

512 矿床成矿的地球化学条件分析

张展适*

(华东地质学院, 江西临川)

提 要:通过对伊犁 512 矿床成矿的物理化学条件分析, 可知蚀源区的各类火山岩及盆地侏罗系砂岩和灰黑色泥岩是本矿床的铀源, 含铀地下水是层间氧化带型铀矿床的成矿流体。由 PHREEQC 1.5 地球化学模式程序计算得知, 成矿流体中铀主要以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 的形式迁移, 而有机质、黄铁矿对铀的还原沉淀作用及水解产物高岭土、伊利石对铀的吸附沉淀作用导致铀矿体产于层间氧化带的氧化还原过渡亚带。形成层间氧化带型铀矿床的决定性因素不是水中铀的含量, 而是成矿时的地球化学条件。

关键词: 铀源 成矿流体 模式程序 层间氧化带 新疆伊犁

随着我国核电事业的迅速发展, 对铀矿资源的需求量与日俱增。寻找大型超大型铀矿床特别是经济可采的可地浸型铀矿显得尤为重要, 目前在国内外这类矿床中最具经济价值的是产于中、新生代砂岩盆地中的层间氧化带型铀矿床。因此对本类矿床的成矿条件进行系统分析就很有必要, 本文选择我国典型的层间氧化带型铀矿床——新疆 512 矿床进行成矿的地球化学条件分析。

1 区域地质特征

矿床处于中天山隆起带的伊宁拗陷南部斜坡带西侧, 该拗陷是在巩乃斯石炭纪—二叠纪弧间断裂的基础上发展起来的中—新生代山间盆地, 盆地基底为石炭—二叠系的中酸性火山岩及海西期花岗岩, 其上不整合有中上三叠统小泉沟群 ($T_{2+3}xq$) 和下中侏罗统水西沟群 ($J_{1-2}sh$) 的河湖相沉积的含矿岩系, 最上面不整合覆盖有盆地萎缩期形成的第三纪陆相红层和第四纪, 构成了典型的有利于铀矿化的“三套结构”^[1]。盆地内地层构成一近东西走向, 倾向北, 倾角 $5^\circ \sim 15^\circ$ 的单斜构造, 区域性逆断层呈东西向贯穿于察布查尔山前地带石炭系中, 控制着盆地南缘。

2 矿床地质特征

512 矿床发现于 50 年代, 90 年代引入层间氧化带找矿模式和地浸技术, 经重新勘探目前已发展成为可地浸的万吨级铀矿床, 其矿床地质特征为: ① 矿床产于缓倾斜的侏罗纪含煤岩系中, 煤、砂岩、泥岩均有铀矿化现象。矿床矿体控制长 3.8 km, 宽约 1 km, 第四系平均厚 75 m, 矿体埋深 160~210 m; ② 主矿体产于层间氧化带的氧化还原过渡带, 平面上南北宽 50~150 m, 分布于由 M_5 和 M_8 组成底、顶隔水层的中粗粒砂岩中, 在剖面上呈卷状, 平面上呈似层状, 总体产状与地层一致。卷状矿体其卷头和卷尾沿地层倾向的宽度分别为 70~150 m 和 200~350 m, 其平均厚度分别为 6.02 m 和 1.58 m, 沿地层走向, 卷头最长

* 张展适, 女, 33 岁, 讲师, 1986 年毕业于南京大学, 地球化学专业。邮政编码: 344000

可达 100 m; ③ 在粉砂岩、泥岩中产有透镜状矿体, 规模较小, 沿地层走向不连续, 一般为几十米, 厚度几十厘米, 在矿床中占极次要地位; ④ 层间氧化带广泛发育于中下侏罗统水西沟群各沉积旋回中。平面上, 层间氧化带分布东起乌库尔其, 西止中哈边境线, 察布查尔山以北 5~10 km 的范围, 层间氧化带前锋在平面上呈蛇曲状分布, 剖面上呈叠瓦状分布^[2], 铀矿主要赋存在 I~IV, V 旋回的层间氧化带中; ⑤ 矿石矿物主要为铀石、沥青铀矿及微屑状钛铀矿、含铀钛铁矿等, 多呈超显微或微粒状分散于矿石胶结物中。另还有大量铀呈吸附状态, 被大量的有机质、碳化植物碎屑、草莓状黄铁矿及高岭土等粘土矿物所吸附。矿石为灰白色或深灰色, 疏松状或胶结状或蜂窝状; ⑥ 矿床品位变化于 0.01%~0.2% 之间, 平均品位为 0.047% (边界品位为 0.01%)。其中卷状矿体的卷头部平均品位为 0.045%, 翼部平均品位为 0.069%, 最高品位可达 2.05%。

3 成矿地球化学条件

本文对 512 矿床成矿的地球化学条件的分析注重于成矿元素铀的“源、转、储”3 个方面, 在此“源”即成矿物质铀的来源, “转”即铀的活化转移, “储”即有利的赋矿部位及矿石矿物的沉淀的物理化学条件。

(1) 512 矿床的成矿物质铀的来源: 由于层间氧化带型铀矿床的特殊的成矿机制, 即层间氧化带型铀矿床是以地下水为载体, 在砂岩层中迁移, 由于氧化还原条件的改变, 在氧化还原界面处富集而形成的。因此, 成矿溶液常为浅部循环的地下水。从而讨论层间氧化带型铀矿床的“铀源”, 重在地下水中铀的含量。通常地下水中铀含量变化于 10^{-8} g/l~2 g/l, 一般为 10^{-6} g/l。通过对层间氧化带型铀矿床中不同类型地下水中铀含量分析表明, 虽然一般含矿区域的水要比不含矿区域的水中的铀含量高, 但在许多情况下, 这两种水中铀含量并没有严格的差别^[3]。有人通过计算表明, 地下水中铀含量采用 1×10^{-5} g/l, $K = 50$, $a_1 - a_2 = 0.001$ g/l, 完全可以形成品位达 0.5% 的铀矿床^[3]。也即从理论上讲, 形成铀矿化并不一定非要特别的“含铀溶液”, 即“相当富铀的地下水”, 使得补给区水中成矿元素的高含量, 并不是水成铀矿床的必要条件。但富含铀的地层对其矿化有利, 而其形成的决定性因素是地球化学环境。

从表 1 可知, 512 矿床各种岩体中铀含量是地壳中同类岩石的 2~3 倍, 而沉积岩层本身铀的含量则是其平均值的 6~12 倍。因此可以推知当物理化学条件有利时, 不仅蚀源区的各种岩体能为成矿提供铀源, 而且沉积岩层本身也能为成矿提供铀。

(2) 成矿物质的活化条件和迁移形式, 即成矿流体的形成: 据李文君, 王玉生的研究^[4], 在正常酸性火山岩

表 1 512 矿区代表性岩石的铀含量

岩性	蚀源区铀含量/ 10^{-6}	资料来源	地壳中铀含量/ 10^{-6}	资料来源
海西期花岗岩	8	[1]	3.5	维氏
中酸性火山岩	6~8	[1]	1.8~3.0	维氏
J 灰色砂岩铀含量	5~6	[1]	0.45	涂和费
灰黑色泥岩	7~8	[1]	1.3	涂和费

中, 铀原始状态主要为分散的形式 (>90%), 次为含铀副矿物 (锆石、褐帘石、磁铁矿、钛铁矿和锐钛矿等) 及少量含铀质点和超显微铀矿物, 在后期脱玻化、水云母和泥化等活化因素作

用下, 铀的带出量最大可达 90%。而据张守本、谈成龙的研究^[5], 在泥岩中腐殖酸对 UO_2^{2+} 也仅起吸附作用。由此可见, 在蚀源区和矿区地层中大部分铀均是弱结合态的活性铀, 完全可以在后期地质作用中活化出来。

早一中侏罗世, 新疆伊犁盆地处于潮湿气候环境, 伴随着盆地基底石炭-二叠系的中酸性火山岩及海西期花岗岩的蚀变作用, 蚀源区大量活性铀以 UO_2^{2+} 的形式随地下水进入盆地, 使盆地内铀的含量增加, 铀产生初始富集。

中侏罗世晚期至今, 盆地上升, 气候炎热干燥, 随着地下水的不断蒸发与运移, 特别是下渗过程中水-岩作用的不断进行, 含铀地下水逐渐演化成形成层间氧化带型铀矿床的成矿流体。铀的存在形式也随着水质成分及其物理化学条件的演化而改变。据我院新疆课题组水文地质孔水质分析资料, 地下水类型在 M_5 以下为 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^{-}-\text{HCO}_3^{-}-\text{Na}^{+}-\text{Ca}^{2+}$ 型, $M_5 \sim M_8$ 为 $\text{HCO}_3^{-}-\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}-\text{Na}^{+}$ 型, M_{10} 以上为 $\text{HCO}_3^{-}-\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}-\text{Na}^{+}$ 型。笔者采用最新的 PHREEQC 1.5 地球化学模式程序进行了地下水中铀的存在形式和饱和指数的计算。计算采用的初始地下水平均水质成分列于表 2, 模式计算结果列于表 3。从表 3 可知: ① 在各含水

表 2 512 矿床各主要含水层水质分析成分表

样号 (样品数)	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	$\text{K}^{+} + \text{Na}^{+}$	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Fe	U/($\mu\text{g}/\text{l}$)	pH
	(mg/L)								
M_5 以下 (22)	154.65	100.03	218.8	106.76	18.9	75.48	1.16	0.6	7.03
$M_5 \sim M_8$ (7)	132.1	31.3	84.9	44.0	9.3	42.9	0.35	4	8.08
M_{10} 以上 (4)	115.62	21.71	56.60	30.23	1.56	46.57	0.59	2	8.46

注: $t = 25^\circ\text{C}$, 据朱建才硕士论文

层中铀的存在形式均以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 、 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 为主, 次为 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)$, 仅在相对含量上有差别。而即使是在 M_5 以下 $\text{SO}_4^{2-}-\text{Cl}^{-}-\text{HCO}_3^{-}-\text{Na}^{2+}-\text{Ca}^{2+}$ 型水中, 铀仍不能以 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)$ 和 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)_2^{2-}$ 的形式迁移。笔者认为, 这是因为体系的 $\text{pH} = 7.03$, 即处于中性到弱碱性环境, 有利于铀以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 的形式迁移, 而铀以 $\text{UO}_2(\text{SO}_4)$ 形式迁移仅发生在 $\text{pH} = 3 \sim 5$ 的硫酸盐体系中; ② 通

通过对饱和指数的计算可知各含水层中沥青铀矿的饱和指数接近, 但均未达到过饱和, 主要是由于模拟采用的是平均水质分析成分, 而大多数水文地质钻孔地处氧化带, 因此本文计算的各含水层中铀的存在形式代表的是氧化

环境下铀的迁移形式。而各含水层中沥青铀矿的饱和指数接近与本矿区各含水层中均能见到铀矿化一致, 仅在 $M_5 \sim M_8$ 构成主矿体, 再一次证明形成层间氧化带型铀矿床的决定性因素不是水中铀的含量, 而是地球化学条件。

(3) 铀的沉淀条件: 层间氧化带的完整发育和规模是 512 矿床形成的决定性因素, 层间氧化带的各个亚带的顺序发育, 氧化带为铀元素的再次活化、迁移提供了有利的地球化学条

表 3 各含水层中铀的存在形式

含水层位 (铀存在形式的相对含量 / % 及 SI)	M_5 以下	$M_5 \sim M_8$	M_{10} 以上
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$	49.87	56.33	41.26
$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$	48.67	43.2	58.56
UO_2CO_3	1.46	0.47	0.14
(UO_2) 的饱和指数 SI	-9.16	-10.51	-11.55

件和环境,而氧化还原过渡带则是导致铀沉淀的物理化学条件及为形成后生工业铀富集提供了场所。现将512矿床层间氧化带的地球化学特征总结于表4。

表4 512矿床层间氧化带的地球化学特征

特征	氧化带	氧化还原过渡带	还原带	资料来源
次生蚀变	褐铁矿、赤铁矿、针铁矿	高岭土、伊利石	有机质、黄铁矿	[1]
颜色	深褐、黄、灰红	灰白、浅黄	灰、深灰	[1]
Fe^{3+}/Fe^{2+}	22.154	3.214	0.596	[1]
全S/%	0.049	0.06	0.156	[6]
有机碳/%	0.04	0.07~0.15	0.28	[6]
Eh (mV)	>40~-25	-25~-80	<-80	[2]
铀的存在形式	$UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 、 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$	铀石、沥青铀矿、钛铀矿等	与有机质的吸附状态存在	

根据表4提供的层间氧化带各亚带的地球化学特征,可以得知,在氧化带以 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 形式迁移的铀,到达氧化还原过渡带时,由于其中富含黄铁矿、有机质等还原物质,导致铀发生还原沉淀,同时该带中还有大量硅酸盐矿物特别是长石发生水解形成的高岭土、伊利石等粘土矿物,也对铀元素在此带富集起到了积极的作用,从而可见氧化还原过渡带是铀发生沉淀的场所。

(4) 小结:伊犁512矿床成矿的地球化学条件可以归结为:① 蚀源区察布查尔山各类酸性火山岩中铀含量是地壳中同类岩石的2~3倍,而伊犁盆地侏罗系砂岩及灰黑色泥岩中铀的含量则是其平均值的6~12倍,它们构成了本矿床的铀源;② 早一中侏罗世,蚀源区大量活性铀以 UO_2^{2+} 的形式随地下水进入盆地。而从侏罗世晚期至今,由PHREEQC 1.5地球化学模式程序计算可知,铀主要以 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 、 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 的形式迁移。而即使是在 M_5 以下 SO_4^{2-} - Cl^- - HCO_3^- - Na^+ - Ca^{2+} 型水中,铀仍不能以 $UO_2(SO_4)$ 和 $UO_2(SO_4)_2^{2-}$ 的形式迁移。笔者认为,这是因为体系的 $pH=7.03$,即处于中性到弱碱性环境,有利于铀以 $UO_2(CO_3)_2^{2-}$ 和 $UO_2(CO_3)_3^{4-}$ 的形式迁移,而铀以 $UO_2(SO_4)$ 形式迁移仅发生在 $pH=3\sim 5$ 的硫酸盐体系中;③ 在氧化带各含水层中,沥青铀矿的饱和指数接近,但未达饱和,既说明了本矿床各含水层均能见有矿化,但仅在某一固定含水层成矿的原因。同时也证明了形成层间氧化带型铀矿床的决定性因素不是水中铀的含量,而是成矿的地球化学环境;④ 形成层间氧化带型铀矿床的有利部位是层间氧化带的氧化还原过渡带,在该带中既产生有机质、黄铁矿对铀的还原沉淀作用,同时又发生水解产物高岭土、伊利石对铀的吸附沉淀作用。

在本文的写作过程中得到导师周文斌教授和史维浚教授的悉心指导和帮助,并审阅全文。在此谨表深深的谢意!

参 考 文 献

- 1 黄世杰. 层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件及找矿判据. 铀矿地质, 1994, 10 (1): 6~13.
- 2 古抗衡, 王保群. 新疆伊犁盆地512矿床层间氧化带铀矿床成矿地质特征. 西北铀矿地质, 1995, 44 (1): 1~9.
- 3 A N 别列里曼. 水成铀矿床. 203所译. 1995, 15.
- 4 李文君, 王玉生. 酸性火山岩中铀的原始性状、活化迁移及作为铀源的可能性. 铀矿地质, 1986, 2(4): 253~封底.
- 5 张守本等. 铀矿化找矿新方法——腐殖酸抽提法. 铀矿地质, 1996, 12 (3): 165~171.
- 6 程明高等. 512可地浸沙岩型铀矿床地质特征和远景评价. 铀矿地质, 1995, 11 (2): 11~18.