

715899

高等学校试用教材

铀成矿原理

罗朝文 王剑锋 编著
钟家蓉 赵凤民 审

原子能出版社

高等学校试用教材

铀 成 矿 原 理

(初 版)

罗朝文 王剑锋 编著

钟家蓉 赵凤民 审

原 子 能 出 版 社

内 容 简 介

本书除绪论外共九章,分别论述岩浆作用、水溶液作用和变质作用过程中铀成矿的原理,对复成因铀矿床、层控铀矿床、地壳演化过程中铀成矿的时空规律和铀成矿作用的研究方法,也作了较深入的介绍。本书概括了1987年以前国内外发表的有关著作和科研成果,基本反映了当代铀成矿理论的研究现状和水平。

本书是为高等学校铀矿地质勘查专业高年级学生编写的一本教材,也可供高等学校有关专业师生与科研、生产单位的地质人员参考。

* * * * *

本书由钟家蓉、赵凤民审,经铀矿地质教材委员会矿床课程组于1988年1月由章邦桐主持召开的审稿会审定,同意作为高等学校试用教材。

高等学校试用教材

铀成矿原理

(初 版)

罗朝文 王剑锋 编著

钟家蓉 赵凤民 审

责任编辑:姜利民

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

国防科工委印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/16 ·印张 20·字数 496 千字

1990年6月北京第一版·1990年6月北京第一次印刷

印数1—1000

ISBN7-5022-0228-5

P·10 (课) 定价: 3.95元

前 言

本书是根据原核工业部教育司于1984年6月在北京召开的放射性地质类教材大纲审定会审定的编写大纲编写的。该书可作为高等学校铀矿地质勘查专业高年级学生的选修课试用教材,也可供地质队和矿山的铀矿地质工作者及有关地质人员参考。

本书教学在学生学完全部专业基础课和专业课之后才进行,其目的是培养学生深入地掌握铀矿床形成的原理,学会综合应用有关学科的理论 and 知识,正确分析各种类型铀矿床形成的地质条件和物理化学条件,掌握铀在地壳发展过程中的分布、迁移、沉淀和富集成矿的规律,并能正确地利用成矿理论指导找矿工作。

在本书编写过程中,作者充分地考虑到了本书的教学目的和特点,因而在内容上加强了基本知识、基本理论和基本技能的阐述,特别注重在专业基础理论知识的横向上加强联系、纵向上增加深度,以便学生学会综合应用各有关学科的理论 and 知识,深入正确地分析铀矿床的形成原理。

本书主要根据成矿介质划分铀矿床类型,重点介绍岩浆铀矿床和水成铀矿床的成矿原理,对变质铀矿床和复成因铀矿床的成矿原理、地球演化与铀的成矿作用和成矿原理的研究方法也作了介绍。

本书除绪论外共九章。绪论、第一、二、五、六、七章和第九章的第一、二节由罗朝文编写,第三、四、八章和第九章的第三、四、五节由王剑锋编写。全书插图由王剑锋绘制。

本书由钟家蓉、赵凤民审校。

在本书编写过程中,教研室部分同志对编写大纲提出了许多宝贵意见。初稿完成后,金景福对书稿作了审查,南京大学章邦桐、原核工业部矿冶局李普洲、华东地质学院杨若利等同志详细审阅了书稿并提出了许多宝贵的修改意见。原核工业部教育司于1988年1月在北京召开了书稿审定会,与会同志对书稿进行了深入细致的审查并提出了进一步的修改意见。

责任编辑姜利民为本书文字和内容的修改付出了大量劳动。

作者对为本书的编写、修改、加工和出版给予帮助的同志,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者 1988年5月

目 录

前言	
绪论	1
一、铀在国民经济中的意义	1
二、铀成矿原理一书的任务和内容	2
三、铀成矿原理与其他学科的关系	3
四、铀成矿理论的发展简史、现状及展望	3
第一章 铀成矿作用概述	7
第一节 地壳的成分和其不同壳层中铀与常见元素的组合	7
第二节 地壳中铀的成矿作用	10
第三节 控制铀成矿的基本因素	11
第四节 铀矿石的结构和构造及其对探讨铀矿床成因的意义	12
一、铀矿石结构和构造的特征及其分类	12
二、研究铀矿石的结构和构造对探讨铀矿床成因的意义	12
第五节 铀矿床成因分类评述及本书采用的分类	18
一、铀矿床成因分类评述	18
二、本书采用的铀矿床分类	27
第二章 岩浆铀矿床的成矿原理	29
第一节 硅酸盐岩浆的成分和性质对铀行为的影响	29
一、硅酸盐岩浆的分类	29
二、硅酸盐岩浆中造岩元素的动态及其对铀和其他成矿元素的影响	30
第二节 硅酸盐岩浆中挥发性组分及其对铀行为的影响	32
一、硅酸盐岩浆中水的动态及其对铀行为的影响	32
二、硅酸盐岩浆中 CO_2 、F和Cl的动态及其对铀行为的影响	34
第三节 硅酸盐岩浆的酸碱演化与铀的成矿作用	36
第四节 温度和压力变化对硅酸盐岩浆分异的影响及铀的析出沉淀作用	38
一、硅酸盐岩浆中铀及其共生元素的可能存在形式	38
二、温度和压力变化对硅酸盐岩浆结晶分异及铀行为的影响	39
三、铀及其共生元素在硅酸盐岩浆演化过程中的富集规律	40
四、岩浆作用中铀的迁移形式和沉淀析出方式	42
第五节 伟晶作用的条件和成矿特点	42
一、伟晶岩成岩物质的来源和性质	42
二、伟晶作用中铀的来源和成矿特点	43
三、伟晶作用中铀的迁移形式和析出沉淀方式	44
四、伟晶岩中铀的赋存形式与矿物共生组合	45
第六节 岩浆铀矿床的主要类型及其成因	45
一、岩浆铀矿床的成矿条件和主要特点	45
二、岩浆铀矿床的主要类型	47
第七节 伟晶岩型铀矿床的主要类型	50

一、伟晶岩型铀矿床形成的地质条件	50
二、伟晶岩型铀矿床的类型	51
第三章 铀的水溶液成矿作用	53
第一节 水成铀矿床概念	53
第二节 含矿水溶液的来源	54
一、水溶液的来源	54
二、水溶液中成矿物质的来源	58
三、成矿溶液与成矿物质来源的同源性 & 异源性	60
四、岩石中成矿物质的活化转移	60
第三节 含矿水溶液的成分及性质	61
一、含矿水溶液的成分	61
二、含矿水溶液的性质	62
第四节 含矿水溶液的运移条件	64
一、含矿水溶液运移的原因	64
二、含矿水溶液运移的通道	65
第五节 含矿水溶液中铀的迁移形式	66
一、碳酸铀酰络离子形式及其迁移条件	68
二、硫酸铀酰络离子形式及其迁移条件	69
三、铀酰的氢氧化物及其胶体形式的迁移条件	70
四、铀酰的有机络合物及螯合物形式与迁移条件	72
五、其他迁移形式	72
六、与铀共生的其他金属元素的迁移形式	73
第六节 含矿水溶液中铀沉淀的机理	74
一、温度和压力在铀沉淀过程中的作用	74
二、围岩在铀沉淀成矿过程中的作用	75
三、酸碱度变化对铀的沉淀作用	76
四、还原反应对铀的沉淀作用	76
五、吸附对铀的沉淀作用	77
六、蒸发和其他因素对铀的沉淀作用	78
七、铀沉淀析出物的形式和富集成矿的方式	78
第四章 内生水成铀矿床的成矿原理	79
第一节 内生水成铀矿床成矿作用概述	79
一、关于内生水成铀矿床的几种成因观点	79
二、内生水成铀矿床形成的地质条件	80
三、围岩蚀变及其对探讨铀矿床成因的意义	91
四、内生水成铀矿床形成的阶段性和矿石类型及矿物共生组合	97
五、铀与其他金属元素成矿的关系	99
第二节 花岗岩型内生水成铀矿床	107
一、产铀花岗岩体形成的地质条件及其特征	107
二、铀成矿与构造的关系	109
三、围岩蚀变类型	113
四、成矿深度	113

五、铀矿石类型与矿物共生组合	114
六、铀矿床主要类型实例成因分析	115
第三节 火山岩型内生水成铀矿床	123
一、产铀火山岩形成的地质条件及特征	123
二、矿床与构造的关系	125
三、围岩蚀变类型	127
四、矿石类型与矿物共生组合	130
五、铀矿床主要类型实例成因分析	130
第四节 产于其他岩石中的内生水成铀矿床	136
一、矿床形成的地质条件	136
二、围岩蚀变	137
三、铀矿石类型和矿物组合	139
四、铀矿床主要类型实例成因分析	139
第五章 外生水成铀矿床的成矿原理	142
第一节 外生水成铀矿床成矿作用概述	142
一、外生水成铀矿床成矿的阶段性和特点	142
二、外生水成铀矿床形成的地质构造条件	143
三、构造在外生水成铀矿床形成中的作用	143
四、岩相条件	149
五、古地理条件(含古气候和古地貌)	152
六、铀源条件	153
七、铀成矿的地球化学条件和地质环境	155
第二节 风化壳型铀矿床	158
一、风化壳型铀矿床形成的条件和机理	158
二、风化壳型铀矿床的类型	159
第三节 沉积含铀砂矿床	160
一、沉积含铀砂矿床形成的条件和机理	161
二、沉积含铀砂矿床的主要类型	161
第四节 沉积-成岩型铀矿床	162
一、沉积-成岩型铀矿床形成的条件和机理	162
二、沉积-成岩型铀矿床的主要类型	164
第五节 后生淋积铀矿床	173
一、后生淋积铀矿床形成的条件和机理	173
二、后生淋积铀矿床的主要类型	177
第六节 蒸发沉积铀矿床	194
一、蒸发沉积铀矿床形成的条件和机理	194
二、蒸发沉积铀矿床的主要类型	195
第七节 外生多阶段水成铀矿床	196
一、外生多阶段水成铀矿床的概念	196
二、矿床实例成因分析	196
第六章 变质铀矿床的成矿原理	200

第一节 变质铀矿床概述	200
一、变质作用和变质铀矿床	200
二、变质铀矿床的分布和工业意义	201
第二节 变质铀矿床形成的条件和机理	201
一、变质铀矿床形成的条件	201
二、变质成矿作用中含铀溶液的来源	203
三、变质过程中铀的活化转移	205
四、变质成矿作用过程中铀的迁移形式和沉淀机理	207
第三节 变质铀矿床的主要类型	209
一、受变质铀矿床	209
二、变成铀矿床	214
三、超变质铀矿床	216
四、接触交代铀矿床	219
第七章 复成因铀矿床的成矿原理和层控铀矿床的归属等问题	223
第一节 复成因铀矿床的成矿原理	223
一、复成因铀矿床的概念	223
二、关于复成因铀矿床的应用范围	224
三、复成因铀矿床的实例分析	224
第二节 关于层控铀矿床的成因和归属等若干问题	233
一、矿床层控理论的兴起和发展现状	234
二、层控铀矿床概念及不同学者对“层控”的应用范围	235
三、关于层控铀矿床在现行铀矿床分类中的归属问题	237
第三节 关于成因不明铀矿床的问题	238
第八章 地球的演化与铀的成矿作用	239
第一节 地球外圈的演化及其对铀成矿作用的影响	239
一、大气圈的形成及其演化	239
二、水圈的形成及其演化	241
三、生物圈的形成及其演化	242
四、地球外圈演化对地质环境和铀成矿作用的影响	243
第二节 岩石圈的演化与铀的迁移和富集规律	245
第三节 地壳主要构造单元的形成及其与铀成矿的时空关系	250
第四节 中国陆壳的发展与铀的演化及成矿作用	252
第五节 铀在地壳演化过程中的旋回性及成矿作用	254
第六节 板块构造与铀的成矿作用	256
第七节 铀成矿的空间规律	261
一、古地台区铀的成矿规律	261
二、地槽-褶皱区铀的成矿规律	265
三、成矿元素的空间分布与共生组合规律	266
第八节 铀成矿的时间规律	273
第九节 同位素组成在研究地壳演化与铀成矿作用中的意义	276
一、铅同位素组成的变化与地壳演化的关系	277

二、铈同位素组成的变化与地壳演化的关系	278
三、同位素组成在研究地壳演化与铈成矿作用中的意义	279
第九章 铈成矿作用的研究方法	283
第一节 铈成矿作用研究方法概述	283
第二节 成矿物质来源的研究	284
一、铈矿石成分与围岩成分的对比分析	284
二、成矿物质来源的同位素判据	284
三、微量元素的研究对探讨成矿物质来源的意义	288
四、稀土元素对探讨成岩成矿物质来源的意义	289
五、铈活化转移的研究方法	292
第三节 成矿溶液成分和性质的研究	293
一、研究成矿溶液成分的方法	293
二、成矿温度和压力的研究	296
三、成矿溶液Eh及pH的研究	300
第四节 铈成矿演化过程的研究	302
一、成矿期和成矿阶段的研究	302
二、矿物生成顺序的研究	303
三、成矿溶液演化的研究	304
四、成矿时代研究	304
第五节 铈迁移形式和沉淀机理的研究	305
一、地质学方法	305
二、热力学方法	306
三、水文地球化学法	306
四、实验矿物学法	307
主要参考文献	307

绪 论

一、铀在国民经济中的意义

原子能的开发利用给人类的科学进步带来了巨大变革，为国防工业和国民经济的发展开创了广阔前景。然而，从铀的发现到工业利用经历了一个漫长的时期。自1789年德国化学家克拉普洛特发现铀元素以来，在以后的一个半世纪里，铀仅以化合物的形式作为染色剂用于陶瓷工业、玻璃工业和纺织工业。1896年法国物理学家贝克勒尔发现 $K_2UO_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$ 样品使底片感光，从而发现了铀的天然放射性；1898年居里夫人证明含有铀元素的化合物都具有放射性，并发现了镭；同年居里夫妇从铀矿石中提取出镭。此后，铀的应用范围扩大到了医疗等方面。但到1940年以前，全世界生产铀的总量不超过4000t，提取镭仅约1000g。1939年德国物理化学家哈恩和斯特拉斯曼发现，铀核裂变时能释放出巨大的能量。这一发现为人类开创了利用核能的新时代。铀开始用于制造威力强大的核武器和建造核电站。

现在，在许多国家的能源结构中，核能已占有重要地位。据报道，截至1986年底，在世界30多个国家和地区共有397座核电站机组在运行发电，装机容量已达273715MW，约占世界电力总装机容量的10%。其中，我国台湾省已有6座核电站在运行发电，装机容量已超过4918MW。华东地区的秦山核电站、华南地区的大亚湾核电站等正在建设中，预计从1990年起将陆续投产发电。预计到2000年，核电站的发电量在世界发电总量中所占的比例将上升到24~32%。核能之所以在能源竞争中发展如此之快，是由于当前核电站已经达到技术上成熟、经济上有竞争能力，并在许多国家开始大规模推广的阶段。在世界上，对核电站的重新估价除了环境保护和安全问题外，更注重各国的能源形势、经济上的竞争能力和对电力需求的增长速度。据1982年9月国际原子能机构发表的世界核能前景报告，欧洲共同体和日本的核电成本比煤电低20~50%。由于核燃料易于贮运，利用核能将改善一些国家能源紧张和因资源分布不平衡而造成能源布局不合理的途径。此外，以核能作能源还用于提高舰艇的航速和续航力。今后，在解决了技术和放射性污染问题之后，核燃料可用于发射火箭，核炸药可用于开山引水、改造环境、控制自然灾害和开发自然资源等等。那时，人类将真正地进入核能时代。

当前以及在可预见的未来一段时期内，即在受控核聚变获得成功之前，铀将仍然是核电站、核潜艇等的主要燃料*。因此，随着核能的迅速发展，对铀的需求量将愈来愈大，铀在国民经济中的地位也将愈来愈重要。因而铀矿地质工作者肩负的任务也将愈来愈重大。为此，必须加强成矿理论研究、掌握成矿规律、科学地进行成矿预测，为四化建设提供更多的优质铀矿资源。

* 目前世界上比较成熟的核电站的反应堆都属于热中子反应堆，其应用的裂变物质是同位素铀-235。现在正处于研究发展中的快中子增殖堆，除应用同位素铀-235之外，还可利用铀-238和钍-232，故铀是解决核燃料高度利用和开辟近期新能源的重要原料。

二、铀成矿原理一书的任务和内容

1. 本书的任务

铀是化学性质比较活泼的变价元素。在地球演化的不同阶段和在不同的地质作用过程中,当环境的介质条件发生变化时,铀都能发生迁移或沉淀、分散或集中,以至富集成矿。现已查明的不同类型、不同规模的铀矿床,其形成时的地质条件和影响因素是各不相同的,同一工业类型铀矿床的控制因素也相差悬殊。探讨铀在地质历史中富集成不同类型矿床的时间和空间,查明铀成矿规律,了解铀在不同时间、不同地区、不同介质条件下富集成矿的机理,即研究铀成矿的原理,对于找矿和研究工作都具有重要的指导意义。作为铀矿地质勘查专业主要专业课的铀地球化学和铀矿床学等,限于其学科本身的研究领域,都分别阐述本学科特定的内容。例如,铀地球化学主要研究铀的地球化学性质、铀在自然界的分布、分配规律和各种地质作用中铀的行为;而铀矿床学则主要探讨不同类型铀矿床形成的地质条件、影响因素和分布规律。本书任务刻意追求突破各有关学科所限定的研究领域,在专业基础理论知识的横向上加强联系,纵向上增加深度,以便使学生学会综合应用铀地球化学、铀矿床学和其它有关学科的理论知识,正确地分析各种类型铀矿床形成的地质条件及物理化学条件,阐明铀在地壳发展过程中的迁移、沉淀和富集成矿的机理,以及铀在时间上和空间上的成矿规律。

2. 本书的内容

《铀成矿原理》一书主要论述铀在地壳演化不同阶段及各种地质作用中的成矿机理和成矿规律,阐明铀迁移和富集的地质条件、物理化学条件,以及各有关因素在铀成矿过程中的作用。在实践中人们认识到,同样的地质作用既可产生富矿床,也可以产生贫矿床;不同的地质作用又可以产生矿体形态和矿物组合相似的矿床。不同产地和不同地质环境中所赋存的矿床也许差异很大,甚至不能类比,但在相同或相似的介质中所形成的矿床,却表现出成因上的相近性。鉴于成矿介质不同,铀成矿的机理有显著差别,以及在相似介质中,铀成矿的机理相似,本书从铀成矿的特点出发,主要根据不同的成矿介质,即岩浆和水溶液,把铀矿床分为岩浆成因和水溶液成因两大类。变质铀矿床的成矿介质虽然主要也是水溶液,但由于变质成矿过程独具特点,所以,作为一类单独列出。故此,本书主要研究铀在岩浆和水溶液两种成矿介质中的成矿原理、以及在变质水溶液中的成矿原理,并在此基础上阐述铀成矿的规律。由于铀的成矿作用是在地壳发展到一定阶段之后发生的,在地壳的不同演化阶段铀的成矿作用及形成的矿床类型有显著差别,又由于在地壳的不同部位铀成矿具有其特殊性,成矿介质所起的作用也不同,不同类型铀矿床在时间和空间的分布上表现出明显的规律性,所以,地球的演化与铀成矿作用的关系也是本书研究的主要内容之一。

为了拓宽知识面,开阔学生视野,增强学生毕业后开展综合找矿和对铀矿床进行综合评价的能力,除铀外,本书还将讨论与铀共生和伴生的某些有益元素的迁移和富集规律,此外,对探索铀成矿作用及矿床形成原理有密切关系的问题,本书也将予以研究。

三、铀成矿原理与其他学科的关系

铀成矿原理与铀矿床学有密切的关系，它是在铀矿床学的基础上发展起来的。它利用铀矿床学的研究方法及其所取得的成果，对各类铀矿床的形成机理进行深入的研究，目的是探索铀成矿的时空规律，为找矿勘探奠定理论基础，以便更有效地指导找矿勘探工作。但两者研究的侧重点不同，铀矿床学着重研究工业矿床的控制条件，其次探讨矿床的形成过程和成因；铀成矿原理则从矿床的控制条件和影响因素出发，着重研究铀矿床的成矿过程和形成机理，探讨铀成矿的普遍规律。二者相辅相成，互为补充，因此铀成矿原理属于矿床学范畴。

铀成矿原理与铀地球化学也有特别密切的联系。它以地球化学的理论作为探讨铀成矿作用的理论基础，利用地球化学的手段和方法研究矿床中元素的赋存状态、铀在不同介质中迁移的形式和条件，以及沉淀富集成矿的机理。

铀成矿原理与铀矿床学一样，是在地质科学各学科发展的基础上建立起来的，是一门综合性很强的学科。因此，它在研究矿床的形成机理时，除涉及到铀矿床学和铀地球化学外，还涉及到其他地质学科与基础自然科学的广泛的基础理论和知识，如矿物学、岩石学、构造地质学和化学、数学、物理学及生物学等。这些学科的理论 and 知识，研究手段和方法，对探索铀成矿原理的相应问题，都是不可缺少的。

由于科学技术的迅速发展，自然科学的新成就被应用到地质科学的各个领域，各种学科相互渗透，许多新兴学科和边缘学科相继建立，并对地学的发展起着巨大的促进作用。因此，不能忽视新兴学科，如全球构造、深部地质、海洋地质、数学地质、遥感地质和同位素地质学等学科的理论 and 知识、研究手段和方法对探讨铀成矿原理的意义和作用。

研究成矿原理不仅需要有多学科的基础理论知识和专业基础理论知识，还需要掌握新的分析测试手段和技术方法，并应注意科学技术发展的新动向和新成果，随时将其引入研究工作中，使研究工作保持较高的起点。

四、铀成矿理论的发展简史、现状及展望

铀矿床学作为一门独立的学科从矿床学中分离出来仅30余年的时间。现代的铀成矿理论是在其他金属矿床成矿理论所取得的成就的基础上发展起来的。

在成矿理论中，历来所涉及的核心问题有成矿物质的来源、成矿溶液（熔体）的性质、运动原因和矿质沉淀的机理等。这些问题虽然至今尚未得到公认的答案，但随着科学技术的进步，新的测试手段和方法被应用到矿床成因的研究工作中来，致使数百年来所争论的许多问题在认识上逐渐趋于统一，或有了更多的共同点。

（一）铀成矿理论发展简史

成矿理论的发展和矿产资源的开发利用，与人类的生产活动紧密相关。人类利用矿产已有悠久的历史，并在生产实践中认识到了矿产赋存的一些规律性。如我国，古代科学家管仲早在2500年前就提出了汞与金、铁与铜和铅与银等元素在空间上共生的概念，并对矿床分带和找矿标志有了初步认识，这些与现代矿床学所论述的基本一致。不过，有明确的目的、用

科学的方法研究矿床,并对矿床形成提出理论性的解释只是近几百年的事。

从16世纪至19世纪,对于成矿理论的发展具有一定历史意义和代表性的论述主要有下列一些:1546年,G. 鲍维尔(George Bauer)首次提出了成矿作用的概念和地下水成矿的假说;1644年,R. 笛卡尔(René Descartes)提出了矿床是由热的地球内部喷出的物质、沉淀在较冷的地壳的裂隙中形成的假说。到18世纪,上述两种假说逐渐发展成为“水成论”和“火成论”两种学说。到19世纪,这两种学说都得到了发展,其中“火成论”占据上风,“水成论”则发展成为“侧分泌”成矿说。

19世纪末、20世纪初,许多有影响的地质学家,如C. R. 范海兹(C. R. Van Hise)、J. F. 坎普(J. F. Kemp)、W. 林格仑(Waldemar Lindgren)、R. C. 艾孟斯(R. C. Emmons)和B. A. 奥勃鲁契夫(B. A. Обручев)等,都认识到成矿的金属和溶液可能是多来源的,可以来自围岩和大气降水,也可来自岩浆。并认识到成矿作用可能是复杂的,用单一的成矿理论去解释不同的矿床成因会遇到困难。同时在矿床成因分类中,已把矿床分为内生的、外生的和变质的三大类(B. A. 奥勃鲁契夫)。1906年,W. 林格仑发表了“矿床与物理环境的关系”的著名论文,其中所阐述的见解及矿床分类,至今仍为许多地质工作者所沿用。以后数十年间,在成矿理论的研究中,几乎没有新的建树。

(二) 铀成矿理论的研究现状

自本世纪中期起,矿床地球化学、同位素地质学、矿物包裹体测定、成矿模拟实验等的迅速进展,极大地推动了成矿理论的发展,现将其中具有重要意义的分述于后。

自1950年H. П. 耶尔马科夫(H. П. Ермаков)研究矿物包裹体,并编著了《成矿溶液研究》一书开始,逐渐开展了对矿物中气液包裹体的成分、盐度、酸碱度、温度和压力的测定,近年来又广泛开展了对矿物包裹体成分的同位素测定等工作。这些工作对于确定成矿温度、成矿溶液的成分和性质,判断成矿物质的来源和成因具有重要意义。

放射性同位素地质研究方法,如U-Pb法、K-Ar法、Rb-Sr法等,对于确定矿床和含矿主岩的形成年龄及矿床成因起着重要作用。碳、氢、氧、硫等稳定同位素研究,对于确定矿液和矿质的来源、成因及演化,提供了重要依据。

成岩成矿模拟实验为铀成矿理论的研究提供了大量有说服力的数据,如矿床形成的温度和压力,成矿溶液的组分、酸碱度和氧化-还原电位,铀在溶液中的迁移形式,铀从溶液中沉淀的物理化学参数等。矿床研究的实验方法,早在100多年前就已由A. 多勃勒(A. Daubrée, 1841)提出,但只是近20年来,由于实验技术条件的发展和新的成矿理论的指导,才对铀成矿作用的研究提供了宝贵的数据。在这方面做出突出贡献的是苏联学者Г. Б. 纳乌莫夫(Г. Б. Наумов)和Р. П. 拉法尔斯基(Р. П. Рафальский)等。

此外,利用古地磁测定成矿年龄,成矿物质的综合鉴定测试,微区分析技术、数理统计、遥感技术和热力学计算等应用于成矿理论的微观和宏观研究,都取得了可喜的成就。因而在野外地质调查研究的基础上,通过上述手段获得了大量可以说明成矿物质和成矿溶液的来源、成矿溶液的性质、铀在成矿溶液中的迁移形式和沉淀机理的资料,这使铀成矿理论在近30年中得到了飞速发展,人们对成矿作用的认识更接近于自然实际。

铀成矿的理论,早期深受其他金属矿床传统成矿理论的影响。本世纪50年代初,在美国西部发现并大量开采砂岩型铀矿床,查明了地下水中铀的地球化学行为。这促进了对该类型

矿床成矿作用的研究和成矿模拟实验，创立了铀的淋积成矿理论和铀在氧化-还原过渡带沉淀、富集成矿的模式。

此后，在中国、法国和苏联，发现大量花岗岩型和火山岩型铀矿床。对该类矿床成矿作用的研究工作也日趋深入。根据岩矿时差数据、成矿时代与岩体内及其附近断陷盆地形成时代的相近性，以及铀在溶液中迁移和沉淀的地球化学特点，法国人J.热弗鲁瓦(J.Geffroy)等，于1958年提出了花岗岩型铀矿床成矿的热液浸出说，这一假说后来发展成为“内生风化论”。此后，M.莫洛(M.Moreou, 1966)又提出了铀成矿的大陆风化说。虽然M.莫洛本人于1977年放弃了这种观点，但该假说在北美、澳大利亚和我国影响仍很大。我国一些铀矿地质工作者在大量研究和积累资料的基础上，提出了以下成矿假说：杜乐天于1972年提出了花岗岩型铀成矿的热水浸出说，周维勋于1979年提出了表生汲取多途淀积成矿模式，刘义发于1980年提出了自变质表生成因观点。1982年杜乐天又提出了成矿壳层的概念。在对火山岩型铀矿床的研究中，1980年陈肇博提出了对热水溶液成矿作用具有普遍意义的双混合成矿模式。上述成矿假说和观点的提出，丰富了铀成矿的理论，促进了铀成矿作用的研究和找矿工作。

对外生成矿作用的研究也取得了较大的进展，除建立了淋积成矿的模式外，近20年来，许多学者如Г.Н.巴图林(Г.Н.Багурин, 1965, 1975)、В.И.丹契夫(В.И.Данчев, 1979)等，注意到了岩相和沉积环境在铀成矿中的作用。我国学者在研究碳硅泥岩型铀矿床时，将矿源层的概念和层控概念引入了铀成矿理论的领域。

对产于古老变质岩中的铀矿床成矿作用的研究也取得了显著成绩。在对古砾岩型铀矿床的成因探讨中，已突破了沉积变质、热液成矿等众说不一的提法。T.尤特(T.Utter, 1977)和D.A.普雷托里斯(D.A.Pretorious, 1976)等通过研究和进行粒度搬运实验，确认了该型矿床属河流冲积形成的古砂矿，并确定了形成该型矿床的时代界限。对变质作用中铀的行为及富集成矿规律的研究有了新的进展，尤其自60年代末，不整合面型铀矿床发现以来，这种研究工作发展较快。在这方面，Я.Н.别列夫采夫(Я.Н.Белевцев)、В.И.茹科娃(В.И.Жукова)、I.B.兰伯特(I.B.Lambert)、M.R.赫吉(M.R.Hegge)和F.J.达尔坎普(F.J.Dahlkamp)等做了很多工作。愈来愈多的产于前寒武纪变质岩中的铀矿床的发现和模拟变质成矿作用的研究成果，加深了人们对变质作用中铀的迁移形式和铀地球化学行为随变质程度增加而改变的认识，并确认了退变质作用对铀成矿的重要意义。最近几年对超变质作用(混合岩化)过程中铀成矿机理的研究也取得了新的进展。

大量矿床的研究结果证明，多数矿床并非一次形成，成矿作用也往往不只一种，而常常是不同成矿作用相互迭加才形成的。据此，1965年涂光炽在研究某铀矿田时提出沉积再造成矿的观点，后来发展成为复成因成矿说。这种复成因成矿的理论近年来已为多数地质工作者所接受，并用于解释控矿条件复杂的矿床的成因。

近30年来，在探索铀成矿机理方面，发表了大量的单篇论文和总结铀成矿理论的专著。在50年代，主要代表著作有：《加拿大铀矿床》，A.H.兰格(A.H.Lang, 1952)著；《资本主义国家铀矿地质》，B.C.多马廖夫(B.C.Домарев, 1956)著；《放射性原料矿物学和地质学》，E.Wm.亨里赫(E.Wm. Heinrich, 1958)著。在本世纪60年代，主要代表著作有：第一本铀矿地质学方面的教材《铀矿地质》，B.H.哥特良尔(B.H.Котляр, 1961)编著；《铀地球化学原理》，B.B.谢尔宾纳等(B.B.Щербина и др., 1963)著；《热液铀矿床》，Ф.И.沃里弗松(Ф.И.Вольфсон, 1966, 1978)编。在70年代，主要代表著作有：

《火山洼地铀矿床》，A.Н. 图加林诺夫 (A.Н. Тугаринов, 1972) 主编；《热液铀矿床》，R.A. 里奇等 (R.A. Rich et al, 1976) 著；《铀成矿作用的演化》，B.И. 卡赞斯基 (B.И. Казанский, 1978) 等著；《铀成矿作用的物理化学模式原理》，Г.Б. 纳乌莫夫 (1978) 著；《外生铀矿床》，B.И. 丹契夫等 (1979) 著；在80年代，主要代表著作有：《水成铀矿床》，С.Г. 巴图林 (С.Г. Батурин, 1980) 等著；《含铀区成矿特征》，B.И. 维利奇金 (B.И. Виличкин, 1983) 著；《火山岩中的铀矿床》会议文集，国际原子能机构编辑 (1985)；《核地质学原理》，U. 阿萨斯纳拉雅纳 (U. Asa Wthanarayana, 1985) 著；《花岗岩型铀矿文集》，杜乐天等 (1982) 编著；《碳硅泥岩型铀矿文集》，北京铀矿地质研究所 (1982) 编著；《中国花岗岩型铀矿床》，王从周 (1985) 编著等。

为促进铀矿普查和勘探工作的进展，探讨铀成矿作用，发展铀成矿理论，联合国国际原子能机构组织召开了六次有关铀矿地质方面的国际性学术讨论会，即分别在1955年、1958年、1964年和1972年在日内瓦召开的和平利用原子能会议，在1974年召开的雅典会议和在1976年召开的维也纳会议。会议上与会各国学者宣读了大量有关铀成矿理论方面的论文。对于铀成矿的地质条件和物理化学条件、铀成矿的时间和空间分布规律作了探讨和理论性阐述。

为了系统地总结铀矿找矿勘探经验和铀成矿理论方面的成就，推动铀矿地质工作的进展，我国在发现大批各类型铀矿床的基础上，召开了一系列学术讨论会，与会者提交了大量学术论文，探讨了我国火山岩型和花岗岩型等主要类型铀矿床的成矿条件和形成机理。

(三) 铀成矿理论的展望

关于铀成矿作用的研究，下述几个方面的动向值得铀矿地质界引起应有的重视。

开展对铀矿产资源研究的国际性协作。国际原子能机构与经济合作和发展组织的核能委员会联合制定和执行“国际铀矿资源评价计划”，对世界185个国家和地区的铀矿远景储量进行估算，确定铀成矿的远景区。国际原子能机构每两年还组织出版世界有关国家和地区铀资源情况和进展的专著（称“红皮书”）。这种大规模的协作对发展铀成矿理论具有重大意义。

各国学者已经从重视研究单个矿床成矿作用和矿床成因，转而重视探讨区域成矿规律和注意分析地质环境，这是因为在不同时代、不同地质环境产有不同类型矿床。近年来，不少地质学家对此做了大量工作，如《铀成矿作用的演化》一书中即指出了在不同地质环境中所产出的铀矿床类型。在分析成矿地质环境时，普遍重视探索区域富铀层位。目前，世界上许多大的铀成矿区，如澳大利亚、加拿大的巨型矿床产出区，都有前寒武纪富铀层位存在，这是后期改造和形成各类型铀矿床的物质基础。

在地球演化过程中，不同类型的铀矿床仅形成于一定的时代。如古砾岩型铀矿床只出现在2300Ma年前地球大气圈缺氧时期，不整合面型铀矿床则形成于大气圈富氧之后，大规模的典型脉状铀矿床出现更晚，等等，由此铀矿地质工作者提出了矿床形成的时控概念。

在成矿理论研究中，今后会更加扩大探索的范围，如把板块学说应用在成矿作用的研究中，从宏观上认识成矿区、成矿省的形成，以及跨越不同大地构造单元的成矿带与全球构造间的关系。在深度上将会涉及到对地幔领域的探索，从地幔与地壳的相互作用来认识成矿能量、矿质、矿液和矿化剂等的来源，地壳运动和成矿的动力等。此外，在成矿机理研究中，除将更重视获得成矿的直接数据（如矿物包裹体测定数据，成矿模拟实验数据等）外，必将更多的引入新的、精确而快速的测试手段和方法，对现代成矿作用进行更深入的观察和研究。

第一章 铀成矿作用概述

自然界铀的成矿作用与地壳中发生的各种地质作用、地壳的成分和环境的物理化学条件（如温度、压力、酸碱度和氧化-还原电位等）等相关。为了论述铀在自然界成矿的原理，首先对上述问题作一概略介绍。

第一节 地壳的成分和其不同壳层中铀与常见元素的组合

地球自其形成以后一直在不断地演化发展。地壳是地球发展演化到一定阶段时形成的。地壳也在不断地发展演化，它的成分和不同壳层中的元素组合随其演化而演化。矿产乃是地壳中元素重新分配再组合的结果。矿产本身也在不断演化。地壳的不同部位，在其发展的不同时期产生不同种类和不同类型的矿床。为理解在不同地质作用中元素的集散特点和富集程度，需了解地壳的成分（元素的丰度）和不同壳层中元素组合的基本特征。

地球和地壳的元素丰度列于表1-1。从表可见，地壳与地球整体相比，有些元素的丰度增加，如Si, Al, K, Rb, U, Th, W, Sn, Nb, Ta, Zr, Sr, Ba等；有些元素的丰度降低，如Fe, Mg, Ni, Cr, C等。地壳上部与地壳下部元素的丰度也相差悬殊，如K, Rb, U, Th等元素的丰度在地壳上部比在地壳下部高10倍。地壳的不同部位发展演化的历史不同，元素的丰度也不一样，例如年轻的大陆壳比古老大陆壳更富Si, K, 而贫Fe, Mg, Ca, Na。古老大陆壳中Fe, Cu, Cr等常更富集。地壳不同部分元素丰度的差异是由其组成物质不同所造成的。根据地壳物质的不均一性，通常把地壳划分为沉积盖层、花岗岩层和玄武岩层（有的学者把地壳分为四层：沉积或火山沉积岩层、花岗岩层、闪长岩层和玄武岩层）*。在沉积盖层和花岗岩层中，常见元素组合相当于元素地球化学分类表中的亲石元素和亲铜元素。在玄武岩层中常见的元素组合则为亲铁元素。

在沉积盖层中，U常与V, Mo, Cu, Pb, Zn, Sb, Hg, Y, W, Cr, Ni, Mn, Ge, Zr, Sc, Co, Bi, Ti, Ca, Ag, As, Se, P, F, REE等伴生。在不同岩石和不同介质条件下，元素组合也有差异。例如，在碎屑岩中U可与Mo, As, Cu, Zn, V, Pb, P, Se, Hg, F等元素相伴生；在磷块岩中，U常与V, Ag, Pb, Cr, Ni, F, Mo, Se, REE等元素伴生；在泥炭中，U则常与Cu, Pb, Zn, Mo, Ge, Mn等元素伴生。

在花岗岩层中，与U伴生的常见元素组合为Ta, Sn, Mo, Li, Rb, Cs, Ti, Ga, Hf, Nb, W, F, Be, Sc, Y, Bi, As, In, Ge, REE；或Co, Ni, Pt, Sr, Be, Ru, Os, Ir, Rh, Cu, Zn, Se, Te, Pd, Tl等。花岗岩层中的元素组合又随大地构造部位不同而有差异。如中国大陆壳的花岗岩层更富W, Sn, Th, 铀与这些元素紧密共生于同一空间。在稳定区与活化区、隆起区与拗陷区，元素组合也不尽一致。需指出，花岗岩层也是不

* 根据苏美等国家深钻资料，地壳的结构并非完全如此，本书采用的是常用的分层方案。

表1-1 地球和地壳的元素平均含量

原子序数	元素符号	地壳的元素平均含量				地球的元素平均含量(%)
		重量克拉克值(%)			原子克拉克值(%)	涂光炯等(1984)
		维诺格拉多夫(1962)*	泰勒(1964)	黎彤(1976)	陶正章(1984)	
1	H	—	—	0.14	2.838	3.3×10^{-3}
2	He	—	—	1.6×10^{-9}	3.226×10^{-8}	111**
3	Li	3.2×10^{-3}	0.0020	0.0021	6.18×10^{-3}	1.85×10^{-4}
4	Be	3.8×10^{-4}	0.00028	1.3×10^{-4}	2.946×10^{-4}	4.5×10^{-6}
5	B	1.2×10^{-3}	0.001	7.6×10^{-4}	2.456×10^{-3}	9.6×10^{-7}
6	C	0.023	0.02	0.028	4.726×10^{-1}	0.0466
7	N	1.9×10^{-3}	0.002	1.8×10^{-3}	2.625×10^{-3}	4.1×10^{-4}
8	O	47.00	46.40	46.00	58.728	30.12
9	F	0.066	0.0625	0.045	4.838×10^{-2}	1.35×10^{-3}
10	Ne	—	—	7×10^{-9}	7.084×10^{-9}	0.50**
11	Na	2.50	2.36	2.30	2.044	0.125
12	Mg	1.87	2.33	2.80	2.353	13.90
13	Al	8.05	8.23	8.30	6.284	1.41
14	Si	29.50	28.15	29.00	21.091	15.12
15	P	0.093	0.105	0.12	5.871×10^{-2}	0.192
16	S	0.047	0.026	0.04	2.549×10^{-2}	2.92
17	Cl	0.017	0.013	0.028	1.613×10^{-2}	1.99×10^{-3}
18	Ar	—	—	4×10^{-6}	2×10^{-6}	$^{36}\text{Ar} 2.20^{**}$
19	K	2.50	2.09	1.70	8.882×10^{-1}	0.0135
20	Ca	2.96	4.15	5.20	2.65	1.54
21	Sc	0.001	0.0022	1.8×10^{-3}	8.178×10^{-4}	9.6×10^{-4}
22	Ti	0.450	0.57	0.64	2.729×10^{-1}	0.082
23	V	9×10^{-3}	0.0135	0.014	5.614×10^{-3}	8.2×10^{-3}
24	Cr	8.3×10^{-3}	0.010	0.011	4.321×10^{-3}	0.412
25	Mn	0.10	0.095	0.13	4.834×10^{-2}	0.075
26	Fe	4.650	5.63	5.80	2.121	32.07
27	Co	1.8×10^{-3}	0.0025	0.0025	8.665×10^{-4}	0-084
28	Ni	5.8×10^{-3}	0.0075	0.0089	3.097×10^{-3}	1.82
29	Cu	4.7×10^{-3}	0.0055	0.0063	2.025×10^{-3}	3.1×10^{-3}
30	Zn	8.3×10^{-3}	0.007	0.0094	2.937×10^{-3}	7.4×10^{-3}
31	Ga	1.9×10^{-3}	0.0015	0.0018	5.273×10^{-4}	3.1×10^{-4}
32	Ge	1.4×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.4×10^{-4}	3.93×10^{-5}	7.6×10^{-4}
33	As	1.7×10^{-4}	1.8×10^{-4}	2.2×10^{-4}	5.99×10^{-5}	3.2×10^{-4}
34	Se	5×10^{-6}	5×10^{-6}	8×10^{-6}	2×10^{-6}	9.6×10^{-4}
35	Br	2.1×10^{-4}	2.5×10^{-4}	4.4×10^{-4}	1.124×10^{-4}	1.06×10^{-5}
36	Kr	—	—	—	—	$^{84}\text{Kr} 0.0236^{**}$
37	Rb	0.015	0.009	0.0078	1.864×10^{-3}	4.58×10^{-5}
38	Sr	0.034	0.0375	0.048	1.119×10^{-2}	1.45×10^{-3}
39	Y	2.9×10^{-3}	0.0033	2.4×10^{-3}	5.514×10^{-4}	2.62×10^{-4}
40	Zr	0.017	0.0165	0.013	2.911×10^{-3}	7.2×10^{-4}
41	Nb	2×10^{-3}	0.002	1.9×10^{-3}	4.177×10^{-4}	8×10^{-5}
42	Mo	1.1×10^{-4}	1.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}	2.76×10^{-5}	2.35×10^{-4}
43	Tc	—	—	—	—	—
44	Ru	—	—	1×10^{-7}	2.021×10^{-8}	1.18×10^{-4}
45	Rh	—	—	1×10^{-7}	1.985×10^{-8}	2.52×10^{-5}