查方法进行了较为广泛的研究。研究的主要方法是地面和航空 γ 能谱测量方法及各种区域化探方法。他们首先用这些方法进行了小规模研究试验, 此后又在不同类型的已知含铀区进行了规模较大的试验测量, 获得了宝贵的资料, 并证明这些方法对于进行快速、有效的大面积区测是普遍实用的。加拿大地调局通过多年的研究和试验, 得出了一个为许多人所接受的观点, 即放射性偏高区找铀的观点。所谓偏高区系指铀含量高于地壳平均值的区域。加拿大地调局在已知地质环境下的实测资料表明, 加拿大已知的铀矿床和矿点多产于放射性偏高区中或其边缘上。图 1—2 是加拿大部分地区的放射性偏高区(富铀区)与铀产出的关系图。

加拿大进行全国铀矿普查的目的之一是圈定找铀的远景区, 即富铀的放射性偏高区。偏高区找铀的观点是加拿大全国铀矿普查计划的基本指导思想。他们认为: ①在高于正常铀含量的偏高区本身中可能存在着铀含量达到经济意义的铀产出; ②从偏高区中搬运出来的铀可能富集于偏高区的附近。

加拿大地调局在已知铀或矿区进行了不同规模、不同详细程度和不同方式的航空 γ 能谱测量试验, 所得到的铀区域分布等值平面图能很好地指示出已知铀产出的位置, 所得到的 γ 能谱测量剖面图能够显示出许多已知矿床和矿点的存在以及 U、Th、K 和 U:Th:K 比值沿测线的细微变化。加拿大地调局还对加拿大地盾区进行了长距离航空 γ 能谱踏勘测量。地盾区被划分为 7 个地质省, 其中又分为若干地质区(共 34 个)。所设计的长距离航测测线贯穿所有的地质省和尽可能多的地质区。根据航测和地面取样结果计算了每个地质省和主要地质区的 U、Th、K 平均含量和圈出了某些放射性偏高带。苏联根据航空 γ 能谱测量资料, 计算了已识的 65 个铀矿床和矿点的 U、Th、K 含量相对本底的变化量。这些数据对于正确解释航测结果是很重要的。

图 1—3 是加拿大地盾区长距离航测剖面图的一部分。从图上可以看出一条宽 70 公里、长 480 公里的放射性异常带, 其平均放射性元素含量为 4.8%K、6.2 ppm eU 和 31.1 ppm eTh。这条带沿伍拉斯顿湖褶皱带分布。位于伍拉斯顿湖西岸的拉比特湖铀矿

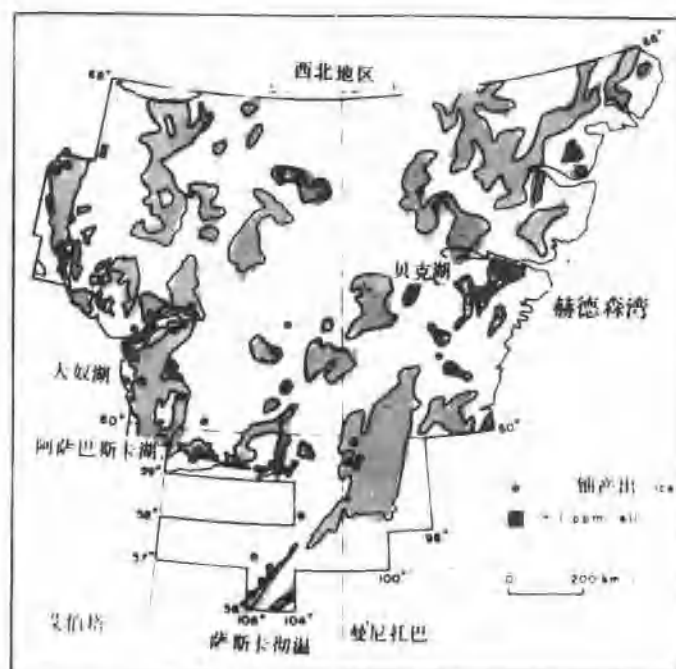


图 1—2 加拿大部分地区的已知铀产出与铀的区域分布的关系 (Richardson和 CARSON, 1976) 图上圈出的灰暗区是地表层铀含量高于 1 ppm eU (根据航空 γ 能谱测量数据确定的) 的偏高区。大多数铀产出位于富铀偏高区中或其边缘附近。

床位于宽阔富铀带的边缘上。在拉比特湖铀矿床上的航空 γ 能谱剖面图上也有明显的异常 (铀道)。

图 1—3 是穿过安大略和昆毕克的长距离航测剖面图。从图上可以看出放射性的区域变化。类似的长距离航测剖面图还有多幅。这些图件对于了解和研究加拿大主要地区的放射性元素区域变化和与已知矿床及地质环境的关系均有很大价值。

加拿大地调局根据多年的航空 γ 能谱研究和实测资料, 总结出一套解释航空 γ 能谱测量数据的经验, 并整理出一套典型的等值平面图和剖面图。图 1—5 是说明放射性偏高区观点的剖面图实例。还有其它根据 U/Th 或 U/K 比值鉴别真假异常的剖面图实例。从图 1—5 上可见, 在 25 英里处的铀道剖面上和 U/K 比值剖面上均有明显的异常。异常的右侧为放射性偏高区 (见总道剖面)。

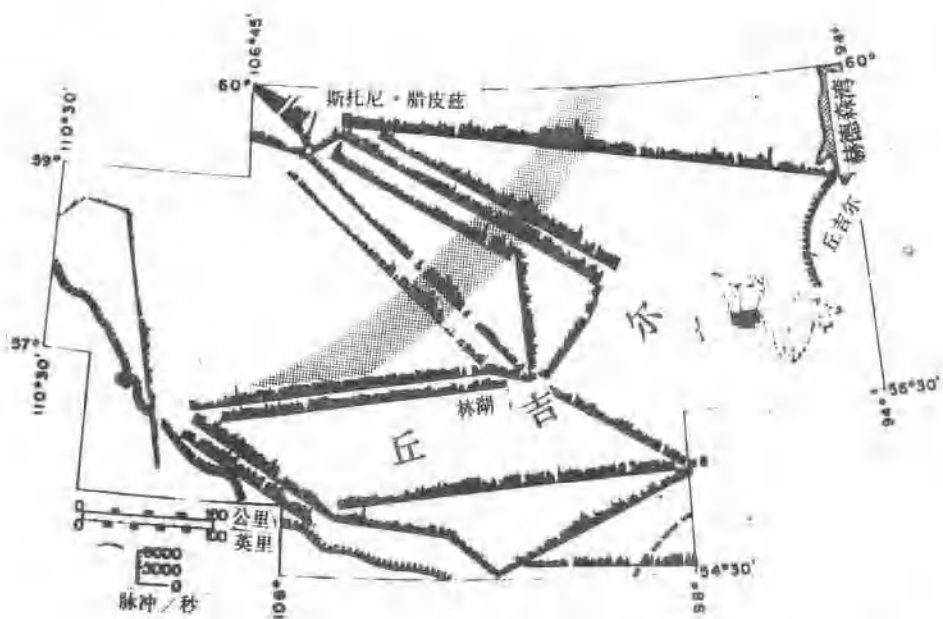


图 1—3 加拿大地盾区长距离航测剖面所指示的异常放射性带 (宽70公里, 长480公里)

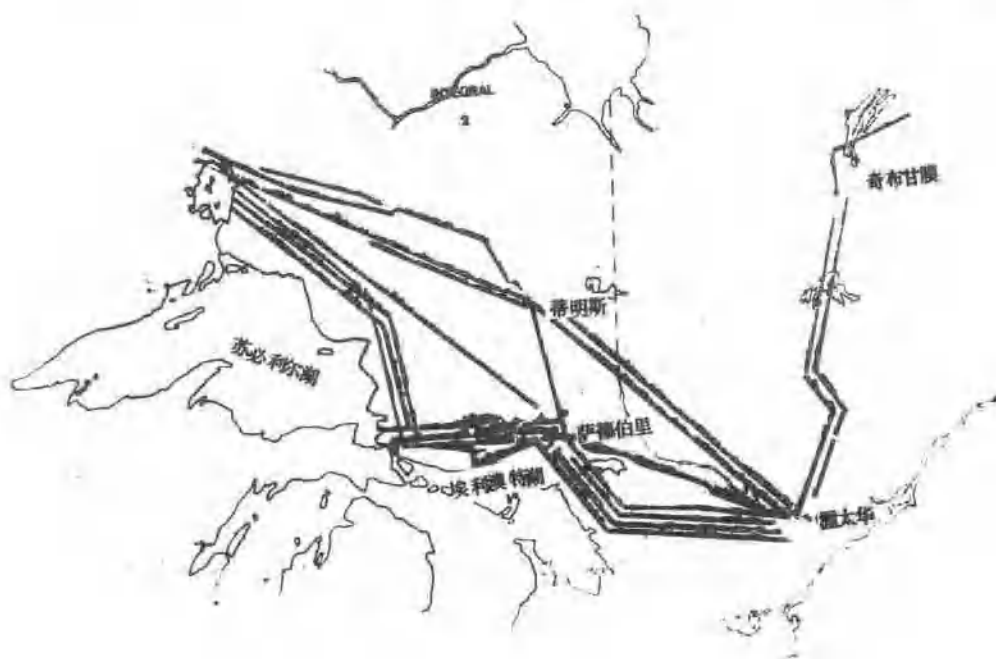


图 1—4 穿过安大略和昆毕克的长距离航测剖面图

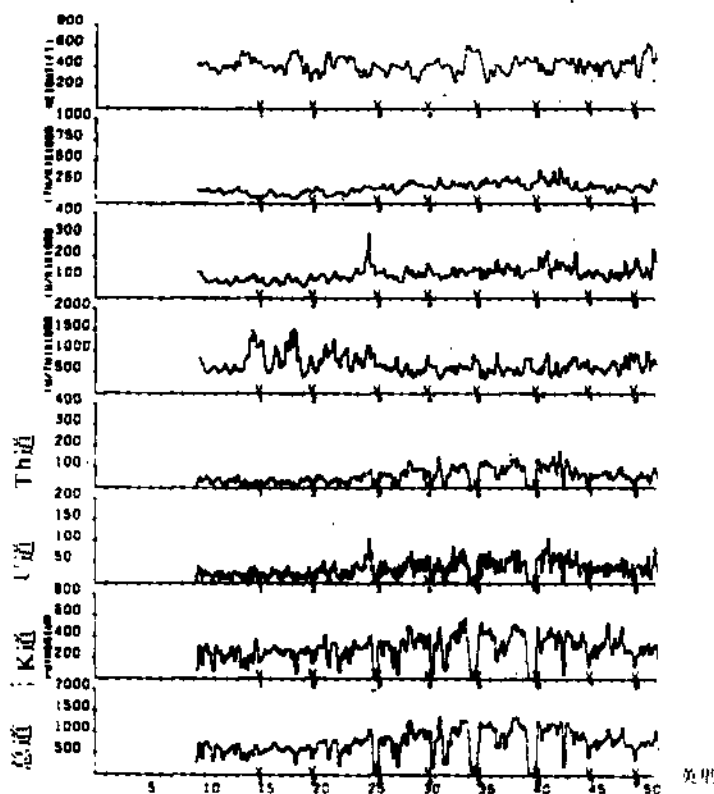


图 1—5 放射性偏高区边缘上的铀异常

4. 航测仪器的发展

高灵敏度航空 γ 能谱测量系统的研究和试验首先开始于加拿大 (1976 年), 随后在许多国家逐渐推广应用。目前美、加等国的仪器公司已生产出多种型号的、用微处理机控制的 256/512 道航空 γ 能谱仪。这种仪器系统能对天然 γ 辐射进行全谱测量, 还能监测宇宙辐射和大气中 Bi^{211} , 并能对这两种成分及飞行高度变化的影响和康普顿散射进行自动修正。航测系统的发展表现在功能的完善和探测灵敏度及工作稳定性的提高, 同时航测数据的处理方法也有很大的发展。

长条状方截面碘化钠晶体的出现, 大大减少了航测探头的重量和体积, 使同样的机仓空间能容纳更大的碘化钠晶体体积。由于方晶体可以拼排组合, 可用 4—6 块 $100 \times 100 \times 406$ 毫米晶体组成一个探头, 同时还可以用四块和一块这样的晶体构成下测/上测组合探头, 用于分别测量来自地面的 γ 辐射成分和大气中的 Bi^{211} 辐射成分; 上测探头 (2π 几何条件) 所测值用于修正下测探头 (4π 几何条件) 的测值, 以消除大气中 Bi^{211} 的影响。

目前国外生产的高灵敏度航空 γ 能谱测量系统多采用方晶体恒温探头, 以保证仪器的

增益稳定。探头采用加热恒温方法。恒温温度分档可调,可根据季节的环境温度选择适当的温控水平,使探头中的温度略高于环境温度。探头的壳体内装有拼排的方晶体,周围有一层保温层或绝热层。图1—6是用6块 $100 \times 100 \times 406$ 毫米方晶体组成的探头的内部结构照片。图1—7是用4块方晶体和一块方晶体构成的下测/上测探头。图1—8是用柱状晶体构成的上测探头。

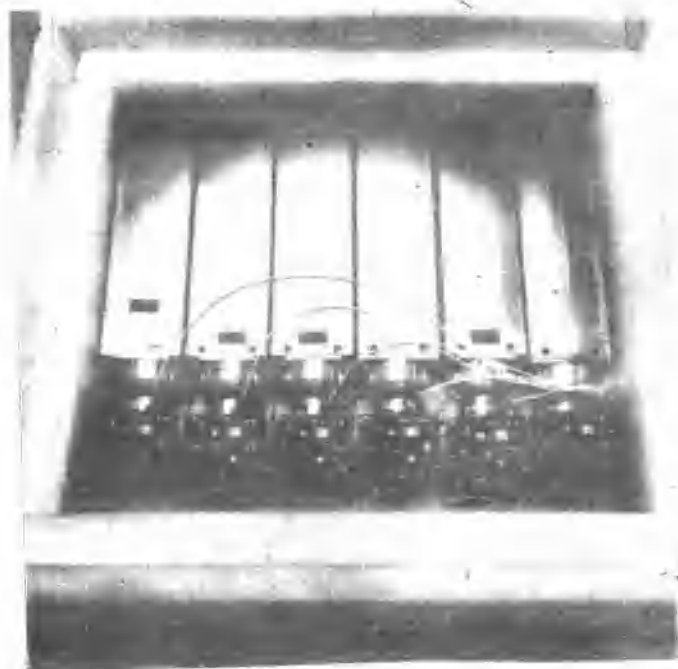


图1—6 用6块 $100 \times 100 \times 406$ 毫米方晶体构成的探头的内部结构照片

美国能源部研究了可能用于航测的其它类型的探测器,如由碘化钠晶体和碘化铯晶体构成的层状探测器及半导体探测器等。

高灵敏度航空 γ 能谱测量系统是由许多仪器单元组成的复杂系统,一套较完善的系统通常由10余种仪器和辅助设备组成,总共能同时测量近10余种参数。目前国外有多家仪器公司能生产性能类似的这种航测系统(见表1—2)。加拿大Urtec公司已研制成一种集成度更高、体积更小的航测系统,其中的磁力仪和微处理机单元已缩小到一块插板的体积,其操纵键盘小巧,而且可以在飞机驾驶室内遥控仪器,并可通过键盘及数码显示屏进行简单的人机对话。

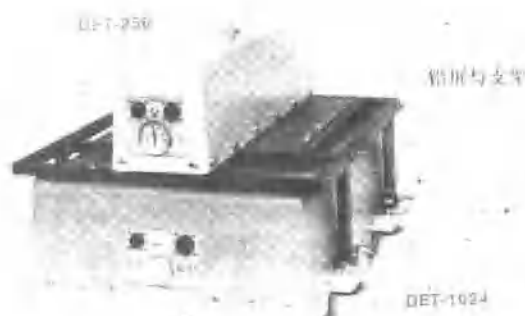


图 1—7 用 5 块 $100 \times 100 \times 406$ 毫米方晶体构成的下测 上测组合探头，两探头之间置有一块铅屏（重 43 公斤）

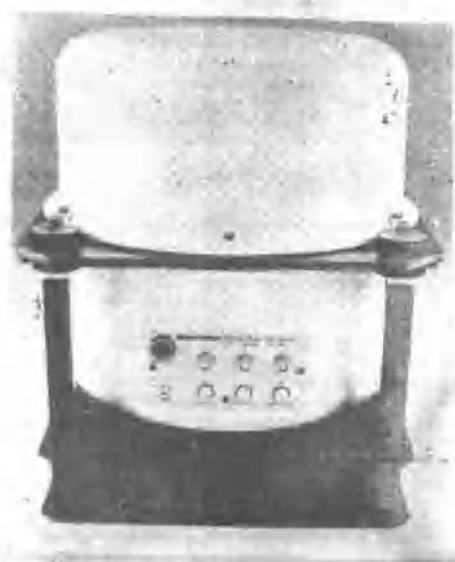


图 1—8 用柱状晶体和铅屏构成的 GSA-95 型温控上测探头，探头下部座架上置有铅屏

表 1—2 国外生产的高灵敏度航空 γ 能谱测量系统

仪 器 型 号	生 产 公 司
GR-800	美国 Geometrics 公司
GAM-2000	加拿大 Scintrex 公司
Spectra III	加拿大 Mepharc 公司
IGSS-2	加拿大 Sonotek 公司
UDAS	加拿大 Urtec 公司

航空 γ 能谱测量多利用低空飞行性能好的固定翼飞机和直升飞机进行。图 1—9 和 1—10 是两种装有方晶体探头的典型 γ 能谱航测系统。



图 1—9 装在 Nomad 飞机上的 GR-800 型高灵敏度航空 γ 能谱测量系统，右图是装在机仓内的仪器系统和三个方晶体探头，其中一个为下测 上测组合探头；探测器总体积为 3328 英寸³



图 1—10 装在 Hughes500—D型直升飞机上的 Spectra III型多道 γ 能谱测量系统，飞机底部装有两个探头，共 8 块 $100 \times 100 \times 406$ 毫米晶体，下图是探头仓内的探头排列照片；探测器总体积为 2084 英寸³

二、地面 γ 和 γ 能谱法

γ 法和 γ 能谱法是铀矿普查、勘探中应用最广的基本方法，该法的应用贯穿于从普查到勘探的所有阶段，应用方式多种多样。在三十多年的铀矿普查、勘探历史中， γ 法始终是一种最主要的方法，至今仍然如此。自从出现 γ 能谱法以来， γ 法有了很大的发展。国际原子能机构自 1974 年以来组织有关专家先后编写了三种有关 γ 和 γ 能谱法应用的技术报告。1974 年出版了有关铀、钍矿床探测仪器的 158 号报告，1976 年出版了有关仪器标定方

法的174号报告, 1979年出版了有关 γ 测量和 γ 能谱测量的186号报告^{*}。在这三个报告中对铀矿普查、勘探的 γ 法和 γ 能谱法的应用经验以及对各种仪器的要求进行了较为全面的总结, 提出了建设性的改进意见。

本节所介绍的地面 γ 和 γ 能谱法仅限于用轻 γ 辐射仪和 γ 能谱仪进行的步行测量方法和车测, 而且仅涉及方法和仪器的某些新发展及某些新的认识。

从表1中可见, γ 法和 γ 能谱法已发展成许多变种或测量方式, 尽管方法的基础原理不变, 但却扩大了方法的应用潜力。对地面 γ 法和 γ 能谱法的某些变种应给以充分的重视, 同时也不可忽视仪器设备的改进。

目前铀矿普查、勘探中的放射性测量方法正在向定量方向发展, 仪器的标定和测量数据的表示方法均有明显改进。

1. 放射性测量数据的表示方法和单位

长期以来, 铀矿勘探中的放射性测量结果随国家、机构和所用仪器的不同而采用多种非标准单位来表示, 致使不同仪器所得结果不能相互比较, 而且过去所使用的单位有些是与地质和地球化学概念不相关的单位, 如脉冲/秒、毫伏、微伦琴/小时等。这些单位均不能表示地质体或某一测点的放射性元素的总含量或铀、钍、钾三者各自的丰度。为了用统一的、有科学意义的标准单位来表示放射性测量结果, 国际原子能机构向其成员国推荐了新的单位, 并提出了建造各种标定模型和标定仪器的方法。要进行较为精确的定量放射性测量和用含量单位表示测量结果, 必须具备已知铀、钍、钾含量的、达到饱和体积的标准标定模型。

国际原子能机构建议采用“Ur”单位作为总计数率 γ 测量的单位, 用于表示放射性元素含量的总丰度。“Ur”是Unit of radioelement concentration的缩写, 称为放射性元素含量单位。这个单位的定义是: 具有1个“Ur”的地质体所造成的仪器响应值(即计数率)与1 ppm平衡铀所造成的响应值相同。也就是说, 1 ppm eU = 1 Ur。如果一个地质体内含有5 ppm eU, 那么用标定好的 γ 辐射仪测量时就会得出5 Ur的测量结果。当地质体同时含有U、Th、K三种放射性元素时, 则所测得的Ur是U、Th、K三者的贡献, 其关系为:

$$1 \text{ ppm eU} \approx 1 \text{ Ur}$$

$$1 \% \text{K} = 1.6 - 2.2 \text{ Ur}$$

$$1 \text{ ppm eTh} = 0.44 - 0.45 \text{ Ur}$$

Ur单位与 $\% \text{K}$ 和ppm eTh的换算关系是以钾和钍的铀当量为基础的。对任何总计数率 γ 辐射仪的净计数率(减去本底)均可写成:

^{*} 这三个报告均已译成中文, 其中174号报告即将出版

$$n = {}^a_K K + {}^a_U U + {}^a_T T,$$

也可写成:

$$n = {}^a_U \left(\frac{{}^a_K}{{}^a_U} K + U + \frac{{}^a_T}{{}^a_U} T \right)$$

式中: K、U、T —— 钾、铀、钍的含量;

a_K 、 a_U 、 a_T —— 钾、铀、钍单位含量所造成的每秒脉冲数。

由于 $1 \text{ ppm eU} = 1 \text{ Ur}$, 因此将所得净计数率除以 a_U , 便可得出以 Ur 表示的测量结果。

表 2—1 中列出了不同尺寸碘化钠晶体在不同测量高度上的钾和钍的铀当量。

表 2—1 总计数率仪器的碘化钠探测器的钾和钍的铀当量

探 测 器 尺 寸 (毫 米)	测 量 高 度 (米)	$\frac{{}^a_K}{{}^a_U}$	$\frac{{}^a_T}{{}^a_U}$
38 × 25	1	1.6	0.44
51 × 51	1	1.6	0.44
152 × 102	1	1.7	0.44
152 × 102	50	2.0	0.45
152 × 102	125	2.2	0.45

表 2—1 中所列数据取自国际原子能机构出版的 186 号报告。加拿大地调局的 P. G. Kileen (1979) 博士在他的报告中列出的数据与表 2—1 的略有差别 ($1 {}^a_K = 2.6 \text{ Ur}$; $1 \text{ ppm U} = 1 \text{ Ur}$; $1 \text{ ppm Th} = 0.177 \text{ Ur}$)。他指出, 他所列的数据仅适用于甄别阈在 0.1 MeV 以上的 γ 辐射仪: 任何具有此种甄别阈的 γ 辐射仪, 均可按他所给出的换算关系, 利用标定模型用 Ur 单位标定 γ 辐射仪。如果使用钾、铀、钍混合模型标定 γ 辐射仪, 则可根据已知的钾和钍及铀含量换算成 Ur 单位。通过标定便可求出 γ 辐射仪的灵敏度 (或称换算系数), 此后在野外测量时便可利用该参数把仪器读数换算成 Ur 单位。 γ 辐射仪的灵敏度为:

$$\text{灵敏度} = \frac{\text{脉冲/秒 (减去本底)}}{1 \text{ Ur}}$$

我国多年来一直采用“微伦琴·小时”单位表示测量结果。我们是否也采用含量单位“Ur”, 是应当考虑的一个问题。也可以同时采用两种单位, 两种单位之间可通过换算系数互相换算, 这样可能好处更多一些, 因为用“微伦琴/小时”表示的照射量率是环境监测所必需的数据, 随着环保工作的发展, 这种数据将更加重要。

丹麦里索实验室曾用美国的 GR-110 型四道铀使 γ 能谱仪进行环境监测试验, 通过模