

高等学校试用教材

铀地球化学

张祖还 赵懿英

章邦桐 沈渭洲

杜乐天

编

审

高等学校试用教材

铀地球化学

张祖还	赵懿英	编 审
章邦桐	沈渭洲	
杜乐天		

原子能出版社

内 容 简 介

本书比较系统地阐述了铀地球化学的基本内容，共十二章。

第一章为绪论。第二章至第六章阐述铀地球化学的基本概念；铀的物理性质和化学性质；铀的热力学和电化学；铀在自然界中的分布等。第七章至第十一章系统叙述铀在岩浆作用、伟晶作用、热液作用、外生作用、变质作用中的地球化学特征。第十二章简要介绍铀的地球化学演化史等。

本书可用作高等院校铀矿地质专业的试用教材，也可供科研、生产单位的地质人员参考。

高等学校试用教材

铀 地 球 化 学

张祖还 赵懿英 编
章邦桐 沈渭洲

杜乐天 审

责任编辑 姜利民

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

八九九二〇部队印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售



开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 13 ·字数344千字

1984年4月第一版·1984年4月第一次印刷

印数1—3800·统一书号：15175·528

定价：1.60元

前 言

本书是根据1978年6月在北京召开的放射性地质类教材大纲审查会议所审定的编写大纲编写的，可作为高等院校铀矿地质专业的试用教材。

本书共十二章，第一、十一、十二章由张祖还编写，第二、三章由沈渭洲编写，第四、五、八、九、十章由章邦桐编写，第六、七章由赵懿英编写。本书由赵懿英主编，由杜乐天审校。

李普洲同志曾担任过本书责任编辑，在此期间，对本书初稿进行了认真审读，做了一定修改，并且参加了审稿会，提出了许多具体修改建议。

在本书编写过程中，刘英俊、李兆麟、魏菊英、张富生等对本书的编写大纲提出了许多宝贵意见。毕木天对本书的第三、五章的初稿提出了宝贵意见。1980年11月在南京召开的审稿会上，南京大学地质系、成都地质学院、华东地质学院、合肥工业大学、北京铀矿地质研究所、长沙铀矿地质研究所、咸阳铀矿地质研究所及其他单位的与会代表详细审阅了书稿各章节的内容并提出了许多宝贵的修改意见。此外，在本书编写过程中，引用了北京铀矿地质研究所大量资料，孙维新提供了有关法国的铀地球化学资料，金景福提供了由王剑锋编写的铀地球化学讲义。全书插图由高秀英描绘。

对以上为本书编写给予很大帮助和支持的单位和个人一并在此表示衷心感谢。

限于编者水平，书中缺点错误在所难免，希望读者批评指正。

编者

1983年1月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 这门课的目的和意义	1
第二节 这门课的内容	2
第三节 这门课与其他学科的关系	2
第四节 铀地球化学发展简史	3
第五节 铀地球化学研究方法	7
一、一般研究方法	7
二、新的研究方法	8
第二章 铀地球化学的基本概念	12
第一节 铀的原子结构和铀在元素周期表中的位置	12
一、铀的原子结构	12
二、铀在元素周期表中的位置	12
三、铀在元素地球化学分类中的归属	15
第二节 铀地球化学的主要参数	16
一、铀的原子半径和离子半径	16
二、铀的电价	17
三、铀的电离能	19
四、铀的电负性	20
五、铀的离子电位	20
六、铀的配位数	22
第三节 铀在地壳中的存在形式	24
一、铀矿物	25
二、类质同象置换	26
三、分散吸附状态	30

第三章 铀的物理性质和化学性质	33
第一节 铀的物理性质	33
第二节 铀的化学性质	34
一、铀在水溶液中的氧化态	36
二、铀的水解作用	39
三、铀的化合物	42
第三节 铀的络合物化学	46
一、铀络合物的基本概念和形成过程	46
二、络合物的稳定性及其影响因素	49
三、铀的络合物	54
第四章 铀的放射性特征及其在地质中的作用	60
第一节 铀的放射性及其派生的地质现象	60
一、铀的放射性	60
二、矿物颜色的改变	61
三、色晕	63
四、变生作用	65
五、物理-化学变化	66
六、放射成因热及其地质意义	67
七、热释光现象	70
第二节 铀放射性系列的基本特征	72
第三节 铀的自发裂变、诱发裂变及其在地球化学中的应用	78
一、铀的自发裂变和诱发裂变	78
二、岩石、矿物中的自发裂变径迹及其观测	79
三、岩石、矿物中诱发裂变径迹的测定	81
四、裂变径迹技术在铀矿地质中的应用	81
第五章 铀及其化合物的热力学性质和氧化-还原电位	85
第一节 铀及其化合物的热力学性质	85
一、热力学基本概念	85
二、标准生成自由能 ΔG° 及其在地球化学中的应用	90

三、反应自由能 ΔG_r 及其应用举例	92
四、铀及其化合物（包括部分铀矿物）的热力学数据	96
第二节 氧化-还原电位	101
一、氧化-还原电位和酸碱度的基本概念	101
二、铀及常见伴生元素的氧化-还原电位	102
三、pH与Eh的关系	105
四、Eh-pH图解	107
五、Eh-pH- $\log \Sigma \text{CO}_2$ 立体图解	109
六、岩石、矿物的还原能力	110
第六章 铀在自然界的分布	114
第一节 铀在陨石和月岩中的分布	114
一、陨石中的铀分布及钍铀比值	114
二、月岩中的铀分布及钍铀比值	115
三、金星岩石中的铀、钍含量及钍铀比值	117
第二节 铀在地球中的分布	117
第三节 铀在各类岩石中的分布	119
一、铀在火成岩中的分布	119
二、铀在沉积岩中的分布	123
三、铀在变质岩中的分布	130
第四节 铀在天然水中的分布	135
一、海洋水的铀含量	138
二、湖水的铀含量	138
三、河水的铀含量	139
四、大气降水的铀含量	139
五、地下水的铀含量	140
第五节 铀在生物体中的分布	144
第七章 岩浆作用和伟晶作用中的铀地球化学	148
第一节 各类侵入岩的铀地球化学特征	148
一、超基性岩类和基性岩类的铀地球化学特征	149
二、中性岩类的铀地球化学特征	150

三、酸性岩类的铀地球化学特征	153
四、碱性岩类的铀地球化学特征	168
五、侵入岩与铀的成矿作用	173
第二节 火山岩的铀地球化学特征	174
一、火山岩的铀含量	174
二、火山岩中铀的分布	178
三、火山岩中铀的存在形式	182
四、火山岩的铀地球化学特征	182
五、火山岩与铀的成矿作用	185
第三节 伟晶作用中的铀地球化学	186
一、含铀伟晶岩的基本特征	186
二、伟晶岩中铀的分布及存在形式	188
三、伟晶作用中的铀地球化学特征	193
第八章 热液作用中的铀地球化学	198
第一节 含铀热液的组分及物理-化学条件	198
一、温度	199
二、压力	201
三、pH	202
四、Eh	203
五、含铀热液的组分及动态	204
第二节 热液中铀的迁移形式	214
一、概述	214
二、热液中铀的迁移形式	216
第三节 热液中铀的沉淀条件	224
一、Eh值的变化	224
二、pH值的改变	227
三、压力降低	229
四、温度变化	230
五、围岩成分的影响	232
六、吸附作用	235
七、共沉淀作用	236

第四节 热液铀矿床围岩蚀变的地球化学特征	237
一、概述	237
二、热液铀矿床中常见的几种围岩蚀变	239
三、围岩蚀变阶段的划分与分带特征	252
四、围岩蚀变与铀成矿的关系	260
第五节 热液成因和铀的来源	267
一、热液成因	267
二、热液中铀的来源	272
第九章 表生作用中的铀地球化学	279
第一节 影响铀表生迁移和聚集的主要因素	279
一、铀在表生带中的物理-化学性质	279
二、表生环境中Eh值和pH值的特点及其对铀地球 化学特征的影响	280
三、吸附作用	284
四、扩散作用	291
五、铀与有机物质的关系	294
六、微生物作用与铀的富集	298
第二节 铀在风化作用中的特征	301
一、风化作用中的铀地球化学特征	301
二、风化作用中铀的迁移性能	303
第三节 铀在沉积作用中的特征	306
一、沉积阶段中的铀地球化学特征	306
二、成岩阶段中铀的迁移、聚集和再分配	310
第四节 后生淋积作用中铀的迁移和聚集	313
一、影响铀后生聚集的主要因素	314
二、铀后生聚集的物理-化学条件	319
三、后生层间氧化带型铀矿床的地球化学分带	323
四、铀后生聚集的地球化学特征	328
第十章 铀矿床氧化带的地球化学基本特征	337
第一节 影响铀矿床氧化带发育的主要因素	338

一、气候	338
二、地形	339
三、构造	339
四、围岩性质及矿石的成分、结构和构造	339
第二节 铀在氧化带中的迁移形式和沉淀条件	341
一、硫酸铀酰	341
二、铀酰及氢氧合铀酰离子	342
三、碳酸合铀酰离子	343
第三节 铀矿床氧化带发育的阶段性	343
一、初期弱碱性阶段	344
二、弱酸-酸性阶段	347
三、晚期弱碱性阶段	350
第四节 铀矿床氧化带的垂直分带	351
一、完全氧化带	351
二、淋滤带	352
三、不完全氧化带	352
四、次生富集带	352
五、原生矿带	353
第五节 几类主要次生铀矿物的分布规律及其对找矿的指导意义	354
一、铀酰氢氧化物	354
二、铀酰硫酸盐	355
三、铀酰碳酸盐	355
四、铀酰硅酸盐	355
五、铀云母	356
六、铀酰钒酸盐	357
第十一章 变质作用中的铀地球化学	359
第一节 变质作用概述	359
一、热力变质作用	360
二、动力变质作用	361
三、区域变质作用	361

四、超变质作用	362
五、变质带和变质相的划分	362
第二节 区域变质作用中的铀地球化学	363
一、不同变质相带的铀含量变化	364
二、影响铀在区域变质作用中活化转移的地球化学因素	369
第三节 接触变质作用中的铀地球化学	372
第四节 超变质作用中的铀地球化学	375
第五节 铀的变质成矿作用	377
 第十二章 铀地球化学和同位素地质	
学在地质科学中的应用及其他	381
第一节 铀地球化学在铀矿地质工作中及地	
质科学其他领域中的作用	381
一、铀的分散晕在铀矿普查工作中的广泛应用	381
二、区域铀含量与含铀远景区的确定	382
三、铀地球化学在铀成矿理论研究上的重要作用	383
四、铀地球化学在地质科学其他领域中的作用	383
第二节 铀和其他元素的同位素地质学在铀矿地	
质工作中的应用	384
一、放射性同位素在铀矿床研究中的应用	384
二、稳定同位素在铀矿地质研究中的重要意义	386
三、铀成矿期与区域地质发展史的关系	388
第三节 铀地球化学演化史与铀矿床形成的关系	390
一、地球发展史和铀地球化学演化	390
二、热液铀矿床中铀的活动史	393
三、铀的表生地球化学演化史	393
四、变质作用中的铀地球化学演化史	396
五、铀在地壳中演化的基本规律	397
六、关于铀矿床的时控性问题	397

第一章 绪 论

第一节 这门课的目的和意义

铀地球化学是一门年轻的学科，在国际上，到了五十年代后期才列为高等院校的教学内容。在国内，六十年代曾出版过长春地质学院等编写的作为试用教材的《放射性元素矿物学和地球化学》一书，其中放射性元素地球化学部分所占篇幅较少。为了更好地满足教学的需要，1978年于北京召开的放射性地质类教材会议上决定编写《铀地球化学》。

铀地球化学阐述铀在各种地质作用中的行为以及铀在地壳演化过程中迁移、聚集和分布的规律，因而它是探讨各种类型铀矿床成矿作用的理论基础。例如研究铀在岩石、矿石中的存在形式，各种铀矿物的形成条件，成矿溶液的性质，铀在成矿溶液中迁移及沉淀的物理-化学条件，控制成矿的内部和外部因素，各种铀矿床在时间和空间上的分布规律等一系列重要理论问题，都要涉及到铀本身的地球化学性质及其在自然界的活动规律。因此，铀地球化学在铀矿地质研究中具有很重要的意义。

近年来的研究表明，在探索地壳的形成及演化史方面，铀具有很重要的意义。这是因为铀具有下述地球化学特点：①铀是非常活泼的变价元素，它在地壳发生变动的过程中，在环境氧化-还原电位或其他物理-化学条件改变时，极易迁移或沉淀。②铀在地壳中分布广泛，虽然含量很低，但采用现代分析技术完全能够准确地测定出来。③铀是放射性元素，人们根据它的放射性衰变规律，能较准确地测定出地质事件发生的时间。④铀在放射性衰变过程中不断释放出一定的能量。在漫长的地质历史中，能量不

断聚积，成为地壳运动最根本的驱动力之一。所以，人们常把铀当作一种示踪元素，用来追索地球演化过程中所发生的各种重大地质事件。

此外，铀地球化学找矿方法经过长期的实践和不断改进，现在已经比较成熟，成为铀矿普查勘探的一种常用手段。铀的区域地球化学研究，对于圈定含铀远景区具有重要意义，在国外已经广泛地开展。在上述领域中，铀地球化学基本原理都已得到广泛应用。因此，每一个铀矿地质工作人员，都必须对铀地球化学的基本理论有所了解。

第二节 这门课的内容

全书分十二章。第一章为绪论。第二章至第五章是铀地球化学基础理论部分，这部分介绍铀原子的结构，铀的主要地球化学参数和铀的物理性质和化学性质等；近年来各种新的研究方法（如放射性同位素、热释光、裂变径迹等方法）和物理-化学基础理论（如热力学基本定理）等在铀地球化学领域中的广泛应用，大大推动了铀地球化学基础理论的发展。第六章介绍铀在自然界的分布；这些年来国际上对天体（如陨石和月岩等）和地球的各个部分，包括地幔、地壳（岩石圈）、水圈、生物圈及大气圈都进行了研究，积累了大量的铀含量分析数据。其中关于地球各部分的铀含量数据，对于探讨铀在自然界的迁移和聚集具有非常重要的意义。第七章至第十一章是本门课的重点，主要介绍铀在岩浆作用（包括伟晶作用）、热液作用、外生作用和变质作用等地质作用中的地球化学特征。第十二章扼要介绍铀地球化学和同位素地质学在地质科学中的应用以及铀地球化学演化简史。

第三节 这门课与其他学科的关系

本门课与物理、化学等基础理论课和地质学的基础课、专业

课都有密切的联系。

在基础理论课中，化学是本门课的主要基础理论课。在本书第二章至第五章中就应用了很多化学知识，特别是物理-化学的知识，要求读者在学习本门课以前能对化学和物理化学方面的知识有较好的掌握。本门课应用了原子核物理的基础知识，因此在学习本门课以前需要有一定的物理和放射性物探的基础知识。

在地质基础课方面，本门课和普通地质学、结晶矿物学、岩石学、地史学、构造地质学、矿床学、普通地球化学等都有较密切的联系。读者在学本门课以前，应当对上述地质基础课有较好的掌握。其中普通地质学、结晶学和岩石学是主要的基础课，只有在掌握这些基础课的基础上，才能学好本书的内容。地史学和构造地质学是区域地质研究的主要内容，也是阐明地壳发展和演化的主要依据。因此，在学习本书中铀在地壳中的迁移和聚集规律以及铀地球化学演化史等内容时，必须具有地史学和构造地质学的基础理论知识。铀是一种金属元素，它在地壳中的迁移和聚集往往跟某些金属和非金属元素有密切的联系。关于金属和非金属元素的一般成矿理论和地球化学规律，在很多方面同样适用于铀元素。因此要学好铀地球化学，必须掌握普通地球化学和矿床学的基本理论知识。

在地质专业课方面，铀矿物学和铀矿床学同本门课互相配合，互相补充，互相渗透，相辅相成。所以要学好本门课，必须对这两门主要专业课有较好的掌握，这样才能收到良好的学习效果。

第四节 铀地球化学发展简史

从德国矿物化学分析家克劳普洛特 (Klaproth, M.H.) 在1789年发现铀以来，到现在已经有190多年，但铀地球化学这门新的学科是到最近30多年才得到迅速地发展。根据化学和物理学

方面有关铀的3次重大发现，即铀元素的发现，铀放射性的发现以及铀原子核裂变的发现而将铀地球化学发展简史划分为以下3个发展阶段：

第1阶段（1786—1896年） 这一阶段从1786—1789年发现铀到1896年发现铀的放射性为止，经历了一百多年的时间。克劳普洛特于1789年在欧洲中部矿石山的银矿废石堆中找到沥青铀矿，经过化学分析试验而发现铀，并将铀作为一个新的元素。但当时所发现的仅仅是铀的氧化物。经过50多年以后，法国化学家毕里哥（Péligot, E.M.）才第一次在实验室中用化学方法获得金属铀。长期以来，对铀元素的研究只是阐明铀的化学性质以及找寻含铀的原生和次生矿物。在纺织工业、玻璃工业和陶瓷工业中，人们将铀作为染色剂加以利用，但所需数量很少，因此未能引起人们足够的重视。关于这一时期铀研究的发展历史，基尔施海默（Kircheimer, F., 1963*）有专门著作加以介绍。

第2阶段（1896—1939年） 从发现铀的放射性到发现铀原子核裂变，经历了40年左右。在此期间，通过对铀放射性的研究，奠定了现代原子能的理论基础。1896年贝克勒尔发现铀矿物会放出射线。继此之后，居里夫妇继续对各种铀矿物进行试验，从而发现了放射性比铀更强的镭和钋两种新元素。1900年发现了 ^{220}Rn ， ^{222}Rn 和 ^{219}Rn 3种放射性射气。1905年以后，施却特（Strett, R.）等开始研究、测定岩石中放射性元素的含量，并初步阐明了岩石中放射性元素分布的某些规律性，即酸性岩一般比基性岩和超基性岩富含放射性元素。在沉积岩中，海相碳酸盐岩石和蒸发岩的放射性元素含量最低。在同一时期中，开始利用放射性元素的衰变规律，建立起铀-铅同位素地质年龄的测定方法。

第3阶段（1939年至今） 在这一时期，铀地球化学已逐渐

* 系指年份，下同。——编者注

成为一门独立的学科进入现代发展阶段，进展非常迅速。1939年发现铀原子核裂变可以释放出巨大的能量，从而开创了人类利用核能的广阔远景。核能首先被用来制造威力强大的核武器，其次被广泛用于核电站发电，作原子破冰船的动力等等，目前，核能在国民经济中已得到广泛应用，并成为能源结构中的一个重要组成部分。随着核能的广泛应用，对核燃料的需求量越来越大，因而自四十年代以来，掀起过两次普查铀矿的高潮，并相继在加拿大、美国、法国、苏联、澳大利亚等国家发现了许多大型铀矿床。在找矿、勘探和开采铀矿的实践中，人们对铀地球化学的研究逐渐深入，铀地球化学的理论得到了进一步的发展。五十年代前后，砂岩型铀矿床的大量发现和开采，促进了外生作用中铀地球化学的研究，并取得了很多成果。在详细研究铀地球化学性质和水溶液中铀-钒、铀-铁、铀-硒等体系矿物平衡条件的基础上，阐明了地下水中铀在氧化-还原界面上富集的规律，同时提出了层间氧化带铀矿床的成矿模式，并进行了卷状铀矿体形成的模拟试验，从而创立了淋积成矿理论。这种理论应用于找矿实践，相继在日本、尼日尔、法国、加蓬等国家陆续发现了具有工业价值的砂岩型铀矿床。

此外，铀地球化学工作者还对许多花岗岩体中铀的存在形式作了系统的研究。通过浸出试验，发现花岗岩中有相当一部分铀易被稀酸和天然水溶液浸出，这一发现为铀的活化转移理论提供了依据。

1955年和1958年，联合国组织在日内瓦召开的两次和平利用原子能会议上，各国的铀矿地质工作者提出了许多有关铀地球化学的论文。尔后，苏联和美国分别出版了《表生带铀的地球化学》

（叶甫谢耶娃等，1962）、《铀地球化学的基本特征》（屠格林诺夫等，1963）、《溶液、矿物和平衡》（加勒斯，1965）及《铀、钍地球化学手册》（罗杰斯等，1969）等专门著作，这标志着铀地球化学已发展成为一门独立的学科。

近20年来,随着各种新的研究方法在铀地球化学研究工作中的应用,铀地球化学这门年轻的学科得到了蓬勃发展。近年来在矿床地球化学领域中,铀地球化学研究工作也有了较大进展。这着重表现在以下几个方面:

由于火山岩型铀矿床和变质岩中铀矿床的大量发现,火山作用和区域变质作用中铀地球化学特征,得到了深入研究。对火山岩中铀地球化学的研究表明,铀主要集中在玻璃基质中,一般很难浸出,但在火山玻璃脱玻化和重结晶的过程中,晶体的自纯化作用会引起部分铀活化转移。这对火山岩型铀矿床的成因解释很有意义。大量样品的分析测试结果表明,区域变质作用引起岩石中铀的贫化。从原岩中活化转移出来的铀向压力较低、变质程度较浅的岩石迁移。变质作用中铀的活化转移理论对区域铀地球化学研究和铀远景区的确定具有重要的意义。

在这一时期内,对花岗岩型铀矿床地球化学特征的研究也有了重大进展:查明了品质铀矿呈显微或超显微包裹体广泛分布于产铀矿岩体中;确定了矿岩时差*的存在;以及获得了大量氧、硫、铅、铈等稳定同位素的研究成果。因此,人们对含铀热液的来源和性质发表了许多新的看法,提出了各种不同的成矿模式。在花岗岩型铀矿床地球化学特征研究方面,我国和法国的铀矿地质工作者做出了较多的贡献。最近,我国出版了《花岗岩型铀矿文集》。

在矿物气液包裹体成分测定和铀矿物及铀化合物热力学数据积累的基础上,对热液铀矿床形成的物理-化学条件的研究,开始由定性描述进入定量计算的阶段。《火山洼地铀矿床》(屠格林诺夫主编,1972)和《铀成矿作用的物理-化学模式原理》(纳乌莫夫,1978)等专著比较系统地阐述了这方面的问题。

国际原子能机构以及美国、加拿大、澳大利亚、英国等曾多

* 矿岩时差表示含矿主岩和铀矿物在形成年龄上的差值。