



编号: 0258-7106(2012)01-0139-12

新疆 511 铀矿床 7 号采区 U-Se-Re-Mo 等元素分布特点*

曾爱花

(东华理工大学地球科学学院, 江西 抚州 344000)

摘 要 Re、Se 是中国急需的紧缺矿种,对国家的资源战略与环境安全保障具有重要影响。新疆伊犁盆地 511 矿床在开采铀的过程中,发现了 Re、Se 和 Mo 等元素存在富集的现象。文章以 511 矿床 7 号采区为例,采取野外地质调查与室内分析测试及综合研究相结合的技术路线,以探求 Re、Se、Mo 等元素的分布特点及其与 U 元素富集之间的关系。研究表明,Re 和 Se 在空间上与砂岩铀矿体密切共生,说明在 511 矿床中矿源等条件具备的情况下,7 号采区内的层间氧化作用促使 Re 和 Se 富集成矿,证实了 511 铀矿床中与 U 密切相关的 Se、Re 等元素具有线状分布的特点。

关键词 地球化学 Re Se Mo U 7 号采区 511 铀矿床 新疆

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Distribution characteristics of U-Se-Re-Mo at No. 7 working sector of No. 511 uranium deposit, Xinjiang

ZENG AiHua

(East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, Jiangxi, China)

Abstract

Minerals of dispersed elements Re, Se are much-needed scarce ore species in China and are of great significance for national resource strategy and environmental safety realization. However, the ore-forming mechanism of Re, Se has been long controversial, which leads to the confusion and difficulty in prospecting for similar minerals. Therefore, the improvement of the understanding of the ore-forming mechanism is of both theoretic and practical value. During the exploration of the No. 511 ore deposit in Xinjiang, the authors found evidence of enrichment of dispersed elements Re, Se. Taking No. 7 working sector of this ore deposit in Yili basin as an example and following the technical line of combining field geological survey with laboratory test and comprehensive study, this paper tries to discuss the distribution features of elements Re, Se, Mo and their relationships with uranium element. The result indicates that the dispersed elements Re and Se are spatially closely related to uranium ore bodies in the sandstone type ore deposit, while no Re and Se super-enrichment exists at No. 7 working sector besides several specific spots. It is thought that the interlayer oxidation at No. 7 working sector might have led to the enrichment of dispersed elements Re and Se, but with no mineralization even under the condition of existence of such mineral resources in the No. 511 ore deposit. It is evident that trace elements Re

* 本文得到国家自然科学基金项目“新疆 511 铀矿床中硒的赋存状态与富集规律(编号:40872072)”资助

第一作者简介 曾爱花,女,1974 年生,工程师,研究方向为地球化学。Email: kzhang@ecit.cn

收稿日期 2011-03-10;改回日期 2011-08-31。许德焕编辑。

and Se which have a close relationship with uranium in the No. 511 ore deposit present a linear distribution.

Key words: geochemistry, Re, Se, Mo, U, No. 7 working sector, No. 511 uranium deposit, Xinjiang

铼(Re)及其合金被广泛应用于石油化工、电子和航空航天等行业,是现代高科技领域极其重要的新材料之一(程挺宇等,2009)。硒(Se)在传统领域(如化工、玻璃、冶金、医学等)应用广泛,在新领域(如太阳能、红外装置、激光器、反射镜、透镜等)同样具有广阔应用前景(王晓民,2011)。钼(Mo)合金在化学、冶金、金属加工、航空航天和核能技术等领域得到广泛应用(刘辉等,2011)。这几种元素的价格比较昂贵。2008年底,每千克铼的价格为1.2万美元,近期由于金融危机的影响,其价格大幅下跌,但预计到2015年可持续回升到每千克6 500~7 500美元^①。硒在2008年的价格为32~34美元/磅。2011年5月,国际市场钼铁价格平均约为40美元/kg^②。

Re、Se是中国急需的紧缺矿种(涂光炽,2004;谈成龙,2004)。作为分散元素,其成矿机制研究及矿产资源的找寻是当今世界地质领域的热点问题之一(涂光炽等,2003;顾雪祥等,2004),也是国家资源战略与环境安全保障的迫切需要(顾雪祥等,2004)。由于分散元素在地壳中的丰度极低,在岩石中极为分散等原因,地质工作者长期认为,自然界中的分散元素一般以分散状态存在,难以富集成矿,更不能形成独立矿床(刘英俊等,1986)。“九五”期间,涂光炽(1994)提出了“分散元素不仅能富集而且能超常富集,并能独立成矿”的科学论断,极大地推动了中国分散元素成矿机制的研究。王正其等(2006,2007)认为,氧化作用可以促使分散元素Re和Se超常富集并独立成矿,是一种潜在的分散元素成矿新机制,应该作为重要找矿新类型加以深入研究和探索。秦明宽等(1997)指出,Re的活化迁移和沉淀富集受地球化学环境的控制,并与有机质密切相关。张乾等(2008)经研究发现,不同的分散元素与特定类型的金属矿床有着对应关系。分散元素成矿专属性提示其找矿的重点应该更多地关注与之对应的矿床类型的发现和找寻。不过,对于分散元素的成矿机制,也有学者提出了不同的观点。谈成龙(2004)通过文献研究发现,在中亚地区的层间氧化带砂岩型铀矿床中,绝大多数卷型铀矿床内Re与U

呈同消长关系,U与Re的富集位置重叠,而在北美及其他地区,类似的铀矿卷中则未见有Re伴生的实例。

在对新疆511砂岩型铀矿床的研究中,发现了Re、Se等分散元素的存在。为了确定Re、Se与U之间是否存在稳定分布关系,本文以511矿床7号采区为例,采取野外地质调查与室内分析测试及综合研究相结合的技术路线,对U-Se-Re-Mo等元素的分布模式展开研究,希望能为Re、Se等分散元素的成矿规律提供些许科学证据,对今后的找矿及勘探开发有所裨益。同时,也希望随着对U-Se-Re-Mo等元素分布关系的认识不断深入,推动铀矿综合利用水平不断提高。

1 矿床地质背景

511砂岩型铀矿床位于新疆察布查尔县境内,伊犁盆地南缘单斜带的西部(图1)。该矿床赋存在侏罗系中,属后生淋积成因,是含铀物质通过地下水的迁移、搬运,在氧化-还原过渡带富集成矿。其中的矿带总体呈近EW向展布,局部变化很大,沿走向呈带状断续延伸2.8 km,沿倾向呈“卷”状延伸数十米至200 m,矿体厚度变化较大,以“卷头”部位最厚,埋深约220~250 m。

矿区出露地层主要是:石炭系东图津河组(C_2d),主要为一套酸性至中-酸性火山岩,上覆灰色砂岩和碎屑岩,侏罗系水西沟群($J_{1-2}sh$),为灰色、灰黄色、黄红色的砂砾岩、砂岩和泥质岩,总厚度达500 m,可划分为8个沉积旋回,自下而上发育有13个煤层,白垩系(K),主要为红色碎屑岩建造(钙质胶结砂砾岩),厚约15~25 m;第四系(Q)冲、洪积物,平均厚度约20 m。

2 511矿床7号采区地球化学特征

2.1 地质特征

在扎基斯台河东侧的0号勘探线两侧,739地浸

① 吴海瀛. 2010. 国际铼市转趋回升. 中国有色金属报, 2010年12月14日第002版.

② 王敏. 2011. 钼:现货过剩价格下挫. 中国金属通报(23).

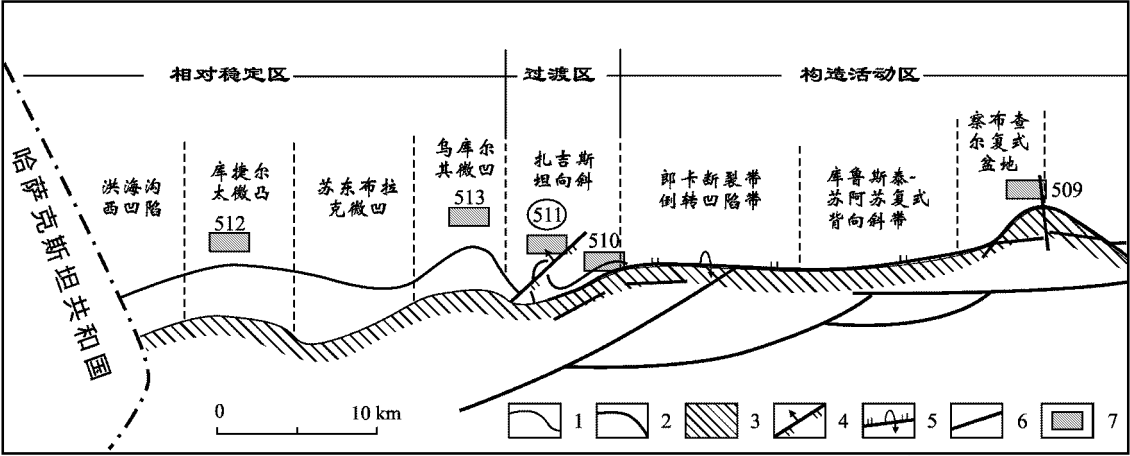


图 1 伊犁盆地南缘构造分区示意图(据王金平 2004 修改)

1—地层界线;2—第八煤层界线;3—古生界;4—逆断层;5—压扭性断裂;6—性质不明断裂;7—铀矿床
Fig. 1 Sketch map of tectonic division in the southern margin of Yili basin(modified after Wang, 2004)
1—Stratigraphic boundary; 2—8th coal bed boundary; 3—Paleozoic; 4—Reverse fault; 5—Compressional torsional fault; 6—Unknown fault; 7—Uranium deposit

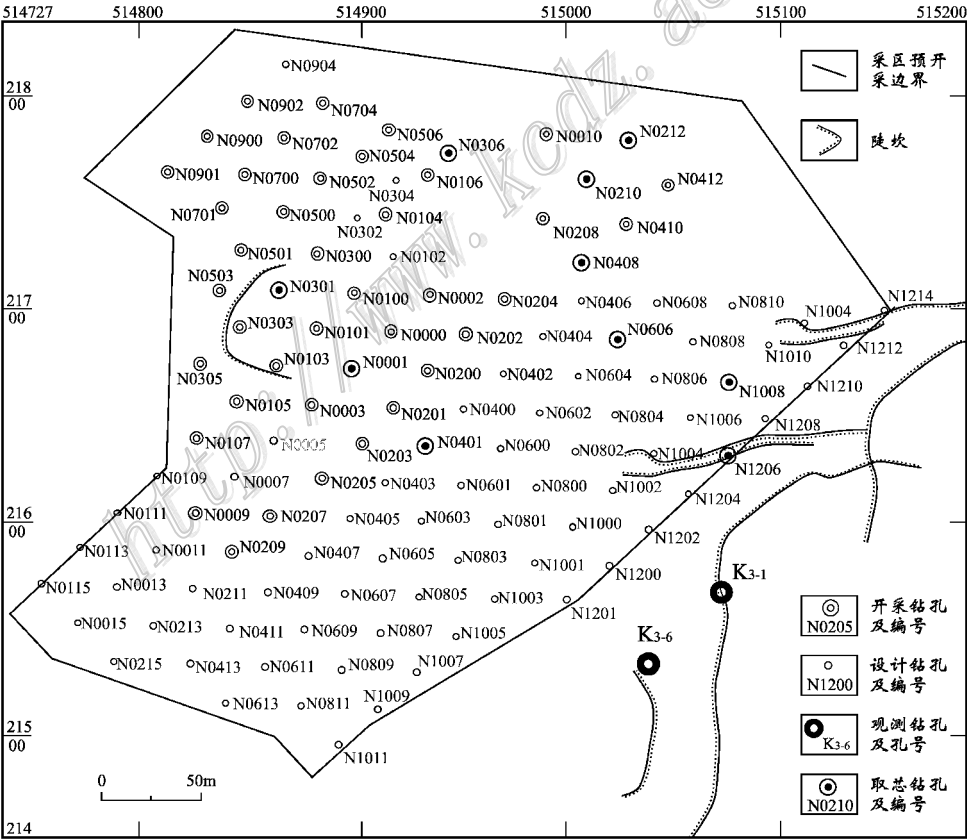


图 2 511 矿床 7 号采区钻孔分布图

Fig. 2 Distribution of drill holes in No. 7 working sector of No. 511 ore deposit

队于 2009 年施工了 50 个钻孔,称为 7 号采区(图 2)。含矿含水层主要赋存在侏罗系水西沟群第 V 旋回中,该旋回分为 5 个沉积韵律段(图 3),含矿含水

层成矿主岩以岩屑砂岩、长石岩屑砂岩、岩屑石英砂岩为主,夹少量不等粒岩屑石英杂砂岩。
地表含氧水由砂体开启部位沿地层倾向渗流,

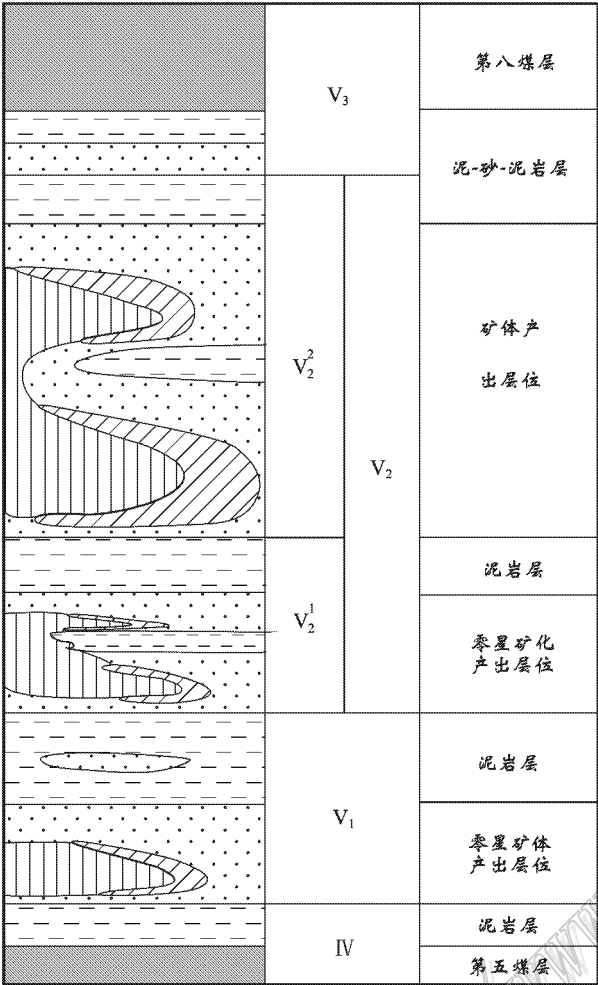


图 3 第 V 旋回内矿体产出层位示意图

Fig. 3 Sketch map of ore body in 5th sedimentary cycle

氧化作用由强变弱,这一点可以从沿层间水渗流方向岩石所表现出的蚀变特征和岩石地球化学特征得到证实。因为对 V_2^2 层间氧化带的研究比较完善,故而,下面将以此为例予以说明。

根据岩石的颜色、特征矿物,沿层间水渗流方向自上而下将 V_2^2 层间氧化带分为:强氧化亚带,中氧

化亚带,弱氧化亚带,过渡带,原生岩石带(表 1)。

强氧化亚带 分布于矿区南部。岩石以红色、粉红色为主(图 4A),其中的低价铁矿物被完全氧化成褐铁矿,部分褐铁矿已脱水成为赤铁矿,分布在填隙物中, Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值 >14 ,铁物相形式以硅酸铁为主,其次是氧化铁和碳酸铁。碳屑等有机物质基本消失。石英颗粒具溶蚀现象。岩石强烈黏土化,黏土矿物多被赤铁矿、针铁矿浸染,局部有赤铁矿胶结岩石的现象。

中氧化亚带 岩石多为褐黄色、深黄色及黄色(图 4B),其中的低价铁矿物多被氧化成褐铁矿或水针铁矿,两者为铁矿物的主要组成部分, Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值为 $5\sim18$ 。碳屑等有机物质多被氧化。黏土化程度较高。特征矿物为褐铁矿和水针铁矿。

弱氧化亚带 岩石以浅黄色(图 4C)、黄白色、黄色夹灰色为主。其中的黄铁矿大部分被氧化成褐铁矿,可见残留黄铁矿(边缘被氧化为褐铁矿),两者为铁矿物的主要成分,褐铁矿不均匀分散于填隙物中, Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值为 $2.1\sim6.4$ 。镜下可见少量残留的碳化植物碎片。长石、绿泥石的高岭土化多发生在矿物的表面,黏土矿物多为高岭石、多水高岭石。铀及伴生元素含量增高。

过渡带 岩石以灰色、深灰色及灰白色为主(图 4D 和 E),铀矿石带多以灰色和深灰色为主,灰白色为褪色带的特征颜色。黄铁矿含量丰富,形态多样,成岩期黄铁矿以自形、草莓状、球粒状为主,部分黄铁矿呈胶状充填于砂岩的孔隙中。 Fe^{3+}/Fe^{2+} 比值为 $0.5\sim3.5$,说明仍有一定量的三价铁矿物存在,铁物相形式以硅酸铁为主,其次是氧化铁和硫化铁,最少的是碳酸铁、硫酸铁和磁性铁、磁黄铁矿、白铁矿及褐铁矿。水解作用发育,褪色带尤为强烈,地球化学环境为中—弱碱性变化带。有机质、碳屑等含量高。铀及伴生元素在此带富集。

表 1 V_2^2 层间氧化带分带及岩石矿物特征

特征	氧化带			过渡带	原生岩石带
	强亚带	中亚带	弱亚带		
宽度/m	300~800	300~1300	100~300	50~200	
颜色	红色、粉红色、黄褐色	褐黄色、黄色	浅黄、黄白色、黄色、灰色	灰色、深灰色、灰白色	灰色、浅灰色
特征矿物	赤铁矿、针铁矿	水针铁矿	褐铁矿、黄铁矿	黄铁矿	黄铁矿
蚀变	赤铁矿化、褐铁矿化、针铁矿化、高岭土化			高岭土化、褐铁矿化	高岭土化

注 据王金平,2004 修改。



图 4 V_2^+ 层间氧化带岩石矿物特征

- A. V_2^+ 下层强氧化亚带的岩芯(ZKN0613); B. V_2^+ 上层中氧化亚带的岩芯(ZKN0613); C. V_2^+ 下层弱氧化亚带的岩芯(ZK1801);
D. V_2^+ 下层过渡带内的砂岩; 含大量呈层状分布的碳屑(ZK1807); E. V_2^+ 下层过渡带中的砂岩(ZK1016);
F. V_2^+ 上层原生岩石带的岩芯(ZK0830)

Fig. 4 Characteristics of rocks and minerals of V_2^+ interlayer oxidation zone

- A. Core of strong oxidation zone in lower V_2^+ (ZKN0613); B. Core of middle oxidation zone in upper V_2^+ (ZKN0613);
C. Core of weak oxidation zone in lower V_2^+ (ZK1801); D. Sandstone of redox zone in lower V_2^+ (ZK1807); E. Sandstone of
redox zone in lower V_2^+ (ZK1016); F. Core of original rock zone in upper V_2^+ (ZK0830)

原生岩石带 岩石以灰色、浅灰色为主(图 4F)。铁矿物多以低价态形式存在,以黄铁矿为主,铁物相形式以硫化铁为主。有机质及碳屑等的含量略低于过渡带。

2.2 U-Se-Re-Mo 地球化学特征

本研究采集了 7 号采区及其外围 17 个取芯钻孔中的 119 个砂岩铀矿石和近矿围岩样品,对每个钻孔剖面均自上而下采样,测定了每个样品中 Se、Mo、Re、U 的含量。测试单位为核工业北京地质研

究院;测试仪器为 HR-ICP-MS(Element I)(Finnigan MAT 制造);测试方法为 DZ/T0223-2001 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则,相对湿度为 30%,相对误差 $<5\%$ 。测试结果见表 2。

富集强度

样品测试数据(表 3)表明: $w(\text{Se})$ 平均为 1.40×10^{-6} ,其中 14 个样品的 $w(\text{Se})$ 小于其陆壳丰度值(0.05×10^{-6}), $w(\text{Se})$ 高于 10×10^{-6} 的样品有 4 个; $w(\text{Re})$ 平均为 0.71×10^{-6} ,远高于其陆壳丰度

表 2 实验样品及分析数据
Table 2 Samples and analytical data

样品编号	采样位置		岩性	$\alpha(B)\times 10^{-6}$			
	钻孔号	采样深度/m		Se	Mo	Re	U
N0401-01	N0401	233.66-233.67	灰白色粉砂岩	0.039	14.9	0.002	13.3
N0401-02		235.75-235.85	灰白色中粗粒砂岩	0.121	8.99	0.002	9.7
N0401-03		243.60-243.74	灰白色含砾粗砂岩	0.312	1.46	0.001	10.4
N0401-04		250.17-250.33	淡黄色含砾粗中砂岩	1.99	2.02	0.03	49.2
N0401-05		250.63-250.75	淡黄色含砾粗中砂岩	0.21	1.18	0.198	41.4
N0401-06		251.43-251.55	灰白色粗中粒砂岩	0.147	3.33	0.275	78
N0301-01	N0301	232.12-232.22	灰色泥质粉砂岩	0.164	3.42	0.986	462
N0301-02		234.67-234.78	灰白色含砾粗中砂岩	0.266	7.58	0.155	1638
N0301-03		236.44-236.54	灰白色含砾石英粗砂岩	0.009	2.89	0.038	16.7
N0301-04		237.07-237.17	灰白色含砾石英粗砂岩	0.294	2.61	0.119	18.3
N0301-05		238.67-238.74	灰白色中粗粒砂岩	0.167	3.19	0.236	65.9
N0301-06		244.20-244.31	灰色粗粒砂岩	0.469	0.854	0.018	7.49
N0301-07		252.99-253.08	淡黄色含砾粗砂岩	0.159	1.23	0.008	6.27
N0001-01	N0001	231.60-231.73	灰白色含砾粗中砂岩	0.02	2.06	0.063	14.9
N0001-02		237.50-237.60	灰黑色粉砂质泥岩	0.209	2.68	0.33	78.4
N0001-03		238.80-238.98	灰色粗粒砂岩	0.254	0.572	0.026	17
N0001-04		240.20-240.32	灰色中砂岩	0.29	2.24	0.829	229
N0618-01	N0618	210.90-211.00	灰色粉砂岩	0.171	6.66	0.012	12.4
N0618-02		212.00-212.10	灰色含砾砂岩	0.119	1.45	0.006	3.39
N0618-03		213.10-213.25	灰色含砾砂岩	0.001	1.28	0.003	3.11
N0618-04		216.30-216.44	灰白色含砾粗砂岩	0.206	0.802	0.001	2.81
N0618-05		220.10-220.20	黑色碳质泥岩	0.113	1.92	0.005	4.35
N0618-06		225.50-225.63	灰色粗砂岩	0.155	1.01	0.001	5.38
N0618-07		227.99-228.10	高岭土化灰白色粗砂岩	0.2	1.31	0.023	10.8
N0618-08		229.50-229.60	高岭土化灰白含砾粗砂	0.214	2.52	0.009	15.3
N0618-09		236.20-236.37	灰色泥质粉砂岩	0.442	0.726	0.006	6.99
N0824-01	N0824	213.50-213.60	灰色粉砂岩	0.108	11.2	0.003	5.5
N0824-02		215.60-215.73	灰白色粗砂岩	0.354	2.34	0.001	2.89
N0824-03		219.50-219.60	灰白色中粗砂岩	0.115	2.12	0.004	5.45
N0824-04		222.05-222.17	灰色含砾粗中砂岩	0.175	0.836	0.004	6.78
N0824-05		223.30-223.41	灰色砂砾岩	0.206	0.639	0.001	7.01
N0824-06		224.50-224.60	灰白色中粗砂岩	0.031	1.07	0.003	9.1
N0824-07		226.60-226.72	灰色粗砂岩	0.097	1.32	0.003	22.5
KN0824-01		227.60-227.80	粗砂岩	0.226	26.7	0.013	8.95
N0824-08		230.50-230.60	灰色泥岩	0.161	11.8	未检出	10.4
N0824-09		232.20-232.31	灰色细砂岩	0.28	87.2	0.001	22.9
N0824-10		233.00-233.15	含砾粗中砂岩	未检出	1.32	0.099	11.3
KN0824-02		233.50-233.70	灰色中砂岩	1.66	25	0.028	45.9
N0824-11		233.70-233.90	灰色中砂岩	0.375	0.947	0.003	12.3
N0824-12		235.60-235.70	灰色砾岩	1.81	0.82	0.008	97.7
KN0824-03		237.30-237.50	灰色粗中砂	0.398	11.9	0.056	184
N0824-13	N0306	237.50-237.60	灰色粗中砂岩	0.145	0.903	0.003	6.98
N0824-14		239.80-239.90	灰色粉砂质泥岩	9.42	0.494	0.001	6.47
N0824-15		241.00-241.10	砂岩泥岩夹层	0.188	0.839	0.001	2.91
N0306-01		228.95-229.07	砾岩	0.126	2.07	1.83	1649
N0306-02		230.20-230.32	含砾粗砂岩	0.127	1.58	0.944	482
N0306-03		231.05-231.20	含砾粗砂岩	1.04	0.81	0.006	5.67
N0306-04		233.15-233.25	含砾粗砂岩	1.25	3.18	0.016	100
N0306-05		233.80-233.90	含砾粗砂岩	0.494	0.773	0.004	195
N0306-06		234.55-234.65	含砾粗砂岩	1.34	0.49	0.009	28.7
N0306-07		239.85-240.02	中砂岩	0.452	0.71	0.011	459
N0306-08		242.12-242.30	灰色中砂岩	0.093	1.61	0.013	19.7

续表 2-1
Cont. Table 2-1

样品编号	采样位置		岩性	$\alpha(B)/10^{-6}$			
	钻孔号	采样深度/m		Se	Mo	Re	U
N0218-01	N0218	213.50-213.62	灰白色中砂岩	0.111	8.89	未检出	4.08
N0218-02		218.40-218.53	灰色中砂岩	0.123	0.882	0.01	7.61
N0218-03		224.00-224.11	灰白色中粗砂岩	0.159	5.6	1.03	28.8
N0218-04		227.90-228.03	灰白色粗粒砂岩	0.015	0.429	0.058	17.6
N0218-05		235.00-235.10	红色粗砂岩	0.063	0.982	0.003	6.2
N0212-01	N0212	223.90-224.10	灰色粗砂岩	0.793	0.658	0.299	29.1
N0212-02		224.60-224.75	灰色粗砂岩	0.229	1.05	0.682	817
N0212-03		226.10-226.25	灰色中砂岩	0.031	1.51	0.844	1132
N0212-04		227.10-227.25	灰色中砂岩	0.053	1.64	1.81	782
KN0210-01	N0210	215.10-215.30	灰色中砂岩	0.035	1.82	0.042	95
N0210-01		219.50-219.60	灰色中砂岩	16.5	1.47	0.069	147
KN0210-02		219.60-219.80	灰色粗砂岩	0.359	92.4	22.9	57204
KN0210-03		220.10-220.30	灰色中砂岩	7.3	1.57	0.027	62.9
KN0210-04		220.35-220.55	灰色中砂岩	0.864	3.57	0.04	72.8
N0210-02		221.00-221.10	灰色粗砂岩	0.129	5.62	0.001	12.8
KN0210-05		221.00-221.20	灰色中砂岩	0.047	9.04	0.001	12.9
N0210-06		221.30-221.48	灰色中砂岩	0.208	13.5	0.343	69.9
KN0210-07		221.50-221.65	灰色中砂岩	0.276	14.4	0.208	28
N0210-03		221.80-221.90	灰色含砾粗砂岩	0.105	14.2	2.74	654
N0210-04		222.10-222.20	灰色中粗砂岩	0.646	79.5	8.39	8666
KN0210-08		222.60-222.75	灰色中砂岩	0.222	56.6	5.15	9343
N0210-05		222.90-223.00	灰色中砂岩	0.055	8.28	0.013	28
KN0210-09		223.15-223.30	灰色中砂岩	20.5	546	0.332	5661
N1018-01	N1018	231.90-232.08	灰色中砂岩	5.82	353	2.63	2937
N1018-02		223.15-223.35	灰色中砂岩	7.42	3850	6.52	73085
N1018-03		234.10-234.35	灰色粗砂岩	0.414	74.5	5.6	1268
S02-01	S02 (水文孔)	206.30-206.50	灰色中砂岩	0.469	5.65	0.522	1523
S02-02		211.70-212.00	灰色中砂岩	0.555	6.43	0.081	538
S02-03		237.20-237.35	灰色中砂岩	0.578	2.48	0.045	470
N1206-001	N1206	228.50-228.70	灰色中砂岩	31.5	325	0.21	2848
N1206-002		235.30-235.60	灰白色中砂岩	9.71	262	1.84	4603
N0606-01	N0606	211.30-211.60	灰色中砂岩	0.309	20.7	1.63	826
N0606-02		216.80-217.00	含砾粗砂岩	0.473	87.4	3.71	5269
N0408-01	N0408	212.70-212.80	灰色中粗砂	2.47	22.7	0.189	248
N0408-02		213.70-213.80	黑色粉砂含煤夹层	0.197	142	0.852	2618
N0408-03		213.90-214.00	黄色中砂岩	0.329	11.9	0.762	260
N0408-04		214.30-214.40	黄色中砂,夹碳碎屑	7.41	5.76	0.441	154
N0408-05		215.40-215.50	淡黄色中粒砂岩含砾	0.121	1.75	0.009	23.3
N0408-06		215.70-215.90	淡黄色中粒砂岩含砾	0.069	9.45	0.572	1118
N0408-07		216.20-216.30	黄色中砂岩	0.073	4.2	0.418	1075
N0408-08		216.50-216.70	黄色中粗砂岩	未检出	4.54	0.046	15.5
N0408-09		216.90-217.00	黄灰色中砂岩	0.194	1.4	0.147	278
N0408-10		218.20-218.30	灰色含砾中粗砂岩	12.5	10.5	0.035	58.6
N0408-11		218.90-219.10	灰色含砾中粗砂岩	0.286	5.19	0.028	50.6
N0408-12		219.30-219.45	灰色含砾中粗砂岩	0.819	1.04	0.026	30.4
N0408-13		220.00-220.20	灰色含砾中砂岩	0.066	1.21	0.012	15.1
N0408-14		220.90-221.10	灰色含砾中粗砂岩	0.14	1.88	0.005	12.7
N0408-15		221.70-221.80	灰色中砂岩含碳	0.056	1.39	0.002	9.35
N0408-16		223.50-223.60	深灰色砂岩	0.03	4.21	0.014	45.3
N0408-17		224.00-224.15	含砾中粗砂岩	0.675	2.07	0.04	19.9
N0408-18		224.50-224.70	含砾中粗砂岩	0.052	2.65	0.066	25.6

续表 2-2
Cont. Table 2-2

样品编号	采样位置		岩性	$\omega(B)10^{-6}$			
	钻孔号	采样深度/m		Se	Mo	Re	U
N1008-01	N1008	210.90-211.15	灰色中砂岩	0.316	3.09	0.105	22.7
N1008-02		211.15-211.40	灰色中砂岩	未检出	1.64	0.035	21.9
N1008-03		211.40-211.75	灰色中砂岩	0.006	1.94	0.042	20.1
N1008-04		211.85-212.05	灰色中砂岩	0.441	2.38	0.128	36.4
N1008-05		216.25-216.45	灰色中细砂岩	0.232	3.16	0.03	24.9
N1008-06		220.65-220.85	灰色中细砂岩	0.139	4	0.016	12.3
N1008-07		228.31-228.55	灰色粗砂岩	0.068	3.09	0.014	11.2
S01-01	S01(水文孔)	224.88-225.00	灰色中砂岩	0.136	1.69	0.168	215
S01-02		229.28-229.48	灰色中砂岩	0.149	9.26	0.732	338
N0307-01	N0307	226.60-226.70	含砾粗中砂岩	0.032	3.57	0.728	1033
N0307-02		227.28-227.40	含砾粗砂岩	0.124	32.4	0.886	1417
N0307-03		227.80-227.90	含砾粗中砂岩	0.152	3.74	0.773	1239
N0307-04		233.50-233.60	含砾粗砂岩	0.175	2.74	0.464	840
N0307-05		234.10-234.20	粗砂岩	0.04	0.748	0.003	18.6
N0307-06		234.65-234.80	粗砂岩	0.013	1.72	0.493	325
C0307-07		237.00-237.20	粗砂岩	未检出	1.38	0.195	513

表 3 7 号采区 U-Se-Re-Mo 平均值对比
Table 3 Comparison of U-Se-Re-Mo average values in No. 7 working sector

	$\omega(B)10^{-6}$			
	Se	Mo	Re	U
平均值	1.40	54.16	0.71	1652.29
511 矿床本底值	0.59	2.40	0.13	4.15
陆壳丰度	0.05	1.30	0.0005	1.70
相对于本底的富集系数	2.4	22.6	3.9	398.1
相对于陆壳的富集系数	28	42	1420	972

表 4 U、Se、Re、Mo 相关系数统计表
Table 4 U, Se, Re, Mo correlation coefficient table

	Se	Mo	Re	U
Se	1			
Mo	0.265	1		
Re	0.010	0.258	1	
U	0.140	0.790	0.755	1

值(0.0005×10^{-6})。 $\omega(Mo)$ 平均为 54.16×10^{-6} , 同样远高于其陆壳丰度值(1.3×10^{-6})。这些数据表明,在 7 号采区,Se、Re 和 Mo 虽未出现超常富集,但其丰度也超过陆壳值的几十倍甚至几百倍。因此,对 7 号采区进行 Se、Re、Mo 的研究,对于实现铀矿综合开发利用具有重要意义。

Se、Re、Mo 与 U 的相关性

为了进一步深入研究 Se、Re、Mo 与 U 的关系,对样品中 Se、Re、Mo、U 的含量分别取对数,计算了

Se、Re、Mo 与 U 的相关程度(表 4、图 5)。结果表明:

(1) Re 与 U 呈明显的正相关,相关系数为 0.755(表 4)。本文认为,如此高的相关性可能与 Re 矿化体和铀矿体的轮廓基本吻合有关。

(2) 一个值得注意的现象是 Se 与 U 的关系。虽然氧化带内的 Se 矿化体与翼部的铀矿体存在较好的对应关系,但与 U 含量之间不存在相关性,其相关系数仅为 0.140(表 4)。推测造成该现象的原因是:① Se 矿化体并不与翼部铀矿体完全重叠;② Se 与 U 的富集条件存在一定的差异。事实上,Se 仅聚集于翼部铀矿体及其内侧,而在卷头铀矿体中则不存在富集现象,也间接说明了这一点。

(3) Mo 与 U 也呈现出高度的相关性,相关系数为 0.790(表 4)。笔者认为,这可能与 Mo 和 U 的地球化学性质相近有关。

Re、Mo 与 U 都显示出强相关特点,相关系数都在 0.75 以上,结合 Re 和 Mo 在层间氧化带中所反映出来的地球化学特征,说明在层间氧化带,Re、Mo 的富集部位与铀矿体的位置和形状有关。

Se、Re、Mo、U 富集与砂岩粒度的关系

为了研究成矿元素与砂岩粒度之间的关系,为矿床开采提供资料,本文选取了 119 个不同粒度的样品,进行了 U、Se、Mo、Re 等元素的分析。不同粒度样品中成矿元素含量的变化见表 5、图 6。

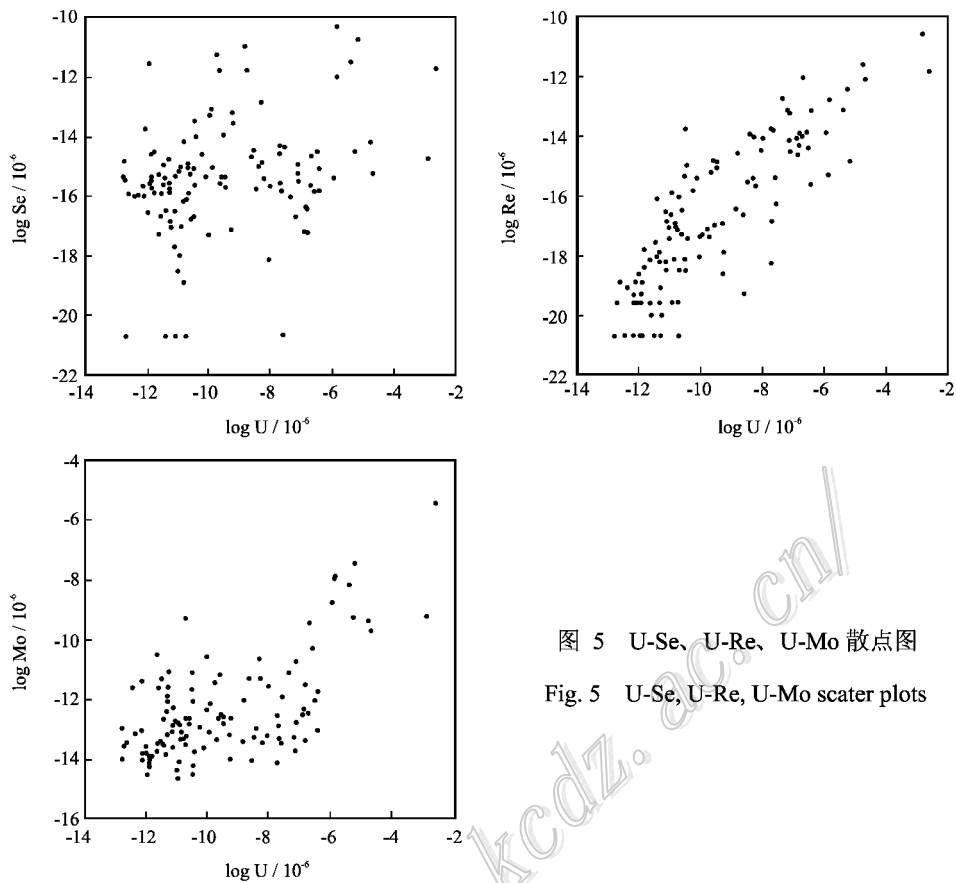


图 5 U-Se、U-Re、U-Mo 散点图

Fig. 5 U-Se, U-Re, U-Mo scatter plots

表 5 511 矿床不同粒度砂岩中成矿元素平均含量统计

Table 5 Average content of ore-forming elements in different lithologic types from No. 511 ore deposit

岩性	颜色	$w(B)(\mu g/g)$							
		Se		Mo	Re		U		
粗砂岩	灰白色	0.806	0.275	5.645	5.024	0.647	0.276	1070.343	141.437
	黄色		1.683		6.679		1.265		2618.52
中砂岩	灰白色	2.506	2.493	144.94	164.427	0.96	1.095	3081.384	3504.45
	黄色		2.602		4.634		0.017		35.31
粉砂岩	灰白色	0.943	1.200	10.831	13.774	0.181	0.188	102.584	96.696
	黄色		0.172		2	0.161			120.25

注：元素下面的数字第一列是元素在某一粒度砂岩中的平均含量，第二列是元素在同一岩性不同颜色的平均含量。

研究结果表明：Se 更倾向于富集在有良好孔隙和渗透性的砂岩中，尤其是中砂岩中，在粉砂岩中 Se 则出现了反常现象，当 U、Mo、Re 出现相对低值时，Se 却有一个峰值，使得 Se 在粉砂岩中的平均值与中、粗砂岩内 Se 的含量相近。笔者分析认为，这一现象是由 Fe、Mn 氢氧化物的吸附所造成。U、Se、Re、Mo 在中砂岩及粗砂岩中的分布规律基本一致，只是 Re 在中砂岩及粗砂岩中变化不大。

结合表 5 和图 6 进行分析，笔者初步认为：

(1) Se 在黄色中砂岩及灰白色中砂岩中变化不

大，而 U 和 Mo 则存在 100 倍的变化，Re 也有 10 倍的变化；

(2) 在黄色粉砂岩及灰白色粉砂岩中，Se 有 10 倍变化，Mo 有 6 倍变化，而 Re 和 U 的变化则很小。而且，从灰白色到黄色粉砂岩，Se、Re、Mo 的含量明显降低；

(3) 在粗砂岩中，Se、Re 的变化趋势与 U 一致，从灰白色到黄色粗砂岩，Se、Re 增加了 6 倍，U 增加了 18 倍，Mo 变化不大。

这说明，在不同粒度的砂岩中，各元素的富集程

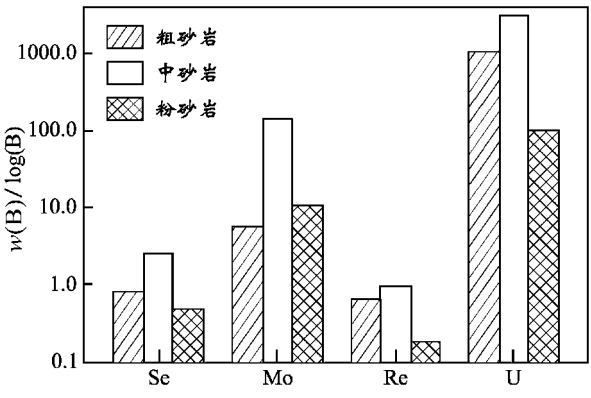


图 6 U-Se-Re-Mo 含量与砂岩粒度的对比图
Fig. 6 Comparison of U-Se-Re-Mo elements logarithmic content based on sand grain size

度不同,在粒度相同的情况下,不同元素的富集程度也有差异。

Se、Re、Mo、U 的空间分布规律

为了进一步研究 U、Se、Re、Mo 的分布特点,对 7 号采区 02 号剖面线(图 7)上的 0210 号钻孔(含矿含水层)进行了全孔取芯,对全部 14 个样品进行了图解分析(图 8)。

由图 8 可见,U 与 Mo 的变化曲线非常吻合,在 215 m 至 221.5 m 深度上,Se、Re 与 U 的变化基本一致。但随着深度的增加(221.5~222.15 m),在样品 KN0210-07、N0210-03 和 N0210-04 中,出现了 Re 的异常。当 U、Se、Mo 达到波谷时,Re 则在波峰的位置。随着深度达到 222 m 至 223 m 区间,样品 N0210-03、N0210-04、KN0210-08 和 N0210-05 中的 U、Se、Mo 含量处于一个较宽的次级波峰位置,而 Re 却在波谷。

综上所述,511 矿床 7 号采区中 U 矿体、Re 与 Se 矿体密切共生,空间展布严格受层间氧化带的制约,均富集于层间氧化带的氧化-还原过渡带或外缘,规律十分明显。具体体现在 Se、Re 在平面上均呈带状延伸,延伸趋势与层间氧化带前锋线走向一致。其中,层间氧化带前锋线及其内外两侧均存在 Re 的富集,富集范围大体与铀矿带一致,略偏向还原带一侧,而 Se 矿体则位于层间氧化带前锋线的内侧,大体与铀矿卷的翼部矿体相对应,且略偏向层间氧化带氧化砂岩一侧。在剖面上,Re 矿体主要呈卷状或囊状发育于层间氧化带尖灭带的外缘,即氧化-还原过渡带,分布范围大体与铀矿体一致,卷头部位构成 Re 矿体的主体,部分位于翼部铀矿体中,但较翼部铀矿体要短。Se 矿体形态主要呈透镜状,位于层间氧化带的上部边缘部位,略偏向层间氧化带氧化砂岩一侧。由 0210 钻孔可见,Se 的峰值位于铀最高值的两侧,而且,Se 的峰度值略偏向氧化带一侧,与铀矿体翼部相比较,两者存在错位现象。Re、Mo 与 U 基本一致,但在翼部两者并不完全一致或重叠。

3 U、Se、Re、Mo 共生分异及富集规律探讨

Se、Re、Mo 与 U 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,易形成 Se^{6+} 、 Re^{7+} 、 Mo^{6+} 、 U^{6+} 等易溶化合物溶入含氧地下水(王正其等 2006)。如 Se 在中性-弱碱性含氧地下水中主要以 HSeO_4^- 和 SeO_4^{2-} 形式迁移,后者存在的环境较前者偏碱性;Re 在 511 铀矿床原生砂岩中的背景值较

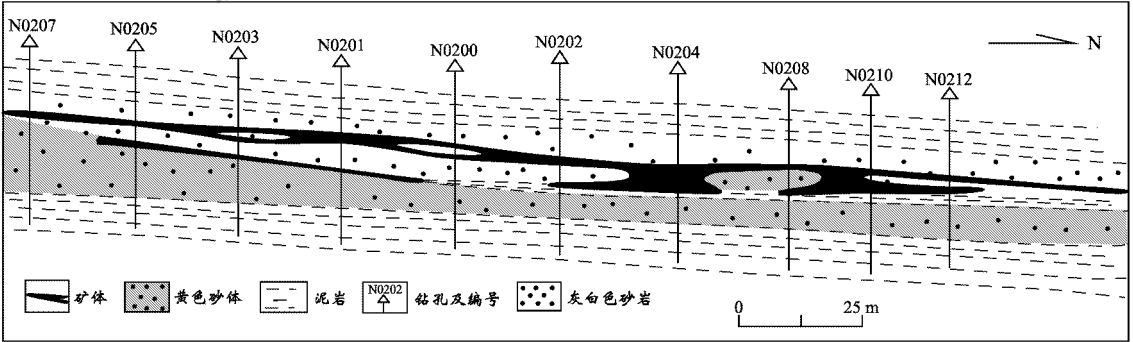


图 7 02 号剖面线含矿含水层钻孔剖面图
Fig. 7 Section of drill hole in mine-bearing and water-bearing strata along No. 02 exploration line

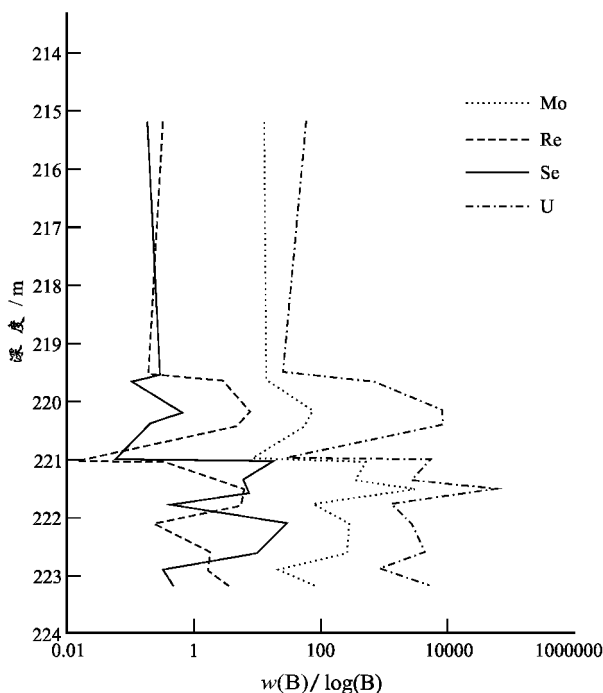
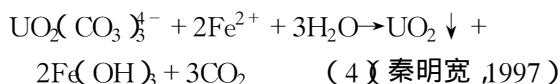
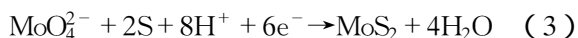
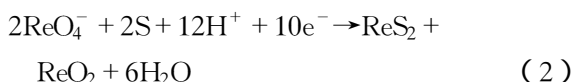
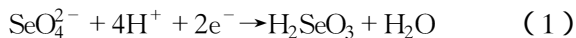


图 8 7 号采区 0210 钻孔层间氧化带
U、Se、Re、Mo 含量变化

Fig. 8 Content of U, Se, Re and Mo in interlayer oxidation zone of No. 0210 drill hole in No. 7 working sector

高,被氧化后,以 Re_2O_7 络合物吸附形式迁移;原生岩石中的 Mo 多为二硫化物,被氧化后以 Mo^{6+} 的钼酸盐 (MoO_4^{2-}) 形式迁移。在还原条件下,Se 还原仅需弱还原环境,而 Re 还原则可能需要更强的还原条件和由较强的还原剂(如 S)提供电子供体,并与有机质有密切关系;Mo 以 MoO_4^{2-} 形式迁移至过渡带后,还原沉积过程如(3)式所示;铀矿石组合中常见沥青铀矿与黄铁矿共生,但黄铁矿本身并不含铀,这表明黄铁矿只是铀的还原剂,促使六价铀还原。笔者推测,层间氧化带的分带性及其地球化学障特征、元素离子获取电子的能力差异,是导致 U 及 Se、Re、Mo 在层间氧化带砂岩中呈现富集分带的主要原因。这些元素的富集强度则主要取决于含氧层间水中相应元素含量的高低。



4 结 论

通过对新疆 511 铀矿床 7 号采区 U、Se、Re、Mo 等元素分布特点的分析,获得以下认识:

(1)除了 Se 有一部分富集在粉砂岩内之外,U、Se、Re、Mo 主要产于中砂岩和粗砂岩中。当 $w(\text{U})$ 大于 1×10^{-4} 时,Re、Se、Mo 与 U 的变化基本一致,当 $w(\text{U})$ 小于 1×10^{-4} 时,Se、Mo 与 U 相背而行。

(2)U、Re 的含矿岩性为灰色中砂岩、黄色粗砂岩,Se 的赋存岩性包括黄色中、粗砂岩或灰色粉砂岩。

(3)Se、Re、Mo 与 U 在空间上具有分带性;Re、Mo 与 U 基本一致且主要分布于层间氧化带的过渡带,Se 主要位于铀矿石带的内侧。

(4)Se 与 U、Re、Mo 的沉淀富集条件有差异。笔者认为,层间氧化带的分带性及其地球化学障特征、元素离子获取电子的能力差异,是导致 U 及 Se、Re、Mo 在层间氧化带砂岩中呈现富集分带的主要原因。这些元素的富集强度则主要取决于含氧层间水中相应元素含量的高低。

(5)Re、Mo 与 U 矿体高度正相关,其相关系数都在 0.75 以上,在层间氧化带,Re、Mo 的富集部位与铀矿体的位置和形状有关。

志 谢 本文在写作过程中得到了潘家永教授的指导与帮助,新疆 739 地浸队提供了部分资料,在此表示衷心感谢!

参考文献/References

- 程挺宇,熊 宁,彭楷元,杨海兵,殷晶川. 2009. 铈及铈合金的应用现状与制造技术[J]. 稀有金属材料与工程, 38(2): 373-376.
- 顾雪祥,王 乾,付绍洪,唐菊兴. 2004. 分散元素超常富集的资源与环境效应:研究现状与发展趋势[J]. 成都理工大学学报, 3(1): 15-21.
- 刘英俊,曹励明,李兆麟,王鹤年,储同庆,张景荣. 1986. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社. 372-421.
- 刘 辉,巨建辉,张军良,崔 顺,夏明星. 2011. 铝合金的强韧化与发展趋势[J]. 中国铝业, 35(2): 26-28.
- 秦明宽. 1997. 新疆伊犁盆地南缘可地浸层间氧化带型砂岩铀矿床成因及定位模式[D]. (博士学位论文). 核工业北京地质研究院.
- 秦明宽,赵瑞全. 1997. 512 铀矿床 Re 的地球化学及其研究意义[J].

铀矿地质, 13(5): 273-278.

谈成龙. 2004. 层间氧化带砂岩型铀矿中铼的地球化学行为及找矿意义探讨[J]. 铀矿地质, 20(5): 299-305.

涂光炽. 1994. 分散元素可独立成矿——一个有待开拓深化的新矿床领域[A]. 见: 中国矿物岩石地球化学新进展[C]. 兰州: 兰州大学出版社. 234 页.

涂光炽, 高振敏. 2003. 分散元素成矿机制研究获重大进展[J]. 中国科学院院刊, 5: 358-360.

涂光炽. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制[M]. 北京: 地质出版社. 424 页.

王金平. 2004. 成矿与非成矿层间氧化带地质地球化学特征研究

[D](博士论文). 南京大学.

王晓民. 2011. 硒及其化合物的生产、消费和应用前景[J]. 世界有色金属(1): 28-31.

王正其, 潘家永, 曹双林, 管太阳, 张国玉. 2006. 层间氧化带分散元素铼与硒的超常富集机制探讨——以伊犁盆地扎吉斯坦层间氧化带砂岩型铀矿床为例[J]. 地质论评, 52(3): 358-362.

王正其, 李子颖, 管太阳. 2007. 层间氧化作用: 一种分散元素(Re, Se)新的富集成矿机制[J]. 铀矿地质, 23(6): 328-334.

张乾, 刘玉平, 叶霖, 邵树勋. 2008. 分散元素成矿专属性探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 27(5): 247-253.

<http://www.kcdz.ac.cn/>