



砂岩型铀矿区域物化探成矿信息 提取及综合评价技术研究

Study on Techniques of Regional Geophysical and Geochemical Weak Information
Extraction and Integrated Evaluation for Sandstone-hosted Uranium Deposits

侯惠群 韩绍阳 柯 丹 著

中国原子能出版社

砂岩型铀矿区域物化探成矿信息 提取及综合评价技术研究

**Study on Techniques of Regional Geophysical and
Geochemical Weak Information Extraction and Integrated
Evaluation for Sandstone-hosted Uranium Deposits**

侯惠群 韩绍阳 柯 丹 黄树桃
胡水清 谈成龙 翟玉贵 张 鹏 著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

砂岩型铀矿区域物化探成矿信息提取及综合评价技术研究/侯惠群,韩绍阳,柯丹著.
—北京:中国原子能出版社,2013.12

ISBN 978-7-5022-6008-8

I. ①砂… II. ①侯…②韩…③柯… III. ①砂岩型铀矿床-地球物理勘探-研究
②砂岩型铀矿床-地球化学勘探-研究 IV. ①P619.140.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 202097 号

内 容 简 介

针对我国北方中生代沉积盆地中砂岩型铀矿预测评价的需求,本书系统研究了砂岩型铀矿区域物化探成矿信息提取及综合评价技术。主要内容包括:阐述了砂岩型铀矿航磁、航放弱信息提取理论依据,建立了一套砂岩型铀矿重磁与放射性成矿信息提取技术,以鄂尔多斯盆地为例,开展了应用研究;提出了基于 GIS 的砂岩型铀矿多源信息综合预测评价技术;基于 GIS 开发了功能强大的砂岩型铀矿综合评价信息系统软件、区域物化探数据处理软件及基于体素模型的三维可视化软件;建立了一套 GR—660 车载伽马全能谱数据采集、处理和解释技术,以内蒙古沙麦—白音呼布尔盆地为例,进行了应用研究;提出了低本底地气找铀新方法,提出了基于土壤气态水的找铀新技术;研制了活性炭吸附测氦测量系统,开发了活性炭吸附测氦采样装置,建立了一种高信噪比的累积式活性炭测氦技术,以 DS 铀矿床为例,开展了应用研究。以鄂尔多斯盆地东北部和伊犁盆地南缘为例,开展了砂岩型铀成矿潜力综合评价示范研究。

本书观点新颖,内容丰富,是一部关于砂岩型铀矿资源研究的创新性著作,对从事铀资源研究的教学、科研和生产工作人员,均有重要的参考价值。

砂岩型铀矿区域物化探成矿信息提取及综合评价技术研究

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)
责任编辑 韩 霞 卫广刚
装帧设计 马世玉
责任校对 冯莲凤
责任印制 潘玉玲
印 刷 保定市中华美凯印刷有限公司
经 销 全国新华书店
开 本 787 mm×1092 mm 1/16
印 张 11.75
字 数 293 千字
版 次 2013 年 12 月第 1 版 2013 年 12 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5022-6008-8 定 价 56.00 元

网址:<http://www.aep.com.cn>

E-mail:atomep123@126.com

发行电话:010-68452845

版权所有 侵权必究

序

我国经济持续发展对能源提出巨大需求,同时面临环保与温室气体减排的巨大压力,核能作为安全、清洁能源在我国能源战略中的地位将更为突出;我国目前成为全球核电在建规模最大的国家,到2015年我国核电装机容量将达到4 000万千瓦以上,到2020年达到约6 000万千瓦。铀资源是核能发展的重要物质基础。为满足我国核能发展对铀资源的长远需求,加快我国铀资源勘查的步伐,持续增加铀资源储备,已显得尤为迫切和重要。

砂岩型铀矿是重要的成矿类型之一。为经济快速寻找砂岩型铀资源,作者在砂岩型铀矿物化探成矿信息提取及综合评价领域,开展了大量的研究探索工作,应用新理论、新技术、新方法开展砂岩型铀矿物化探成矿信息提取,取得了多项创新性成果。《砂岩型铀矿区域物化探成矿信息提取及综合评价技术研究》一书是作者在多年科研成果的基础上,系统总结提炼写成的,是一部理论上有所探索、方法技术上有创新的铀资源研究学术专著。

本书观点新颖,内容丰富,所介绍的成果主要有:

(1) 建立了一套可有效降低干扰噪声、识别断裂构造、划分沉积岩性和提取铀矿化信息的地球物理弱信息提取技术和沉积盆地区域物性界面反演技术,提出了基于GIS的砂岩型铀成矿靶区综合评价技术,成功用于找矿实践。

(2) 基于GIS开发了集多源信息管理、复杂空间分析、物化探常规处理、弱信息提取及综合评价等强大功能为一体的砂岩型铀矿综合评价信息系统;开发了功能强大的砂岩型铀矿区域物化探数据处理系统和基于体素模型的三维可视化软件,为铀资源预测评价提供了有效技术支撑平台。

(3) 开发了基于车载伽马全能谱的砂岩型铀矿弱信息提取技术,成功用于找矿实践。

(4) 发明了基于土壤气态水的纳米级铀微粒探测方法和综合应用超声波、去离子水清洗聚酯膜的高精度地气探测方法。

(5) 自主研发了新型便携式、智能化活性炭吸附氮测量系统,实现了活性炭吸附氮全自动测量;发明了累积式土壤氮捕集采样装置。

本书的出版对推动砂岩型铀矿勘查评价技术水平的提高具有重要意义,对从事铀资源研究的教学、科研和生产工作人员,均有重要的参考价值;我很高兴向广大读者及科研人员推荐这部专著,同时也向全体作者致以衷心的祝贺。

中国科学院院士



2013年9月

前 言

铀资源是核能发展的物质基础。经济社会发展对能源的需求日益突显,而核能作为一种清洁、高效、安全、经济的能源,已在世界范围得以广泛应用,是我国未来能源发展的重要方向之一。我国已开始规模化发展核电,现已成为全球核电在建规模最大的国家,预计到2025年我国商业运行的核电装机容量将接近9 000万千瓦。为了保障核能发展所需铀资源的稳定供应,立足国内加快铀资源勘查、增加铀资源储备,已显得非常迫切和重要。

地浸采铀是铀采矿史上一次重大技术革命,它使许多低品位砂岩型铀资源变成可利用的财富,且经济效益显著。自20世纪90年代初以来,我国铀矿勘查的主攻方向转为储量大、开采成本低的可地浸砂岩型铀矿。砂岩型铀矿一般产于中生代沉积盆地内,为全盲型,矿体具有一定的埋藏深度、品位较低、但矿量大;砂岩型铀矿床是在沉积环境下形成的,铀矿体与围岩、各沉积层位之间的物性界面为渐变结构,物性差异很不明显,在地表异常场中反映的与成矿相关的物化探异常信息十分微弱,难发现、难识别。国外通常采用以钻探为主、结合少量物化探工作的方法寻找此类型铀矿床,需以大量投资为后盾。为了快速、经济寻找砂岩型铀资源,在铀成矿理论的指导下,充分利用已获取的物化探信息源,应用新理论、新技术、新方法完成物化探异常场的高精度分解,将模糊化隐蔽的成矿弱信息通过“解密”提取出来,有效圈定“致矿”和“矿致”异常,提高成矿预测水平和找矿效果,最大限度地减少地勘投入风险,已显得非常重要。为有效地识别与铀成矿相关的物化探弱信息,有两种途径:一是提高探测器精度,改进测量采集技术,降低测量的噪声水平;二是借助于数据处理模型,并通过编制软件的方式,对原始测量数据进行深入挖掘,压制地质背景所引起的干扰噪声,提取成矿弱信息。就数据处理方法而言,由于成本低,易于实现,在合适的地质条件下能够达到预期目标,因此被广泛采用。

我国中生代沉积盆地中已经积累了大量地质勘查资料,在铀成矿理论指导下,基于GIS平台如何使这些资料在砂岩型铀矿勘查评价中发挥最大效能也是当前一项重要研究课题。

本书是铀矿科研人员在总结多年研究成果的基础之上完成的,从另一侧面记录了近年来在砂岩型铀矿区域物化探勘查与综合评价领域中取得的一些代表性成果,如地球物理弱信息提取、高灵敏度地球化学探测技术、GIS 应用软件开发、铀资源综合预测等。本书可供物化探、地质等领域的科学研究人员、有关生产应用部门的技术人员和大专院校的师生参考。由于作者水平所限,文中错误和不足之处在所难免,恳请各位读者批评指正。

最后,衷心感谢核工业北京地质研究院、核工业航测遥感中心、核工业 208 大队、核工业 216 大队,在项目研究过程中给予的大力支持和帮助。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '侯李群' (Hou Liqun). The signature is stylized and written in a cursive script.

2013 年 9 月

目 录

第 1 章 砂岩型铀矿弱信息提取研究	(1)
1.1 砂岩型铀矿国内外研究现状	(1)
1.2 砂岩型铀矿航磁、航放弱信息提取内涵	(3)
1.3 砂岩型铀矿航磁弱信息提取依据	(4)
1.4 砂岩型铀矿航放弱信息提取依据	(5)
1.4.1 钾、铀和钍地球化学特性	(5)
1.4.2 地表放射性弱信息形成机理	(6)
1.4.3 砂岩型铀矿勘查中航磁、航放弱信息提取研究现状	(9)
第 2 章 砂岩型铀矿重磁与放射性成矿信息提取技术	(10)
2.1 沉积盆地重磁弱信息提取方法	(10)
2.2 沉积盆地物性界面埋深反演方法	(12)
2.3 沉积盆地放射性弱信息提取方法	(14)
2.3.1 多道全能谱信息的应用探讨	(14)
2.3.2 利用航放能谱信息识别成矿环境的方法	(15)
2.3.3 砂岩型铀矿弱信息提取模型	(17)
第 3 章 基于 GIS 的砂岩型铀矿综合预测技术	(20)
3.1 砂岩型铀矿综合预测模式	(20)
3.1.1 综合成矿预测信息	(20)
3.1.2 铀资源综合预测模式	(21)
3.2 砂岩型铀矿综合找矿模型研究	(22)
3.2.1 综合找矿模型内涵	(22)
3.2.2 综合找矿模型基本特征	(23)
3.2.3 砂岩型铀矿综合找矿模型的构建流程	(24)
3.3 基于 GIS 的铀资源评价关键技术	(25)
3.3.1 基于 GIS 的铀资源评价方法与流程	(25)
3.3.2 基于 GIS 的铀资源预测数据库建设	(26)
3.3.3 基于 GIS 的铀资源评价综合分析方法	(28)
第 4 章 砂岩型铀矿综合评价信息系统研发	(30)
4.1 砂岩型铀矿综合评价信息系统需求分析	(30)
4.1.1 功能需求	(30)
4.1.2 数据格式需求	(31)
4.1.3 用户需求	(31)
4.2 系统功能设计	(31)
4.2.1 GIS 功能模块	(31)

4.2.2	专业信息提取功能模块	(32)
4.3	GIS 应用系统的开发方式分析	(33)
4.3.1	完全独立开发	(33)
4.3.2	单纯二次开发	(33)
4.3.3	集成二次开发	(34)
4.4	砂岩型铀矿综合评价系统开发的技术路线	(35)
4.5	砂岩型铀矿综合评价信息系统开发	(35)
4.5.1	ArcView 3.2 简介	(36)
4.5.2	ArcView 3.2 与其他应用程序的通信方式分析	(36)
4.5.3	系统开发中的混合编程技术	(37)
4.5.4	模块界面设计及功能介绍	(41)
4.5.5	具体功能的实现方法	(47)
第 5 章	基于组件 GIS 开发砂岩型铀矿区域物化探数据处理系统	(48)
5.1	组件式 GIS 介绍	(48)
5.1.1	组件技术与 COM 技术	(48)
5.1.2	组件式 GIS 及其特点	(48)
5.1.3	国内外常用组件式 GIS 软件简介及对比	(49)
5.2	系统开发的技术路线	(50)
5.3	ArcGIS Engine 简介	(50)
5.4	系统开发的关键技术	(51)
5.4.1	基于组件的接口技术	(51)
5.4.2	混合编程技术	(52)
5.5	系统界面设计	(53)
5.6	系统功能的实现	(55)
5.6.1	基本 GIS 功能的实现	(55)
5.6.2	物化探专业处理功能的实现	(65)
5.7	小结	(67)
第 6 章	基于体素模型的三维可视化软件开发	(68)
6.1	体数据三维可视化数据模型研究	(68)
6.2	三维插值算法研究	(69)
6.3	三维可视化软件的开发	(70)
6.4	三维可视化软件应用实例	(72)
6.5	小结	(73)
第 7 章	砂岩型铀矿重磁与放射性成矿信息提取技术应用研究	(74)
7.1	试验区地质概况	(74)
7.1.1	盆地基底岩性特征	(74)
7.1.2	盆地盖层岩性特征	(74)
7.2	区域岩石物性特征	(78)
7.2.1	密度参数特征	(78)

7.2.2	磁性参数特征	(79)
7.3	DS 铀矿区地质特征	(82)
7.4	鄂尔多斯盆地重磁场特征	(84)
7.4.1	重力场特征与地质解释	(84)
7.4.2	航磁异常场特征与地质解释	(89)
7.5	成矿环境识别技术应用研究	(93)
7.5.1	识别断裂构造的弱信息提取方法试验	(93)
7.5.2	沉积盆地物性界面反演方法试验	(98)
7.6	DS 砂岩型铀矿区航磁、航放弱信息提取试验研究	(107)
7.6.1	试验区航测数据可视化方法研究	(107)
7.6.2	航磁弱信息提取方法试验研究	(110)
7.6.3	航放弱信息提取方法试验研究	(115)
7.6.4	小结	(120)
第 8 章	车载全能谱测量系统在砂岩型铀矿勘查中的应用研究	(123)
8.1	GR—660 车载 γ 能谱测量系统简介	(123)
8.2	研究区地质概况	(124)
8.3	全能谱降噪数据处理技术应用研究	(124)
8.4	应用伽马能谱信息分析研究区铀成矿地质环境	(129)
8.4.1	研究区钾、铀、钍空间分布特征	(129)
8.4.2	白音呼布尔—沙麦盆地研究区典型地段放射性参数特征	(132)
8.4.3	研究区断裂构造识别	(134)
8.5	研究区砂岩型铀矿成矿靶区优选	(135)
8.6	小结	(137)
第 9 章	高灵敏度地球化学深部探测技术研究	(138)
9.1	地气探测方法研究	(138)
9.1.1	地气探测方法实现的关键技术研究	(138)
9.1.2	DS 铀矿床试验效果分析	(142)
9.1.3	小结	(143)
9.2	土壤气态水中铀测量方法研究	(144)
9.2.1	基于土壤气态水的测铀原理	(144)
9.2.2	土壤气态水测铀的关键技术研究	(146)
9.2.3	试验效果分析	(147)
9.2.4	土壤气态水铀测量和地气(铀)测量的差别	(150)
9.2.5	小结	(150)
9.3	壤中活性炭吸附氡探测方法研究	(150)
9.3.1	壤中活性炭吸附测氡方法实现的关键技术	(150)
9.3.2	累积式活性炭吸附氡探测应用试验	(156)
9.4	小结	(158)

第 10 章 基于 GIS 的砂岩型铀成矿潜力综合评价示范性研究	(159)
10.1 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀成矿潜力综合评价	(159)
10.1.1 DS 铀矿床多源信息描述模型	(159)
10.1.2 DS 式砂岩型铀矿综合找矿模型	(159)
10.1.3 鄂尔多斯盆地东北部铀成矿潜力综合评价	(161)
10.2 伊犁盆地南缘砂岩型铀成矿潜力综合评价	(163)
10.2.1 512 铀矿床的多源信息描述模型	(163)
10.2.2 512 式砂岩型铀矿田和铀矿床综合找矿模型	(169)
10.2.3 伊犁盆地南缘层间氧化带砂岩型铀矿成矿潜力综合评价	(170)
10.3 小结	(170)
第 11 章 主要研究成果	(171)
参考文献	(172)

第 1 章 砂岩型铀矿弱信息提取研究

1.1 砂岩型铀矿国内外研究现状

砂岩型铀矿一般产于中生代沉积盆地内疏松砂岩层中,目前约占世界已探明铀资源总量的近 40%,在各类铀矿床中居首位。自 1880 年在美国科罗拉多高原发现尤拉凡铀矿床开始,砂岩型铀矿开始登上历史舞台;随后,世界上又发现了多个大型、超大型砂岩型铀矿床及铀矿省,如美国中西部砂岩型铀矿集区、中亚克兹尔库姆砂岩铀成矿省及楚萨雷苏·锡尔河铀矿集区等。砂岩型铀成矿理论在人们的不断探索研究中发展与完善,铀矿地质工作者逐渐总结出了层间氧化带型、潜水-层间氧化带型(古河道型)和潜水氧化带型(含煤铀型)砂岩型成因类型,并总结出了 7 条评价准则:构造及铀源准则、古气候和建造准则、岩性-岩相古地理准则、古地球动力学及水文地质准则、水文和放射性水文地球化学准则、岩性-地球化学准则和经济地质准则。层间氧化带型如哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦的可地浸砂岩型,其矿床规模巨大,单个矿床常常是几千吨到几万吨,最大可达 30 万 t;古河道型如俄罗斯、蒙古、乌克兰等国的砂岩型铀矿,该类型矿床单个矿体(床)量不大,但矿体(床)往往成群出现,因而储量也比较可观,而且这种矿床一般埋深较浅,经济效益好。

如何提高砂岩型铀矿的找矿效果一直是国内外铀矿地质工作者研究的焦点之一。有两方面的工作一直在不间断进行:一是加强成矿地质理论和实验研究,深入了解各类铀矿床形成的环境和条件以及矿床分布规律及产出特征,总结区域成矿规律,总结正确有效的成矿理论和成矿、找矿模式,指导找矿工作;二是加强找矿方法技术研究,进一步查明指示矿床存在的各种标志和现象,有针对性地开发识别、获取、加工、分析和解释海量找矿信息的手段、工具和软件。世界产铀大国在大力进行铀资源勘查的同时,也带动了勘查技术的发展,同时由于采用了新的先进方法技术,也促进了铀资源储量有了很大突破。

对砂岩型铀矿研究起步较早的是美国和苏联的铀矿地质工作者。研究的高峰集中在 20 世纪 60~80 年代。美国地质学家在 20 世纪 60~70 年代对砂岩型铀矿进行了大量的研究,在产铀盆地分析、成矿地质条件、地球化学环境、成矿物质来源、成矿作用机制、找矿判据等研究领域,都取得了重要的成果,建立了著名的卷型铀矿床成矿理论及矿床模式,阐明了层间氧化带砂岩型铀矿的成矿地质条件和成矿机理,建立了怀俄明式、科罗拉多式和南得克萨斯式等几种不同类型铀矿床的成矿模式与找矿标志。美国 1974—1984 年开展的全国铀资源评价计划(NURE)是区域成矿预测和战略选区的一个代表性工作,建立了砂岩型铀矿计算机半定量识别评价体系;其技术方法是将全国划分为许多等面积的矩形区域,将多种地学信息半定量打分,通过计算机数据处理技术给每个预测单元进行打分,然后进行战略选区。但到 20 世纪 80 年代后,随着美国国内铀矿勘查和采铀工业的萎缩,相关的研究成果逐渐减少。

20 世纪 50 年代以来,苏联在中亚地区发现了大量可地浸砂岩型铀矿床。自 20 世纪 70 年代起,苏联铀矿地质学家对中亚地区的砂岩型铀矿床的成矿环境、形成机理及矿床时空分

布规律和找矿标志等开展了大量的研究,出版了一系列研究专著,提出了一整套比较系统的层间氧化带型砂岩铀矿找矿预测及普查勘探准则和方法。苏联在大力进行铀资源勘查的同时,也带动了勘查技术的发展,同时由于采用了新的先进方法技术,也促进了铀资源储量有了较大突破。近 10 多年来,俄罗斯在古河道砂岩型铀矿的勘查中取得了一系列成果,在俄境内的外乌拉尔、西西伯利亚、外贝加尔等地区及蒙古发现了一系列古河道型铀矿床,建立了古河道型砂岩型铀矿床的成因地质模式、预测准则及相应的勘查技术方法。苏联在中亚地区创立了小比例尺系列编图方法,开展区域成矿预测和方法研究,取得了较好的效果。俄罗斯专家在中亚地区、俄罗斯和蒙古的砂岩型铀矿勘查过程中,在大中比例尺的找矿方法技术方面形成了一整套成熟的地质、地球物理、地球化学和水文地质综合勘查方法技术,其中具有代表性的有:① 运用物化探技术和水文、放射性水文地质方法圈定层间氧化带前锋线的先进方法技术;② 运用综合物化探方法技术,配合钻探圈定古河道的先进方法技术。

我国砂岩型铀矿勘查始于 1955 年,以地表找矿为主,通过放射性测量发现了产于中生代陆相沉积盆地中的若干砂岩型铀矿床,如衡阳盆地汪家冲矿床、滇西龙川江盆地城子山矿床、塔里木盆地巴什布拉克矿床、伊犁盆地的达拉地矿床等。当时的地质研究以物质成分和矿床成因解剖为主;由于工作上的局限和采冶工艺的滞后,在砂岩型铀矿找矿勘查中未取得重大突破,已发现的矿床规模小,采冶成本高,经济效益差。我国对可地浸砂岩型铀矿的大规模研究开始于 20 世纪 90 年代初。20 多年来,从直接引进成矿理论、找矿方法、技术人才等,到广泛借鉴、吸收消化、积极探索,逐步形成了符合中国地质特色的可地浸砂岩型铀矿成矿地质理论和预测勘查体系,在地质找矿、理论研究、勘查方法技术等诸多领域取得了重要成果。我国铀矿地质工作者对我国北方中生代盆地砂岩型铀矿形成的地质构造、古气候、岩相古地理、铀源、水动力及水化学、层间氧化带发育状况及特征等地质条件进行了较深入的研究,对典型矿床进行了成因解剖,建立了我国西部造山带内山间盆地(如伊犁、吐哈盆地)和大型地台型沉积盆地(如鄂尔多斯盆地)砂岩型铀矿成矿模式、预测准则及找矿标志。随着成矿预测和科学找矿的兴起,为了把成矿模式转换为勘查模式,我国科研人员根据砂岩型铀矿不同勘查阶段所要解决的地质问题,深入广泛地开展了大量科研工作,应用重磁、电、震、放射性、综合测井和深穿透地球化学等勘查方法探测深部铀成矿地质环境和捕捉铀矿化信息。近 10 多年来,通过加大投入,应用先进成矿理论和有效的找矿方法技术,在我国北方中生代沉积盆地铀资源勘查中取得了重大突破,先后探明了多处砂岩型铀矿床。

砂岩型铀矿预测评价过程中需解决的主要问题有:① 圈定沉积盆地基底隆起区,识别断裂构造、沉积盆地地球化学环境,研究盆地蚀源区铀源情况;② 圈定有利成矿砂体的空间展布、形态及规模;③ 定位古河道及层间氧化带前锋线;④ 划分沉积盆地岩性、岩相;⑤ 探测沉积盆地地层精细结构;⑥ 圈定铀矿体引起的各类异常;⑦ 利用多源信息开展铀资源综合预测。近年来,砂岩型铀资源预测评价进入到一个多源信息更加综合、技术快速更新的新时期,主要表现在有机地将当代成矿理论与现代高新综合勘查技术结合起来,将传统的定量数值计算方法与计算机 GIS 信息可视化技术结合起来。如何把多源地学成矿信息(区域地质、遥感、重磁、放射性、地球化学等)的综合和 GIS 相融合,将成矿环境、控矿因素、成矿过程、异常系列以及成矿后变化-保存等方面预测判据有机结合起来,建立重要类型铀矿床的

综合预测评价标志体系,形成基于 GIS 的铀资源评价决策系统,是铀成矿预测研究的“热点”内容。

1.2 砂岩型铀矿航磁、航放弱信息提取内涵

航空物探(航磁、航放)之所以一直受到普遍重视,在于它能够在很短时间内获得大面积的精度均一的测量资料;与地面物探相比,它是一种高速度、高效率,并在很多情况下很有效且成本低的地质调查和普查找矿方法;在综合找矿领域发挥了巨大作用,是成矿预测中的重要资料。自 20 世纪 80 年代以来,航空磁测技术取得了重大进展,测量仪器的灵敏度从 20 世纪 70 年代的 1~10 nT 进展到 0.01~0.1 nT,磁测总精度从约 10 nT 至小于 2 nT;GPS 导航定位技术的引进,使得大比例尺航测成为可能。因此航空磁测除继续寻找铁矿外,在其他固体矿产找矿方面以及基础地质应用方面都取得了新进展。在寻找非磁铁矿床中,隐伏矿床对应的磁异常不像铁矿那样突出,都是一些低缓的弱小异常,这类异常往往叠加在强的正或负磁场背景上,在 ΔT 基础图件中被淹没而难以识别,如何在强干扰背景下有效地突出弱小低缓磁异常,显得非常重要。航空放射性测量技术也取得了极大进展,采用多至 512 道的全能谱记录,测量仪器的灵敏度大大提高,应用航放资料直接定位隐伏铀矿床时,也不可避免地会面临上述类似情况。

过去在寻找硬岩型铀矿时,航磁、航放测量在铀矿普查工作中占据了重要地位,是进行战略选区、远景预测和直接找矿的一种重要手段和有效方法,我国 90% 以上的硬岩型铀矿床都是首先通过航测发现的。这些矿床的矿体埋藏浅,甚至直接出露地表,铀品位高,航磁、航放异常显示明显且强度较大,因而在航测中易于被识别和提取。但砂岩型铀矿体与围岩间的物性差异很小,在航测物理异常场中反映的成矿信息微弱,若不采用较为特殊的方法技术手段,这些弱信息可能因难以识别而被遗漏掉。

弱信息是一个相对概念,也是一个模糊概念。在铀资源勘查领域,与深部铀矿床产出相关的弱异常信息强弱取决于铀矿床的规模、埋藏深度和品位高低以及矿体与围岩间的物性(含放射性)差异。本书所指的航磁、航放弱信息是指在原始测量图件上反映不明显、与铀矿化相关的航磁和航空伽马能谱弱异常信息。弱信息提取技术是地球物理数据解释中的难题之一,一直受到国内外众多地球物理学家的关注。弱信息提取是从测量数据中提取隐含的、先前不知道的和潜在有用的信息过程。航磁、航放测量可以获得丰富的地质信息,其中有些信息显而易见,而有些信息需经过特殊处理才能显示出来。弱信息提取只是一种数学加工处理,它能使资料中某些信息更加突出和明显,但不能获得测量数据中不包含的信息;数学处理只能改变异常的信噪比,而不能创造新信息,因此弱信息提取的前提是弱信息必须被测量仪器捕捉到。

目前从国内外的发展趋势看,要有效获取有用信息有两个途径:一是提高探测器精度,改进测量采集技术,降低航空物探测量的噪声水平;二是借助于数据处理模型,并通过编制软件的方式,对原始测量数据进行深入挖掘,压制地质背景所引起的干扰噪声。自 20 世纪 70 年代以来,随着地质找矿基础理论研究和地球物理测量技术自身的发展,带动了地球物理数据处理解释技术的进展,压制干扰、增大信噪比提取有用信息的数据处理技术得到广泛

应用,例如相关分析、小波分析、相关滤波、多重分形等。就数据处理方法而言,由于成本低,易于实现,在合适的地质条件下能够达到预期目标,因此被广泛地采用。本书的弱信息提取主要从两方面展开:一是从航磁、航放等地球物理测量数据中提取反映铀成矿地质环境的微弱异常信息;二是从这些测量数据中直接提取定位铀矿床空间位置的弱异常信息。

1.3 砂岩型铀矿航磁弱信息提取依据

由于铀矿体本身是无磁性的,所以在铀矿勘查中,以往的航空磁法常被用来研究和解决与铀成矿相关的地质环境问题,而没有被用来直接找矿。随着应用航磁方法进行铀矿普查的深入研究,发现某些铀矿(包括砂岩型和热液型)在形成与富集过程中,其周围铁磁性矿物遭受破坏或交代,而使铀矿化段呈现弱磁性,导致铀矿化段与航磁异常在空间位置上具有一定的相关关系,这就造就了应用磁法直接找矿的有利前提。在这种情况下,进行高精度磁场强度测量,在磁场强度降低地段有可能发现铀矿体。如美国得克萨斯地区非生物成因的卷型铀矿床,由于含矿砂岩遭到矿前的硫化物化,大量碎屑铁钛氧化物(包括磁铁矿)转换为铁的硫化物,致使磁化强度降低。在美国科罗拉多州卷型铀矿床上,磁化强度明显降低(卢贤栋,1981);吐哈盆地南部的铀矿床、铀矿点大多位于航磁异常和区域背景场之间的渐变部位(韩长青,2002)等。哈萨克斯坦应用磁法追踪氧化还原过渡带时,发现了15 nT低磁异常,通过钻孔资料及已知资料分析,层间氧化还原过渡带就定位于磁异常变异部位,此推断已被证实(但这一理想结果是弱磁性古生代基底磁性比较均匀条件下得到的)。

磁异常的存在依赖于磁性矿物的空间分布,首先要研究的是控制磁性矿物分布的因素。在层间氧化带砂岩型铀矿的形成过程中,在岩石的碎屑中,伴随着一定数量的磁性矿物的富集,在不同地球化学分带内,各种磁性矿物的含量是有差异的,在地表可引起微弱磁异常。在铀矿的形成与富集过程中,可使其周围的铁磁性矿物遭受破坏或改变,这一规律在卷型砂岩铀矿中表现最为典型;在氧化-还原界面附近,由于矿化地段地球化学环境变化,Eh值剧变,在氧化前锋线形成氧化还原障,地下水中携带的铀发生沉淀,同时一些强磁性矿物受地球化学障的作用,蚀变为弱磁性矿物,如赤铁矿、褐铁矿等,于是在铀矿卷的前后方向的过渡界面附近产生一种磁场强度的弱化现象(谈成龙,1998)。在美国北科罗拉多已知铀矿床上,采用0.25 nT灵敏度的磁力仪,总精度达0.5 nT,在矿卷处见到了15~20 nT的低磁异常(谈成龙,1998)。美国3个主要产铀区(南得克萨斯海岸平原、怀俄明州沉积盆地和新墨西哥州的圣胡安盆地)的资料提供了有利的证据:在由氧化的地下水形成或再分布的沉积矿床中,铀矿化和磁化率之间一般呈负相关关系;低磁化率的蚀变晕通常延伸到铀矿化范围之外,形成一个比铀矿化范围更大的勘探目标。

综上所述,在层间氧化带砂岩型铀矿成矿地质条件有利的地区,通过弱信息提取方法获取找矿目的层中磁化强度减弱或降低的地段,可为预测铀成矿远景区提供依据。

1.4 砂岩型铀矿航放弱信息提取依据

1.4.1 钾、铀和钍地球化学特性

土壤中钾的主要部分(90%~98%)是被束缚在矿物部分中,主要在长石和云母中。钾的残余是通过矿物颗粒风化开始释放过程的;当被释放时,钾不是以植物和土壤生物的新陈代谢方式被利用,就是以地下水中溶解的方式被带走。在自然界中 Th 仅有一种氧化价态,即 Th^{4+} ;铀则以 U^{4+} 和 U^{6+} 两种价态形式存在。在还原环境中,铀钍均以 +4 价状态存在,且离子半径相似,因此它们常以类质同象形式在矿物中共生。然而铀在氧化环境中呈 +6 价,以 $(\text{UO}_2)^{2+}$ 的形式存在,该离子的化合物易溶于水,而 Th^{4+} 化合物难溶于水,在氧化条件下,两者因化学性质差别在地球化学过程中可相互分离。在表生环境下铀和钍的行为是明显不同的。由于钍仅有一个单价态(+4 价),于是从还原环境变化到氧化环境不会发生钍的化学反应。 ^{228}Ra (钍子体)可在天然水中运动,从源地迁移;但是, ^{228}Ra 的半衰期为 5.76 a,在地质年代中是非常短暂的,只有急速的地质过程才能导致重新分配。另外,在地表氧化环境下,铀从 +4 价态变到 +6 价态。它氧化物如 $(\text{UO}_2)^{2+}$ 在各种地表环境中形成一定数量的可溶的化合物;在氧化环境中, U^{4+} 可转变为易溶的 U^{6+} ,因而含铀水能在砂岩中迁移运动;当遇到还原环境时, U^{6+} 可还原为 U^{4+} 发生沉积。但是,在近地表环境钒酸盐、磷酸盐和有机络合物使铀的可溶性明显降低。在铀衰变系列中的 ^{226}Ra 同位素有 1 602 a 的半衰期,比半衰期为 5.76 a 的钍子体 ^{228}Ra 有更多的移动时间。

表 1-1 列出了铀、钍衰变系列某些重要的半衰期较长的元素在氧化和还原环境中的地球化学特性。铀系列同位素 ^{234}U 和 ^{238}U 在氧化环境中都是活动的,而在还原环境中都是不活动的。值得注意的是, ^{226}Ra 与 ^{238}U 、 ^{234}U 不同, ^{226}Ra 在氧化、还原环境中都是活动的。 ^{226}Ra 的半衰期为 1 602 a,它在地下水位以下能以扩散方式迁移,也能在地下水位以上沿着破碎带的裂隙水膜而迁移; ^{226}Ra 在地下水位以下还能随水的运动搬运很远的距离。 ^{222}Rn 是 ^{226}Ra 的衰变产物, ^{222}Rn 是惰性气体,可自由地凭搬运或扩散作用而迁移。 ^{222}Rn 气流穿过泥质土壤的平均迁移时间大于穿过砂质土壤的时间,这是由于在细颗粒的物质中孔隙度较粗颗粒物中的孔隙度小。钍系列同位素 ^{232}Th 和 ^{228}Th 在氧化、还原环境中都是不活动的,而 ^{228}Ra 在氧化、还原环境中却是活动的。

表 1-1 铀、钍衰变系列某些重要的半衰期较长的同位素一般地球化学特性

铀衰变系列 元素	环境		钍衰变系列 元素	环境	
	氧化	还原		氧化	还原
^{238}U	M	I	^{232}Th	I	I
^{234}Th	I	I	^{228}Ra	M	M
^{234}U	M	I	^{228}Th	I	I

续表

铀衰变系列 元素	环境		钍衰变系列 元素	环境	
	氧化	还原		氧化	还原
^{230}Th	I	I			
^{226}Ra	M	M			
^{222}Rn	M	M			

注:M—活动性,I—无活动性。

1.4.2 地表放射性弱信息形成机理

利用伽马能谱测量寻找铀矿床,无论在国内外均有过不少的成功事例。就放射性测量理论而言,测量数据仅反映距地表数十厘米厚的地表岩石放射性,使用该方法直接寻找距地表很近的铀矿床会取得满意的效果,在这一点是没有争议的。但对寻找可地浸砂岩铀矿是否会一样适用,说法不一。由于弱信息淹没在区域背景干扰场内,找矿思路不能像过去那样——找矿一定要到放射性高场中去找。对于今后的可地浸砂岩铀矿勘查工作,除了更深入地注意已有矿床周围扩大外,一个很重要的任务就是向成矿地质条件有利的低场地段转移,通过弱信息提取手段,压制干扰,突出微弱异常;大量的事实证明,放射性低场中也有矿,而且在一定条件下,可发现大型砂岩型铀矿床。用伽马能谱测量方法直接寻找砂岩铀矿的理论依据如下所述。

1. 氡的迁移带来了深部铀矿化信息

在铀和钍衰变系列中有3个氡同位素(见表1-2),这些全都是惰性气体,因而不会和其他元素发生化学结合。这些气体通过两种主要模式在地球或大气中移动,扩散和借助外力迁移。多数地球物质的扩散系数是非常低的,限制了扩散方式的移动, ^{222}Rn 也只能扩散几十米。钍射气和锕射气扩散距离极小,因为它的半衰期非常短。第二种公认的移动模式是借助外力的迁移方式。

表 1-2 氡的同位素表

氡的同位素	名称	长寿命母体	半衰期
^{222}Rn	氡	^{238}U	3.82 d
^{220}Rn	钍射气	^{232}Th	54.5 s
^{219}Rn	锕射气	^{235}U	3.92 s

20世纪90年代,由于人们对氡的迁移机制的新认识,再加上对氡测量技术的改进和解释方法的完善,使氡法测量能探测到来自深部铀矿床(数百米)的氡气异常。按常规的氡气扩散理论,只能迁移出数米的距离,其找矿范围非常有限。但考虑到一些其他影响因素,如作为氡气迁移通道的断裂构造的存在、地下水的活动、地热作用、气温的变化、地动力的影响……,对氡的迁移就有了新的认识,深部铀矿床衰变产生的氡气就有可能运移到地表而被探测器探测到,从而使深部铀信息在地表得到反映。