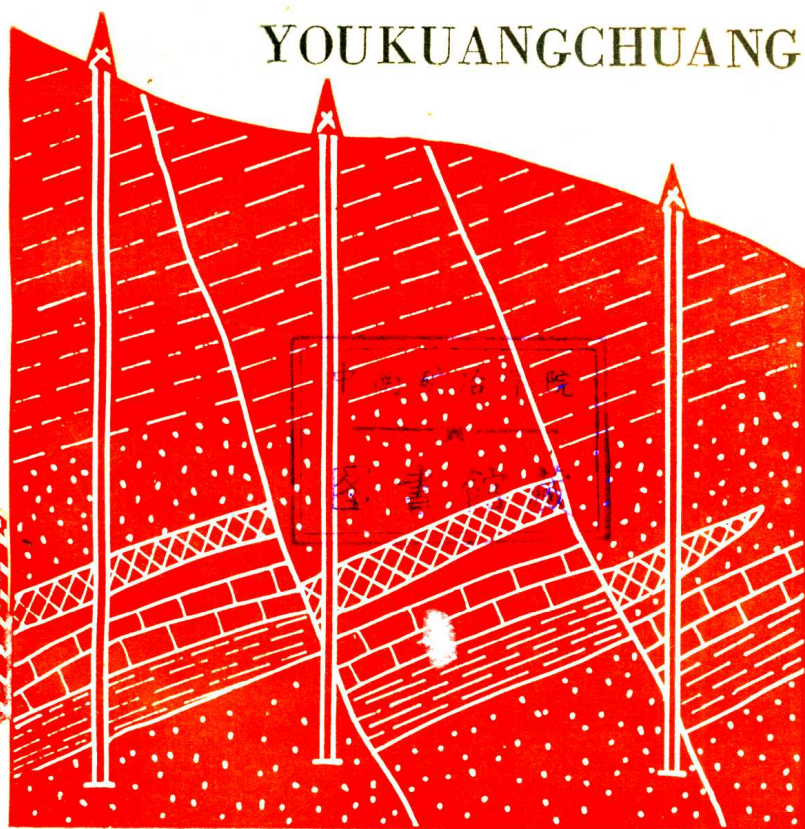


526397

[苏] B. H. 丹契夫 H. H. 斯特列梁诺夫 著

外生铀矿床

WAISHENG
YOUKUANGCHUANG



外 生 铀 矿 床

——形成条件与研究方法

В. И. 丹契夫 Н. П. 斯特列梁诺夫 著

姚振泓 郑作环 史维浚 译

张待时 校

原 子 能 出 版 社

外 生 铀 矿 床

В. И. 丹契夫 Н. П. 斯特列梁诺夫 著

姚振瀾 郑作环 史维浚 译

张待时 校

原 子 能 出 版 社 出 版

(北京 2108 信箱)

水泥制品厂印刷厂印刷

(北京西郊永定路)

新华书店北京发行所发行 · 新华书店经售

☆

开本 787 × 1092 $\frac{1}{32}$ · 印张 8 $\frac{5}{8}$ · 字数 190 千字

1984年10月第一版 · 1984年10月第一次印刷

印数 1—2,000 · 统一书号: 15175·561

定价: 1.10元

内 容 简 介

本书以大量实际资料探讨了沉积盖层岩石中铀矿床形成条件的各种理论观点,介绍了这类矿床最重要的工业成因类型及其与区域性构造-岩浆活化和构造活化作用不同阶段有关的基本分布规律,阐述了矿石和围岩的某些研究方法和成果解释方法。根据成矿作用与岩石生成的不同时期和阶段相共轭的原则,本书提出了新的更加完善的铀矿床成因分类。论证了对在外生作用参与下由内生铀源形成的复成因矿床进行分类的必要性。描述了作为具体矿床归属某种成因类型的主要依据——各类控矿分带性及矿石结构-构造特征。

本书适用于科研和生产单位的地质人员,并可供大专学生和研究参考。

全书共 79 幅插图, 27 个表格和 325 篇参考文献。

前 言

原子能事业的发展速度与日俱增，这要求人们对它的原料基地展开多方面的研究。二十世纪初，铀还仅用作制取镭和特种颜料，但在最近三、四十年内，它已成为主要的能源原料。

近年，在许多国家的能源总对比表中，原子能的比例获得了急剧增长。例如，苏联原子能发电站 1970 年的发电量仅为 40 亿千瓦小时，到 1975 年已增长为 220 亿千瓦小时。1976 年，世界上已有 162 座原子能电站运转，到 2000 年，这种能源形式很可能将占主导地位。计算表明，在美国，为了满足对原子能原料的需要，到 2000 年必须发现并开发 16 个储量与安布罗西亚湖矿床相当的巨型铀矿床^[291]。鉴于此，全世界都在竭力扩大铀的原料基地，首先是加强研究并开发新的铀矿床和成矿区。

有关各种成因类型铀矿床的研究问题，已有大量文章、专著、教科书和方法手册作了专门论述。国际和平利用原子能会议（日内瓦，1955 和 1958 年）和许多地质会议上，以及其他国际性会议中（雅典，1974 年；维也纳，1976 年），对此问题都进行过专题讨论，但有关矿床成因、矿床类型及其分类和研究方法等一系列问题，迄今仍是争论的问题。

四十年代，已开始大力开展对沉积层中铀矿床的普查勘探工作和研究，当时最大的缺点是对铀在外生作用中极高的迁移能力和铀在较广的地质条件范围可能形成矿化富集的认识不足。那时只查明了铀矿化的岩相赋存性，铀矿化与形成含矿围岩的还原条件的关系以及在深成作用阶段成岩型的矿

石富集的再分配特点等重要规律，而对后生铀矿床本身的意义，无疑是作了过低的估价。

在以后十年（五十年代至六十年代初），人们对铀矿床形成过程中的后生作用给予了极大的关注。当时，在研究地球化学棚的成矿作用概念方面，取得了卓越成果。确定了地球化学棚的类型及与其有关的元素共生组合。但研究人员在矿床的这一研究阶段却陷入另一极端，即忽略了在围岩形成岩石的早期阶段形成矿石富集的可能性，而把全部已知矿床都视为后生矿床。这种迄今仍然存在的观点，导致所查明的一些后生矿床——其矿体受层状氧化带（或层状潜育带）控制——的形成规律和空间分布规律，与一些成因更为复杂的矿床的实际资料互相矛盾。

在近年召集的一次铀矿床成因问题国际会议上（雅典，1974年），美国地质学家^[291,313]得出结论说：分布最广的、与层状氧化带有关的成因类型矿床的资源已基本耗尽^[291第24页]。他们忽略了造山建造内的其他类型矿床，这类矿床恰恰可以弥补由于原子能动力的飞跃发展而引起的对铀急剧增长的需求。

本书著者确信，沉积盖层岩石中的铀矿床的成因类型是多种多样的。它们在现有的成因分类中并未得到充分反映^[85,92]，从而在颇大程度上降低了普查评价工作的效果。对这些矿床的分类，应以成矿作用的阶段性及其与含矿岩石形成阶段的共轭性这一原则为基础。这个原则始终贯穿在本书始末，其实质在本书第二章得到阐明。在对岩石生成的各时期和各阶段的特征扼要描述以后，对大量矿床进行了成因分类。分类中考虑了如下一些因素，诸如铀源，成矿作用类型及其出现的时间与围岩关系等。在这一章里，首次试图对岩

石生成的各个时期和阶段中铀成矿的相对远景意义进行了评价。这个问题具有重要的理论意义和实际意义，必须进行深入研究。除按传统的矿床分类方法，即将矿床分为三大成因类型——内生，外生和变质矿床外，作者还提出与上述三种类型具有同等意义的第四种复成因类型矿床。这类矿床是在外生作用参与下由内生铀源形成的。划分出复成因类型矿床的必要性，由于获得了过去被列为“成因有争议或成因不明”矿床的新的实际资料，而变得更为显而易见。

著者既然提出把铀矿床分为多种类型的分类方法，那么，就应拟定出能予确定具体矿床归属的划分标志。

控矿分带性的类型便是这种主要标志之一。除已知的和文献中描述的岩相分带和后生地球化学分带外，著者还论述并总结了铀矿床的岩相-地球化学分带、成岩作用分带、表生成岩作用分带和表生作用分带等控矿分带，以及多成因矿床的分带等（第三章）。不同的分带类型，不仅反映形成矿床的不同条件，而且决定着矿化富集的空间分布。在不同的岩石生成阶段，由于成矿作用的发育强度和产矿性不同，其中有一种控矿分带将起主导作用。揭示并研究这些对矿体的形成和其空间分布起重要作用的规律，可更有针对性地对沉积盖层岩石中的铀矿床开展普查勘探和预测评价工作。

作为矿床形成条件的可能标志，本书还对矿石的结构构造特点进行了分析（第四章）。

第五章描述了沉积岩层中铀矿床的最主要工业类型。查明了许多矿床特有的成矿作用发展的长期性和复杂性（往往包括岩石生成过程的数个时期或阶段）。这种多期成因铀矿床，分布极广。某些具有内生铀源的、成因不明或有争论的矿床，很可能具有复成因性质。

第六章根据地壳及其巨大的地质构造单元，在构造-岩浆活化和构造活化作用中的总发展规律，对铀矿床的分布问题进行了探讨。

沉积盖层岩石中铀矿床的研究，需要综合运用各种野外和室内的研究方法。考虑到铀矿床研究的特点，本书第二部分（方法部分）只对著者加以补充的几种方法做了介绍。在所推荐的参考文献目录中，读者自己可以查找到矿石和围岩的其它研究方法。

本书在编写过程中，得到 С. Д. 列布基、А. И. 别列里曼和 В. А. 舒姆良斯基的大力协助；С. Д. 列布基参加了第五章和第六章的编写工作，А. И. 别列里曼参加了第一章的编写工作，В. А. 舒姆良斯基参加了第六章第一、二节的编写工作。М. А. 达维多夫参加了本书方法部分的第三节修改工作；О. П. 切特维里柯娃参加了第一节的编写工作；В. М. 莫依谢耶夫和 Л. Т. 拉柯夫参加了第三节的编写工作。在定稿付印前著者得到 А. В. 柯切诺夫的许多有益指教。

著者谨对上述人员以及科研机构和生产单位的全体专家们（与他们的密切协作和对本书个别章节的讨论，使得书中许多问题得以迎刃而解）致以热忱谢意。对尚处于争议的、新的理论性概念，未予详尽阐述与说明。我们将十分感激对本书或个别章节提出宝贵的批评和指正。

目 录

前言

第一部分 外生铀成矿作用的理论基础 1

第一章 外生作用中铀的某些地球化学特性 1

第二章 沉积盖层岩石中铀矿床的成矿阶段性与成因分类 17

1. 概述 17

2. 铀成矿作用与岩石生成阶段的共轭性是铀矿床成因分类的基础 20

3. 含矿沉积岩岩石生成过程中相继发育的各个时期和阶段内铀的成矿能力特征对比 31

第三章 作为矿床成因判据的控矿分带类型 35

1. 在岩石生成的不同时期内沉积物与沉积岩中形成的控矿分带类型 36

2. 各类控矿分带的形态成因特征 49

第四章 矿石结构和构造特征的成因意义 53

第五章 沉积盖层岩石中最主要工业成因类型铀矿床的特征 69

1. 碎屑岩中的铀矿床 70

(1) 碎屑岩中成岩型、表生成岩型和多阶段成因型矿床 71

(2) 碎屑岩中的后生矿床 98

2. 含煤层和泥炭中的矿床 106

(1) 含铀泥炭 106

(2) 木煤、褐煤和烟煤中的矿床 110

3. 碳酸盐岩中的铀矿床 131

4. 含铀磷酸盐矿床	149
(1) 磷块岩和铝磷酸盐岩中的铀	150
(2) 残骸碎屑堆积中的铀	156
5. 含铀地沥青矿床	160
第六章 沉积盖层岩石中铀矿床的分布规律	168
1. 含铀期、含铀省及铀成矿作用的不可逆演化	169
2. 铀矿床在大陆造山沉积和地台沉积标准剖面中的 分布	175
第二部分 外生铀矿床矿石与围岩的研究方法	185
1. 铀与沉积岩中有机质关系的研究	186
2. 含矿沉积岩的颜色特征	200
3. 电子顺磁共振光谱测量在含铀沉积岩中的应用	206
4. 珠球-荧光法分析铀	212
5. 热释光分析	219
6. 岩石开放型孔隙度的测定	220
7. 岩石地球化学综合剖面图的编制	228
8. 化学分析结果换算方法	236
参考文献	244

第一部分 外生铀成矿作用的 理论基础

第一章 外生作用中铀的某些 地球化学特性

在外生作用过程中，铀的地球化学，一方面取决于化学元素铀的本身性质，另方面则与铀的迁移和富集作用的参数有关。

在外生条件下，四价铀只见于在缺氧和有强还原剂存在的条件下所形成的矿物之中。六价铀则分布较广。

在天然条件下， U^{6+} 易水解，形成二价铀酰络阳离子 $(UO_2)^{2+}$ ；这种阳离子活动性较强，故在外生作用中对铀的迁移和富集有其积极意义。铀酰存在于许多矿物成分之中，例如铀的氧化物和氢氧化物、硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐、砷酸盐、钒酸盐、钼酸盐以及上述各类矿物间的过渡性矿物之中等等。

在含酸式碳酸根离子 HCO_3^- 的水溶液中的铀酰化合物，只有二种络离子较稳定，即三碳酸铀酰络离子 $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ 和两个结晶水的重碳酸铀酰络离子 $[UO_2(CO_3)_2(H_2O)_2]^{2-}$ 。作为配位最饱和的络离子——三碳酸铀酰络离子，只在 HCO_3^- 过剩条件下存在于溶液中。随着碳酸浓度降低，重碳酸铀酰络离子变成更稳定的形式。天然水中， HCO_3^- 离

子比其它酸根离子分布都广，因此水溶液中碳酸铀酰络离子形式比其它化合物的分布都广。Г. Б. 纳乌莫夫^[169]计算了不同铀浓度的碳酸铀酰络离子，在 25°C 时与介质酸度（弱酸性、中性和碱性 pH 5—10）、CO₂ 分压以及 CO₂ 总量有关的稳定场。 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 是三碳酸铀酰络离子在中性或弱碱性介质中最稳定并为分布最广的迁移形式。干旱气候带中，碳酸铀酰络离子形式相当典型，据此类推，易溶的铀酰腐殖酸络合盐类，应是潮湿气候带中铀的最活跃形式。

在介质的 pH 值降低（由 7 至 4.5）和碳酸浓度降低的条件下，三碳酸铀酰络离子 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 被破坏，在这样较窄的 pH 值范围内则形成较稳定的氢氧化铀酰络合物 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ 。

硫酸铀酰络合物和含其它酸根的铀酰络合物，稳定性更差。如， UO_2SO_4 只在强酸的 pH 值并形成游离的 H_2SO_4 的条件下存在。当 pH 值增高和溶液被稀释时， UO_2SO_4 即水解成 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ 。

И. Е. 斯达里克、Л. Б. 卡良京、Б. Н. 拉斯柯林、Л. С. 叶夫谢耶娃等人，借助电渗析和离子交换树脂进行的实验表明，在 pH < 4 条件下（硫化物矿床氧化带的特征酸度），水中只观测到带负电的硫酸铀酰离子 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2^{2-}$ 和 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_3^{4-}$ ；在 pH = 4.5—7.5 条件下，只观测到带正电的离子 UO_2^{2+} 和 $\text{UO}_2(\text{OH})^+$ 。在上述条件下，形成氢氧化铀酰凝胶 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ 。当水中含有酸式碳酸根离子和碳酸根离子（ HCO_3^- 和 CO_3^{2-} ）时，在上述同样的条件下，它们可促使形成较稳定的带负电的重碳酸铀酰离子 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 和三碳酸铀酰离子 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 。后者在更高的 pH 值（达 11）条件下仍然存在。

铀酰磷酸盐在水中的溶解度极低。例如,在 25°C 的蒸馏水中,铀酰磷酸盐的溶解度为 5×10^{-6} M。铀酰二磷酸盐,例如 $\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$,在弱酸和碱性苏打溶液中的溶解度相当高。在这种化合物中,铜可被 Fe、Mn、Ca、Pb 取代。

迄今对水溶液中的铀酰硅酸盐络合物研究得还很不够,但完全可能的是,它们比铀酰碳酸盐更易在碱性介质中形成。

众所周知,铀酰硅酸盐倾向形成胶体体系。

综上所述,在外生条件下铀最普遍的迁移形式是碳酸铀酰和腐殖酸铀酰络离子,其次是氢氧化铀酰络离子,最有限的迁移形式是硫酸铀酰络离子。

天然水中,铀的普遍含量变化在 $n \times 10^{-5}$ 至 $n \times 10^{-7}$ 克/升范围内(表 1)。

介质的氧化-还原特性,是外生条件下铀迁移的最重要的物理-化学因素。可划分出三种主要环境:氧化环境、潜育环境和硫化氢还原环境(硫化氢-硫化物)。这三种环境广泛分布于地壳之中,它们常在同一个外生铀矿床中互相交替,形成氧化-还原分带。须指出的是,含有游离氧并不是潜育环境和硫化氢环境的特点。同时,在地球化学上它们是相对立的,潜育介质有利于大多数金属迁移,而硫化氢介质却不利于金属元素迁移(因生成难溶硫化物)。这种情况下,Eh 值可能相同。

在硫化氢还原条件下,通常铀的活动性不大,因为铀被还原成 U^{4+} 。在潜育环境下,铀的迁移较复杂;在这种环境中, Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 和许多亲铜金属易于活动,形成溶解的酸式碳酸盐[如 $\text{Pb}(\text{HCO}_3)_2$] 和有机络合物。当 Eh 值稍有下

表 1 岩石圈和水圈中的铀含量*

岩 石	U, %	天 然 水	U, 克/升
岩 浆 岩		大洋水	3×10^{-8}
酸性岩	3.5×10^{-4}	内海、海湾、泻湖:	
中性岩	1.8×10^{-4}	淡水	$n \times 10^{-7} - n \times 10^{-8}$
基性岩	5×10^{-5}	咸水	$n \times 10^{-6} - n \times 10^{-5}$
超基性岩	$3 \times 10^{-7**}$	湖水:	
平均岩浆岩	2.5×10^{-4}	润水带	$n \times 10^{-7} - n \times 10^{-8}$
(2份酸性岩 + 1份基性岩)		干燥带	$n \times 10^{-5} - n \times 10^{-4}$
沉 积 岩		河水:	
泥岩	3.7×10^{-4}	润水带	$n \times 10^{-7}$
砂岩	4.5×10^{-4}	干燥带	$n \times 10^{-8}$
碳酸盐岩	2.2×10^{-4}	裂隙-潜水	
平均沉积岩	3.1×10^{-4}	高山区	$n \times 10^{-7} - n \times 10^{-8}$
(泥岩80%, 砂岩15%, 碳酸盐岩 5%)		中山区	$n \times 10^{-8}$
总岩石圈	3×10^{-4}	低山区、沙漠、半沙漠区	$n \times 10^{-6} - n \times 10^{-5}$
		层状水:	
		克拉克值铀含量的岩石 中的含氧水	$n \times 10^{-5}$
		铀矿床矿体中的含氧水	$n \times 10^{-5}$
		含硫化氢和二氧化碳的 无氧水	$n \times 10^{-8}$

* 数据源自不同著作^[101, 185, 238, 238]。** 原文为 3.00^{-7} , 应为 3×10^{-7} 。——译者注

降时, 六价铀可同 Fe^{2+} 一起迁移。这种对铀是氧化, 对铁是还原的环境, 称为弱潜育环境。Eh 值急剧降低, 导致 U^{6+} 还原至 U^{4+} , 并产生铀沉淀。这种强潜育环境对铁和铀均是还原环境。

在潜育介质中铀与 Fe^{2+} 共同迁移的可能性, 可通过对比该二种元素的标准电位 E_0 和对实际存在的天然水中不同

形式的铀的热力学平衡进行计算来加以证实。在各种类型水中铀和铁的迁移条件的对比，示于表 2。

表 2 铀和铁迁移的地球化学环境

环 境	铀	铁
自由氧	活动	不活动
硫化氢	不活动	不活动
弱潜育	活动	活动
强潜育	不活动	活动

在小范围(硫化物矿石的氧化带等)内的强酸性介质中，铁也可在氧化环境中迁移。

根据酸碱条件，表生作用带中的水可分为四种主要类型：强酸性、酸性和弱酸性、中性和弱碱性、强碱性。水中迁移的每种介质，都具有一定的氧化-还原条件和酸碱条件的组合(表 3)。总共可划分出 12 种主要的地球化学迁移环

表 3 按氧化-还原条件和酸碱条件划分的水的
地球化学分类^[100]

水的酸碱条件	水的氧化-还原条件		
	含 氧 水	潜 育 水	硫 - 化 氢 水
强酸性($\text{pH} < 3$)	I 强酸性水	V 强酸性潜育水	IX 强酸性硫化氢水
酸性和弱酸性 ($\text{pH} = 3 - 6.5$)	II 酸性水	VI 酸性潜育水	X 酸性硫化氢水
中性和弱碱性 ($\text{pH} = 6.5 - 8.5$)	III 中性水	VII 中性和碱性潜育水	XI 中性和碱性硫化氢水
强碱性(苏打) ($\text{pH} > 8.5$)	IV 碱性水	VIII 碱性潜育水	XII 碱性硫化氢水

境和水的类型。这同时也是外生作用的主要地球化学类型。

每一类水的特点是，既含有一定的元素共生组合，又含有在该条件下活动性差的“封禁(запрещенная)元素组合”。例如，在碱性含氧水(第IV类)中，Na、Li、F、Mo、U、V、Y、Be、B及其它许多元素易于迁移，但这类水对于Fe、Ca、Mg、Ba、Sr等元素却是“封禁”的。

水与岩石的互相作用，导致淋滤作用发育，而氧化-还原条件和酸碱条件对淋滤作用则具有重要意义。共有三种主要淋滤作用带：① 氧化淋滤带；② 潜育淋滤带；③ 硫化氢淋滤带。

每种淋滤带又可细分成四个亚类：① 强酸性淋滤带；② 酸性和弱酸性淋滤带；③ 中性和弱碱性淋滤带；④ 碱性淋滤带。这12种淋滤亚带，分别与表3中水的主要地球化学分类相对应。

在金属矿床中，研究得较好的是硫化物矿石在氧化条件下形成的硫酸型淋滤带。在古风化壳中，也可见到酸性淋滤现象。对其它类型的淋滤作用，研究得还很不够。然而，它们却有非常重要的意义，因为许多这种淋滤作用，可成为形成外生铀矿床矿体的含铀溶液的供给区。

按铀的地球化学特点，可划分出下列主要类型淋滤带*：

一、氧化淋滤带

- (1) 硫酸淋滤带；
- (2) 弱酸性淋滤带；
- (3) 中性和弱碱性淋滤带；
- (4) 碱性(强碱性)淋滤带。

* 铀在硫化氢水和强潜育水中的活动性小，故淋滤作用带对铀无代表性。

二、弱潜育淋滤带

- (5) 强酸性潜育淋滤带；
- (6) 酸性潜育淋滤带；
- (7) 中性和弱碱性(碳酸盐)潜育淋滤带；
- (8) 强碱性(苏打)潜育淋滤带。

在氧化和酸性介质中，即在硫酸和部分为酸性及酸性的潜育淋滤带中(1 和 2)，铀的行为如同典型的阳离子元素一样，形成铀酰 UO_2^{2+} ，它从稀释溶液中沉淀的 pH 值为 4.2，即接近于 Al^{3+} 沉淀的 pH 值(4.1)，远低于 Ni^{2+} (6.7)、 Pb^{2+} (6.0)及其它阳离子沉淀的 pH 值。从而可以推测，与 Al^{3+} 相似，铀酰从酸性水中就可沉淀，于残积风化壳中聚集，而在弱酸性、中性和碱性水中不易迁移。但在外生条件下，铀酰的行为则有所不同：它在中性和碱性水中易于迁移，成为各种络阴离子的组成部分，其中以碳酸铀酰络阴离子最为稳定。因此，六价铀在较宽的 pH 值范围内迁移能力较强，其行为既与阳离子元素相似，又与阴离子元素相似。所以，在某些作用过程中铀同 Cu、Pb、Zn、Ni、Co 及其它阳离子金属相似；在另些作用过程中，则与 V、Se、Mo 及其它阴离子金属和非金属相似。

在天然水中迁移能力很强的元素，极易被生物体所吸附，这些元素在灰岩、磷块岩、煤及其它岩石中为生物聚集是相当特征的。但铀与周期表中后几种元素(Hg、Tl、Pb、Bi)一样，由于具有强毒性而不可能在生物体中富集，故生物迁移作用在铀的地球化学中并无重要意义。

因此，在外生条件下铀的地球化学的典型特性是，在水中迁移明显而强烈，其生物迁移则较弱。类似这样的特性的组合并非常见。通常，在天然水中易于形成可溶化合物并强