第二章　铀地球化学

铀地球化学是研究铀在地球各部分（主要是地壳）中的分布规律、存在形式、化学作用和演化历史的一门学科。

铀地球化学的基本任务是：研究铀元素在地球各圈层和各种地质体中的含量、存在形式；研究铀元素在各种地质作用中的迁移、沉淀和富集规律；阐明铀矿物、铀矿床的成因，指明找矿方向。

2.1 岩浆作用中的铀地球化学

- 岩浆结晶分异对铀在岩浆结晶过程中的地球化学行为，对铀的分布、存在形式、迁移和沉淀方式影响很大。铀与钍密切共生。
- 在岩浆结晶分异早期，不晶出铀的独立矿物，也很少形成类质同像矿物。
- 在岩浆结晶分异晚期，在较高温度下，微量铀同性质相似的**Th**、**RE**、**Ca**等组成少量类质同像矿物，当残余岩浆中的铀浓度达到一定程度时，铀作为副矿物。

2.1 岩浆作用中的铀地球化学

- 铀矿物和含铀矿物不在岩浆作用早期而是在其晚期才晶出的原因是：
- (1)矿物从岩浆结晶析出，常决定于形成矿物的成分的饱和程度，岩浆结晶中浓度高的组分如Fe，Mg，Ca等一达到过饱和就先结晶出铁镁矿物。在岩浆作用的早期阶段，铀的浓度过低不足以形成独立的铀矿物。
- (2)在岩浆冷却分异过程中，矿物按熔点的高低依次晶出。各矿物的熔点由晶体晶格能的高低决定。铀的离子半径较大，不能进入早期晶出的硅酸盐矿物的晶格中。惟有到了岩浆活动晚期，铀才有可能从残浆中结晶出来形成独立的铀矿物，或以类质同象混入物形式进入其他副矿物晶格中。

2.1 岩浆作用中的铀地球化学

(3)铀属于亲氧元素，岩浆早期的结晶作用是在氧逸度较低的情况下进行的。许多浓度较高的变价元素如Fe等处于低价态，浓度低、亲氧性强的铀则更不易晶出成为矿物。

(4) 在岩浆分异过程中，铀与逐渐增多的挥发性组分如CO_2，F^-，Cl^-具有较强的亲合力，因此挥发性组分逸出时有可能将铀带出，这使本来浓度就低的铀变得更少，所以在岩浆作用早期，铀一般不易集中晶出。至于存在于许多酸性岩体内的大量裂隙、粒间的铀，则可能是先前形成的晶质铀矿、含铀副矿物在岩浆作用晚期或岩浆期后，在自交代作用或蚀变作用过程中释放出的铀形成的。

2.1 岩浆作用中的铀地球化学

- 铀在酸性岩中含量最高，在超基性岩中含量最低。一般认为，铀在这些岩浆岩中有三种存在形式：
- (1)铀矿物形式　铀在岩浆岩中形成的独立矿物极少。常见的有钛铀矿、晶质铀矿、方钍石、铀钍石等。
- (2)类质同象混入物形式　铀经常置换Th，RE，Zr，Ca等元素。这主要是因为它们的离子半径大小相近，U^{4+}和Th^{4+}的离子半径分别为0.97A和1.02Å，因而它们之间可进行广泛的类质同象置换，在钍石$ThSiO_4$中铀含量有时很高，甚至可转变为铀钍石(Th，U)(SiO_4)·1-1.5H2O。此外，U4+又与离子半径相近的RE^{3+}广泛发生类质同象置换，形成各种含铀副矿物，如锆石、磷钇矿、独居石、榍石、磷灰石等。
- (3)分散吸附形式　在岩浆岩中，尤其是在酸性岩中，铀呈铀酰离子或络合物，以分散状或以吸附状存在于蚀变矿物、粘土矿物的表面、矿物的解理缝、粒间和裂隙之中，以及溶解于矿物的结晶水和气液包裹体中。

2.2 伟晶作用中的铀地球化学

- 伟晶岩中的铀继承了岩浆作用中的某些地球化学特点。在伟晶岩中，铀以四价离子存在，与四价钍离子关系密切。铀在伟晶岩中的集中与分散，取决于地质环境和物理化学条件。
- 当含铀的残余熔浆（伟晶熔浆）进入断裂裂隙时，随着温度、压力的降低，先晶出**Si**、**Ca**、**Al**、**Mg**、**Fe**等的矿物，之后**U**、**Th**、**REE**参与钛酸盐和硅酸盐矿物的形成。在这些矿物结晶过程中，**UTh**主要以类质同像混入物形式置换矿物中的**REE**。在伟晶岩中，当稀有、稀土元素很富集时，铀（钍）就呈类质同像混入物形式分散于各种稀有、稀土元素矿物之中；而当各稀有、稀土元素很少时，则易形成独立的铀（钍）矿物。
- 华岗伟晶岩中的铀含量要高一些。铀在伟晶岩中主要富集在副矿物中，造岩矿物中铀含量极低。

2.2 伟晶作用中的铀地球化学

铀在伟晶岩中的存在形式：

- **(1)铀矿物形式**

主要有简单及复杂的无水氧化物，如晶质铀矿、钍铀矿、钇铀矿、钛铀矿等。

- **(2)类质同象混入物形式**

伟晶岩中铀呈类质同象混入物形式的矿物非常发育，种类繁多，成分复杂。主要含铀矿物有：方钍石、贝塔石、褐钇铌矿、黑稀金矿、复稀金矿、铌钇矿、钍石、含铀独居石等。

- **(3)分散吸附形式**

铀主要赋存于造岩矿物中。

在含铀伟晶岩中，铀矿物形式、类质同象混入物形式是铀的主要存在形式。在伟晶岩中放射性元素、稀土、稀有元素共同富集，可供综合利用。

2.3 热液作用中的铀地球化学

在热液作用中，铀主要以独立矿物形式存在，如沥青油矿，铀石等，在此过程中，在岩浆作用和伟晶作用过程中不易形成的硫化物、碳酸盐、高价铁氧化物等大量出现。这些标志可以成为鉴定矿化成因的标志。

2.3 热液作用中的铀地球化学

- 含铀热液的成分

  水（H_2O）和各种气体（H_2S,CO_2,O_2,CH_4）；

  阴离子：F^-、Cl^-、SO_4^{2-}、HCO_3^-、CO_3^{2-}；

  络离子：$UO_2(CO_3)_3^{4-}$,$UO_2(CO_3)_2^{2-}$,MoS_4^{2-},SbS_3^{3-},AsS_3^{3-},AsS_4^{3-},HgS_2^{2-}；

  阳离子：K^+,Na^+,Ca^{2+},Mg^{2+}；

  成矿元素：U、Fe、Cu、Pb、Zn、Th、Mo、Bi、Hg、Ag。

- 热液中铀的迁移形式

  （1）碳酸铀酰离子

  （2）硫酸铀酰离子

  （3）四价铀卤化物及六价铀氟、氯合铀酰离子

  （4）其它迁移形式：钼酸铀酰离子、硅酸铀酰离子、氢氧化铀酰离子等。

2.3 热液作用中的铀地球化学

- 热液中铀的沉淀条件

（1）Eh

（2）Ph

（3）压力

（4）温度

（5）热液与围岩的化学反应

2.3 热液作用中的铀地球化学

热液铀矿物的特征

- 热液铀矿物的形成一般经历以下几个步骤：首先，铀在含铀热液中主要以铀酰络离子形式迁移；之后，铀酰络离子分解产生UO_2^{2+}和阴离子；最后，UO_2^{2+}中的六价铀被还原为四价铀析出，形成铀矿物。
- 在高温热液铀矿床中，铀矿物有晶质铀矿、钛铀矿、铈铀钛铁矿，含铀矿物有铀钍石、褐帘石等。在上述矿物中含有Th和RE。中低温热液矿床产于多种地质环境，但它的矿物成分却很简单，主要有沥青铀矿和铀石，它们不含或只含痕量Th和RE。
- 在热液铀矿床中，同铀矿物共生的矿石矿物组合类型甚多，但总的来说，每种组合类型中的矿物成分比较简单。矿物组合类型有，沥青铀矿-微晶石英(或玉髓)组合、沥青铀矿-方解石组合、沥青铀矿-萤石组合、沥青铀矿-硫化物组合、沥青铀矿-辉钼矿组合等。

2.4 风化作用中的铀地球化学

- 表生带内的物理化学环境与内生作用的不同，其要特点是：①低而速变的温度(世界地表的温差一般小于160℃，即由—75℃到+85℃，有昼夜变化和季节变化)；②低压(常压)；③常处在大气圈游氧和二氧化碳的作用下；④极丰富的具有各种不酸碱度的水参加作用；⑤有生物和有机质参加作
- 风化作用的能量来源与内生作用的不同，主要是阳的辐射能，它决定表生带的温度，造成大气圈水圈的运动，决定生物有机体的活动，也支配元在表生带中的迁移和沉淀。

2.4 风化作用中的铀地球化学

- 风化作用中铀的迁移和沉淀

（1）铀酰碳酸盐

（2）铀酰硫酸盐

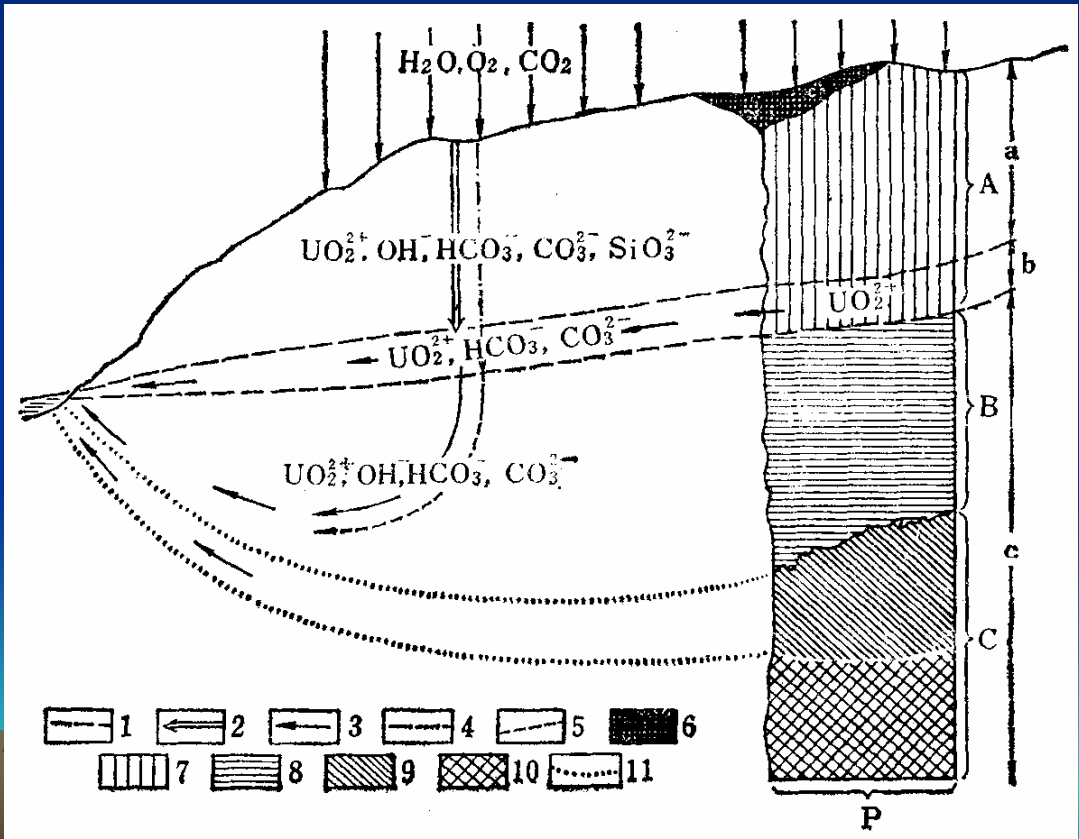
（3）铀酰氢氧络合物胶体

（4）铀酰腐殖酸盐

2.4 风化作用中的铀地球化学

- 铀矿床氧化带

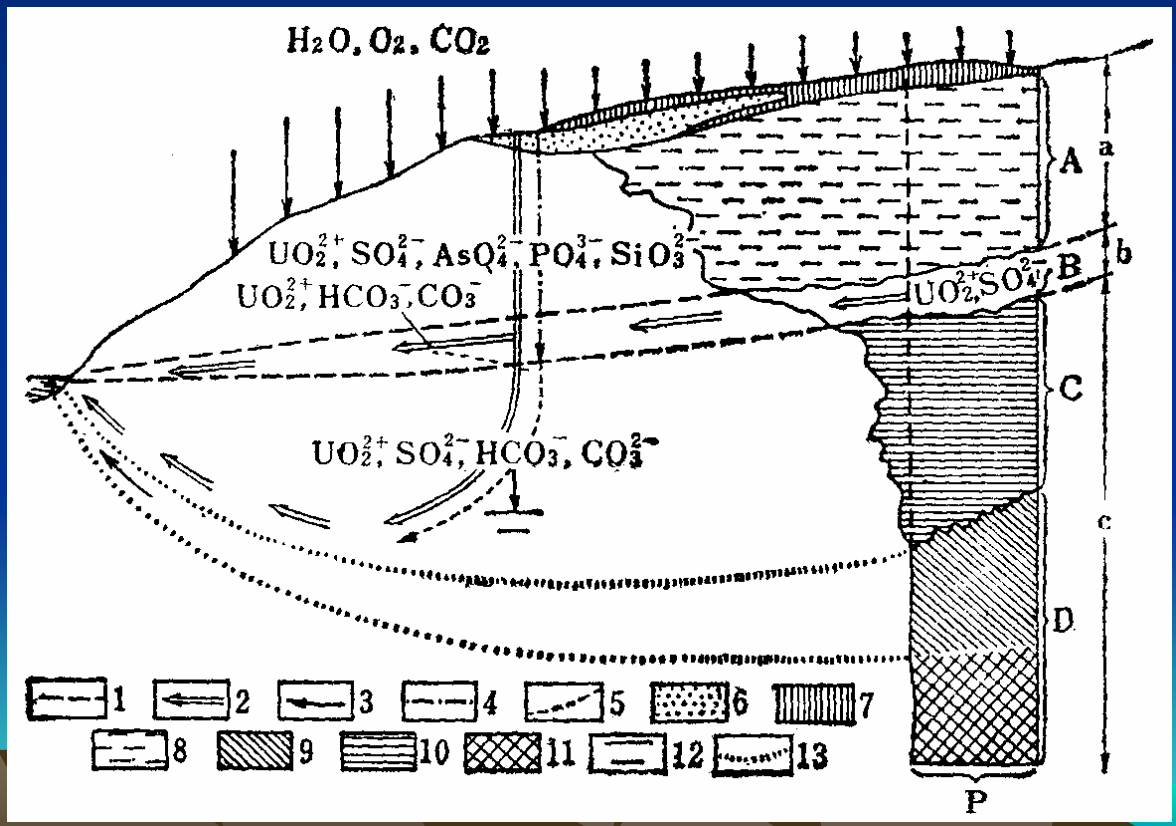
（1）铀酰氢氧化物—硅酸盐型氧化带



2.4 风化作用中的铀地球化学

- 铀矿床氧化带

（2）铀云母型氧化带



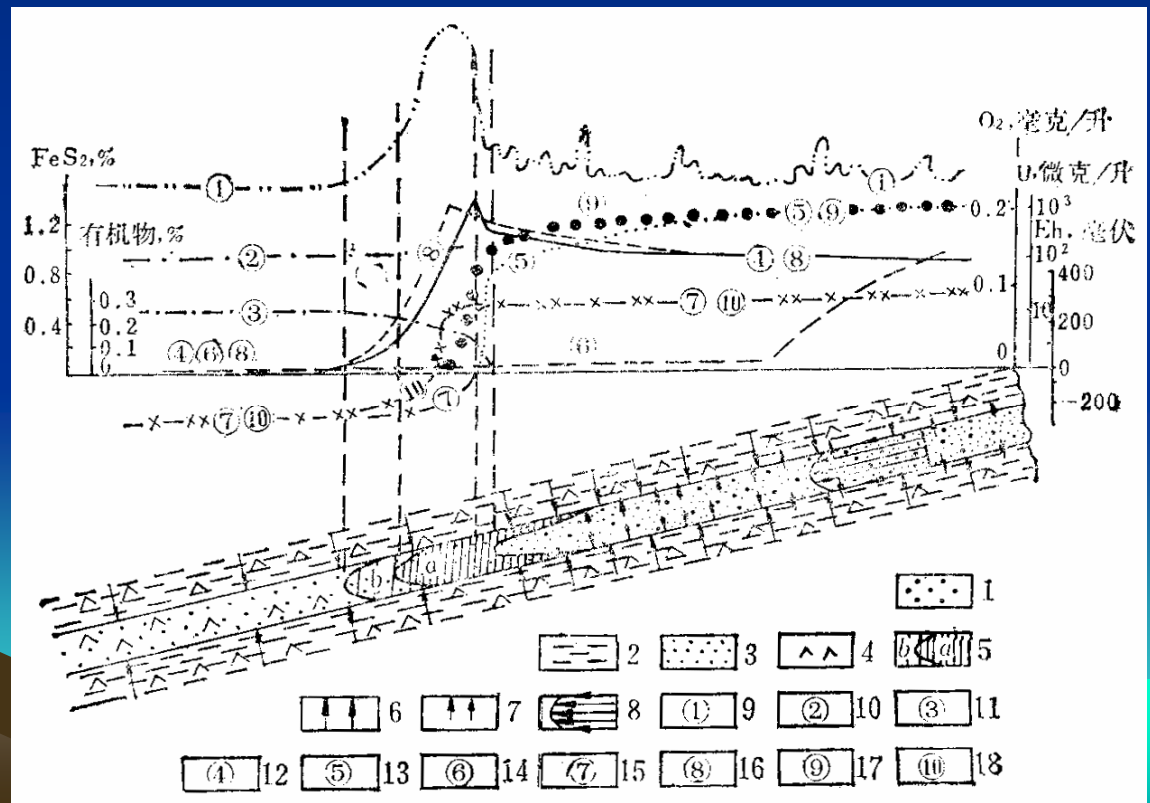
2.4 风化作用中的铀地球化学

- 层间氧化带：

（1）层间氧化带

（2）氧化－还原过渡带

（3）还原带



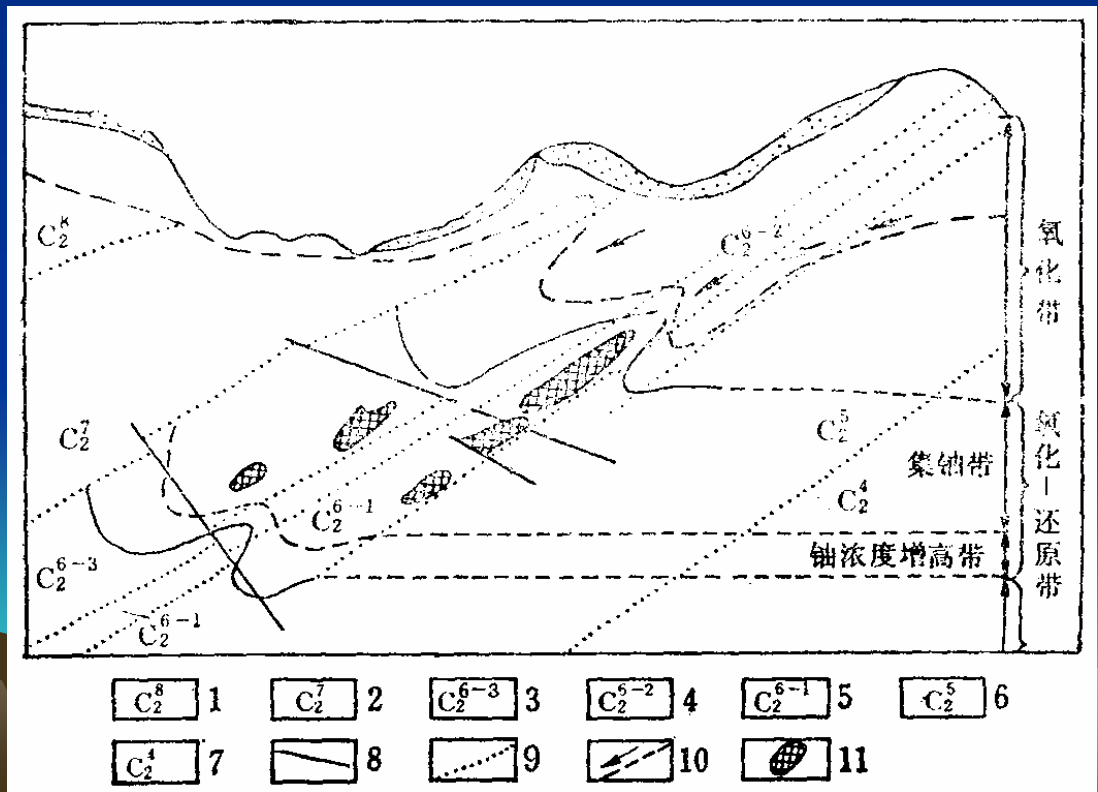
2.4 风化作用中的铀地球化学

- 构造氧化带：

（1）氧化带

（2）氧化—还原过渡带

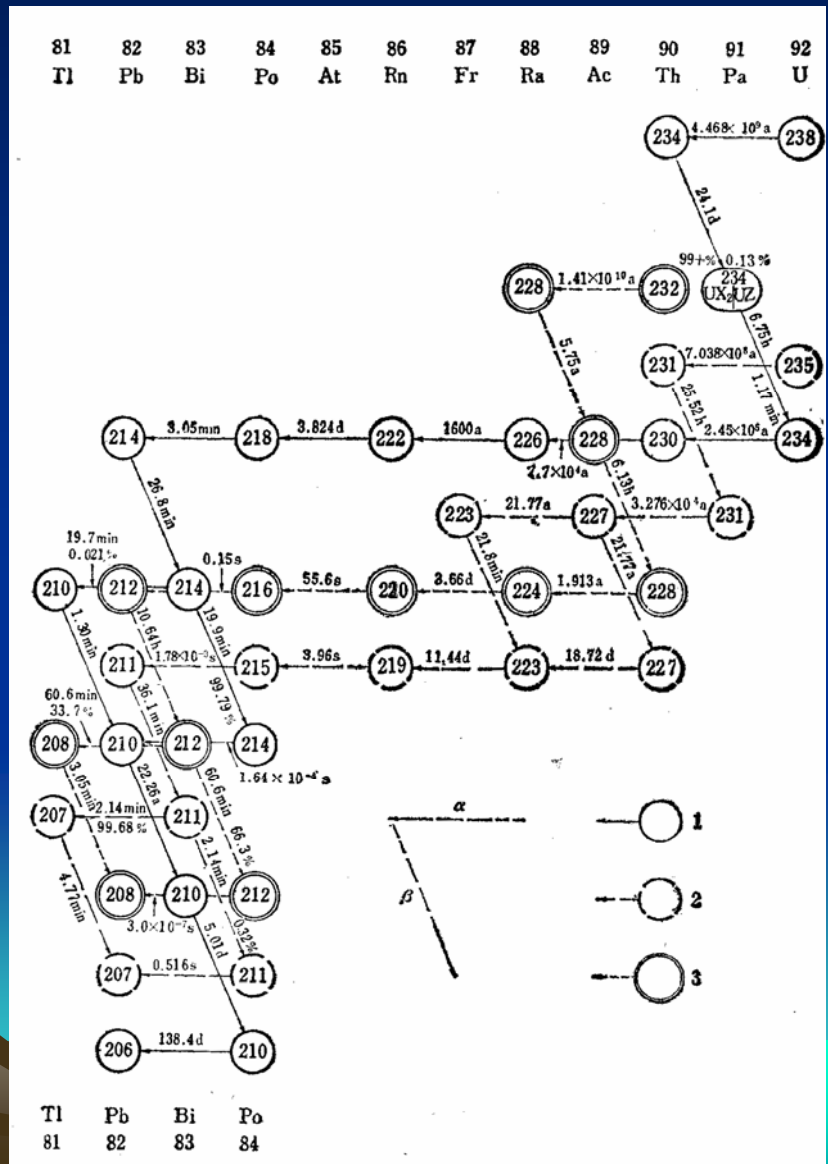
（3）还原带



2.4 风化作用中的铀地球化学

- 氧化带的U-Ra平衡

假若铀和镭处于放射性平衡，铀与镭之量保持一定的比值(Ra/U=3.4×10^{-7})。但是，由于铀、镭的化学性质不同，一旦改变所处地球化学环境，就可能发生铀或镭的相对富集或贫化，因而铀镭的正常比例发生改变，即U-Ra平衡遭受了破坏。



2.5 沉积作用中的铀地球化学

- 沉积阶段

在沉积阶段，岩石和矿床经风化破坏以各种形式进行搬运。这时，惟有抗风化能力较强的独居石、石、钍石、烧绿石和其他含铀矿物才有可能作长离搬运，并经分选富集成砂矿；而铀矿物(沥青铀矿、晶质铀矿等)则易风化分解，其中的铀以各种铀酰络合物形式搬运。这些铀酰络合物在河漫滩、沼泽、湖泊和海盆中，由于有机质等的吸附或局还原作用，同沉积物一起沉淀，从而增高沉积物铀含量。

2.5 沉积作用中的铀地球化学

成岩阶段

- 在成岩阶段，底沉积层上部水和软泥水处于不同的条件，前者含游离氧，处于氧化环境，后者所含游离氧在有机物腐烂分解中被消耗，含有CH_4，NH_3，H_2S等组分而处于还原环境。在海底淤泥中，从沉积物表面向下**50—100**厘米，**Eh**值已变为负值。
- 处于还原环境的软泥水中的六价铀因被还原沉淀而减少，但上部水中，铀含量较高，因而底沉积层上部水和软泥水之间存在浓度差，于是铀便不断扩散迁移转入淤泥水中并沉淀富集。在这种沉积物被固结为坚硬岩石以前发生的成岩作用阶段铀可以得到相对富集，个别情况下，可以形成规模较大的成岩铀矿床。

2.5 沉积作用中的铀地球化学

- 后生阶段

在后生阶段广发生两种不同性质和作用趋势的后生变化，一种是进后生作用，即沉积物固结为岩石以后至变质作用以前的晚期成岩阶段的后生作用，还有一种是退后生作用，即矿物岩石进入地表风化环境中的后生作用。进后生作用是在岩石埋藏较深处发生的，在深处由于温度增高，压力增大，因而矿物脱水产生粒伺水。这种粒间水与矿物岩石发生作用，并短距离搬运其中溶解的铀。在有机质和硫化物的作用下粒间水中的铀重新沉淀。倘若这种作用延续到变质作用阶段，便形成沉积变质铀矿床。退后生作用发生于表生风化环境中，流经岩石的富含游离氧的地下水，将岩石中分散的铀氧化、溶解，从而形成含铀溶液。当这种含铀溶液向下流经还原环境时，铀便得到重新沉淀，形成淋积铀矿床；或者当这种含铀溶液在浅部地下水作用下，在适宜的pH，Eh和干燥的气候环境中，形成表生成岩铀矿床。