

# 铀矿地质与勘查 简明教程

YOUKUANG DIZHI YU KANCHANG  
JIANMING JIAOCHENG

○ 李巨初 陈友良 张成江 编著

地 质 出 版 社

# 铀矿地质与勘查简明教程

李巨初 陈友良 张成江 编著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

《铀矿地质与勘查简明教程》概括了铀矿地质学的基本理论和基本方法。

全书主要包括四大部分。第一部分介绍铀地球化学的基本概念和知识。第二部分介绍工业铀矿物和常见铀矿物的特性和鉴定方法以及矿物成因。第三部分包括铀矿床分类、各主要类型铀矿床的成矿地质条件和地质特征以及研究进展。第四部分简要介绍了铀矿找矿勘查和评价工作的主要内容和基本工作方法。

本书可作为核技术应用专业和铀矿地质专业方向的本科专业教材,亦可以作为铀矿地质方向研究生和有关地质工作者的参考用书。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

铀矿地质与勘查简明教程 / 李巨初等编著. —北京:  
地质出版社, 2011. 1  
ISBN 978-7-116-07095-0

I. ①铀… II. ①李… III. ①铀矿—地质勘探—教材  
IV. P619. 140. 8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 264034 号

---

责任编辑: 罗军燕

责任校对: 张 坤

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82324514 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: [zbs@gph.com.cn](mailto:zbs@gph.com.cn)

传 真: (010) 82324340

印 刷: 北京地质印刷厂

开 本: 787 mm × 1092 mm  $\frac{1}{16}$

印 张: 12.25 图版: 4 面

字 数: 300 千字

印 数: 1—1000 册

版 次: 2011 年 1 月第 1 版

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 20.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-07095-0

---

(如对本书有建议或意见, 请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

# 前 言

20 世纪 80 年代前后是全世界铀矿地质勘查与开发的高峰时期。世界上已知的许多重要的、大型—超大型的铀矿都是在那个时代或以前发现的。那个年代出版了很多有关铀矿地质与勘查方面的教材和专著。成都理工大学张万林老师编写，由原子能出版社 1987 年出版的《铀矿地质简明教程》是其中之一。

从 20 世纪 90 年代至今 20 多年的时间里，铀矿地质与勘查工作发生了重大的变化。苏联大型砂岩型铀矿床的发现，地浸开采技术的成功应用，以及砂岩型铀矿床表生、后生、渗入成矿理论的提出等，是重要的、显著的成就，并且一直在影响着我国的铀矿找矿和战略决策。多年来，一些重要的老矿山的深部找矿和同类型新区找矿工作取得新的突破；矿床进一步勘探和开发的成果，对矿床特征、成因和成矿规律等提出了很多新的、更深入的认识；铀矿找矿勘探的方法有了新的发展；我国找矿勘查规范和相应的铀矿地质勘查规范等也有了根本的变化。原有教材已难以满足现代教学和研究参考的需要。本教材《铀矿地质与勘查简明教程》就是为了适应新的形势而在《铀矿地质简明教程》的基础上修编而成的。

本教材在铀矿物的命名规范和铀矿物成因等方面作了大的修改、补充和订正；提出了铀矿床分类的建议；对典型铀矿床和世界铀矿主要产地的地质特征介绍等方面作了大幅度的调整和修改，特别是系统增加了对地浸砂岩型铀矿床和超大型铀矿床的资料，以及对上述矿床研究进展的介绍和阐述；精选和补充了典型矿床实例和相关图件，特别是我国的铀矿床公开发表的资料。在勘查部分，按照国家新的固体矿产资源/储量规范和新的核工业行业标准等重新编写了相关内容。力图在介绍基本理论和基本知识的同时，引进铀矿找矿、勘查和地质研究最新的成果和资料，既提供大量、丰富的信息，又简要地反映当代铀矿地质研究和开发的全貌。

“铀矿地质与勘查”历年来是我校放射性地球物理勘查、核技术应用与核工程专业的必修课。授课总学时 40 学时。这门课程要求突出重点，简明介绍有关铀矿地质学（包括铀地球化学、铀矿物学、铀矿床学）和铀矿地质勘查的基本知识、基本理论和基本方法。在 40 学时的课程教学时间内，学生通过本课程的学习，要求对铀的地球化学、铀矿物学和铀矿床学知识有基本的了解，掌握主要的铀矿物特征和主要的工业矿床类型的地质特征与分布；掌握铀矿地质勘查的阶段，以及各阶段的任务、一般工作程序和方法；了解铀资源勘查的地质、地球物理和地球化学勘查技术以及铀资源评价的方法；思考和懂得

应用核技术、放射性地球物理勘查技术与地质勘查技术及其他勘查技术等的配合和结合,为适应铀矿资源勘查工作和相关研究打下基础。

本教材由李巨初主编统稿,李巨初编写前言、第一章、第二章、第五章;李巨初、陈友良联合编写第三章、第四章;张成江修编第三章。在编写过程中得到成都理工大学教务处和核技术与自动化工程学院等的大力支持,研究生孟伟、王红军、薛钧月、李莎莎参加了部分工作,对此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,诚恳欢迎读者批评指正。

编 者

2010年5月,成都

# 目 录

## 前 言

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一章 绪 论 .....               | 1  |
| 第一节 铀资源、生产和需求 .....         | 1  |
| 一、铀的发现和应​​用 .....           | 1  |
| 二、铀矿资源勘查、生产和需求 .....        | 3  |
| 第二节 铀资源勘查的一般概念 .....        | 6  |
| 一、铀矿资源地质勘查概念 .....          | 6  |
| 二、铀矿找矿勘查的某些思路 and 进展 .....  | 7  |
| 三、我国现行铀资源勘查的一些基本规定和指标 ..... | 7  |
| 第三节 我国铀资源勘查状况 .....         | 9  |
| 一、我国铀资源勘查简史 .....           | 9  |
| 二、我国已探明铀资源储量的基本特点 .....     | 10 |
| 三、我国国土铀矿地质勘查程度 .....        | 11 |
| 四、我国铀资源潜力和发展战略 .....        | 12 |
| 第二章 铀地球化学概论 .....           | 14 |
| 第一节 铀的性质 .....              | 14 |
| 一、铀的物理性质 .....              | 14 |
| 二、铀的化学性质 .....              | 15 |
| 第二节 铀在自然界的分布和赋存形式 .....     | 16 |
| 一、铀在地球各圈层中的分布 .....         | 16 |
| 二、铀在自然界的存在形式 .....          | 18 |
| 第三节 各种地质作用中的铀地球化学 .....     | 19 |
| 一、岩浆作用中的铀地球化学 .....         | 19 |
| 二、伟晶作用中的铀地球化学 .....         | 20 |
| 三、热液作用中的铀地球化学 .....         | 21 |
| 四、表生作用中的铀地球化学 .....         | 25 |
| 第三章 铀矿物学概论 .....            | 31 |
| 第一节 铀矿物的基本特性 .....          | 31 |
| 一、铀矿物的化学成分 .....            | 31 |
| 二、铀矿物的形态特征 .....            | 31 |
| 三、铀矿物的物理性质 .....            | 32 |
| 四、铀矿物的成因 .....              | 33 |
| 五、铀矿物的分类 .....              | 34 |

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第二节 四价铀矿物 .....              | 35 |
| 一、四价铀的简单氧化物 .....            | 35 |
| 二、四价铀的复杂氧化物 .....            | 38 |
| 三、四价铀的硅酸盐 .....              | 41 |
| 四、四价铀的磷酸盐 .....              | 41 |
| 第三节 六价铀矿物 .....              | 42 |
| 一、铀酰氢氧化物和重铀酸盐 .....          | 42 |
| 二、铀酰硅酸盐 .....                | 44 |
| 三、铀酰磷酸盐和铀酰砷酸盐 .....          | 45 |
| 四、铀酰钒酸盐 .....                | 49 |
| 五、铀酰硫酸盐、铀酰碳酸盐及铀酰复盐类 .....    | 50 |
| 第四节 含铀矿物 .....               | 51 |
| 一、铀呈类质同像混入物的含铀矿物 .....       | 52 |
| 二、铀呈吸附质状态的含铀矿物 .....         | 55 |
| 三、铀呈铀矿物超显微包裹体的含铀矿物 .....     | 55 |
| 第五节 铀矿物鉴定方法 .....            | 56 |
| 一、铀矿物的鉴定程序 .....             | 56 |
| 二、放射性照相 .....                | 56 |
| 三、荧光分析 .....                 | 57 |
| 四、微化分析 .....                 | 58 |
| 五、裂变径迹分析 .....               | 59 |
| 第四章 铀矿床学概论 .....             | 62 |
| 第一节 概 述 .....                | 62 |
| 一、铀矿床学任务 .....               | 62 |
| 二、铀矿床的特点 .....               | 62 |
| 第二节 铀矿床分类 .....              | 63 |
| 一、国际原子能机构使用的铀矿床分类 .....      | 65 |
| 二、中国主要工业铀矿床分类和本教材建议的分类 ..... | 67 |
| 第三节 花岗岩型铀矿床 .....            | 68 |
| 一、花岗岩型铀矿床及类型 .....           | 68 |
| 二、产于花岗岩体内部的铀矿床 .....         | 69 |
| 三、产于花岗岩体外接触带的铀矿床 .....       | 82 |
| 四、产于岩体上叠断陷红盆中的铀矿床 .....      | 85 |
| 五、成矿条件和找矿判据 .....            | 86 |
| 第四节 火山岩型铀矿床 .....            | 89 |
| 一、火山岩型铀矿床及类型 .....           | 89 |
| 二、产铀陆相中酸性火山岩的地质特征 .....      | 90 |
| 三、火山爆发相中的铀矿床 .....           | 93 |
| 四、溢流-侵出相中的铀矿床 .....          | 94 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 五、火山口相中的铀矿床 .....           | 95  |
| 六、次火山岩相中的铀矿床 .....          | 96  |
| 七、火山岩型铀矿床的基本地质特征和成因模式 ..... | 97  |
| 第五节 砂岩型铀矿床 .....            | 98  |
| 一、砂岩型铀矿床及类型 .....           | 98  |
| 二、层间氧化带砂岩型（卷状）铀矿床 .....     | 104 |
| 三、潜水氧化带及复成因砂岩型（板状）铀矿床 ..... | 105 |
| 四、古河谷型铀矿床 .....             | 107 |
| 五、热水改造砂岩型铀矿床 .....          | 109 |
| 六、砂岩型铀矿床主要产地 .....          | 110 |
| 七、砂岩型铀矿找矿判据 .....           | 123 |
| 第六节 碳硅泥岩型铀矿床 .....          | 123 |
| 一、碳硅泥岩型铀矿床及类型 .....         | 123 |
| 二、含矿建造及铀成矿条件 .....          | 127 |
| 三、碳硅泥岩热液叠加改造型铀矿床 .....      | 130 |
| 第七节 前寒武纪特殊、超大型铀矿床 .....     | 134 |
| 一、不整合面型铀矿床 .....            | 135 |
| 二、石英卵石砾岩型铀—金矿床 .....        | 140 |
| 三、赤铁矿角砾岩型铜—金—铀矿床 .....      | 142 |
| 第八节 变质—混合交代岩型铀矿床 .....      | 143 |
| 一、铁—铀型铀矿床 .....             | 144 |
| 二、混合交代岩型铀矿床 .....           | 145 |
| 三、钠质交代岩型铀矿床 .....           | 146 |
| 第九节 表生型铀矿床 .....            | 149 |
| 一、钙结砾岩型铀矿床 .....            | 149 |
| 二、泥炭粘土型铀矿床 .....            | 150 |
| 第十节 其他富铀岩石型铀矿床 .....        | 150 |
| 一、富铀岩浆岩型铀矿床 .....           | 150 |
| 二、富铀伟晶岩型铀矿床 .....           | 152 |
| 三、富铀矽卡岩型铀矿床 .....           | 153 |
| 第十一节 世界铀矿床的时空分布 .....       | 154 |
| 一、全球的铀成矿时代与地球演化 .....       | 154 |
| 二、铀矿床空间分布——铀成矿省的概念和特征 ..... | 160 |
| 三、世界巨型铀成矿带 .....            | 162 |
| 第五章 铀矿地质勘查方法 .....          | 168 |
| 第一节 找矿标志和找矿方法 .....         | 168 |
| 一、找矿标志 .....                | 168 |
| 二、找矿方法 .....                | 169 |
| 三、找矿方法的综合运用 .....           | 171 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第二节 铀矿资源评价 .....       | 173 |
| 一、铀矿资源评价及方法 .....      | 173 |
| 二、地浸砂岩型铀资源区域评价任务 ..... | 174 |
| 三、可行性评价工作 .....        | 175 |
| 第三节 铀矿地质勘查阶段 .....     | 176 |
| 第四节 铀矿资源/储量分类 .....    | 177 |
| 一、国际上铀矿资源/储量分类 .....   | 177 |
| 二、我国铀矿资源/储量分类 .....    | 177 |
| 第五节 铀矿地质勘查程度 .....     | 179 |
| 一、铀矿地质研究程度 .....       | 179 |
| 二、铀矿勘查控制程度 .....       | 180 |
| 三、铀矿勘查工作及质量要求 .....    | 184 |
| 第六节 编录、取样和储量计算 .....   | 185 |
| 一、编 录 .....            | 185 |
| 二、取 样 .....            | 186 |
| 三、铀矿产资源/储量计算 .....     | 186 |
| 主要参考文献和资料 .....        | 188 |
| 图 版                    |     |

# 第一章 绪 论

## 第一节 铀资源、生产和需求

### 一、铀的发现和应用

德国柏林的化学教授和药学家 Martin Heinrich Klaproth (1743 ~ 1817) 1789 年在分析取自 George Wagsfort 矿山的沥青铀矿 (pechblende) 时发现了铀元素, 最初命名为 uranit。1790 年改为现在的 uranium, 这个名字来源于 1781 年发现的行星天王星 (Uranus)。

铀矿物的应用可追溯到 1797 年。最早被人们喜爱是因其色彩鲜明, 晶体漂亮, 而当奇异怪石被收藏。随后, Klaproth 发现了铀在商业应用方面的重要性质, 如在玻璃熔体中的着色效应, 于是少量的铀矿石被用于玻璃、陶瓷着色及合金钢工业中。1896 年, 贝可勒尔发现铀的放射性特征, 并证实了它可以转化成其他元素。1898 年, 居里夫妇从捷克斯洛伐克雅希莫夫矿床铀矿石中提取了镭, 从而发现了放射性比铀强度更高的镭和钋两种新元素。于是铀矿石通常被作为提取强放射源——镭的原料, 通常是每生产 3 吨铀提取 1 克镭。

随着世界科技的革命和进步, 铀在国民经济中的地位不断上升。19 世纪末 20 世纪初, 人们发现放射性同位素并进一步了解原子核结构。在 1925 ~ 1928 年间, 人们不断更新对电子、原子等微观世界的认识。爱因斯坦根据相对论原理推出物体能量与质量的关系式:  $E = mc^2$ , 向人类揭示了微量的物质可释放出巨大的能量。被称为爱因斯坦幽灵的维尔纳·海森堡建立了量子力学理论基础, 他们研究的贡献, 为以量子力学理论基础来研究原子核铺平了道路。1938 年 12 月, 德国科学家奥托·哈恩证实并阐明了铀在中子轰击下产生裂变现象。意大利裔的美国物理学家恩里科·费米 1942 年 12 月 2 日建成人类第一个由人工控制的反应堆。这个反应堆的调试成功, 意味着人类已经签发了原子世纪的出生证, 世界已悄悄进入原子时代。原子时代使铀矿在各个国家中的国民经济地位大为提升, 在世界力量角逐的舞台上变得格外重要。

原子能给人类带来了科技进步的幸福和希望, 也给人类带来了负面作用和灾难。1945 年 8 月美国在日本的广岛、长崎投放了两颗原子弹。这两颗原子弹展示了原子能的威力, 也拉开了世界核武器竞赛的序幕。从此世界再也不安宁了, 铀矿也就一跃成为了战略物资。1946 年苏联建成第一座反应堆, 1949 年 9 月, 苏联第一颗原子弹爆炸成功, 虽比美国晚了 4 年多, 但使美国失去了对原子弹的垄断地位。1952 年 6 月 14 日, 美国第一艘核潜艇“鹦鹉螺号”下水。11 月 1 日在爱纽维特克进行首次氢弹试验并获成功, 这个氢弹的爆炸威力相当于 1 200 万吨的 TNT 炸药, 其威力相当于广岛原子弹的 600 倍。继后, 苏联为了与美国进行核竞争, 1953 年 8 月在西伯利亚进行了最初一次氢弹试验, 并获得成功。就技术上而言, 苏联氢弹是“干式燃料”, 比美国的“湿式燃料”略胜一筹。从此,

两个超级大国便开始了耗费千百亿美元的核竞争。

在军用的同时,和平利用原子能的研究也在不同层面上展开。铀能作为能源被广泛推广使用。1954年6月2日,苏联原子能发电站开始运转,1956年10月17日,英国柯达·霍尔第一号原子能发电站开始运转。美国于1975年建成第一个原子能发电站。近半个世纪的建设,核能作为一种清洁、高效、安全的能源形式,已成为世界各国能源结构中不可缺少的组成部分,核发电量占全世界总电量的16%。而有些国家如法国、比利时、保加利亚、斯洛伐克和瑞典,其核电发电量占总电量的比例已逼近或超过50%,成为国家能源供给的命脉。

1964年10月25日我国第一颗原子弹爆炸成功。三年后,1967年氢弹又爆炸成功。中国核武器试制成功,打破了世界上超级大国的核垄断,给世界和平的天平上添加了一颗希望的砝码。我国的秦山核电站于1991年并网发电,大亚湾核电站1993年又并网发电成功,标志着我国和平利用原子能事业的春天来临。

随着和平利用原子能研究层面的展开,原子反应堆所提供的大量放射性同位素将在社会各个领域得到广泛应用。诸如利用放射性同位素来诊断治疗疑难病症,用来研究生物机体内的反应,用于食品保存、保鲜,用于农业的种子改良,用于物质成分的分析(中子活化法测量微量元素),用于材料的鉴别等。铀矿链的产品从军用广泛走向了民用,从而在国民经济中的地位越来越显得重要。

随着对天然放射性元素铀的子体研究的深入,人们越来越感到铀的子体——氡气,与人类环境和国民经济建设息息相关。氡气具有给人类造福的特性,如氡水,有些氡水就可做矿泉水;氡具有放射性,又是气体,具有扩散、渗透(无孔不入,无缝不钻)、对流的特性,从而有助于寻找隐伏在深部的地下水,预测地质灾害(滑坡、地下煤燃烧、地震)和找矿(寻找铀矿、石油、天然气)等。但由于氡是铀的放射性衰变链的中间产物,氡的子体又是带正电荷的粒子,因此,由于放射性污染导致的大气环境和人类居住房屋环境的氡气浓度超标及其对人体的危害将会引起人们的关注。可以预料,微氡测量和氡环境的研究将会在21世纪以人类未来生活质量的命题介入人类生活。

随着核能利用的发展和人类对生存环境的重视,放射性废物处置或处理已成为世界各国共同关注的问题。放射性废物又称核废物。按照国际原子能委员会的定义:放射性废物是指放射性浓度或活度大于国家主管部门所规定的“豁免量”(exempted quantity),并预计将来不再被利用的含放射性核素或被放射性核素污染的任何物质。由此可见,放射性废物可产生于任何应用放射性核素的废物,如废矿石、表外矿石、尾矿砂,以及一切被污染了的工程、房屋、水和各类物品。由于放射性废物的放射性活度和对人类、对地球中生命体的潜在危险要维持几十万年之久,所以,对铀矿在国民经济中的地位不仅要看到它在国民经济建设中有利于人类的一面,还要看到它还有威胁环境生态恶化,对地球生命体(不仅仅是人类,而且包含了整个食物链)造成危险的一面。

20世纪80年代末90年代初,随着美苏两个超级大国冷战的结束,铀矿作为核武器的原料暂时失去了军用的战略地位,但铀矿石作为核电站的主要原料,每年的需求量仍在增长。

世纪之交,世界核电发展对铀的需求和供给之间的不平衡,导致了天然铀价格持续攀升。自2003年开始的铀市场价的快速上扬是影响世界铀地质勘查和铀生产的一个大

事件,低迷了20年左右的铀市场价格终于开始上涨,且势头强劲。自1983年以后,世界核电站对天然铀的需求就开始大大超过铀生产,近几年的铀生产仅能满足需求的50%~58%,这种强劲的趋势还远未结束。天然铀作为能源安全和敏感的军民两用物质,很多国家都予以高度重视。今后几十年中,世界电力会持续增长,核电在电力生产中将继续发挥重要作用(尽管这种作用的重要性具有不确定性),以满足人口不断增加和经济增长的需要。

## 二、铀矿资源勘查、生产和需求

由经合组织/核能机构(OECD/NEA)和国际原子能机构(IAEA)联合出版《铀资源、生产和需求》红皮书,已经成为世界铀矿业界最具权威性、代表性的出版物。《铀资源、生产和需求》每两年出刊一期,自20世纪60年代中期以来,已出版了23期。该出版机构邀请铀矿业界知名专家组成工作小组,小组成员主要来自铀资源、生产及需求大国,包括哈萨克斯坦、澳大利亚、加拿大、德国、法国、日本、俄罗斯、英国、美国及中国等国家,部分成员是来自欧盟、国际原子能机构、经合组织/核能机构3个国际组织的代表,每年定期召开两次会议,重点分析各国铀政策、铀资源、勘探、生产、价格及核电需求,预测未来生产及需求状况。2005、2007、2009年版的《铀资源、生产和需求》红皮书涵盖了43个国家官方和1个国家非官方提供的资料,介绍了当时铀世界市场的基本状况,2007年版预测了至2025年世界核发电能力和反应堆的铀需求,讨论了长期的铀供应和需求问题,2009年版红皮书预测了2035年的供求状况,提出了高、中、低三种方案。

### 1. 铀矿勘查

世界范围的铀勘查活动主要在20世纪60~80年代。90年代后各国国内勘查费用一般是减少的。世界上铀矿勘查在地区上仍然分布不均衡。大部分勘查费用集中在最有可能发现经济上有吸引力的矿床地区。

进入21世纪,由于2003年以来铀价格的上涨,铀市场强劲,刺激了铀矿勘探活动,勘查费用在不断增长。2004年世界铀勘查费用总计1.33亿美元,比2002年几乎增加了40%。2008年世界铀矿勘探及矿山开发费用为16.41亿美元,比2006年增加了133%。大多数铀生产国都显著增加了其勘查费用。其中美国也许是最典型的例子,2002年勘查费用不到100万美元,2004年增到1000万美元以上。

各国使用这些勘查费用主要用于在其本国内开展勘查,也有部分费用用于在外国勘查活动。如,2004年勘查费用用于国内和国外(澳大利亚、加拿大、法国和瑞士报告了国外勘查费用)的比例大体各半。2008年,80%的铀矿勘探及开发是在本国开展,总计费用为13.42亿美元。开展海外铀矿勘探和开发的主要国家有中国、法国、日本和俄罗斯,2008年花费3.243亿美元,比2007年下降0.282亿美元。

全球铀矿勘查活动集中在已知矿床及邻近区域,集中在不整合面型和地浸砂岩型铀矿具有潜力的地区。由于铀价上涨,也刺激了一些在以往工作证实有前景的地区和一些探索项目的勘查活动。

### 2. 铀资源

广义上铀资源可以划分为常规资源和非常规资源。常规铀资源是指那些有确定生产历

史的资源, 铀作为主要产品, 或作为共产品 (铀和其他金属共同作为矿床) 或是重要的副产品 (如从采铜或采金中回收, 从磷酸盐矿床中副产品回收铀等) 的资源。非常规铀资源认为是非常低品位的资源或作为次要产品回收铀的资源。

根据产出置信度的不同水平, 各个国家对常规铀资源有不同分类分级, 一般可以分为四级: 可靠资源 (RAR)、推断资源、预测资源和推测资源 (SR)。

一般铀资源和产量用吨 (t) 表示所含的金属铀 (U) 量, 也有使用氧化铀 ( $U_3O_8$ ) 表示铀量的。国外常按回收成本级别来划分矿产开采的经济可行性, 即每磅 (或千克)  $U_3O_8$  (或 U) 资源量的成本 (美元), 其换算是:  $1 \$/lb U_3O_8 = 2.6 \$/kg U$ 。

世界铀资源量主要在 20 世纪 60~80 年代确定的, 90 年代后增加不多。进入 21 世纪, 铀资源量在回升。2004 年全部已查明资源  $854.7 \times 10^4 t U$  (回收成本低于  $80 \$/kg U$  者  $380.4 \times 10^4 t$ , 低于  $130 \$/kg U$  的有  $474.3 \times 10^4 t$ )。与 2003 年相比, 已查明铀资源增加了  $15.5 \times 10^4 t U$ 。截至 2009 年 1 月 1 日, 小于  $130 \$/kg U$  ( $< 50 \$/lb U_3O_8$ ) 全部已发现资源 (可靠资源及推断资源) 为  $540.2 \times 10^4 t U$ , 比 2007 年下降了 1.2%, 若包括重新使用的  $260 \$/kg U$  类别 ( $< 100 \$/lb U_3O_8$ ), 则为  $630.63 \times 10^4 t U$ , 比 2007 年增加了 15.5%。

铀资源量是一个动态数据, 与商品的价格有关。铀资源总量主要是由于铀价上涨和边界品位降低后, 通过对以前已查明资源进行重新评价的结果。然而, 正如过去加强勘查工作一样, 近期激增的勘查费用也会导致新的资源基地的发现。例如, 近年来新发现的铀矿床, 包括澳大利亚的 Double 8, Beverley North, Blackbush, Ranger 3 Deeps, Thunderball, N147, Crystal Creek, 加拿大阿萨巴斯卡盆地的 Centennial, Shea Creek, Wheeler River, Roughrider 等矿床。

世界铀矿可采储量主要集中分布在几个国家。据报道, 截至 2007 年 12 月世界铀矿经济可采储量 (EDR) 中, 澳大利亚占 34%, 哈萨克斯坦占 12%, 加拿大占 11%, 南非占 7%, 俄罗斯占 6%。奥林匹克坝矿床是世界最大的铀矿床, 据澳大利亚有关公司 2007 年 6 月报道的储量, 其铀的金属量占据了世界铀矿经济可采储量 (EDR) 的 26% 之多。

### 3. 铀生产

世界上铀矿生产国和生产总量在不断变化。据报道, 2004 年 19 个国家从事铀的生产, 比 2002 年减少 1 个国家 (西班牙于 2003 年停止生产), 铀生产继续呈现集中在越来越少国家的趋势。其中, 加拿大和澳大利亚两个国家的铀产量占世界总产量的 51%, 加拿大、澳大利亚、哈萨克斯坦、俄罗斯、尼日尔、纳米比亚和乌兹别克斯坦 7 个国家的铀产量就达到世界铀生产总量的 89%。在产量上, 2004 年共生产  $40\,263 t U$ , 比 2002 年的  $36\,050 t U$  增加了 12% (2003 年为  $35\,492 t U$ )。2002~2004 年, 澳大利亚、哈萨克斯坦和纳米比亚的产量显著增加 (超过 30%), 巴西、尼日尔、俄罗斯和乌兹别克斯坦的产量略有增加 (5%~15%), 捷克、南非和美国的产量有所下降。2008 年铀产量为  $43\,880 t U$ , 比 2007 年的  $41\,244 t U$  增加了 6.4%, 共有 20 个国家报告了铀生产情况。其中, 哈萨克斯坦比 2007 年增加了 61%, 澳大利亚、巴西、纳米比亚、俄罗斯稳步增加, 加拿大、尼日尔和美国产量下降。

铀矿开采方法也在不断变化中。据报道, 2004 年, 全球地下开采生产的铀占 39%, 露天开采占 28%, 地浸开采占 20%, 综合利用回收的铀占 13%。2008 年, 地下开采占

32%，由于哈萨克斯坦产量剧增，地浸开采增加到 30%，露采 27%，与铜金共同开采、伴生开采等占了 11%。

有关铀矿山环境问题，各个国家为避免造成进一步的污染都进行了不同程度的环境恢复。恢复方法可分为两类：一类是关闭矿山，采取这种方法的国家包括巴西、保加利亚、加拿大、捷克、德国、匈牙利、哈萨克斯坦、波兰、斯洛文尼亚、西班牙、乌克兰及美国等；第二类是针对正在运行的矿山，采取不同的措施，如：澳大利亚、加拿大矿山投产前需进行环境评估，哈萨克斯坦开展对矿山运营环境的监测，纳米比亚努力减少水消耗，中国则制定了严格的环境防护制度等。

#### 4. 铀需求

为保持经济可持续发展和减少温室气体的排放，越来越多的国家选择核电来代替传统的化石燃料发电。核电在不断发展，对铀生产量产生很大的需求。

截至 2004 年底，全世界共有 440 座商用反应堆在运行，其发电量为 369GW（净），需要 67 320 t U。2004 年底世界铀生产量只能满足于全球反应堆需求的 60%。截止到 2008 年年底，世界共有 438 台核电机组运行，装机容量为 373 GW，消耗 59 063 t U。2008 年，铀产量只能满足世界核电需求的 74%。近年来，由于铀价上涨，各电厂在浓缩铀时通过降低尾矿品位来减少铀矿消耗，导致从市场采购减少，库存下降。预计到 2035 年，世界核电装机容量低方案增加 511 GW，高方案增加 782 GW，相应的铀需求量分别为 87 370 t U 和 138 165 t U。核电发展呈现出区域性的不平衡。东亚地区会显著增加，中欧、东欧和东南欧有明显增加，北美可能减少。西欧实施了逐步废除核能的计划，预计会有所下降。世界基本负载电力需求、公众对核能的接受程度、建议的废物管理策略以及核电和核燃料与其他能源相比的竞争力等会影响铀需求预测的不确定性。对矿物燃料长期供应的安全性关注以及核能在降低温室气体排放中的优势，从长远来看铀的需求可能会更大些。

核电发展对铀的需求还来自于铀供应的第二渠道——由包括剩余商业库存、由核武高浓铀转化成低浓铀、贫铀尾料的再浓缩及废燃料再处理等获得的二次铀源补充。混合氧化物燃料（MOX）是核电厂使用的铀氧化物和钚氧化物混合组成的一种燃料。目前实践中使用贫化铀氧化物和钚氧化物的混合物。贫化铀是一种浓缩加工的副产品， $^{235}\text{U}$  含量低于天然铀的 0.7110%（天然铀中  $^{235}\text{U}$  所占比例）。

世界核协会（WNA）最新公布的一份市场报告《2009 ~ 2030 年的全球核燃料市场的供应与需求》。该报告对核电直至 2030 年的发展做出了 3 种情景的预测。在低增长情景中，预计核电装机容量到 2030 年未能实现增长，仍保持在 2008 年的 373 GW 这一水平。在参考情景中，核电装机容量将以每年 2.2% 的速度增长，到 2020 年达到 476 GW，到 2030 年达到 600 GW。在高增长情景中，核电装机容量到 2020 年将增加至 558 GW，到 2030 年将增加至 818 GW。相对于 2007 年版的市场报告，这份报告在参考情景与高增长情景中的预测值都有所提高，这主要体现了印度和中国近年来跻身于世界主要核国家之列。

#### 5. 中国的铀政策和铀需求

截至 2008 年年底，中国已建成核电站 4 个，共有 11 个核电机组在运行，装机容量约 885 万千瓦。根据中国核电发展规划（2005 ~ 2020），到 2020 年，核电运行装机容量争取达到 4 000 万千瓦，并有 1 800 万千瓦在建项目结转至 2020 年以后续建。核电占全

部电力装机容量的比重从现在的不到 2% 提高到 4%，核电年发电量达到 2 600 亿 ~ 2 800 亿千瓦时。并且，根据目前我国核电建设发展趋势，上述规模还会进一步扩大。核电的规模发展对铀资源的保障供应能力提出了新的要求。按上述核电规模测算，2020 年当年消耗的天然铀近万吨，需要万吨以上的地质储量来保证。从我国铀资源现状来看，国内现已探明的铀资源/储量难以支撑中长期核电大规模发展的资源需求。为满足核电发展对铀资源的需求，中国政府对铀资源勘查和生产活动给予了高度重视，本着铀资源最终安全保障要立足国内的原则，确立了加大国内勘查力度，尽快探明家底，合理开发国内资源的发展战略，同时坚决贯彻“走出去”的方针，充分利用“两种资源，两种市场”，确保供应安全。

## 第二节 铀资源勘查的一般概念

放射性元素铀的发现和被利用，开辟了人类的原子能时代。原子武器的出现刺激了铀矿勘查的发展而出现了第一个高潮。核电站的建立开辟了人类和平利用原子能的新阶段，导致铀矿勘查第二个高潮的出现。20 世纪 70 年代世界能源危机，又使第三个铀矿勘查高潮应运而生。不整合面型和砂岩型铀矿的发现，开辟了一个新的铀矿找矿领域。而砂岩型铀矿的成矿理论和找矿、采矿技术的重大突破，如层间氧化带的成矿理论和地浸采矿技术的发展，又极大地推动了砂岩型铀矿勘查事业的飞速发展。20 世纪 80 年代以来，苏联对中亚地区砂岩型铀矿床的地浸开采技术研究获得重大突破，使储量相当可观的贫矿石（0.02% ~ 0.05%）得到充分利用，地浸矿石品位甚至可以降低到 0.005%。

### 一、铀矿资源地质勘查概念

铀矿资源地质勘查包括铀资源评价和铀矿地质勘查两部分工作。

**铀资源评价** 系统收集、分析和整理工作区内已有地质工作成果和研究资料；应用矿产资源评价技术对工作区内的未发现铀资源进行预测评价。它是一项重要的基础性工作，其目的是为国家制定铀矿地质发展规划和部署勘查工作提供依据（中华人民共和国核行业标准 铀矿资源评价规范 EJ/T551—91）。

**铀矿地质勘查** 目的是为矿山建设设计或矿业权流转提供铀矿资源/储量和开采技术条件等必需的地质资料，以减少开发风险和获得最大的经济效益。铀矿地质勘查规范有地浸砂岩型铀矿勘查（中华人民共和国核行业标准 EJ/T1157—2002）和非地浸型铀矿地质勘查（中华人民共和国核行业标准 DZ/T0199—2002）规范之分，是执行固体矿产地质勘查规范总则（国家标准 GB/T13908—2002）的具体规范。

铀矿地质勘查工作包括了铀矿区域地质调查、铀矿地质填图、铀矿找矿方法，铀矿探矿工程和探矿工程编录、铀矿取样、储量计算和可行性研究，铀矿勘查地质报告编写等一系列工作。

铀矿地质勘查根据目的任务和工作程度不同可分为预查、普查、详查和勘探四个循序渐进的阶段，每个阶段有不同的任务、工作程度要求和工作（工程）规范。

## 二、铀矿找矿勘查的某些思路和进展

国内外铀矿找矿勘查在 20 世纪 70~80 年代投入了大量工作,取得了重大突破,有大量新的铀矿床,特别是超大型铀矿床的重大发现。世界铀矿床基本类型已经基本确立。以后的这些年来,铀矿找矿勘查工作的思路和进展大体归纳如下几点。

### 1. 重视新区、新类型探索,但主要集中在老矿区的扩大

老矿区的扩大主要工作是寻找同类型矿床;寻找与此成矿条件类似的新类型;老矿床的深部发现新矿体等。世界著名的铀矿集中区,如加拿大的阿萨巴斯卡不整合面型铀矿区外围,澳大利亚西部奥林匹克坝赤铁矿角砾杂岩(Cu—U—Ag)矿床的西北部同构造环境中发现了同类矿床。中亚地区砂岩型铀矿也有新的发展。在纳米比亚和尼日尔等国在已知铀矿床外围找矿,都有重要的发现。

我国开辟了新区——北方砂岩型铀矿,取得了重大突破,找到了如伊犁、东胜和吐—哈—红滩等一批铀矿床。在南方,花岗岩型和火山岩型铀矿田的外围或深部找矿也有突破。

### 2. 提出一些新的概念来指导找矿

铀矿找矿提出了一些新的成矿理论和找矿新概念,如提出了铀矿成矿的时控性,认为古老地壳含铀性是重要的成矿背景,其中发现的铀矿储量占世界已探明储量的 1/2,中生代砂岩型铀矿占 1/3,其他占 15%;又如提出了原岩和源岩的概念,欣科罗布韦岩浆热液矿床的源岩是元古代地层等;又如提出建立开发模式,既着重突出可观察到和可测量到的、同时又与成因解释相一致的那部分特点来指导找矿等,都有找矿效果;再如提出中亚地区砂岩型铀矿“次造山带成矿”、美国盆—岭地区砂岩型铀矿“伸展成矿”、我国“山间盆地成矿”和我国南方“伸展背景花岗岩—火山岩”成矿、“陆内成矿”,即地幔柱有关的岩浆热液活动成矿的概念等,都对找矿有所指导。

### 3. 新技术方法引进和找矿方法综合运用

开展对新的找矿方法的实验和引进,发展铀矿独特的找矿方法,强调找矿方法的综合运用。

## 三、我国现行铀资源勘查的一些基本规定和指标

铀矿资源是指在地壳内部或地表自然形成的、品位大于或等于 0.01% 的金属铀量。

铀资源根据资源估算值的可靠程度分为三级(核行业标准—铀矿资源评价规范 EJ/T551—91):可靠资源、远景资源、预测资源。可靠资源是指矿床经过详查、勘探,矿体或矿段已由工程系统控制和圈定,矿量和品位根据取样资料及有关参数进行计算的资源。远景资源是指矿体或矿段已有工程大体控制和了解,其取样数据和矿体参数以及对矿体或矿段特征的研究还不足以将其划为可靠资源的金属铀量。可靠资源和远景资源均为已发现资源。预测资源指应用资源预测技术估算的边界品位大于或等于 0.01% 的铀矿资源。铀资源的这种划分执行到 2000 年。

1999 年我国颁布了国家固体矿产资源/储量分类标准(表 1-1)。它以经济意义、可行性研究程度和地质可靠程度三个指标划分为:查明矿产资源和预测资源两大类。把经济的和边际经济的查明矿产资源称为储量,而把次边际经济的和内蕴经济的称为资源量。储量是指基础储量中的经济可采部分,基础储量是查明矿产资源的一部分。资源量是指查明

矿产的一部分和潜在矿产资源。铀矿资源/储量分类统一执行国家标准总原则。

表 1-1 国家固体矿产资源/储量分类

| 经济意义   | 地质可靠程度      |             |           |            |
|--------|-------------|-------------|-----------|------------|
|        | 查明矿产资源      |             |           | 潜在矿产资源     |
|        | 探明的         | 控制的         | 推断的       | 预测的        |
| 经济的    | 可采储量 (111)  |             |           |            |
|        | 基础储量 (111b) |             |           |            |
|        | 预可采储量 (121) | 预可采储量 (122) |           |            |
|        | 基础储量 (121b) | 基础储量 (122b) |           |            |
| 边际经济的  | 基础储量 (2M11) |             |           |            |
|        | 基础储量 (2M21) | 基础储量 (2M22) |           |            |
| 次边际经济的 | 资源量 (2S11)  |             |           |            |
|        | 资源量 (2S21)  | 资源量 (2S22)  |           |            |
| 内蕴经济的  | 资源量 (331)   | 资源量 (332)   | 资源量 (333) | 资源量 (334)? |

注：表中所用编码 (111~334)，第 1 位数表示经济意义，即 1 = 经济的，2M = 边际经济的，2S = 次边际经济的，3 = 内蕴经济的，? = 经济意义未定的；第 2 位数表示可行性评价阶段，即 1 = 可行性研究，2 = 预可行性研究，3 = 概略研究；第 3 位数表示地质可靠程度，即 1 = 探明的，2 = 控制的，3 = 推断的，4 = 预测的。b = 未扣除设计、采矿损失的可采储量

(据国家标准 GB/T17766—1999)

铀矿的一般工业要求、矿床规模、矿石品级、矿石工业类型和伴生综合利用组分见表 1-2，1-3。

表 1-2 铀矿一般工业要求、矿床规模、矿石品级、矿石工业类型

| 一般工业要求                                                                                                 | 矿床规模                                                                                                | 矿石品级                                                                                           | 矿石工业类型                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 边界品位<br>( $w_B/10^{-6}$ ，下同)<br>300<br><br>最低工业品位<br>500<br><br>最小可采厚度<br>0.7 m<br><br>夹石剔除厚度<br>0.7 m | 按铀矿查明的资源/储量 (金属量) 分为 3 类：<br>大型矿床<br>≥3 000 t<br>中型矿床<br>≥1 000 ~ 3 000 t<br>小型矿床<br>≥100 ~ 1 000 t | 按矿石铀品位高低分为 3 级：<br>高品位 (富) 矿石<br>≥3 000<br>中品位 (普通矿石)<br>1 000 ~ 3 000<br>低品位 (贫) 矿石<br><1 000 | 根据矿石的物质组成 (尤其是所含特征性矿物的种类、含量以及铀矿物与共生矿物的关系)、化学成分、含矿围岩，并结合采、选、冶工艺特征等，可将铀矿石分为以下 10 种矿石工业类型：<br>a. 特征性矿物含量低的含铀碎屑岩和高硅酸盐铀矿石；<br>b. 富含萤石的高硅酸盐铀矿石；<br>c. 富含粘土矿物的铀矿石；<br>d. 富含碳酸盐、硫化物的低硅酸盐铀矿石；<br>e. 富含有机质、粘土矿物的铀矿石或富磷粘土铀矿石；<br>f. 富含碳酸盐的含铀碎屑岩或低硅酸盐铀矿石；<br>g. 富含碳酸盐、萤石、磷灰石的铀矿石；<br>h. 硅化煌斑岩、辉绿岩铀矿石；<br>i. 含多种金属硫化物和多种特征性矿物的复合铀矿石；<br>j. 含铀煤和含铀炭质页岩的铀矿石 |

注：地浸砂岩型铀矿的矿床规模划分为大型矿床 ≥10 000 t；中型矿床 ≥3 000 ~ 10 000 t；小型矿床 ≥1 000 ~ 3 000 t。