



高等教育教材

铀地球化学教程



(第二版)



王剑锋 编著
韩泽宏 主审



原子能出版社

ISBN 7-5022-1183-7



9 787502 211837 >

ISBN 7-5022-1183-7

P595 定价: 17.60 元

高 等 教 育 教 材

铀地球化学教程

(第二版)

王剑锋	编著
韩泽宏	主审
赵凤民	审

原子能出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

铀地球化学教程/王剑锋编著. —北京:原子能出版社,1998.6

高等教育教材

ISBN 7-5022-1183-7

I. 铀… II. 王… III. 铀-地球化学-高等学校-教材 N. P595

中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 03997 号

内 容 简 介

本书是为高等工科院校铀矿地质勘查专业编写的教材。书中系统地阐述了铀地球化学的基本理论和基本知识,重点论述了铀在各种地质作用、特别在热液作用、风化作用和沉积作用过程中铀的地球化学行为和特征。此外,书中还注意阐明铀地球化学的基本理论在解释铀矿床形成机理方面的应用和铀地球化学研究方法等问题。

本书除绪论外共分为十一章,列有思考题,并附有附录和参考文献。

本书也可供高等院校有关专业师生、铀矿地质工作者及地球化学工作者参考。

Ⓒ

原子能出版社出版发行

责任编辑:张恩海

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 22.125 字数 549 千字

1998 年 6 月北京第 2 版·1998 年 6 月北京第 2 次印刷

印数:1—1000

定价:17.60 元

第二版前言

此书根据中国核工业总公司教育培训部 1991 年召开的、教材编审工作规划会审定通过的《铀地球化学教程》修订再版编写提纲修订而成。本着“打好基础、精选内容、逐步更新,利于教学”和“拓宽专业面”的精神,在本次修订中增删了第一版的内容,更新组织、改写了绪论、第一至第六章,删除原版第二章和第六章,有关重要内容合并入相关章节。根据多数读者建议和审稿人意见,保留第十三章铀地球化学的研究方法,并增写了含铀热液热力学性质的计算方法。从附录中删除铀矿物和含铀矿物的晶体化学特征及形成条件表,修订了其他附录的内容。全书各部分更多地反映了国内研究成果。

此书除绪论和附录外共分十一章。修订工作由王剑锋承担。请倪师军教授、博士增写了第十一章第四节。本版书稿由韩泽宏、赵凤民审校;罗朝文根据教学大纲对书稿进行了内审。在修订过程中,成都地质学院党政领导和核原料与核技术应用工程系全体教师给予大力支持。责任编辑张恩海同志对书稿的编辑加工做了大量工作。对以上同志和参加修订版编写提纲审定会的同志谨表示衷心的感谢。

由于编著者水平有限,书中错漏和不妥当之处仍在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

1992 年 7 月

第一版前言

铀地球化学是建立在铀化学、地球化学和铀矿地质学基础上的一门新兴学科。它主要是研究铀的地球化学性质、铀在自然界分布及分配的规律、铀在不同地质作用中迁移和沉淀的机理,以及铀在地壳形成和发展过程中的演化史及旋回性的学科。

本书内容和份量适合高等工科院校铀矿地质勘查专业学生用,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。

本书是在成都地质学院三系,于1976年、1979年所编的“铀地球化学讲义”的基础上,根据核工业部教育司(原二机部教育局)1981年5月召开的编写大纲审定会审定的《铀地球化学教程》编写提纲编写的。在编写过程中,首先考虑到本书作为专业课教材的特点,加强了基本知识、基本理论和基本技能的阐述;重点介绍铀在各种地质作用,特别在热液作用、风化作用和沉积作用中的地球化学特征,对铀的晶体化学性质、同位素地球化学和铀地球化学的研究方法也作了介绍。此外,还注意阐明铀化学和地球化学的基础理论在解释铀矿床形成机理方面的应用问题。

本书的编写,是在院、系、教研室的领导和支持下完成的。初稿完成后,教研室部分同志对书稿作了审查和试用;华东地质勘探局二七〇研究所马永焕同志对书稿进行了认真的审校;北京铀矿地质研究所赵凤民、韩泽宏、牛林、刘正义、夏毓亮和王志雄同志分别对一些章节进行了复审,提出许多宝贵意见。根据审校人提出的意见和建议,编著者对全书的体系和内容作了认真的修改。

本书编写过程中,北京铀矿地质研究所、南京大学、华东地质学院和其他许多生产科研单位的有关同志热心提供资料或提出宝贵意见,还得到成都地质学院绘图室同志的大力支持,在此谨致谢意。

由于编者学识有限,缺乏经验,且编写时间较紧,书中错漏和讲解不够清楚之处在所难免,谨请读者批评指正。

编著者

1984年1月

目 录

绪论	(1)
一、地球化学的定义及基本问题	(1)
二、铀地球化学的定义和任务	(2)
三、铀地球化学的学科特点及与其他学科的关系	(2)
四、铀地球化学发展简史及发展趋势	(3)
第一章 铀的主要物理化学性质及其在地球化学中的作用	(6)
第一节 铀原子的结构及其在元素地球化学分类表中的位置	(6)
一、铀原子的结构	(6)
二、元素的地球化学分类与铀的归属	(6)
第二节 铀的基本化学性质	(10)
一、铀的氧化态及其基本化学性质	(10)
二、铀的水溶液化学	(12)
第三节 铀的晶体化学性质	(20)
一、铀的原子半径和离子半径及其地球化学意义	(20)
二、铀的配位数及其地球化学意义	(22)
三、铀的极化性质及其地球化学意义	(23)
四、铀化合物和矿物中键的类型	(25)
五、铀的电离能及其地球化学意义	(25)
六、铀的电负性及其地球化学意义	(26)
七、铀的晶体化学参数与晶体化学定律	(27)
第四节 铀的放射性及其地质-地球化学作用	(28)
一、放射性的地质和地球化学作用	(29)
二、铀和钍的天然放射性系列与放射性平衡	(34)
三、裂变径迹产生的原理及其地球化学意义	(35)
思 考 题	(37)
第二章 铀地球化学的热力学和电化学基础	(38)
第一节 热力学理论和方法在铀地球化学中的应用	(38)
一、地球化学热力学	(38)
二、热力学的基本原理和计算方法	(38)
三、热力学状态函数在地球化学中的应用	(44)
第二节 铀及其化合物的热力学性质	(48)
一、U-O 体系中铀矿物形成的热力学条件	(49)
二、U-O-H ₂ O 体系中铀矿物形成的热力学条件	(50)
三、水溶液中 UO_2^{2+} 与 UO_3 的热力学特征	(51)

第三节 铀地球化学中的氧化还原反应	(52)
一、铀的电极电位与标准电极电位的地球化学意义	(52)
二、铀的氧化还原体系类型	(55)
三、pH 值对铀的氧化还原反应及迁移的控制作用	(56)
四、O ₂ 和 CO ₂ 对铀氧化还原反应的影响	(58)
第四节 地质环境的氧化还原电位和铀与常见共生元素的矿物平衡	(59)
一、Eh-pH 图及自然界氧化还原环境的极限	(59)
二、铀与常见共生元素的 Eh-pH 图解	(61)
第五节 氧化还原电位法在铀地球化学中的应用	(63)
一、氧化还原电位法的基本原理和测定方法	(63)
二、岩石和矿物的氧化还原性质及其对铀成矿的控制作用	(64)
思考题	(65)
第三章 地球和地壳中铀的分布、分配与存在形式	(67)
第一节 太阳系的化学成分与铀的丰度	(67)
第二节 地球的化学成分与铀的丰度	(69)
一、基本概念	(69)
二、地球的平均化学成分与铀的丰度	(73)
三、铀在地壳、地幔和地核中的分布	(75)
第三节 岩石和矿物中铀的分配	(78)
一、各类岩浆岩中铀的分配	(78)
二、沉积岩中铀的分配	(81)
三、变质岩中铀的分配	(84)
第四节 天然水的化学成分与铀的丰度	(86)
一、海洋水、陆地水和地下水中的铀含量	(86)
二、天然水中的铀含量与水文地球化学条件的关系	(89)
三、我国大陆地区浅成地下水中铀的分布特点	(89)
第五节 铀在生物圈和大气圈中的分布	(92)
一、植物和微生物的铀含量	(92)
二、动物机体中的铀含量	(94)
三、大气中的铀含量	(95)
第六节 铀在地壳中的存在形式	(95)
一、元素的存在形式与结合规律	(95)
二、地壳中铀的存在形式	(95)
思考题	(97)
第四章 岩浆作用中铀的地球化学	(98)
第一节 岩浆的形成与铀的来源	(98)
一、花岗岩浆的成因与铀的来源	(98)
二、玄武岩浆的成因与铀的来源	(100)
三、安山岩浆的成因与铀的来源	(101)

第二节 岩浆的性质与铀的析出	(101)
一、岩浆的性质和铀在岩浆作用中演化的条件	(101)
二、岩浆的结晶分异作用与铀的析出	(104)
第三节 铀在岩浆演化过程中的富集规律	(106)
一、铀在岩浆结晶分异作用晚期的富集	(106)
二、岩浆结晶分异过程中铀与主要造岩元素演化的关系	(110)
三、铀在岩体边缘相的富集	(114)
第四节 各类侵入岩中铀的主要地球化学特征与成矿作用	(114)
一、超基性岩类铀的地球化学特征	(114)
二、基性岩类铀的地球化学特征	(115)
三、中性岩类铀的地球化学特征	(115)
四、中酸性和酸性岩类铀的地球化学特征	(115)
五、碱性岩类铀的地球化学特征	(118)
六、脉岩中铀的地球化学特征	(119)
第五节 火山岩与火山作用中铀的地球化学特征及成矿作用	(121)
一、基本概念	(121)
二、火山岩中铀的含量和分配	(122)
三、火山岩中铀的存在形式	(124)
四、火山作用与铀矿化的关系	(125)
第六节 伟晶岩中铀的分布、分配及存在形式	(126)
一、伟晶岩中铀的分布和分配	(126)
二、伟晶岩中铀的存在形式	(127)
第七节 伟晶岩中铀矿物的分布特点与矿物组合	(128)
一、不同成因类型伟晶岩中铀矿物的分布和矿物组合	(128)
二、花岗伟晶岩和霞石正长伟晶岩中铀矿物的分布与矿物组合	(129)
思考题	(130)
第五章 热液作用中铀的地球化学	(131)
第一节 热液的成因与铀的来源	(131)
一、热液的成因类型	(131)
二、热液中铀的来源	(133)
三、铀源体及其中矿质的活化机制	(137)
第二节 含铀热液的性质及其演化的物理化学条件	(137)
一、含铀热液的化学成分及其性质	(137)
二、热液作用的温度和压力	(142)
三、含铀热液的 pH 值和 Eh 值	(148)
第三节 铀在热液中的迁移	(152)
一、铀迁移的条件和影响因素	(152)
二、确定铀迁移形式的标志	(153)
三、铀的迁移形式	(154)

第四节 热液中铀沉淀的条件	(160)
一、温度变化	(160)
二、压力变化	(161)
三、 Eh 值变化	(162)
四、 pH 值变化	(164)
五、热液与围岩之间的化学反应	(165)
第五节 热液铀矿床的成矿模式与矿物共生组合	(166)
一、热液铀矿床形成的地球化学条件和成矿模式	(166)
二、热液成因铀矿物的形成条件与矿物组合	(167)
第六节 热液蚀变的地球化学特征	(170)
一、热液蚀变的概念及命名原则	(170)
二、蚀变的影响因素与围岩的变化特征	(171)
三、热液铀矿床中围岩的主要蚀变类型及其成因	(172)
四、热液蚀变的阶段性和蚀变岩石的分带性	(177)
五、研究围岩蚀变的意义和方法	(178)
第七节 热液铀矿床原生分散晕的成因及特征	(181)
一、原生分散晕的概念及成因	(181)
二、热液铀矿床原生晕的特征和影响因素	(181)
三、铀矿床原生晕的分带性	(182)
思考题	(183)
第六章 风化作用中铀的地球化学	(184)
第一节 地表环境的地球化学作用	(184)
一、地表环境的物理化学条件的特点	(184)
二、地球化学反应类型和反应特征	(185)
三、胶体分散体系的地球化学	(186)
第二节 风化作用的特点与元素的活化迁移	(187)
一、风化作用的特点	(187)
二、影响铀矿床氧化带发育的因素	(189)
三、岩石和矿物的分解与铀元素活化迁移	(192)
四、铀元素在水中的迁移强度	(193)
第三节 铀矿床氧化带中铀的迁移形式和沉淀条件	(195)
一、铀的迁移形式及其确定方法	(195)
二、铀沉淀的条件和析出形式	(197)
第四节 铀矿床氧化带的发育阶段及分带性	(199)
一、铀矿床氧化带的发育阶段	(199)
二、铀矿床氧化带的分带性	(201)
第五节 铀矿床氧化带中铀矿物的形成顺序与矿物稳定序列	(203)
一、氧化带中铀矿物的形成顺序	(203)
二、次生铀矿物的稳定序列与离子置换反应	(205)

第六节 铀矿床氧化带类型及矿物组合特征	(206)
一、热液铀矿床氧化带类型及矿物组合特征	(206)
二、伟晶岩型铀矿床氧化带的地球化学特点及矿物组合	(208)
三、沉积铀矿床氧化带的地球化学特点及矿物组合	(208)
第七节 氧化带中镭的地球化学特征	(209)
思 考 题	(210)
第七章 沉积、成岩和后生作用中铀的地球化学	(211)
第一节 影响沉积作用中铀地球化学行为的基本因素	(211)
一、铀在表生条件下的主要物理化学性质	(211)
二、表生环境的 Eh 和 pH 值	(211)
三、生物地球化学作用	(213)
第二节 沉积作用中铀的来源和迁移	(214)
一、铀的来源	(214)
二、铀的淋蚀和迁移	(216)
第三节 沉积作用中铀沉淀和聚集的机理	(217)
一、有机质对铀的沉淀作用	(218)
二、矿物吸附剂对铀的沉淀作用	(221)
三、硫化物对铀的沉淀作用	(223)
四、铀的其他沉淀作用	(225)
第四节 沉积和成岩阶段铀的地球化学特征	(226)
一、沉积阶段铀的地球化学特征	(226)
二、成岩阶段铀的地球化学特征	(228)
第五节 后生作用中铀的地球化学特征	(230)
一、后生淋积作用中铀富集的条件	(230)
二、后生淋积铀矿床的地球化学分带	(234)
三、层间氧化带型铀矿床形成的过程及演化模式	(237)
第六节 铀的伴生元素及矿物组合	(238)
一、铀的伴生元素及影响因素	(238)
二、铀矿床元素共生组合的实例分析	(239)
思 考 题	(241)
第八章 变质作用中铀的地球化学	(242)
第一节 影响变质作用中铀地球化学性状的因素	(242)
一、温度和压力对铀性状的影响	(242)
二、脱水作用对铀性状的影响	(244)
三、重结晶作用对铀性状的影响	(245)
四、脱碳作用对铀性状的影响	(245)
第二节 区域变质作用中铀的地球化学	(246)
一、进变质作用中铀的性状	(247)
二、超变质作用中铀的性状	(247)

三、变质岩中铀的存在形式	(250)
四、铀的变质成矿作用	(252)
第三节 接触变质作用中铀的地球化学	(253)
第四节 交代作用中铀的地球化学特征	(256)
一、碱交代作用与铀成矿的关系	(256)
二、CO ₂ 的交代作用与铀成矿的关系	(257)
思考题	(259)
第九章 铀同位素地球化学	(260)
第一节 铀的天然同位素和铀同位素分离	(260)
一、铀的天然同位素	(260)
二、天然 ²³⁵ U 的分离	(261)
三、天然 ²³⁴ U 的分离	(261)
第二节 铀同位素的分布、迁移与富集规律	(263)
一、各类岩石及水体中的 ²³⁴ U	(263)
二、铀矿物和含铀矿物中的 ²³⁴ U	(264)
三、铀矿床及其围岩中的 ²³⁴ U	(265)
第三节 铀同位素在地质和地球化学中的应用	(266)
第四节 放射性铅及铅同位素地球化学	(268)
第五节 U-Th-Pb 同位素年龄地球化学	(270)
思考题	(274)
第十章 铀的地史地球化学	(276)
第一节 地球外圈的化学演化与铀富集成矿的关系	(276)
第二节 地壳发展史中铀演化的基本特征	(280)
第三节 铀在地壳发展过程中的运移旋回性	(283)
一、旋回性的概念与铀的运移旋回	(283)
二、研究铀运移旋回的意义	(285)
第四节 控制铀地球化学旋回和成矿作用的地质事件	(286)
思考题	(287)
第十一章 铀地球化学的研究方法	(288)
第一节 铀地球化学的野外研究方法	(288)
一、地质和地球化学观察法	(288)
二、放射性测量法	(289)
三、地球化学测量法	(289)
四、α 径迹测量法	(289)
五、热释光测量	(290)
第二节 铀地球化学研究的室内分析测试法	(292)
一、放射性分析法	(292)
二、化学分析和放射化学分析	(293)
三、荧光分析法	(293)

四、X 射线荧光分析法	(293)
五、中子活化分析	(294)
第三节 研究成矿介质物理-化学参数的方法	(295)
一、温度的测定	(295)
二、压力的测定	(296)
△ 三、测定成矿溶液化学成分和 pH 值及 Eh 值的方法	(299)
第四节 含铀热液热力学性质的计算方法	(300)
一、热液温度、压力和热液成分的测定	(300)
二、离子强度、活度系数和活度的计算	(300)
三、热液的 pH 值和 Eh 值等参数的计算	(302)
▷ 四、热液的 f_{O_2} 和 f_{S_2} 的计算	(304)
五、热液中铀的迁移形式的热力学定量计算	(305)
六、含铀热液热力学性质计算的计算机处理程序	(313)
七、离子熵对应原理计算方法	(314)
八、HKF 模型的计算方法简介	(315)
第五节 裂变径迹法	(316)
一、铀含量的裂变径迹测定方法	(316)
二、矿物年龄的裂变径迹测定方法	(318)
第六节 铀存在形式的研究方法	(319)
一、放射性照相和裂变径迹法	(319)
二、分步溶解与浸取分析	(319)
三、电渗析	(320)
四、其他方法	(321)
第七节 稳定同位素在铀地球化学研究中的应用	(321)
一、稳定同位素的分馏作用与表示方法	(321)
二、稳定同位素在铀地球化学研究中的应用	(323)
思 考 题	(326)
附录	(327)
附录一 水溶液中铀的主要平衡常数	(327)
附录二 我国部分花岗岩和碱性岩岩体中铀和钍的含量及其比值	(329)
附录三 活度系数与离子强度的关系	(332)
附录四 铀及其化合物和水中常见离子及化合物的热力学参数	(333)
附录五 本书采用的计量单位及常数	(338)
附录六 地球化学周期表	(339)
参考文献	(340)

绪 论

地球科学研究的是一个经历数十亿年发展演化,并且目前仍处于强烈变动的地球。地球科学具有众多的分支学科,它们从不同的侧面研究地球过去和现在。地球化学作为一个分支学科则着重研究地球的化学组成、化学作用和化学演化,即从组成地球物质的化学运动形式方面研究和认识地球。地球化学又有许多分支学科,各学科有其自己的研究内容和任务,本书依据地球化学的基本原理,阐述铀的地球化学。

一、地球化学的定义及基本问题

地球化学作为独立的学科,其发展已经历 70 余年历史。对它的研究范围、内容和任务的认知,虽然存在某些演变和发展,但其基本的研究方向和科学的思维方法没有改变,这是阐述地球化学定义的出发点。

地球化学建立初期,В. И. 维尔纳斯基(1922 年)提出:“地球化学科学研究地壳中的化学元素,即地壳的原子,在可能范围内也研究整个地球的原子。地球化学研究原子的历史、它们在空间上和时间上的分配和运动、以及它们在地球上的成因关系。”同一时期,А. Е. 费尔斯曼(1922 年)提出了类似的定义:“地球化学研究地壳中化学元素——原子的历史及其在自然界的各种不同的热力学与物理化学条件下的行为”。从本世纪 30 年代开始,В. М. 戈尔德施密特(1933 年)把地球化学研究范围扩大到整个地球,他认为:“地球化学的主要目的,一方面是要定量地确定地球及其各部分的成分,另一方面是要发现控制各种元素分配的规律”。根据经典地球化学家给出的定义:地球化学是研究地球及其各部分的化学成分和元素行为的科学。

随着生产和科学技术特别是宇宙空间探测技术的迅速发展,地球化学的研究领域不断扩大,对地球以外星体化学的研究工作也日益增多。近 20 余年来,地球化学家把研究宇宙化学的内容也归属到地球化学的研究领域内,并给地球化学规定了更加广泛的现代定义。1973 年,美国科学院全国地球化学委员会在《地球化学的发展方向》一书中给地球化学规定如下的定义:“地球化学是关于地球和太阳系的化学成分及化学演化的一门科学,它包括了与它有关的一切科学的化学方面”。并进一步指出:“地球化学包括组成太阳系的宇宙尘埃化学;地球、月球和行星化学;地壳、地幔和地核化学;岩石循环(包括剥蚀、搬运、沉积和抬升)化学;海洋与大气的化学演化;岩石中有机质的化学”。1982 年,В. 梅森提出的定义为“地球化学是研究地球整体及其各组成部分的化学的科学”,并强调“地球化学阐述在地球范围内元素在空间和时间上的分配和迁移问题”。涂光炽(1985 年)提出“地球化学是研究地球(包括部分天体)的化学组成、化学作用和化学演化的科学”。所以,现代地球化学的定义仍强调地球及其组成部分是地球化学研究的主要对象,而研究内容则是地球及其组成部分的化学成分,以及元素在其中的分布、分配、分散、集中、共生组合、迁移规律和演化历史,即研究地球的化学组成、化学作用和化学演化。

根据地球化学的定义,可以确定地球化学研究的几个基本问题:

1. 地球及其各组成部分的化学成分,包括元素及其同位素的含量在空间、时间和不同产状地质体中的变化,即研究元素在自然界的分布分配问题。
 2. 元素在地质体中的赋存形式和共生组合规律。
 3. 元素的迁移形式和迁移机制。
 4. 地球的化学演化与地史上元素的迁移旋回。
- 研究这些问题都有助于揭示地球的组成及其演化的本质。

二、铀地球化学的定义和任务

铀地球化学是地球化学的一门年轻的分支学科,所以,地球化学所阐述的基本原理、基本知识、基本技能和所研究的基本问题也适用于铀地球化学。

铀地球化学是铀矿地质学和铀化学相结合的一门边缘学科,是侧重于研究铀在地球及其各组成部分(主要是地壳)中的分布和分配、迁移和沉淀、分散和集中以及共生组合规律和演化历史的学科。它的基本任务是:

1. 研究铀的基本化学性质,以阐明其在各种地质作用过程中的地球化学行为。
2. 研究铀及其同位素的天然丰度和在地壳中的克拉克值,并在此基础上阐明铀在地壳乃至整个地球中的分布、分配演化规律及原因。
3. 研究铀在各种地质体中的存在形式、共生组合特点以及活化转移条件,为探索成矿物质的来源提供可靠的地球化学依据。
4. 研究铀的区域地球化学,即铀的分布、分配和集中成矿与区域内地层、岩性及构造等地质条件之间的关系。
5. 研究铀在地壳发展过程中的演化历史和旋回性,探索铀成矿的地史规律。
6. 研究铀及其衰变子体在地壳乃至整个地球中的含量变化规律,探索地壳的形成和演化方向。
7. 研究铀矿物合成和分解的条件,模拟地壳中各种铀的地球化学作用过程,据以推论天然铀矿物形成的地球化学条件和铀的各种成矿作用机制。
8. 研究并总结铀成矿的地球化学标志,为铀矿找矿勘探、特别是寻找隐伏矿体提供可靠的理论根据。

三、铀地球化学的学科特点及与其他学科的关系

铀地球化学的产生和发展与其他科学、特别是地球科学各分支学科的发展有密切的关系。同时铀地球化学的发展又推动着其他学科的发展。这种相互联系和互相促进是事物发展的普遍规律。只有了解这种规律,才能更好地了解本学科的特点以及它的发展前景。

根据研究内容和任务,可以将铀地球化学的学科特点及与其他学科的关系概括如下:

1. 铀地球化学以铀化学的理论为基础,并与其他化学类科学如无机化学、有机化学、物理化学、热力学、胶体化学和化学动力学等有密切联系。一般说来,化学元素及其天然化合物(包括各种矿物)的基本物理化学性质和行为在自然条件下和在实验室中并没有本质的差别,因此铀地球化学广泛深入地应用上述基础学科的理论和方法研究自然条件下铀的性质和行为,并

应用物理学和数学的理论及方法,进行量化研究。

2. 铀地球化学与相邻学科如铀矿物、铀矿床、放射性水文地质学相互渗透,并与地学基础学科矿物学、岩石学、构造地质学、矿床学、普通地质学等有密切联系,这些学科为研究铀地球化学提供大量的实际资料,而地球化学的理论则为这些学科的深入研究提供理论依据。

3. 铀地球化学着重于研究地质作用过程中铀的化学运动形式,包括铀的迁移形式、沉淀机制、赋存形式、结合规律和富集及分散状态,并重视研究铀同位素以及铀与其他元素的关系,以此与上述其他学科相区分。

4. 铀地球化学具有较强的理论性和应用性,它以自然科学的理论为基础,应用范围从铀矿产资源的勘查利用到环境的监测和治理。我们必须随时注意把自然科学的基础理论和新技术、新方法、新成就引进到铀地球化学中来,并应用铀地球化学的理论和方法去保护人类生活的环境,防止放射性污染。

四、铀地球化学发展简史及发展趋势

从 1789 年德国化学家 M. H. 克拉普洛特(Klaproth, M. H.)发现铀以来,铀地球化学的创立和发展大体上可分为三个阶段:

第一阶段,从铀元素的发现到本世纪 20 年代末,是铀地球化学思想的萌芽和放射性元素地球化学学科的开创时期。

地球化学是 20 世纪的新兴学科,而“地球化学”这个名词早在 1838 年就由瑞士化学家许拜因(G. Schönbein)首次提出,并在 1842 年预言“一定要有地球化学,才能有真正的地质科学”。1908 年,美国化学家克拉克(F. W. Clarke)著的《地球化学资料》一书问世;1924 年,前苏联地球化学家 В. И. 维尔纳斯基(В. И. Вернадский)出版了《地球化学概论》。自此,地球化学作为一个新的学科已经建立。同期,В. И. 维尔纳斯基研究和论述了铀和钍两个放射性元素的地球化学,并作为重要组成部分纳入《地球化学概论》一书。

在这个阶段,J. B. 沃格特、R. J. 斯鲁特和 В. И. 维尔纳斯基等人的研究结果证明:酸性岩比基性岩含铀量高;沉积岩中的有机物质容易富集铀;铀在岩石中以吸附、分散、独立矿物和类质同象形式存在;铀与钍、镭、稀土等元素共生。R. J. 斯鲁特和 J. J. 乔利首先研究了放射性热能的地质地球化学作用,指出 U, Th, Ra 主要分布在地壳的上部岩石中。

1898~1930 年,上述学者陆续发表了地壳中 U, Th, Ra 的平均含量数据。但由于当时受测试水平所限制,因此所测数据与现代测定的克拉克值差别较大。

第二阶段,从本世纪 30 年代初到 50 年代末,是放射性元素地球化学蓬勃发展的时期。这个阶段的特点是:对铀在地壳和岩石中的分布量进行经验统计,对铀的地球化学性质和行为开展多方面研究,并对铀地球化学资料进行理论总结。

高灵敏度分析方法(荧光分析、放射化学分析和光谱分析)的应用、铀核裂变反应的发现和第一座原子核反应堆在美国建成,特别是核武器的出现,推动了原子能科学的发展。美国、前苏联、加拿大等国开展了大规模的、有计划的铀矿普查工作,铀地球化学资料作为铀矿普查的“副产品”不断丰富。部分学者初步测定了铀、钍在地壳中的克拉克值。铀为 $4 \times 10^{-4} \%$ (A. E. 费尔斯曼, 1933 年; K. 古德曼和伊文斯, 1941 年等);钍为 $(1.0 \sim 1.3) \times 10^{-3} \%$ 。研究出了用铀-铅同位素法测定岩石和矿物的年龄,并开展了该项工作。

B. И. 维尔纳斯基在《地球化学概论》(德文版,1930年;俄文版,1934年)、A. E. 费尔斯曼在四卷集《地球化学》(1934~1939年)和 S. T. 特菲弗在《铀地球化学》(科学进展,1946年)等著作中都较系统地论述了铀和钍在地壳中的分布、存在形式和变化特点。1933年,V. M. 戈尔德施密特根据他创立的晶体化学原理,所提出的晶体化学第一定律和元素的地球化学分类,对铀地球化学的发展有很大影响。

从50年代初期开始,不仅研究三大岩类中铀的含量及存在形式,还开展了铀矿物的合成与成矿作用的模拟试验,以及铀同位素和地壳中放射性热能的研究工作。E. W. 海因里奇、J. W. 格鲁纳、B. B. 谢尔宾纳、Д. И. 谢尔巴科夫、A. И. 维诺格拉多夫和 R. M. 加勒尔斯等编写了很多著作,总结和论述了铀在岩浆作用、热液作用和沉积作用中铀的地球化学行为。加勒尔斯等人还把热力学的化学平衡理论和 Eh - pH 图引入铀地球化学。1958年和1959年两次在日内瓦召开和平利用原子能会议,与会代表宣读了关于铀地球化学的多篇论文,推动了铀地球化学研究工作的发展。

各国学者还对铀的迁移形式和沉淀机制进行了研究。争论的核心是铀迁移的价态问题。P. E. 克尔(1915年)和 A. F. 别捷赫琴(1959年)提出铀在岩浆流体和热水溶液中以四价铀的卤素化合物形式迁移。Г. Б. 纳乌莫夫(1959,1963年)、B. B. 谢尔宾纳(1963年)、R. M. 加勒尔斯(1955年)等则认为铀以 UO_2^{2+} 离子及其络合物形式迁移。由于实验地球化学的发展,到50年代末期和60年代初期所积累的实验资料证明,铀主要以六价铀铬合物形式迁移。

第三阶段,从60年代初期开始到现在,是铀地球化学向深度发展的阶段。

50年代末期以前,铀地球化学是放射性元素地球化学的一个组成部分;从60年代初期开始,铀地球化学已逐渐发展成为有系统的理论和独立方法的学科,出版了一批有代表性的专著,如 A. B. 维诺格拉多夫(1963年)主编的《铀地球化学基本原理》,Л. С. 叶夫谢耶娃等人(1963,1974年)编著的《表生带铀的地球化学》,Г. Б. 纳乌莫夫(1978年)著的《铀矿成矿作用的物理化学模式原理》,以及 J. J. W. 罗杰斯、A. K. 李西钦和 Г. A. 西多连科等人的某些著作,都较深入地、系统地论述了铀地球化学的基本理论和研究方法。

该阶段铀地球化学发展的主要特征如下:

1. 在研究方法上引进和应用各种精密、灵敏和高效的分析技术,进行微量、微区观测和实验模拟研究,对获得的大量铀地球化学资料,采用电子计算机处理。
2. 在理论上广泛深入地引入基础科学的理论和成果,特别是无机化学、有机化学和化学热力学理论的引入和应用,提高了铀地球化学的研究水平和认识深度。
3. 在研究范围上全面深入地研究陆地和海洋中各种岩石、矿物、水体和生物中铀的含量和分布、分配特点,存在形式和结合规律。采用裂变径迹法测定了以前难以测量的超基性岩、基性岩和陨石中铀与钍的含量。
4. 对铀在各种地质作用,特别是成岩后生作用、变质作用和火山作用中的地球化学行为,成矿溶液中铀的来源、迁移形式和沉淀机制进行了较深入的研究。从50年代中期开始的铀矿物-溶液平衡体系的热力学分析和成矿作用的模拟试验得到了进一步发展。

1964和1972年在日内瓦召开了第三和第四次和平利用原子能的国际会议;1979年在维也纳召开了国际性“铀矿勘探实例讨论会”;1982年在巴黎召开了“铀矿勘探方法”讨论会;1987年在维也纳召开了“国际铀矿床成矿作用学术报告会”;1990年在北京召开了“亚太地区铀成矿省技术委员会会议”及学术讨论会。这些由国际原子能机构(IAEA)等组织召开的国际