

文章编号: 0258-7106 (2005) 04-0409-07

新疆 511 铀矿床微量元素富集特征研究*

王正其¹, 曹双林¹, 潘家永^{1,2}, 管太阳¹, 张国玉¹

(1 东华理工学院, 江西 抚州 344000; 2 南京大学, 江苏 南京 210093)

摘 要 通过对砂岩铀矿体及其围岩中的 Se、Re、Ga、Ge、V、Mo 和 U 等元素的测试与分析, 文章系统研究了 511 砂岩型铀矿床中主要微量元素的富集特征。结果表明: 511 铀矿床中, Se、Re、Ga、Ge、V、Mo 等微量元素存在不同程度的富集, 其中 Se、Re、Ga 的富集达到综合利用工业品位; 微量元素空间分布受层间氧化带控制且具有规律性, 沿层间氧化作用方向, 依次出现 Se-Re(+Ge)-Mo-V 等分带; Re 与 U 具有较好的相关性, Se、Re 元素对砂岩铀矿找矿具有重要指示意义。511 铀矿床是一个与层间氧化带有关的多元素聚集的复合矿床。

关键词 地球化学; 微量元素; 铀矿; 富集特征; 砂岩; 伊犁盆地

中图分类号: P619.14

文献标识码: A

层间氧化带型砂岩铀矿, 因其矿体厚、铀资源规模大、含矿砂岩疏松、可地浸、开采成本低而受到高度重视, 成为当今铀矿床学研究的重要领域之一(张金带, 2003; IAEA, 2001; Dahlkamp, 1993)。在中亚及美国等地, 发现该类型矿床中伴生有 Se、Re、Mo、V、Sc 及稀土元素等(Dahlkamp, 1993; 狄永强等, 1994)。研究表明, 不同矿床伴生元素种类和分布特点不尽相同。与其他国家相比较, 中国针对砂岩铀矿床的研究工作, 主要集中在铀成矿作用和成矿特征方面, 对伴生的微量元素的特征则研究较少并缺乏系统性。511 铀矿床是中国最早发现的可地浸砂岩型铀矿床之一, 笔者认为, 探讨与该铀矿床伴生的微量元素的富集特征, 对砂岩铀矿床成因机理研究、找矿预测、伴生组分的综合回收利用等具有重要意义。本文通过系统取样、研究, 较全面地揭示了 511 砂岩铀矿床微量元素的富集特征。

1 511 铀矿床地质概况

伊犁盆地位于哈萨克斯坦板块的伊犁微板块内, 是在石炭纪-二叠纪弧间裂陷槽基础上发展演化而成的陆相中新世代山间盆地, 呈东窄西宽的楔形体, 向西延伸进入哈萨克斯坦共和国境内。石炭纪-

二叠纪的陆相火山碎屑岩、酸性火山岩构成盆地基底, 呈北陡南缓的不对称构造形态, 构造格局总体为北强南弱, 南缘由南往北总体呈简单的构造单斜带(冯建辉等, 2000)(图 1)。511 铀矿床就发育在南缘构造单斜带上。

矿区内的地层包括下-中侏罗统水西沟群(J₁₋₂ sh)、白垩系、第三系和第四系, 产状平缓, 倾角 3~8°。含矿岩系为水西沟群, 呈超覆不整合于基底之上, 为一套潮湿气候条件下沉积的暗色含煤碎屑岩系, 可划分为 8 个沉积旋回。其中, I~IV 旋回形成由冲积扇-扇平原相辫状河沉积的灰色粗碎屑岩; V 旋回以扇三角洲体系沉积为特征, 主要形成一套含砾粗砂岩、中-粗砂岩、细砂岩、泥质粉砂岩、泥岩和煤岩等; 上部 VI~VIII 旋回以水退型三角洲-河流相沉积为主。V 旋回砂体在剖面上呈泥-砂-泥结构, 砂体平均厚约 18 m, 构成 511 铀矿床的主要赋矿层位。

511 铀矿床为后生层间氧化成因。砂岩铀矿严格地受发育于 V 旋回砂体中的舌状层间氧化带的控制。由南往北, 层间氧化带可划分为氧化带、氧化-还原过渡带和还原带。研究表明^①, 层间水中的游离氧与围岩中的有机碳及变价元素(S、Fe、成矿元素等)之间发生的氧化还原反应, 导致层间氧化带不同分带的地球化学性质(如 Eh、pH)不同, 并发生铀成

* 本文由(973)国家重点基础研究发展规划项目(2001CB0988)资助

第一作者简介 王正其, 男, 1964 年生, 硕士, 副教授, 长期从事铀矿地质科研及教学工作。E-mail: zhqwang@ecit.edu.cn。

收稿日期 2004-12-20; 改回日期 2005-04-07。许德煊编辑。

① 王正其, 等. 1998. 伊犁盆地扎吉斯坦地段层间氧化带控矿规律研究(内部资料)。

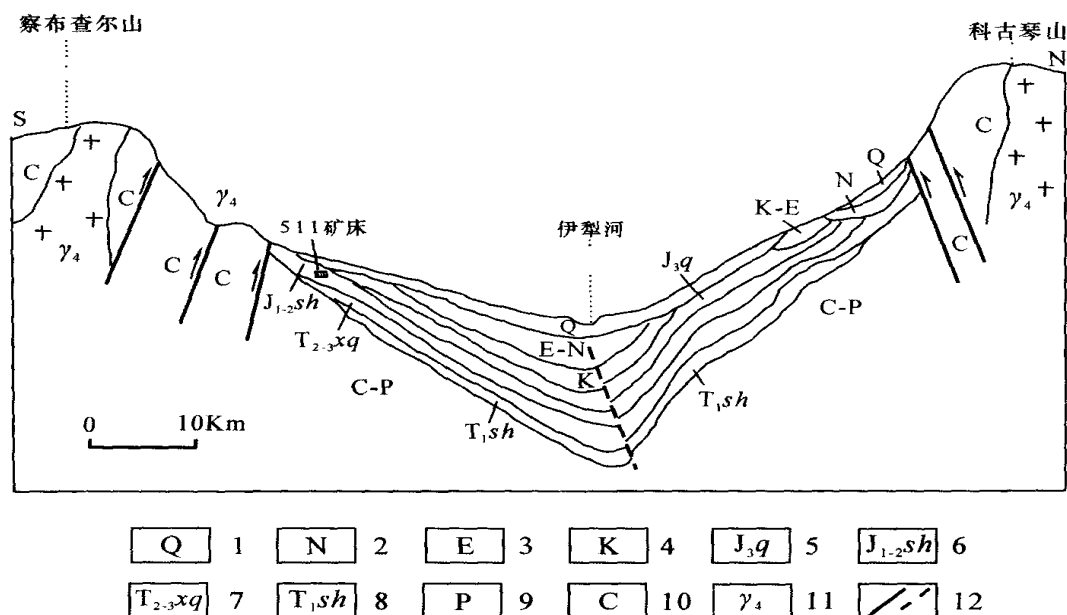


图1 伊犁盆地结构示意图(据冯建辉等,2000 修改)

1—第四系;2—新第三系;3—老第三系;4—白垩系;5—上侏罗统齐古组;6—中、下侏罗统水西沟群;7—中、上三叠统小泉沟群;
8—下三叠统上苍房沟群;9—二叠系;10—石炭系;11—海西期花岗岩;12—断层

Fig.1 Structural diagram of Yili Basin (modified after Feng et al., 2000)

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Palaeogene; 4—Cretaceous; 5—Upper Jurassic Qigu Formation; 6—Middle-Lower Jurassic Shuixigou Group; 7—Middle-Upper Triassic Xiaoquangou Group; 8—Lower Triassic Shangcangfanggou Group; 9—Permian;
10—Carboniferous; 11—Hercynian granite; 12—Fault

矿作用。511 砂岩铀矿体主要产于层间氧化带的前锋线及其外缘部位(氧化-还原过渡带),平面上呈弯曲带状延伸。矿体形态主要呈卷状、似卷状或厚层板状等,以前锋线为界,分翼部和卷头铀矿体两大部分(王正其,1998)。含矿主岩主要为灰色、暗灰色含砾粗砂岩、中-粗砂岩及少量中-细砂岩。从前锋线到矿体尾部,卷头矿体的铀品位呈现由高到低逐渐降低的趋势。铀元素主要呈吸附状态和铀矿物形式存在,铀矿物主要为沥青铀矿,有少量铀石。据有关单位研究,沥青铀矿为显微粒状或超显微粒状,属弱氧化程度,常与乳滴状、星点状草莓黄铁矿及碳屑共生(闽茂中等,2003)。

2 样品采集与分析方法

511 铀矿床为一隐伏砂岩型矿床。矿区被第四系广泛覆盖,矿体埋深最浅约 190 m。因此,样品均采自钻孔岩芯。样品采集实施连续分段劈半取样法。采集层位为 V 旋回砂体,采集对象为铀矿石及其围岩砂体,矿石与围岩分别采集。

本次研究工作分别在 25 个钻孔中共采集样品 169 个。分析项目为 Se、Mo、V、Re、Ga、Ge 和 U 等元素的含量。

将样品粉碎到 250 目后,缩分出适量样品,分别送不同单位测试待研究组分的含量。其中,微量元素分析由国土资源部新疆测试中心完成,测试方法为原子吸收光谱(AAS);铀含量分析由核工业 216 大队完成,视样品中铀含量高低分别采用容量法和光度法。

3 微量元素富集规律

3.1 微量元素含量特征

169 个样品的微量元素测试结果表明:Se、Re、Ga 含量的均值分别为 45.59×10^{-6} 、 0.28×10^{-6} 、 12.93×10^{-6} (表 1),都大于相应的综合利用品位的下限(核工业地质局,2002);矿化样品出现几率, Ga 最高,其次是 Re、Se,分别为 71.01%、53.85%、31.36%;以综合利用品位的下限为基准,Se 的平均富集强度最大,为 4.56,最高可达 107.5,其次是 Re、

表 1 样品中微量元素的含量

Table 1 Concentrations of associated elements in No. 511 Uranium Deposit

元 素	Se	Mo	V	Re	Ga	Ge
平均 $w_B/10^{-6}$	45.59	4.62	56.12	0.28	12.93	2.72
变化系数/ %	252.6	123.7	62.5	112.1	48.0	70.9
矿化样品出现几率/ %	31.36	0	1.18	53.85	71.01	2.37
综合利用品位下限/ 10^{-6} *	10	100	450	0.2	10	10

* 据铀矿地质勘查规范(DZ/T0199—2002)(核工业地质局,2002)。

Ga,平均富集强度分别为 1.4、1.29,最高富集强度分别达 11.5、3.02;Ge、V 的均值较低,但有局部富集矿化现象,矿化样品出现几率仅为 2.37%和 1.18%;Mo 没有出现富集矿化现象。

变化系数计算表明,Se 含量的变化系数最大,达 252.6%,说明在层间氧化带发育过程中,Se 重新分配程度最高;其次是 Mo 和 Re,变化系数分别为 123.7%和 112.1%,其重新分配程度为中等;变化系数最低的是 Ge、V 和 Ga,仅为 70.9%、62.5%和 48.0%。比较特殊的是 Mo 和 Ga 元素,其重新分配程度与富集程度之间表现出不一致性,究其原因,估计与含矿岩系中 Ga 元素丰度较高、而 Mo 元素丰度低有关。

据此可初步确定,511 砂岩铀矿床的主要伴生元素为 Se、Re、Ga,且可能存在较大的可综合利用的资源潜力;Ge、V 虽存在矿化富集现象,但分布局限;Ge、V、Mo 主要体现为地球化学异常。

3.2 微量元素空间分布特征

依据综合利用品位的下限,分别圈定出伴生组分矿体。通过平面(图 2)和剖面(图 3)对砂岩铀矿带进行了研究。研究表明,Se、Re、Ga 的聚集部位明显受层间氧化带的控制,主要富集于层间氧化带的氧化-还原过渡带或外缘,其空间展布与砂岩铀矿体密切相关,规律特征十分明显。

Se 元素 矿化体在平面上呈带状延伸,位于层间氧化带前锋线的内侧(图 2),大体与铀矿卷的翼部矿体相对应,并偏向层间氧化带的氧化砂岩一侧。赋存 Se 矿化体的岩性有两种,即浅黄色或杂色砂岩及灰色、暗灰色砂岩。需要特别指出的是,铀矿卷的卷头矿体中无 Se 的富集,且绝大多数样品的 Se 含量低于检出限。这种现象表明,Se 主要由含氧渗入水携带而来;也说明,矿化体的 Se 含量取决于渗入的含氧层间水富 Se 的程度。

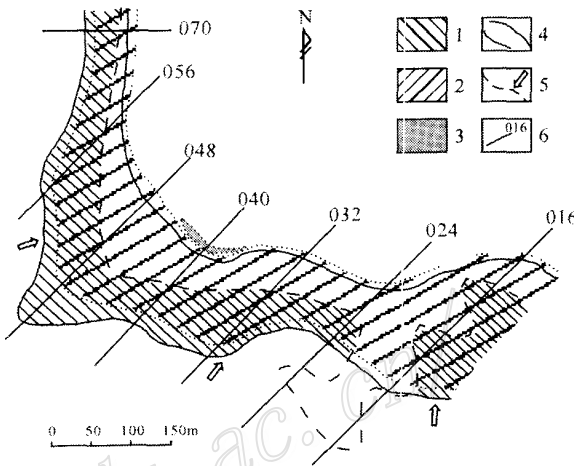


图 2 微量元素矿带平面展布图

1—Se 矿带;2—Re 矿带;3—V 矿带;4—U 矿带边界;
5—层间氧化带前锋线及发育方向;6—剖面线及编号

Fig.2 Zonation of trace element orebodies in a plan view

1—Se ore belt; 2—Re ore belt; 3—V ore belt; 4—boundary of U ore belt; 5—Front line and development direction of interlayer oxidation zone; 6—Section line and serial number

Re 元素 在平面上,于层间氧化带前锋线及其内外两侧均存在矿化现象(图 2),呈带状展布,分布范围大体与铀矿带一致,略偏向还原带一侧。剖面显示,Re 矿化体主要赋存于卷状铀矿体的卷头部位,部分位于翼部铀矿体中,但较翼部铀矿体要短(图 3),存在向还原带方向前移的趋势。富 Re 岩性为灰色、深灰色砂岩。与上述现象类似的是,在还原带或氧化带砂岩中,Re 含量甚低,说明 Re 主要与层间渗入水有关。

Ga 元素 分布范围宽,远大于铀矿带的分布范围(图 3),近于面状展布,从氧化带、过渡带直至还原带,几乎都有 Ga 矿化体存在(图 4A)。剖面特征表明,Ga 矿化体主要位于卷状铀矿体及其外缘还原砂体中,部分落在层间氧化带内缘,其内边界与层间氧

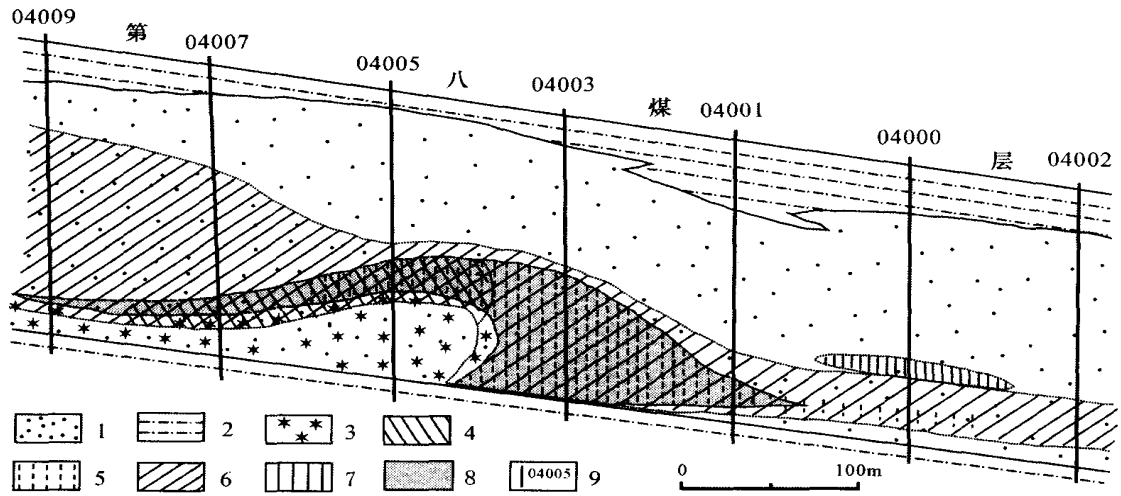


图 3 040 剖面中微量元素矿化体的分布

1—V 旋回砂体; 2—泥岩、泥质粉砂岩; 3—氧化砂岩; 4—Se 矿化体; 5—Re 矿化体; 6—Ga 矿化体; 7—V 矿化体; 8—U 矿体; 9—钻孔及编号

Fig.3 No. 040 geological section showing vertical distribution of trace element mineralized bodies

1—Sand body of V cycle; 2—Mudstone and argillaceous siltstone; 3—Oxidized sandstone; 4—Se mineralized body; 5—Re mineralized body; 6—Ga mineralized body; 7—V mineralized body; 8—U orebody; 9—Drill hole and serial number

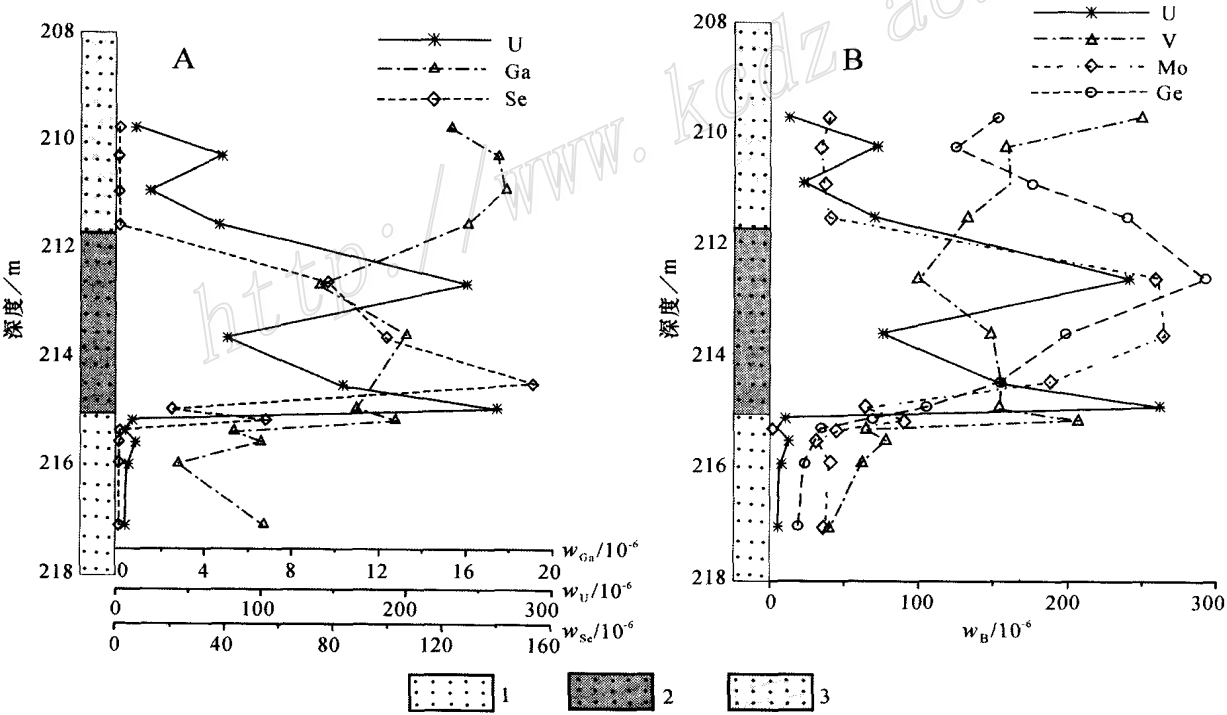


图 4 04007 钻孔 V 旋回砂体中铀及微量元素含量变化曲线

1—氧化带; 2—氧化-还原过渡带; 3—还原带

Fig.4 Variation of U and trace elements in Cycle V sand body of No. 04007 drill hole

1—Oxidation zone; 2—Oxidation-reduction transition zone; 3—Reduction zone

化带形态一致。富 Ga 岩石以灰色砂岩为主,部分为黄色、浅黄色砂岩。分析其原因,可能与砂体原始沉积物中 Ga 含量较高有关,但在层间氧化过程中, Ga 元素存在活化迁移也是肯定的。

04007 钻孔中微量元素含量变化曲线表明, Ge、V、Mo 在层间氧化带不同分带中也存在规律性分布特点:由氧化带到还原带,依次出现 Ge、Mo 和 V 地球化学异常; Ge 元素在氧化带与还原带砂岩中含量较低,而在氧化-还原过渡带(铀矿体部位)中,其含量显著增高(图 4B); Mo 地球化学异常呈现较铀矿体稍有后移的现象; V 异常则主要位于铀矿体的后部。

3.3 微量元素与铀的相关性

对伴生的微量元素的含量与相应样品的铀含量分别取对数,研究微量元素与铀的相关性。由于 Se、Re 矿化体分布的特殊性, Se 与 U 相关性研究的取值仅针对 Se 含量达到伴生元素综合利用下限品位的样品, Re 与 U 相关性研究的取值范围是卷头铀矿石样品,其余元素的取值为砂岩铀矿带中的全部样品。

研究结果表明, Re 与 U 呈明显的相关性,相关系数为 0.78(样品数为 65),跟 Re 矿化体与砂岩铀矿体轮廓基本吻合相一致,这在 04003 钻孔的 U、Re 含量曲线上体现得更为清楚(图 5)。一个有趣且值得注意的现象是 Se 与 U 的关系,虽然在空间上 Se 矿化体与翼部铀矿体存在较好的对应关系,但其含量与 U 含量之间不存在相关性(相关系数仅为 0.042, 44 个样品)。推测造成上述现象的原因有二:其一是, Se 矿化体并不与翼部铀矿体完全重叠;其二是, Se 与 U 的富集条件存在一定差异(狄永强等, 1994)。事实上, Se 仅聚集于翼部铀矿体及其内侧,而在卷头铀矿体中并不存在富集现象,也说明了这一点。Ga 与 U 含量之间基本不相关(相关系数为 0.026),结合 04007 钻孔的 Ga 含量变化特征(图 4B),过渡带和还原带砂岩中 Ga 含量普遍高于氧化带砂岩,而且,还原带灰色砂岩中 Ga 含量似乎更高。此现象可能与砂体原始沉积物中 Ga 含量较高有关,并且,在层间氧化过程中, Ga 元素肯定存在活化迁移,只不过活化分异程度很弱。

Ge、Mo、V 与 U 的相关性具有相似之处,体现出弱相关特点,相关系数分别为 0.34、0.15 和 0.16。结合这 3 种元素在 04007 钻孔中反映的地球化学异常特征(图 4B),推测在层间氧化带作用过程中,它

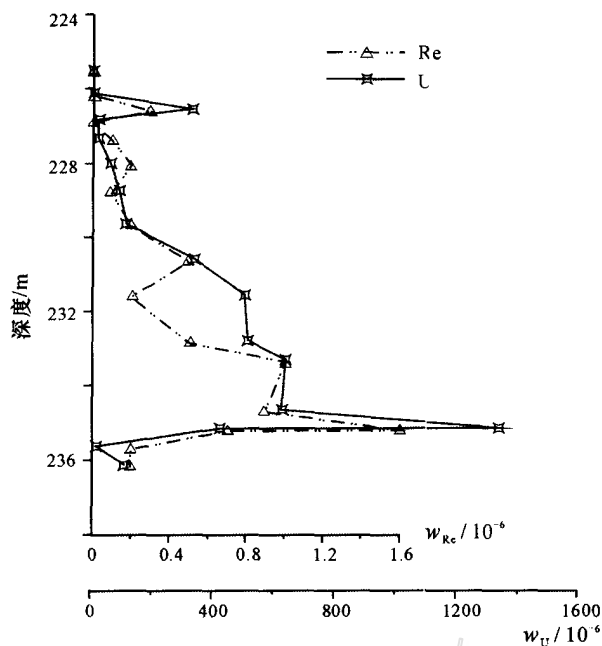


图 5 04003 钻孔卷头矿体中 Re 及 U 含量变化曲线

Fig. 5 Variation of Re and U concentrations of the orebody from No. 04003 drill hole

们存在弱富集现象,但富集部位与铀矿体不完全对应。

3.4 微量元素与砂岩粒级的关系

为研究微量元素富集与砂岩粒级的关系,选取了 3 个铀矿石样品,将其破碎、过筛,分成 5 个粒级: >1 mm, 1 ~ 0.3 mm, 0.3 ~ 0.1 mm, <0.1 mm, <0.074 mm。之后,分别进行 Se、Ga(由于标样问题, Re 未测)及 U 含量的测定(表 2)。结果表明,与赋矿砂岩中碎屑颗粒度之间的关系, Se、Ga 及 U 含

表 2 矿石样及其不同粒级中某些元素含量分析结果

Table 2 Element concentrations of ores of different grain sizes

样号	性质	粒级	$w_{Se}/10^{-6}$	$w_{Ga}/10^{-6}$	$w_U/10^{-2}$
K984-7A	矿石	>1 mm	5.2	8.4	0.8642
K984-7B	矿石	1 ~ 0.3 mm	3.6	5.7	0.4308
K984-7C	矿石	0.3 ~ 0.1 mm	7.3	11.5	0.8071
K984-7D	矿石	<0.1 mm	9.8	18.4	1.52
K984-7E	矿石水析物	<0.074 mm	18.9	35.0	1.21
K984-7	原样		8.0	7.7	1.24
K984-2	矿石水析物	<0.074 mm	1732	30.0	0.37
K984-2	原样		693.0	11.0	0.0331
K984-3	矿石水析物	<0.074 mm	12.8	30.0	0.37
K984-3	原样		3.0	7.3	0.2528

测试方法: X 射线荧光光谱; 测试单位: 南京大学现代分析中心 X 射线荧光光谱室。

量的变化具有一致性,即随碎屑颗粒变细,上述元素含量明显增高,且在粘土级($<0.074\text{ mm}$)颗粒中含量最高,如样品 K987-7、K987-2、K987-3,在粘土级颗粒中,Se 含量较原样分别增高了 2.4 倍、2.5 倍、4.3 倍,Ga 含量也有 2.7~4.5 倍不等的富集增高。据此,有理由认为,Se、Ga 等伴生元素的富集与铀成矿作用具有成因联系。

4 富集机理浅析

对 511 砂岩型铀矿床中微量元素富集及分带性的成因机理简要分析如下。

层间氧化带砂岩型铀矿的发育过程,实质是含铀(U^{6+})含氧地表水的不断补给,承压水在含矿含水层中渗透迁移,导致发生一系列物理化学反应(包括氧化-还原反应)的平衡、破坏,再平衡、又破坏,循环往复作用的过程。该过程致使还原态砂岩发生氧化,使铀发生活化迁移并于氧化-还原过渡带聚集成矿(IAEA, 2001; Dahlkamp, 1993; Hobday et al., 1999)。

Se、Re、Ga、Ge、Mo、V 等微量元素及 U 均属变价元素,具有相似的地球化学性质,在氧化条件下具有较强的活动性(牟保磊,1999;刘英俊等,1986; Myneni et al., 1997),易形成 Se^{6+} 、 Re^{7+} 、 Ga^{3+} 、 Ge^{4+} 、 Mo^{6+} 、 V^{5+} 等易溶化合物溶入含铀(U^{6+})含氧的地表水,在适当条件下,转为层间渗流水。这种含氧水在含矿含水层(砂体)内渗流的过程中,与砂岩围岩发生一系列的水-岩反应,导致层间氧化带的形成。该过程可能致使砂体中部分同生沉积形成的铀及微量元素活化并随层间水迁移。当渗流水与还原剂相遇时,由于水中游离氧的消耗,环境由氧化态逐渐转为还原态,形成层间氧化带的分带性,同时导致上述变价元素由高价态转变为低价形式(U^{4+} 、 Se^{4+} 、 Re^{4+} 、 Ga^{2+} 、 Ge^{2+} 、 Mo^{4+} 、 V^{4+}),使其失去活动性并聚集于氧化-还原过渡带(层间氧化带前锋线附近),从而形成上述微量元素与铀的共生。研究也表明,511 矿床 V 旋回层间氧化带的氧化-还原过渡带是吸附障、还原障及中和障的统一体(王正其,1998),推测层间氧化带的分带性、地球化学障的特征以及微量元素之间地球化学特性的差异,是导致微量元素在砂岩铀矿体内富集并形成分带的主要原因。

5 结 论

(1) 微量元素 Se、Re、Ga、V、Ge、Mo 等在 511 砂岩铀矿床中均有不同程度的富集,成因上与层间氧化带的发育及铀成矿过程密切相关,其空间分布具有规律性:沿层间氧化作用方向,依次出现 Se-Re(+Ge)-Mo-V 等分带。其中,Se 的富集部位与翼部铀矿体基本吻合,富集范围略大于翼部铀矿体,扩大至矿体内侧的氧化砂岩中;Re(可能包括 Ge 异常)的富集部位与卷状铀矿体重叠;Mo 异常具有较铀矿体稍有后移的现象;Ga 的富集体范围最大,从铀矿体至其后部一定范围内的还原砂体中均有富集;V 异常则主要位于铀矿体的后部。

(2) Re 与 U 含量之间的相关性最好,其余 5 种元素与 U 含量之间的相关性较差或不相关,说明 Se、Ga、V、Ge、Mo 等元素的地球化学性质与 U 虽具相似性(狄永强,1994),但元素富集的地球化学条件存在一定差异。微量元素富集分带是层间氧化带分带性、地球化学障特征以及元素地球化学特性差异等因素综合所致。

(3) Se、Re 对寻找砂岩铀矿具有重要指示意义:当铀矿体中存在 Se、Re 的富集,则表明处于铀矿卷的翼部,应继续向层间氧化带发育方向追索厚大矿体(卷头矿体);当铀矿体中仅存在 Re 的富集,则说明已经追索到卷状矿体的卷头部位。

(4) 511 矿床不单是一个铀矿床,而且是一个与层间氧化带有关的多元素聚集的复合砂岩矿床。Se、Re、Ga 的富集程度达到了伴生元素综合利用品位(Ga 含量高不排除与原始沉积物富 Ga 有关);Ge、Mo、V 则主要体现为地球化学异常。依据砂岩铀矿地浸开采的特点,Se、Re、Ga 等具有较可观的利用价值,应加强综合回收利用方面的研究工作。

References

- Bureau of Geology, CNNC. 2002. The Standards for uranium prospecting and exploration (DZ/T0199-2002)[Z]. Standardization Administration of China (In Chinese).
- Hobday D K and Galloway W E. 1999. Groundwater processes and sedimentary uranium deposits[J]. Hydrogeology Journal, 7:127~138.
- Di Y Q, Xia T Q, Xiong F Q, et al. 1994. The mineralizations in artesian basins in the Central Asian countries[M]. Beijing: Seismic Publishing House. 120~191 (in Chinese).

- Dahlkamp F J. 1993. Uranium ore deposits[M]. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 250 ~ 318.
- Feng J H and Jiang Z X. 2000. Study on sequence stratigraphy and sedimentary petrology in Yili basin [M]. Beijing: University of Petroleum Press. 22 ~ 58 (in Chinese).
- IAEA. 2001. Assessment of uranium deposit types and resources — a worldwide perspective[M]. ISSN 1011-4289, 93 ~ 101, 171 ~ 185.
- Liu Y J, Cao L M, et al. 1986. Elements geochemistry [M]. Beijing: Science Press. 378 ~ 382, 399 ~ 421 (in Chinese).
- Ming M Z, Wang R C, Bian L Z, et al. 2003. Microbial metallogenesis in interlayer oxidation zone sandstone-type uranium ore deposits[J]. Progress in Natural Science, 13(2): 164 ~ 167 (in Chinese).
- Mu B L. 1999. Elements geochemistry [M]. Beijing: Peking University Press. 100 ~ 111, 184 ~ 197. (in Chinese).
- Myneni S C B, Tokunaga T K. 1997. Abiotic selenium redox transformation in the presence of Fe(II, III) Oxides[J]. Science, Vol. 278, Iss. 5340, 1106.
- Wang Z Q. 1998. Characteristics of interlayer oxidation zone and sandstone-type uranium mineralization in Zhajistan area, southern border of Yili basin, Xinjiang [D]. Fuzhou, Jiangxi Province: The East China Institute of Technology (in Chinese).
- Zhang J D. 2003. Some consideration on current uranium geologic work [J]. Uranium Geology, 19(6): 321 ~ 325 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 狄永强, 夏同庆, 熊福清, 等译. 1994. 中亚自流盆地的成矿作用 [M]. 北京: 地震出版社. 120 ~ 191.
- 冯建辉, 姜在兴. 2000. 伊犁盆地层序地层学及沉积学研究 [M]. 北京: 石油大学出版社. 22 ~ 58.
- 核工业地质局. 2002. 铀矿地质勘查规范 (DZ/T 0199-2002) [Z]. 中华人民共和国标准局发布.
- 刘英俊, 曹励明, 等. 1986. 元素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社. 378 ~ 382, 399 ~ 421.
- 闽茂中, 王汝成, 边立曾, 等. 2003. 层间氧化带砂岩型铀矿中的生物成矿作用 [J]. 自然科学进展. 13(2): 164 ~ 167.
- 牟保磊. 1999. 元素地球化学 [M]. 北京: 北京大学出版社. 100 ~ 111, 184 ~ 197.
- 王正其. 1998. 新疆伊犁盆地南缘扎吉斯坦地区层间氧化带型砂岩铀矿地质特征 [D]. 江西抚州: 东华理工学院.
- 张金带. 2003. 关于当前铀矿地质工作的几点思考 [J]. 铀矿地质, 19(6): 321 ~ 325.

Trace element geochemistry of No. 511 uranium ore deposit in Xinjiang

WANG Zheng-qí¹, CAO Shuang-lín¹, PAN Jia-yong^{1,2}, GUAN Tai-yang¹ and ZHANG Guo-yu¹

(1 East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, Jiangxi, China; 2 Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract

Systematical studies of main and trace element geochemistry indicate that the No. 511 uranium ore deposit in northwestern China is a sandstone type composite ore deposit characterized by multi-element enrichment. Se, Re, Ga, Ge, V and Mo are concentrated to different extents in this deposit, of which Se, Re and Ga are of economic significance. Se-Re (+ Ge)-Mo-V and other zones of these trace elements are recognized successively in the development direction of interlayer oxidation. Integration of these trace element data further shows that there exists a positive correlation between U and Re, suggesting that Re and Se may be important indicators of uranium ore deposits.

Key words: geochemistry, trace element, uranium ore deposit, enrichment characteristics, sandstone, Yili Basin