

〔英〕M. 伊凡诺维奇 R. S. 哈蒙 主编

铀放射系的 不平衡及其 在环境研究 中的应用

海 洋 出 版 社

铀放射系的不平衡 及其在环境研究中的应用

〔英〕 M. 伊凡诺维奇 主编
R. S. 哈蒙

陈铁梅 赵树森 原思训 译
严正 王祥云 刘明林

海 洋 出 版 社

1991年·北京

内 容 简 介

铀 (^{238}U 、 ^{235}U) 放射系包括12种元素, 30多种核素, 铀系成员间的放射性平衡的破坏与重建现象遍及自然环境的各个方面。

本书由国外19位在本领域有影响的学者合作编写。全书共19章, 系统地介绍了铀系不平衡的理论、实验方法与技术, 总结了近30年来铀系不平衡方法在地质学、海洋学、水文学、地球化学、同位素年代学、考古学及环境科学等学科的应用, 对本领域的发展前景作了展望。本书可供上述学科的研究人员及大专院校有关师生参考。

责任编辑 盖广生

责任校对 刘兴昌

铀放射系的不平衡及其在环境研究中的应用

M. 伊凡诺维奇 主编
英 } R.S. 哈 蒙
失梅 赵树森 原思训 译
正 王祥云 刘明林

•

海洋出版社出版 (北京市复兴门外大街1号)

新华书店北京发行所发行 昌平兴华印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 26.125 字数: 598千字

1991年7月第一版 1991年7月第一次印刷

印数: 1—600

•

ISBN 7-5027-0280-6/P·40 定价: 18.90元

中译本序言

我们编写本书的目的是为了全面地评述铀放射系不平衡现象的理论、实验分析方法以及该现象在环境研究各学科中的广泛应用状况。书的内容应反映本领域最新的研究课题与成果，同时也能作为一本参考工具书。我们心目中的读者既包括地球科学各专业的学生，也包括很多领域的实际工作者，因为对于后者来说，铀放射系的不平衡现象作为测年手段或者作为地球化学示踪剂具有特殊的意义。

我最近访问了中国，很高兴地获知在中国已有十个铀放射系不平衡实验室在积极工作，它们涉及诸如岩溶地质、水文地质、第四纪地质、海洋和考古等众多的研究领域。我将引以为荣的是：本书的中译本将会有为数甚多的读者，并将为我们的中国同行们为本领域必将取得的成就作出微薄的贡献。我以极大的兴趣期待着在最近的将来有新的进展。

M. 伊凡诺维奇

于英国哈威尔实验室 1987年7月

译者的话

铀作为亲石元素普遍地存在于地壳中，而六价铀的易溶性使它广泛地参与地表及近地表环境中的各种地球化学过程，特别是陆相和海相的沉积过程。这些过程不仅可以导致铀系各元素间的分离，而且还可能导致同一元素的同位素之间的分馏。

因此，铀及其子体是研究火成及沉积等过程的良好示踪剂。与稳定的示踪核素相比，这些放射性示踪剂探测灵敏度高、污染本底低，而且把时间因子引入被示踪过程，即在揭示被示踪过程的物料平衡的同时，还能提供关于过程速度的信息。例如海水中 ^{234}U 相对于 ^{238}U 的过剩， ^{230}Th 和 ^{231}Pa 在海水中的亏损和在沉积物中的过剩，有助于了解海洋物质的来源、运移和积聚，以及这些核素在海洋中的停留时间等。

铀、钍系包括一系列不同半衰期的核素，因此其测年范围甚广，从几天到一百万年。可用于铀系法测年的样品种类繁多，包括各种成因的自生碳酸盐、磷酸盐和硫酸盐，海洋和湖泊的沉积物，骨化石和古土壤等。目前它是测定近代沉积物，以及是在4万年(^{14}C 方法测年的极限值)至35万年的年代范围内的最佳年代学方法。研究第四纪气候旋回、海平面升降等的绝对时标主要是由铀系法提供的。

铀系不平衡方法也应用年轻火山岩年代的测定、岩浆运移和演化的示踪，铀矿的勘探、地震预报乃至核废料的贮存和环境保护。铀系不平衡研究是一年轻的学科分支，它的发展仅30年历史，而铀系涉及12种元素和30多种放射性核素，它们在环境中的地球化学行为还有很多方面是未知的，因此它的发展与应用有着十分广阔的前景。

我国开展铀系不平衡的研究和应用主要是在80年代，但发展甚快，研究的课题已涉及深海和近海的沉积速率，港湾的选址，地下水的示踪和年龄，岩溶发育以及建立我国旧石器文化年表等多方面。

本书是铀系不平衡研究的一部较完整和系统的最新专著，全面总结了1981年以前的研究成果，展望了近期的发展。本书由19位在本领域内有影响的学者撰写，它不是一本论文集，而是根据统一计划和规格编写的，因此前后连贯，易于阅读，同时又保留了各作者有争议的观点。全书共19章，前三章介绍放射性现象、铀系核素的地球化学和铀系地质年代学，这构成了全书的理论基础。第4、5章总结了本领域的分析测量技术。第6—14章和15—18章分别介绍了应用铀系不平衡方法于大陆与海洋环境各方面的研究。最后第19章是现状的总结和未来的展望。我们愿将本书推荐给从事地质学、海洋学、地球化学、同位素地质年代学、水文学、古气候学和考古学研究的读者，他们将会发现把铀系不平衡方法应用于各自的研究领域是十分有益的。

本书第1、3、5、12、19章由陈铁梅译，7、9、10、11章由赵树森译，2、4、15章由原思训译，13、16、17、18章由严正译，8、14章由王祥云译，刘明林译第6章，杨基方、蔡莲珍、陈铁梅、王祥云参加了本书校对，全书由陈铁梅统校。原书中个别欠妥之处已根据我们的理解改正或加注。由于我们水平所限，译校中不妥之处敬希批评指正。

序 言

放射性现象的发现至今还不到一百年,但它已成为地球科学革命的基础,这一革命至今还在继续。在本世纪的前二十五年,这一领域的早期工作证实了 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 等长寿命核素的衰变系包括了多种物理和化学性质不同的元素的放射性同位素。然而只是在最近的25年中才认识到由于近地表环境中发生的地球化学过程,使这些衰变链可能被打断,母体与子体核素可能发生分离。这一认识加快了应用天然放射性不平衡现象的前进步伐,应用的范围也愈益多样化,涉及地质学、海洋学、水文学、古气候学和考古学中广泛的研究课题。Cherdynstev(1971)发表了这一领域中的第一部专著,他综述了在近地表环境中U和Th系核素的地球化学行为和它们所遵循的基本物理定律。正是这些定律和行为导致了天然存在的放射性不平衡。该书主要是根据Cherdynstev本人和他的苏联同行们的工作编著的。Cherdynstev专著的特点反映了对本领域许多课题所表现的想像力与洞察力。最近10年来,铀系不平衡研究的范围迅速扩大,我们认为现在编写一本书以便对25年来的一般进展作一回顾,特别是对最近的发展与应用作一最新的总结是适时的。

本书关于自然界存在的 ^{238}U 和 ^{235}U 衰变系的放射性不平衡,是为对自然环境中的U有兴趣的科学工作者和技术人员写的。本书的编写既考虑了已从事铀系研究的专家和有志于进入铀系某一方面研究的高等学校学生,又考虑了对本研究领域有一般兴趣的非本专业人员。因此本书兼顾了详尽性和概括性两个方面。虽然阅读本书的读者应有一定的物理学、化学和地质学的知识,但是为了帮助读者了解和应用较为专门的章节,本书在相应的地方提供必要的背景解释。

本书将对U系不平衡的理论、实验方法和在环境科学课题中的广泛应用作综合讨论。主要目的在强调多样性,即U系不平衡现象能应用于多种学科和多方面的研究课题。为了实现这一目的我们请了多位作者共同编写,这样可以充分反映相应领域中著名学者的知识与经验。全书统一的文体与格式将使本书免沾那种各章节之间往往互不衔接而只有表面联系的论文集式的通病,使本书在便于阅读的同时,仍保留了各作者不同的观点与看法。我们衷心希望读者既可将本书当作参考课本,又能用作本领域的手册,并促进他们将铀系不平衡应用于他们自己感兴趣的研究课题中。

M.伊凡诺维奇

R.S.哈蒙

于哈威尔,基尔布赖德

1981年1月

前言

为了方便读者,全书使用统一的符号,并制表列出了所用符号、单位以及含铀和钍的矿物名称。这些符号与单位兼顾了习惯用法和国际纯化学和应用化学联合会(International Union of Pure and Applied Chemistry)推荐的用法。各章所引文献统一编排目录列于全书的最后。文献目录也是一个索引,每篇文献后注明了引用本文献的章节。

本书收稿时间是1980年3月至1981年1月,共19位作者编写了19章。全书可分成五部分,第一、二、三章包括了核理论、地球化学和地质年代学,它们组成了其余各章的理论基础。第四、五章涉及分析与测量技术,这两章可作为有志于本领域工作的非专业人员的实用手册。随后的两个主要部分分别讨论U系不平衡应用于大陆环境(第六到十四章)和海洋环境(第十五到十八章)。每部分的头一章提供了相应的地球化学基础,中间各章讨论影响各种特定环境中核素间关系的有关过程,后面各章重点研究铀系不平衡在各种环境一些专门方面的应用。全书最后一章,即十九章是对目前本领域技术发展水平的综述和对未来的展望。书后的五个附录是关于几个问题的较详细的数学推导。附录一是放射性年龄基本方程的推导,附录二是5.4节中讨论的核统计学的实例,附录三、四相应给出 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 和 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 测年方法中计算年龄的计算机程序,附录五是第十章讨论的U趋势模型的有关方程式。

本书作者姓名与单位

1. C. J. Bland (C. J. 布兰德) 加拿大艾伯塔省, 卡尔加里大学物理系
2. W. C. Burnett (W. C. 伯内特) 美国佛罗里达州 32306, 塔拉哈西, 佛罗里达州立大学海洋学系
3. J. K. Cochran (J. K. 科克伦) 美国马萨诸塞州 02543, 伍兹霍尔海洋研究所
4. J. B. Cowart (J. B. 科沃特) 美国佛罗里达州 32306, 塔拉哈西, 佛罗里达州立大学地质系
5. M. Gascoyne (M. 盖斯科因) 加拿大安大略省 L85 4M1, 汉密尔顿, 美因西路 1280, 麦克马斯特大学地质系
6. R. S. Harmon (R. S. 哈蒙) 英国苏格兰东基尔布赖德 G75 0QU, 苏格兰大学研究及反应堆中心同位素地质部
7. M. Ivanovich (M. 伊凡诺维奇) 英国奥克桑 OX11 0RA, 哈威尔原子能研究中心, 7 栋, 核物理部
8. T. -L. Ku (顾德隆) 美国加利福尼亚州 90007, 洛杉矶, 南加州大学地质科学系
9. A. E. Lally (A. E. 拉利) 英国奥克桑 OX11 0RA, 哈威尔原子能研究中心, 364 栋, 环境和医学科学部
10. C. Lalou (C. 拉鲁) 法国 91190, 吉夫-絮-伊维特, 国家科学研究中心-原子能委员会, 弱放射性中心
11. A. A. Levinson (A. A. 莱文森) 加拿大艾伯塔省, 卡尔加里, 卡尔加里大学地质系
12. R. L. Lively (R. L. 莱夫利) 美国明尼苏达州 55108, 圣保罗, 尤斯提斯大街 1633, 明尼苏达地质调查所
13. W. S. Moore (W. S. 穆尔) 美国南卡罗来纳州 29208, 哥伦比亚, 南卡罗来纳大学地质系
14. J. K. Osmond (J. K. 奥斯蒙德) 美国佛罗里达州 32306, 塔拉哈西, 佛罗里达州立大学地质系
15. J. N. Rosholt (J. N. 罗肖尔) 美国科罗拉多州 00225, 丹佛, 联邦中心美国地质调查局
16. H. P. Schwarcz (H. R. 施瓦兹) 加拿大安大略省 L85 4M1, 汉密尔顿, 美因西路 1280, 麦克马斯特大学地质系
17. M. Scott (M. 斯科特) 美国得克萨斯州 77343, 学院站, 得克萨斯农业和机械大学海洋学系
18. B. J. Szabo (B. J. 萨博) 美国科罗拉多州 00225, 丹佛, 联邦中心美国地质调查局
19. H. H. Veeh (H. H. 维埃) 澳大利亚 SA5042, 南澳大利亚州贝德福公园, 弗林德斯大学物理科学学院

本书所用符号

A	质量数, 某种原子核中的核子总数
Z	原子序数, 某种原子核中的质子数, 即核的电荷量
N	中子数, 等于 $(A - Z)$
λ	衰变常数, 代表单位时间内衰变的放射性原子的分数
$t_{1/2}$	放射性核素的半衰期
t	时间
B	核的结合能
B/A	每个核子的平均结合能
N_A	阿佛加德罗常数 (6.023×10^{23})
M_H	氢原子质量 ($1.008142u$)
M_n	中子质量 ($1.008982u$)
m_e	电子静止质量 ($0.5488 \times 10^{-3}u \equiv 9.108 \times 10^{-31}kg$)
T	动能
c	光速 ($2.99776 \times 10^8 m/s$)
$\ln$	自然对数
e	自然对数的底 (2.718281828)
$\log$	以10为底的对数
π	圆周率
Σ	求和符号
Δ	增量
E_b	氧化还原电位
pH	氢离子活度对数的负值
M	摩尔
STP	标准温度和标准压力
δ	同位素比值相对于标准的千分偏差
下角标 0	表示初始状态
上角标 0	表示标准状态
上角标 nnn	核素符号的上角标, 表示该元素某种特定的同位素 (例 ^{234}U 表示核素的质量数为234)
下角标 nnn	λ 的下角标, 表示质量数 (例 λ_{234} 代表 ^{234}U 的衰变常数)
上角标 $n+$	表示离子价态 (例 U^{6+} 表示六价铀离子)
下角标 l, v, s, m	相应表示液-汽、固和熔融相

本书所用单位

除热量单位用 Cal 表示和放射性单位外, 本书一律采用中华人民共和国法定计量单位。

能量

J 焦耳

eV 电子伏特 ($1\text{eV} \approx 1.602 \times 10^{-19} \text{J}$)

keV 千电子伏特

MeV 兆电子伏特 ($1\text{MeV} \approx 0.001074 \text{u}$)

质量

u 原子质量单位 ($1\text{u} \approx 931.56 \text{MeV} \approx 1.6605655 \times 10^{-27} \text{kg}$)

kg 千克, SI基本单位 ($1\text{kg} = 10^3 \text{g} = 10^6 \text{mg} = 10^9 \mu\text{g}$)

g 克

mg 毫克

μg 微克

物质的量

mol 摩尔, SI基本单位

长度

km 千米 (公里 $1\text{km} = 10^3 \text{m}$)

m 米, SI基本单位 ($1\text{m} = 10^2 \text{cm} = 10^3 \text{mm} = 10^6 \mu\text{m} = 10^9 \text{nm}$)

cm 厘米

mm 毫米

μm 微米

nm 纳米

体积

L 升 ($1\text{L} = 10^{-3} \text{m}^3$)

mL 毫升 ($1\text{mL} = 10^{-3} \text{L}$)

μL 微升 ($1\mu\text{L} = 10^{-6} \text{L}$)

质量浓度

ppm 百万分之几 (例 $\mu\text{g/g}$, mg/kg)

ppb 十亿分之几 (例 $\mu\text{g/kg}$, $\sim \mu\text{g/L}$)

时间

Ma 兆年 (距今 10^6a)

ka 千年 (距今 10^3a)

a 年

d 天

h 小时

min 分

s 秒, SI基本单位

电学

V 伏特, 电压单位

A 安培, SI基本电流单位

Ω 欧姆 电阻单位 $\Omega = V/A$

$\Omega \cdot m^2$ 电阻率单位

温度

$^{\circ}C$ 摄氏度

放射性活度

dpm 每分钟衰变数

cpm 每分钟计数

Ci 居里, 它与SI基本单位贝可勒尔Bq间的换算关系为 $1Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$, 同时每居里相当于 $2.22 \times 10^{12} dpm$

mCi 毫居里 ($1mCi = 10^{-3} Ci$)

μCi 微居里 ($1\mu Ci = 10^{-6} Ci$)

nCi 纳居里 ($1nCi = 10^{-9} Ci$)

pCi 皮居里 ($1pCi = 10^{-12} Ci$)

放射性浓度或比度

$\mu Ci/L$ 每升微居理数

pCi/L 每升皮居理数

dpm/g 每克每分钟衰变数

dpm/L 每升每分钟衰变数

铀为主要组分的矿物表

(根据Rogers 和 Adams 1970年资料)

<i>Oxide</i>	氧化物类	
Becquerelite	深黄铀矿	$7\text{UO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Billietite	黄钼铀矿	$\text{BaO} \cdot 6\text{UO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$
Clarkeite	内钠铀矿	$(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}, \text{Pb})_2\text{U}_2\text{O}_7 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Compreignacite	水钾铀矿	$\text{K}_2\text{O} \cdot 6\text{UO}_2 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ (Protas, 1964)
Curite	板铅铀矿	$3\text{PbO} \cdot 8\text{UO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Fourmarierite	红 铀 矿	$\text{PbO} \cdot 4\text{UO}_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Ianthinite	水斑铀矿	$\text{UO}_2 \cdot 5\text{UO}_3 \cdot 10.56\text{H}_2\text{O}$
Gummite	脂铅铀矿	UO_3
Schoepite	柱 铀 矿	$2\text{UO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Uraninite	沥青铀矿	UO_2
Uranospherite	红铋铀矿	$(\text{BiO})(\text{UO}_2)(\text{OH})_3(?)$
Vandenbrandeite	绿 铀 矿	$\text{Cu}(\text{UO}_2)\text{O}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Vandendriesscheite	橙水铀铅矿	$\text{PbO} \cdot 7\text{UO}_3 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
<i>Phosphates-Arsenates</i>	磷酸盐类-砷酸盐类	
Abernathyite	水铯钾铀矿	$\text{K}_2(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Arsenuranylite	水铯铀矿	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_4(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Autunite	钙铀云母	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8-10\text{H}_2\text{O}$
Bassetite	铁铀云母	$\text{Fe}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Bergelite	钼磷铀矿	$\text{Ba}(\text{UO}_2)_4(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Dewindtite	磷铅铀矿	Doubtful Pb, uranyl phosphate
Dumontite	水磷铀铅矿	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Hallimondite	砷铀铅矿	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
Heinrichite	砷钼铀矿	$\text{Ba}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$
Hagelite	砷铅铀矿	$\text{Pb}_2(\text{UO}_2)_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Kahlerite	黄砷铀铁矿	$\text{Fe}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Lermontovite	水铯铀磷钙石	$(\text{U}, \text{Ca}, \text{TR})_3(\text{PO}_4)_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Meta-autunite	准钙铀云母	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 6-8\text{H}_2\text{O}$
Metaheinrichite	准砷铀钼矿	$\text{Ba}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Metakahlerite	准砷铀铁矿	$\text{Fe}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Meta-kirchheimerite	准砷钴铀矿	$\text{Co}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Metanovacekite	准水砷镁铀矿	$\text{Mg}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Metatorbernite	准铜铀云母	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 6-8\text{H}_2\text{O}$
Meta-uranocircite	准钼铀云母	$\text{Ba}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Meta-uranospinite	准砷钙铀矿	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Metazucconite	准翠砷铜铀矿	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$

续 表

Novacekite	水铯铀矿	$Mg(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 8-10H_2O$
Parsonsite	斜磷铅铀矿	$Pb_2(UO_2)_3(PO_4)_2(OH)_4 \cdot 7H_2O$
Phosphuranylite	磷铀矿	$Ca(UO_2)_4(PO_4)_2(OH)_4 \cdot 7H_2O$
Przhevalskite	水磷铅铀矿	$Pb(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 2H_2O$
Renardite	黄磷铅铀矿	$Pb(UO_2)_4(PO_4)_2(OH)_4 \cdot 7H_2O$
Sabugalite	铝钙铀云母	$HAl(UO_2)_4(PO_4)_4 \cdot 16H_2O$
Salceite	镁磷铀云母	$Mg(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8-10H_2O$
Torbernite	铜铀云母	$Cu(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 12H_2O$
Troegerite	铀矿	$H_2(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$
Uramphite	铀铈磷石	$NH_4(UO_2)(PO_4) \cdot 3H_2O$
Uranocircite	钼铀云母	$Ba(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot 8-10H_2O$
Uranospathite	水磷铀矿	$Cu(UO_2)_2(AsO_4, PO_4)_2 \cdot 16H_2O(?)$
Uranospinite	铀钙铀矿	$Ca(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 10H_2O$
Walpurgite	铀铈铋矿	$Bi_4(UO_2)(AsO_4)_2 \cdot 3H_2O$
Zeunerite	翠铀铜铀矿	$Cu(UO_2)_2(AsO_4)_2 \cdot 8-10H_2O$
Carbonates		
Andersonite	水钠钙铀矿	$Na_2Ca(UO_2)(CO_3)_2 \cdot 6H_2O$
Bayleyite	菱铀矿	$Mg_2(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 18H_2O$
Liebigite	铀钙石	$Ca_2(UO_2)(CO_3)_2 \cdot 10-11H_2O$
Rabbittite	针钙铀矿	$Ca_3Mg_3(UO_2)_2(CO_3)_6(OH)_4 \cdot 18H_2O$
Rutherfordine	菱铀矿	$(UO_2)(CO_3)$
Schoeckingerite	板菱铀矿	$NaCa_3(UO_2)(CO_3)_3(SO_4)F \cdot 10H_2O$
Sharpite	水菱铀矿	$(UO_2)(CO_3) \cdot H_2O(?)$
Swartzite	水钙铀矿	$CaMg(UO_2)(CO_3)_3 \cdot 12H_2O$
Wyartite	水碳酸钙铀矿	$3CaO \cdot UO_2 \cdot 6UO_3 \cdot 2CO_2 \cdot 12-14H_2O$
Sulfates		
Johannite	铀铜矾	$Cu(UO_2)_2(SO_4)_2(OH)_2 \cdot 6H_2O$
Uranopilite	铀钙矾	$(UO_2)_6(SO_4)(OH)_{10} \cdot 12H_2O$
Zippeite	水铀矾	Near $2UO_3 \cdot SO_3 \cdot 5H_2O$
Vanadates		
Carnotite	钒钾铀矿	$K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 1-3H_2O$
Ferghanite	水钒铀矿	$U_3(VO_4)_2 \cdot 6H_2O$
Francevillite	黄钒铀铈铅矿	$(Ba, Pb)(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 5H_2O$
Metatyuyamunite	准钙钒铀矿	$Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 5-7H_2O$
Rauvite	水钙钒铀矿	$CaO \cdot 2UO_3 \cdot 2V_2O_5 \cdot 16H_2O(?)$
Sengierite	水钒铀矿	$Cu(UO_2)(VO_4)(OH) \cdot 4-5H_2O$
Tyuyamunite	钙钒铀矿	$Ca(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 7-11H_2O$
Uvanite	钒铀矿	$U_2V_6O_{21} \cdot 15H_2O(?)$
Vanuralite	钒铝铀矿	$Al_2O_3 \cdot 2V_2O_5 \cdot 4UO_2 \cdot 17H_2O$
Silicates		
Beta-uranophane	β硅钙铀矿	$Ca(UO_2)_2(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$

续 表

Boltwoodite	硅钾铀矿	$K_2(UO_2)_2(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$
Coffinite	水硅铀矿	$U(SiO_4)_{1-x}(OH)_x$
Cuprosklodowskite	硅铜铀矿	$Cu(UO_2)_2(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$
Gastunite	水硅钾铀矿	Ca, Pb, uranyl silicate
Kasolite	硅铅铀矿	$Pb(UO_2)(SiO_3)(OH)_2$
Orlite	水硅铀铅矿	$3PbO \cdot 3UO_3 \cdot 4SiO_2 \cdot 6H_2O$
Piibarite	硅铀铅钍矿	$UO_3 \cdot PbO \cdot ThO_2 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O(?)$
Ranquillite	多水硅铀钙石	$1.5 CaO \cdot 2UO_3 \cdot 5 SiO_2 \cdot 12H_2O$
Sklodowskite	硅镁铀矿	$Mg(UO_2)_2(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$
Soddyite	硅铀矿	$(UO_2)_5(SiO_4)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$
Uranophane	硅钙铀矿	$Ca(UO_2)_2(SiO_3)_2(OH)_2 \cdot 5H_2O$
Ursilite	水钙镁铀石	$2(Ca, Mg)O \cdot 2UO_3 \cdot 5SiO_2 \cdot 9-10H_2O$
Weeksite	水硅钾铀矿	$K_2(UO_2)_2(Si_2O_5)_3 \cdot 4H_2O$
<i>Niobates-Tantalates-Titanates</i>	铌酸盐类-钽酸盐类-钛酸盐类	
Betafite	铌钛铀矿	$(U, Ca)(Nb, Ta, Ti)_2O_9 \cdot nH_2O$
Brannerite	钛铀矿	UTi_2O_6
Lodochnikovite (Lodochnikite)	斜绿铀铅石	$2(U, Th)O_2 \cdot 3UO_3 \cdot 14TiO_3$
<i>Molybdates</i>	钼酸盐类	
Calcurmolate	钼钙铀矿	$Ca(UO_2)_3(MoO_4)_3(OH)_2 \cdot 11H_2O$
Irginite	黄钼铀矿	$UO_3 \cdot 2MoO_3 \cdot 4H_2O$
Moluranite	黑钼铀矿	$UO_2 \cdot 3UO_3 \cdot 7MoO_3 \cdot 20H_2O$
Umohoite	菱钼铀矿	$(UO_2)(MoO_4) \cdot 4H_2O$

钍为主要组分的矿物表

(根据Rogers和Adams 1970年资料)

Brookite	水磷钙钍矿	$\text{Ca}_{0.42}\text{Sr}_{0.03}\text{Ba}_{0.01}\text{Th}_{0.41}\text{RE}_{0.11}$ $(\text{PO}_4)_{0.02}(\text{CO}_3)_{0.17} \cdot 0.9\text{H}_2\text{O}$
Cheralite	富钍独居石	$(\text{Th}, \text{Ca}, \text{Ce})(\text{PO}_4, \text{SiO}_4)$
Ekanite	硅钙铁铀钍矿	$(\text{Th}, \text{U})(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Pb})_2\text{Si}_2\text{O}_{20}$
Huttonite	硅钍石	ThSiO_4
Monazite	独居石	$(\text{Ce}, \text{Y}, \text{La}, \text{Th})\text{PO}_4$
Thorbastnaesite	钍氟碳酸铈矿	$\text{Th}(\text{Ca}_{0.3}\text{RE}_{0.2})(\text{CO}_3)_2\text{F}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Thorianite	方钍石	ThO_2
Thorite	钍石	ThSiO_4
Thorogummite	钍脂铅铀矿	$\text{Th}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$
Thorosteenstrupine	钍水硅铈钍矿	$(\text{Ca}, \text{Th}, \text{Mn})_2\text{Si}_4(\text{O}_{11.24}\text{F}_{0.05})_{12.6} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Thorutite (Smirnovite)	钍钛矿	ThTi_2O_6
Uranothorianite	方铀钍石	$(\text{Th}, \text{U})\text{O}_2$
Uranothorite	铀钍石	$(\text{Th}, \text{U})\text{SiO}_4$

译者注：中文译名主要依据“英汉综合地质学词汇”（科学出版社）和“英汉原子能词典”（原子能出版社）

目 录

第一章 放射性现象	(1)
1.1 核物理引论	(1)
1.2 原子核稳定性界限	(2)
1.3 放射性衰变类型	(6)
1.3.1 α 衰变	(6)
1.3.2 β 衰变	(8)
1.3.3 γ 射线发射	(9)
1.4 放射性衰变规律	(10)
1.5 放射性衰变系	(14)
第二章 铀系元素及其子体的地球化学	(22)
2.1 引言	(22)
2.1.1 元素的性质	(22)
2.1.2 普通化学性质和地球化学共生组合	(23)
2.1.3 风化作用的影响	(23)
2.2 铀系元素的来源	(25)
2.2.1 火成岩	(25)
2.2.2 沉积岩和准沉积岩	(26)
2.2.3 近代沉积物	(26)
2.2.4 水圈	(27)
2.2.5 矿床	(27)
2.3 地球化学循环	(27)
2.3.1 在溶液中的活动化作用和搬运	(27)
2.3.2 在颗粒物上的活动化作用和搬运	(30)
2.3.3 在气相中的活动化作用和搬运	(30)
2.4 近地表环境中的沉积过程	(32)
2.4.1 无机沉积和生物沉积	(32)
2.4.2 吸附	(32)
2.4.3 沉积作用	(33)
2.5 年龄效应和成岩作用对同位素不平衡的影响	(33)
2.5.1 铀同位素的分馏	(33)
2.5.2 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 放射性比值的天然变化	(35)
2.5.3 其他铀系元素和它们子体的分馏作用	(35)
第三章 铀系不平衡应用于地质年代学	(38)
3.1 放射性测年	(38)

3.2 铀系不平衡测年方法	(40)
3.3 基于U系子体积累的测年方法	(42)
3.3.1 $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ 测年方法	(42)
3.3.2 $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$ 测年方法	(43)
3.3.3 He/U测年方法	(44)
3.4 基于过剩的铀系子体衰变的测年方法	(45)
3.4.1 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 测年方法	(45)
3.4.2 ^{230}Th 过剩测年方法	(46)
3.4.3 ^{231}Pa 过剩测年方法	(46)
3.4.4 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 测年方法	(47)
3.4.5 $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ 测年方法	(48)
3.4.6 ^{234}Th 测年方法	(48)
3.4.7 $^{228}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 测年方法	(48)
3.4.8 ^{210}Pb 测年方法	(49)
3.5 测年的适宜性标准	(49)
3.6 岩屑污染的校正技术	(50)
3.7 开放体系的测年方法	(51)
第四章 化学流程	(54)
4.1 引言	(54)
4.1.1 预富集或提取	(54)
4.1.2 分离流程	(54)
4.1.3 放射源制备	(55)
4.2 U、Th、Pa、Ra、Rn、Pb和Po分析分离技术综评	(55)
4.2.1 铀	(55)
4.2.2 钍	(57)
4.2.3 镤	(58)
4.2.4 镭	(59)
4.2.5 氡	(59)
4.2.6 铅	(59)
4.2.7 钋	(60)
4.3 样品的制备和预处理	(60)
4.3.1 固体样品	(60)
4.3.2 液体样品	(61)
4.4 已发表的用来测定环境样品中U、Th、Pb、Po、Pa、Ra、Rn和He的方法	(62)
4.5 放射源的制备	(68)
4.5.1 α 谱仪源	(68)
4.5.2 总 α 和 β 计数源	(70)
4.5.3 质谱源	(70)
4.6 总结	(71)