

确定砂岩型铀矿矿化地段的铀、钍同位素证据*

刘金辉

(华东地质学院, 江西临川)

提 要: 根据铀、钍同位素地球化学基本原理, 对新疆伊犁盆地 512 矿床含矿砂岩的 U、Th 含量及其 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 进行了测试, 并在此基础上对含矿砂岩的氧化带、还原带和氧化还原过渡带特征进行了研究。研究表明, 与氧化带、还原带相比, 氧化-还原过渡带具有较高 U 含量和 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值, 较低 Th/U 比值; 矿石样品中的 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 比值位于过渡带范围内, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值偏高区往往是过渡带分布区(铀沉淀区)。显然, 含矿砂岩中的 U 含量, Th/U、 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 和 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 比值可以为判断砂岩型铀矿矿化地段位置提供重要依据。

关键词: 层间氧化带 放射性同位素 同位素比值 砂岩型铀矿 新疆伊犁

1 前 言

后生的砂岩型水成铀矿床, 其形成和分布受含矿岩层氧化还原分带的控制, 铀矿主要产于层间氧化带尖灭地段, 即氧化还原过渡带。因而, 如何来确定层间氧化带尖灭地段的具体位置就成为寻找砂岩型铀矿床主要的技术关键之一。本文运用铀、钍同位素地球化学基本原理, 以新疆伊犁盆地南缘的 512 矿床为例, 对层间氧化带砂岩型铀矿含矿层氧化还原分带的铀、钍及其同位素特征进行了初步探讨。

天然铀是三种铀同位素(^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{234}U)的混合物。其相对含量依次为 99.28%、0.71% 和 0.006%, 半衰期分别为 4.51×10^9 a、 7.1×10^8 a 和 2.44×10^5 a。 ^{235}U 与 ^{238}U 都是母体同位素, 其化学性质与活泼程度相似, 故它们的分离程度很小, 可视为基本上不分离的同位素。因而, 在研究铀同位素比值时, 主要是指 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 。钍有 6 个同位素(^{234}Th 、 ^{230}Th 、 ^{231}Th 、 ^{227}Th 、 ^{232}Th 、 ^{228}Th)。其中以 $^{230}\text{Th}/\text{Th}$ 最为重要。钍(^{230}Th)和钍的化学性质一样, 在表生带不易形成次生富集, 其惰性比铀、镭大。用 $^{230}\text{Th}/\text{U}$ 比值可较确切地反映铀矿化形成、保存或破坏情况^[1]。近 30 年来, 国内外不少学者运用放射性同位素对砂岩型铀矿床(卷形矿床)进行过研究。如 J C 耶夫谢耶娃认为位于含氧水作用范围内的矿体平衡破坏往往偏 ^{230}Th ^[4]。吴慧山等认为当氧化砂岩接近矿体时, 明显地存在多余的 ^{234}U 和高的钍^[2]等。

J K Osmond 等人^[3]对砂岩型铀矿床层间氧化带前锋体系铀、钍同位素分布特征作了详细的系统研究。并指出铀矿的沉积呈“C”形, 且具有滚动沉积特点。前锋迁移速度一般为 $0.0n \sim n \text{ m}/1 \times 10^6 \text{ a}$ 。其基本原理是: 在具有泥砂泥结构的沉积岩层中, 含氧地下水渗入砂岩并溶滤砂岩中的铀。随着地下水向深部的还原环境流动, 水中六价铀将还原成四价铀而沉淀形成

* 核能资源开放实验室资助项目(1995)

作者简介: 刘金辉, 男, 1961 年生, 副教授, 1982 年毕业于武汉地质学院水文系, 1995 年在华东地质学院获硕士学位, 现为 中国地质大学环境科学系 96 级博士研究生。邮政编码: 344000
1998-12-10 收稿, 1999-04-13 修改回

矿卷前锋 (图 1a)。在前锋沿倾向缓慢移动过程中,原先被还原沉淀的铀又被氧化,再次从前锋上游向下游迁移,并在过渡带中再次沉淀。这种循环过程不断地重复导致铀的聚积,形成铀矿床。由于前锋中铀是再生的,沉淀下来的铀则以薄层形式裹在岩石颗粒外面。故衰变产生的 ^{234}U 易被反冲到地下水中。在前锋过渡带 ^{238}U 被还原而不能迁移,而 ^{234}U 的还原沉淀则比 ^{238}U 迟一些。所以,在前锋下游造成固相中 ^{234}U 过剩(即 ^{234}U 的峰值位于 ^{238}U 峰值下游)。由于 ^{234}U 的活动性较 ^{238}U 强,使 ^{234}U 曲线宽度比 ^{238}U 曲线大。在体系达到稳定状态时, ^{238}U 和 ^{234}U 强度分布曲线的峰值应以相等速度向下移动。但由于 ^{230}Th 较难溶于水,不参与循环迁移过程,所以 ^{230}Th 强度曲线峰值一般都不如 ^{234}U 和 ^{238}U 高,且位于 ^{234}U 强度峰值上游(图 1b),前锋迁移越快,铀聚积强度越大。若将图 1b 中的放射性核素以 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 为坐标则可得 ^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{230}Th 与矿卷前锋不同区段(I、II、III、IV、V)之间的关系(图 1c)。从

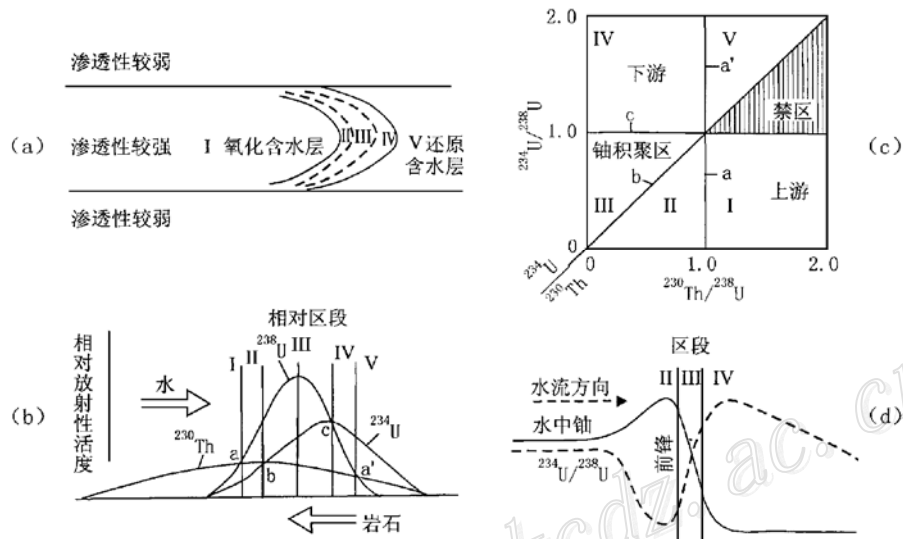


图 1 矿卷前锋铀系列同位素组成

(据 J K Osmond 等, 1983)

(a) —矿卷前锋示意图; (b) —前锋体系的铀同位素模式; (c) —前锋体系中 ^{238}U 、 ^{234}U 、 ^{230}Th 相对放射性活度分布图; (d) —前锋体系水中铀含量和铀同位素比值分布曲线。I—前锋上游氧化区段; II—矿卷中的氧化区段; III—矿卷中铀沉淀(以 ^{238}U 为主)区段; IV—矿卷中铀沉淀(以 ^{234}U 为主)区段; V—前锋下游还原区段。a—I区段与II区段界线($^{230}\text{Th} = ^{238}\text{U}$); b—II区段与III区段界线($^{234}\text{U} = ^{230}\text{Th}$); c—III区段与IV区段界线($^{234}\text{U} = ^{238}\text{U}$); a'—IV区段与V区段界线($^{230}\text{Th} = ^{238}\text{U}$)

Fig. 1. Isotopic composition of uranium series in the roll front system.

(a) —Sketch diagram of roll front; (b) —Uranium isotopic pattern of the front system; (c) —Distribution of ^{238}U , ^{234}U and ^{230}Th relative radioactivities; (d) —Distributive curves of uranium content and uranium isotopic ratios in water of the front system. I—Upper reach oxidation sector of the front; II—Oxidation sector in the roll; III—Uranium (mainly ^{238}U) precipitation sector in the roll; IV—Uranium (mainly ^{234}U) precipitation sector in the roll; V—Lower reach reductive sector of the front. a—Boundary between Sector I and Sector II ($^{230}\text{Th} = ^{238}\text{U}$); b—Boundary between Sector II and Sector III ($^{234}\text{U} = ^{230}\text{Th}$); c—Boundary between Sector III and Sector IV ($^{234}\text{U} = ^{238}\text{U}$); a'—Boundary between Sector IV and Sector V ($^{230}\text{Th} = ^{238}\text{U}$).

水中铀含量看,含氧水与砂岩相互作用后Ⅱ区段水中铀含量最高,随着铀的沉淀Ⅲ区段铀含量急剧降低并在Ⅴ区段达到最低值。而岩石中的铀同位素比值($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$)则相反,即在Ⅱ区段降低,Ⅲ区段增高并在Ⅴ区段达到高值(图1d)。

本文试图以新疆伊犁盆地南缘的512矿床为例,探讨含矿层不同的水文地球化学分带与铀、钍及其同位素比值之间的变化规律,并据此来确定砂岩型铀矿层间氧化带尖灭地段的位置。

2 实例

2.1 地质背景

512矿床位于新疆伊犁盆地南缘,该矿床地层为近东西向展布,向北倾斜,倾角 $2^{\circ}\sim 18^{\circ}$,为一典型的单斜构造。含矿层发育于中下侏罗系具有泥砂泥结构的水西沟群Ⅴ旋回砂体中。砂体平均厚25m,渗透系数 $0.411\sim 0.546$ m/日,分布稳定。矿体平面上呈近东西走向,垂向上为卷状。Ⅴ旋回砂体氧化带前锋线在平面上呈近东西向蛇曲状分布,弧形突出指向北,氧化带沿地层倾向呈舌形尖灭,埋深一般100~280m。据矿物组合和颜色、层间氧化带可分为氧化带(完全氧化亚带、局部氧化亚带)、过渡带和还原带。

2.2 样品采集和测试

本次放射性同位素样品取自钻孔岩心,取样层位为水西沟群Ⅴ旋回砂岩、砂砾岩和泥岩,取样按剖面进行,在取样剖面中尽量包括氧化带、氧化还原过渡带和还原带。每个钻孔中一般采取2~3个样品,以便控制矿体翼部和卷头。在512矿床,选择了矿化较好的30号剖面进行系统取样。样品测试项目包括:岩石中的U、Th含量和 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 、 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比值。 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ 比值根据测试数据计算获得。计算方法如下:

据放射性活度定义: $A=N\lambda$,考虑自然界中U含量主要是 ^{238}U ,Th含量主要是 ^{230}Th 。则

$$\begin{aligned} A_{230} &= A_{230}/A_{232} \times A_{232} = A_{230}/A_{232} \times N_{232}\lambda_{232} \\ &= A_{230}/A_{232} \times \text{Th} \times 0.693/1.4 \times 10^{10} \end{aligned}$$

又:

$$A_{238} = \lambda_{238} N_{238} = 0.693/4.5 \times 10^9 \times \text{U}$$

故:

$$A_{230}/A_{238} = 0.32 \times A_{230}/A_{232} \times \text{Th}/\text{U}$$

式中: A ——放射性活度、 N ——核数数目、 λ ——衰变常数。238、230、232分别代表 ^{238}U 、 ^{230}Th 和 ^{232}Th ;U、Th为所测样品U、Th含量。

2.3 结果与讨论

伊犁盆地512矿床30号剖面铀、钍含量和放射性同位素比值测定结果列于表1和表2。从表1和表2中可以得出如下认识。

(1)在表1中可以清楚地看到,含矿砂岩中的铀含量大大高于非含矿砂岩的U含量。在氧化还原过渡带砂岩层中(翼部、卷头矿体),铀含量一般都高于 $30\mu\text{g}/\text{g}$,最高可达 $982\mu\text{g}/\text{g}$ 。而在非矿层(氧化带或原生带)砂岩中U含量一般均小于 $30\mu\text{g}/\text{g}$ 。而钍含量无论是在氧化带、过渡带或还原带则变化不大。由此我们可以得到一个认识,就是根据砂岩中的U含量可以初步判断层间氧化带各带的大致位置。如512地区,位于矿卷前锋上游且U含量小于30

$\mu\text{g/g}$ 的砂岩很可能是处于氧化带的位置。位于下游, 可能是还原带。大于 $30 \mu\text{g/g}$, 则有可能是过渡带。

(2) 从铀、钍地球化学原理可知, 钍不是变价元素, 在自然界仅有四价态, 不易被游失。其地球化学行为与四价 U 相似, 常与之共同迁移和沉淀。在正常原生沉积岩中, Th/U 比值一般为 3~4 (砾岩 3.7, 砂岩、粉砂岩 3.6)^[1]。因而, 在砂岩型层间氧化带发育过程中, 水与岩石相互作用后, 由于主要是铀被淋滤而钍值则改变不大, 加之钍在水迁移过程中不如铀那样容易发生次生富集, 铀可以形成表生铀矿化, 钍却不能。因此, 在氧化带 Th/U 值往往大于 4, 铀矿石带 (过渡带) Th/U 值往往小于 3, 还原带 (原生带) 则介于 3~4 之间。512 矿床砂岩中 Th/U 比值具有类似的规律性, 只不过划分界线有所差异, 其原因是由于 512 地区砂岩中 Th 的背景值含量太低之故。由表 1 可以清楚地看出, 从上游到下游矿翼和矿卷中的 Th/U 值一般小于 0.3, 最低仅有 0.004, 而非矿体的原生带砂岩除表 1 伊犁盆地 512 矿床 30 号剖面 U、Th 含量个别外, Th/U 值都大于 0.3, 如 3002 孔和 3010 孔, 该值分别为 0.76 和 1.5。很明显, 在砂岩型铀矿床研究中, Th/U 值可以作为确定层间氧化带尖灭地段的又一证据。

表 1 伊犁盆地 512 矿床 30 号剖面 U、Th 含量

Table 1. U and Th content of No. 30 section in No. 512 ore deposit, Ili basin

序号	样号	取样位置/m	岩性	U/($\mu\text{g/g}$)	Th/($\mu\text{g/g}$)	Th/U	备注
1	3002-T ₂	182~184	灰色砂砾岩	16.80	12.70	0.76	
2	3002-T ₃	188~189	黄色中粗砂岩	125.00	9.20	0.07	矿
3	3002-T ₄	185~186	灰色含砾中粗砂岩	296.00	10.30	0.035	矿
4	3004-T ₂	172~174	灰黄色中粗砂岩	39.40	5.20	0.13	矿(翼)
5	3004-T ₁	131~133	灰色粉砂质泥岩	3.84	9.20	2.40	
6	3004-T ₃	底板	灰色泥岩	3.13	10.00	3.19	底板
7	3006-T ₁	169~172	深灰色泥岩	4.14	8.40	2.03	顶板
8	3006-T ₃	196~200	灰色砂岩	36.60	4.50	0.132	矿(翼)
9	3006-T ₄	202~203	灰色砂岩	248.00	6.00	0.02	矿(翼)
10	3006-T ₅	223~226	灰色泥质粉砂岩	3.52	10.10	2.87	底板
11	3010-T ₁	193~195	灰色泥岩	3.60	4.00	1.11	顶板
12	3010-T ₂	195~198	灰白色砂砾岩	3.46	5.20	1.50	
13	3010-T ₃	215.77	浅灰色中粗砂岩	18.80	4.60	0.24	矿
14	3010-T ₄	228~230	深灰色泥岩	3.22	10.30	3.20	底板
15	3012-T ₁	192~194	灰色粉砂质泥岩	12.90	6.80	0.53	顶板
16	3012-T ₂	203~205	浅灰色砂砾岩	29.20	7.60	0.26	矿
17	3012-T ₃	214~216	浅灰色中粗砂岩	18.40	4.10	0.22	
18	3012-T ₄	223~225	深灰色含碳泥岩	3.56	8.30	2.33	底板
19	3016-T ₁	185~188	灰色泥岩	3.66	6.60	1.8	顶板
20	3016-T ₂	207~210	浅灰色中砂岩	982.00	4.20	0.004	矿
21	3016-T ₃	196~198	灰色含砾砂岩	11.80	9.60	0.81	
22	3016-T ₄	219~222	灰色含碳泥岩	7.22	9.40	1.30	
23	3016-T ₅	208	灰黄色砂岩	43.6	4.80	0.11	矿(卷)

注: 样品由核工业北京地质研究院测试中心测试, 1996

(3) 表 2 列出了 512 矿床 30 号剖面放射性同位素比值, 若将表中数据投到 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 关系图上 (图 2), 则显示出铀矿石样品都落在 III 和 IV 区, 且大多数位于 IV 区。按 J K Osmond 的研究成果^[3], 矿石样品在 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 关系图上大多应位于 III 区, 但实际上大多位于 IV 区即氧化还原过渡带的矿卷前锋体系下游。由于 III 和 IV 区都属于氧化还原过渡带范围, 因而, 总体上看与理论上^[3]的分带基本吻合, 同时也表明不同地区、不同矿床的不同

地带,其放射性同位素比值亦稍有差异。此外,由于样品中钍含量极低,难以精确确定,亦有可能产生一定误差,但这并不影响对层间氧化带各分带特征的认识。

表2 伊犁盆地512矿床30号剖面放射性同位素比值

Table 1. Radioactive isotopic ratios of No. 30 section in No. 512 ore deposit, Ili basin

序号	样号	取样层位/m	岩性	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$	备注
1	3002-T ₂	182~184	灰色砂砾岩	1.20	10.20	2.48	
2	3002-T ₃	188~189	黄色中粗砂岩	1.26	3.00	1.07	矿
3	3002-T ₄	185~186	灰色含砾中粗砂岩	1.15	2.33	0.03	矿
4	3004-T ₂	172~174	灰黄色中粗砂岩	1.67	15.60	0.65	矿(翼)
5	3006-T ₃	196~200	灰色砂岩	1.04	12.30	0.48	矿(翼)
6	3006-T ₄	202~203	灰色砂岩	1.02	14.00	0.09	矿(翼)
7	3010-T ₃	215.77	浅灰色中粗砂岩	0.99			矿
8	3012-T ₂	203~205	浅灰色砂砾岩	1.18	8.83	0.73	矿
9	3012-T ₃	214~216	浅灰色中粗砂岩	1.20			
10	3016-T ₂	207~210	浅灰色中砂岩	0.84	252.90	0.32	矿
11	3016-T ₅	208	灰黄色砂岩	2.72			矿(卷)

注:样品由核工业北京地质研究院测试中心测试,1997

(4)从表2中还可以看出,铀矿体的 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值为0.84~1.67,平均1.15($n=9$)。也就是说,铀矿石带 ^{234}U 一般都大于 ^{238}U ,表明明显存在多余的 ^{234}U ,这与吴慧山等^[2]研究得到的当氧化砂岩接近矿体时,明显地存在着多余的 ^{234}U 的认识具有一致性。因而,我们有理由认为

^{234}U 比值在确定砂岩型铀矿氧化还原过渡带(矿卷位置)的研究中具有重要意义。在此带范围内一般都有着高的或偏高的 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值^[2]。氧化还原过渡带具有偏高的 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值与 ^{234}U 原子较 ^{238}U 原子有较大的活动性有关。这一事实支持矿石样品在 $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ - $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 关系图上(图2)大多位于N区的结论。

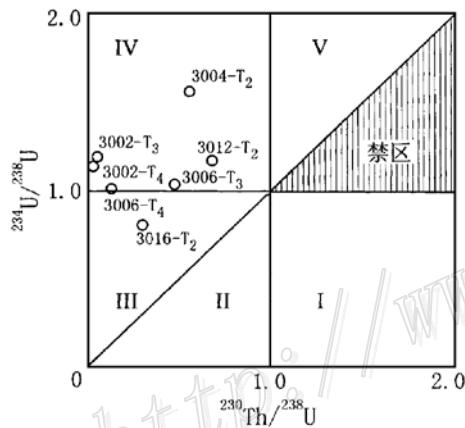


图2 512矿床30剖面放射性同位素比值相图
I—氧化带; II~N—过渡带; II—矿卷上游氧化区; III—铀沉淀区(以 ^{238}U 为主); N—铀沉淀区(以 ^{234}U 为主); V—还原带; 3004-T₂—样品编号

Fig. 2. Radioactive isotopic ratios of No. 30 section.

I—Oxidation zone; II~N—Transitional zones; II—Upper reach oxidation area of the roll; III—Uranium precipitation area (mainly ^{238}U); N—Uranium precipitation area (mainly ^{234}U); V—Reduction zone; 3004-T₂—Serial number of sample.

3 结论

新疆伊犁盆地512矿床放射性同位素研究结果表明,含矿岩层中的U含量和Th/U比值与层间氧化带的氧化还原分带有关。在氧化还原过渡带,砂岩中U含量较高(一般大于30 μg/g),氧化带和还原带砂岩中U含量较低,通常小于30 μg/g。而含矿岩层中的Th含量在不同的氧化还原分带中则变化不大。从Th/U比值看,过渡带铀矿石的Th/U(512矿床小于0.3)比值低于氧化带和还原带砂岩中的Th/U比值。显然,在层间氧化带砂岩型铀矿床研究中,含矿岩层中的U

含量和 Th/U 比值可以为层间氧化带尖灭地段的确定提供重要依据。放射性同位素比值测试结果显示，铀矿石样品的同位素比值 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) 位于氧化还原过渡带范围内，与 J K Osmond 等人的研究成果接近。此外，砂岩中的 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值亦可以作为判断砂岩型铀矿床氧化还原分带的重要标志。在过渡带，存在明显多余的 ^{234}U ，即 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 通常大于 1。 $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值偏高区往往是过渡带分布区。

通过研究对比，运用含矿砂岩中 U、Th 含量及同位素比值 ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$) 来确定层间氧化带尖灭地段与实际地质勘探结果基本一致。

参 考 文 献

- 1 史维浚. 铀水文地球化学原理. 北京: 原子能出版社, 1990.
- 2 吴慧山, 谈成龙. $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ 比值在铀矿地质工作中的若干应用. 放射性地质, 1981, (5): 424~434.
- 3 Osmond J K et al. Uranium isotopic disequilibrium in groundwater as an indicator of anomalies. Int. J. Appl. Isot., 1983, 34 (1): 283~308.
- 4 Евсева Л С и др. Геохимия урана в зоне гипергенеза, 1974.

URANIUM AND THORIUM ISOTOPIC EVIDENCE FOR DETERMINING MINERALIZED SECTORS OF THE SANDSTONE TYPE URANIUM DEPOSIT

Liu Jinhui

(East China Geological Institute, Linchuan 344000)

Key words: interformational oxidation zone, radioactive isotope, isotopic ratio, sandstone type uranium deposit, Ili of Xinjiang

Abstract

On the basis of the basic principle of uranium and thorium isotopic geochemistry, the author determined the U and Th content as well as $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ and $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ratios of ore-bearing sandstone, and studied characteristics of the oxidation zone, the reduction zone and redox transition zone in No. 512 deposit, Ili basin, Xinjiang. The results suggest that the uranium content and $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratios in the sandstone of the redox transition zone are generally higher than those of the oxidation and reduction zones, while the Th/U ratios of the transition zone are lower than those in sandstone of the oxidation zone and the reduction zone. $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ratios in uranium ore samples are in the range of their ratios in the redox transition zone. The high value areas of $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ratios are often consistent with the distribution areas (the uranium precipitation areas) of the transition zone. It is obvious that important evidence for locating mineralized sectors of the sandstone type uranium deposit may be provided by the U and Th content as well as Th/U, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ and $^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}$ ratios in the sandstone.