

文章编号: 0258-7106 (2005) 01-0034-10

吐哈盆地西南缘砂岩型铀矿地质地球化学基本特征^{*}吴伯林^{1,2}, 权志高², 魏观辉², 彭新建³, 王金平², 李占游²徐高中², 刘池阳¹, 张复新¹

(1 西北大学大陆动力学教育部重点实验室, 陕西 西安 710069; 2 中国核工业地质局 203 研究所, 陕西 咸阳 712000;

3 核工业总公司地质局, 北京 100013)

摘 要 文章通过对含矿目的层及其渗透性的分析、与成矿作用有关的常量和微量元素及部分特征性地球化学指标如有机碳含量、全硫含量、三价铁和二价铁比值的分析, 以及流体包裹体成分和物理化学参数的测试, 配合铀、铅、碳、氧、硫同位素的分析等方法, 综合分析研究区内砂岩型铀矿的地质地球化学基本特征, 认为: 吐哈盆地西南缘砂泥岩互层地层结构完整且延伸稳定, 属弱渗透-渗透性地层, 对砂岩型铀矿成矿比较有利。据常量和微量元素分析, 认为铀成矿存在着明显的地球化学分带性, 其中, 氧化带以有机碳和全硫 (ΣS) 含量低、 Th/U 和 Fe_2O_3/FeO 及 Ra/U 比值高为特征; 过渡带 (成矿带) 以 Th/U 比值低、 ΣS 、 Mo 、 Re 含量高为特征; 还原带则以明显的低 Fe_2O_3/FeO 、 Ra/U 比值, 高有机碳含量为其特征。其他微量元素如 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Cr 、 Co 、 Ni 、 Zr 等及稀土元素在成矿过程中并未得到明显富集。经对相关岩石的铀-钍平衡、气液包裹体及相关同位素的研究, 认为铀成矿具有多期次、年代新且集中于第三纪的特点; 含矿目的层煤成气提供了成矿所需的还原环境; 成矿作用铀源主要来自于含矿目的层本身; 铀成矿古流体属低温浅成热液且主要来源于大气降水。

关键词 地球化学; 砂岩型铀矿; 铀成矿; 地球化学分带; 古流体; 同位素; 渗透性; 煤成气

中图分类号: P619.14

文献标识码: A

根据砂岩型铀矿成矿特点, 吐哈盆地南部存在着较好的成矿条件及远景(王保群, 2000; 周巧生等, 2003; 吴伯林等, 2004a; 2004b)。近 7~8 年来, 首先在盆地西南缘发现了十红滩铀矿床, 经研究认为, 它是层间氧化带型成因, 并具有多期次、成矿时代较新的特点(权志高等, 2002; 夏毓亮等, 2003; 李保侠等, 2003), 成矿流体经历了早期氧化向晚期呈弱还原的演变过程(吴伯林等, 2003a)。此后, 在十红滩外围, 如八仙口、白嘴山、迪坎儿, 经初步勘探又相继发现了一批矿点、矿化点。这些矿(化)点在构造上均位于艾丁湖斜坡带, 其分布严格受新构造运动所形成的新构造的控制(徐高中, 2003; 吴伯林等, 2003b); 其矿化成因与十红滩矿床相似(吴伯林等, 2003a; 2003b; 2004b)。由于它们同处于一个统一的构造单元, 因此, 有必要把盆地西南缘八仙口-十红滩-白嘴山-迪坎儿地区的铀矿作为一个具有统一成因联

系的整体, 对其地质地球化学特征进行系统总结、研究、探讨, 以期从地球化学的角度对该区整体成矿规律及成因有一个基本的认识。

1 地质概况

研究区位于吐哈盆地西南缘艾丁湖斜坡带; 地貌景观为处于南部蚀源区(觉罗塔格山)与北部地下水排泄区(盐碱滩地及艾丁湖区)之间的荒漠戈壁, 地势总体南高北低, 地层向艾丁湖缓倾, 倾角一般为 $3 \sim 10^\circ$ 。

该区出露的基底地层为石炭系下统小热泉子组 (C_1x) 及石炭系中统迪坎儿组 (C_2d) (图 1), 构成南部觉罗塔格中低山系。前者岩性为灰绿色火山岩及浅海相碳酸盐岩; 后者为灰绿色中砂岩、砂质砾岩、粉砂岩、浅变质岩等。山前出露的盖层地层主要为

^{*} 核工业地质局科技基金(200010100001)、科技部科技攻关项目(2001BA609A-07-13)及国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2003CB214607)联合资助

第一作者简介 吴伯林, 男, 1967 年生, 西北大学 2002 级在读博士生, 主要从事盆地分析及铀矿地质研究。

收稿日期 2004-01-12; 改回日期 2004-04-19。

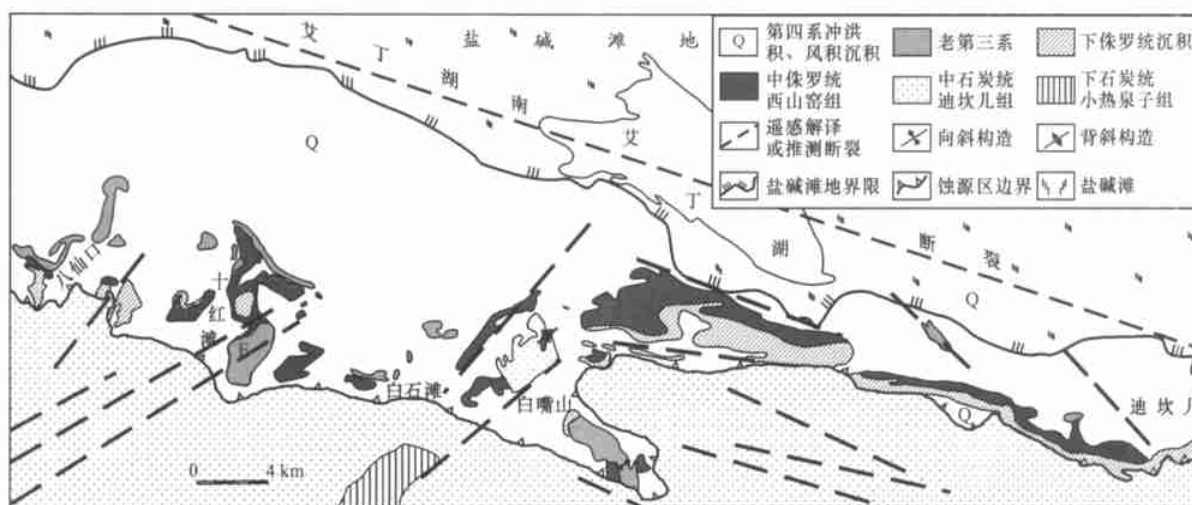


图1 吐哈盆地西南缘八仙口-十红滩-白嘴山-迪坎儿地区地质略图

Fig.1 Geological sketch map of Baxiankou-Shihongtan-Baizuishan-Dikaner area on the southwestern edge of Turpan-Hami basin

中-下侏罗统水西沟群($J_{1-2}sh$),包括八道湾组(J_1b)、三工河组(J_1s)、西山窑组(J_2x);与下伏基底呈角度不整合接触。其中西山窑组由辫状河相及辫状三角洲相沉积构成,含多个煤层,是区内主要的找矿目的层及研究层位。区内缺失白垩系;见有老第三系砖红色泥岩、含砾细砂岩夹薄层钙质砾岩;第四系为松散砂砾岩。

由于新构造运动对吐哈盆地南缘影响较弱,使南部中生代地层适度抬升,形成西南缘的艾丁湖斜坡带及东南部的南湖凸起,此种构造便于含铀地下水长期稳定地径流,从而有利于形成砂岩型铀矿。而北部新构造运动强烈,地层逆掩推覆现象常见(马瑞士等,1997),不利于砂岩型铀矿的形成。吐哈盆地的这一区域构造特点使砂岩型铀矿主要分布于其南部,尤其是在地层呈单斜状产出的西南缘艾丁湖斜坡带。

2 找矿目的层基本地质特征

2.1 侏罗系地层结构与分布

通过大量钻探揭露和地层层序分析,对研究区地层变化特征可作一示意性对比(图2)。从中可见,十红滩和迪坎儿地区的西山窑组(J_2x)地层发育较完整且稳定,而白嘴山地区则是西山窑组上部地层较稳定,八仙口地区地层变化较大。这一规律控制了砂岩型铀矿的整体分布性,即具有稳定发育的砂

体地层是铀矿化形成的基础,这对从宏观上把握该区铀成矿的空间分布奠定了一个基本的认识基础。因而,对十红滩、迪坎儿及白嘴山地区西山窑组上部地层应作重点关注。

2.2 西山窑组岩性岩相特征

依据岩性岩相变化及沉积特征,可将西山窑组分为4个岩性段(见图2)。

(1) 第一岩性段(J_2x^1):属辫状河-沼泽相沉积,岩性为砾岩、砂质砾岩、砂岩夹粉砂岩、泥岩,泥岩顶部发育稳定的 M_2 厚煤层。埋深由西往东及由南往北逐渐增大。该岩性段总体发育3层砂体,下部两层砂体延伸稳定,厚度较大,粒度结构下粗上细,为典型的正粒序,辫状河相沉积特征明显,为十红滩铀矿床南矿带的主要赋矿层位,厚度为50~90 m。砂岩中含较多有机质及黄铁矿。

(2) 第二岩性段(J_2x^2):在十红滩地区,其下部为辫状河三角洲前缘沉积的灰色厚层状砂岩、粉砂岩、泥岩、砂质砾岩;上部为三角洲平原沉积的浅灰色砾岩、砂质砾岩、砂岩夹泥岩,顶部出现多层煤线(统称为 M_3 煤)。在迪坎儿地区,以三角洲前缘沉积为主,发育较厚的泥岩并夹砂岩层;厚度82~220 m。总体有4层砂体,虽然厚度变化大,但渗透性良好,局部也可形成铀矿化。

(3) 第三岩性段(J_2x^3):主体岩性为冲积扇辫状河沉积的厚层灰色、灰白色砾岩、砂质砾岩,含砾砂岩夹泥岩,顶部为沼泽环境沉积的厚层工业煤层(即

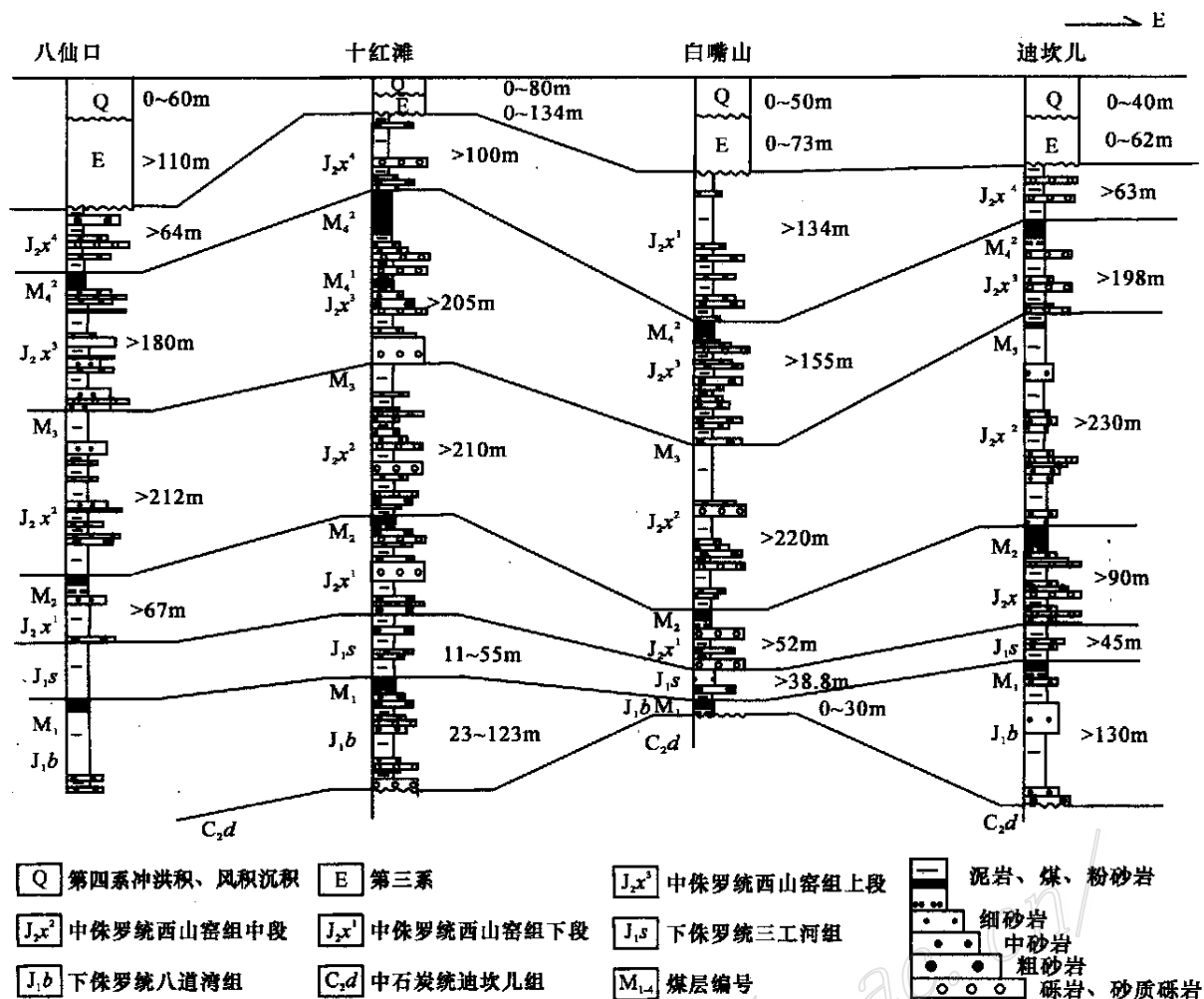


图 2 吐哈盆地西南缘八仙口-十红滩-白嘴山-迪坎儿地区地层综合柱状示意图

Fig. 2 Schematic stratigraphic columnar section of Baxiankou-Shihongtan-Baizuishan and Dikaner area on the southwestern edge of Turpan-Hami basin

M₄ 煤,分为 M₄¹、M₄² 两支,其中 M₄² 较厚),厚度为 80~177 m,砂岩含较多的碳屑等有机质成分。3 层砂体均已见矿,为十红滩铀矿床北矿带的主要赋矿层位。

(4) 第四岩性段(J₂x⁴):岩性为河流-湖泊沉积的厚层泥岩夹砾岩、砂岩,以浅黄色、紫红色、玫瑰红色等彩色泥岩、粉砂岩为主,夹薄层砂岩。该段地层的岩相及厚度变化均较大,缺乏有机质等还原剂,在许多地段被剥蚀,钻孔所见最大沉积厚度 184 m,未发现铀矿化。

由上可知,铀矿化之所以主要集中于 J₂x¹ 及 J₂x³,是因为该两层位存在延伸稳定、厚度较大且富含有机质等还原性组分的大型辫状河砂体。

2.3 西山窑组砂岩地层的渗透性

层间氧化带型铀矿形成的主要条件之一是,砂岩地层必须具备良好的渗透性能。对工作区内砂岩地层的渗透系数(K_φ)做了大量测试,除少数样品(多为致密钙质胶结的岩石)K_φ<0.1 m/d(米/天)外,大多数 K_φ为 0.1~1 m/d;也有部分样品 K_φ>1 m/d。据水成铀矿理论,渗透性能分为 4 级,即①高渗透性的, K_φ>10 m/d;②渗透性的, K_φ为 1~10 m/d;③弱渗透性的, K_φ为 0.1~1 m/d;④不渗透的, K_φ<0.1 m/d。研究区各层位的渗透系数平均值为 0.3533~0.7105 m/d,单值为 0.04~1.4976 m/d(表 1)。据此,笔者认为该区应属弱渗透性-渗透性地层,这一属性对砂岩型铀矿的形成比较有利。

表 1 吐哈盆地西南缘西山窑组砂岩地层岩石渗透性能^{①②}Table 1 Permeability coefficients of sandstone ($J_2 x$) on the southwestern edge of Turpan-Hami basin

地区及层位	渗透系数/ $m \cdot d^{-1}$	
	数值范围	平均值
八仙口		
$J_2 x^2(5)$	0.055 ~ 0.998	0.4118
十红滩		
$J_2 x^1(5)$	0.0762 ~ 0.6692	0.3533
$J_2 x^2(11)$	0.09 ~ 1.4976	0.7105
$J_2 x^3(11)$	0.049 ~ 1.3666	0.3651
白嘴山		
$J_2 x^1(6)$	0.065 ~ 0.784	0.3997
迪坎儿		
$J_2 x^1(4)$	0.04 ~ 0.55	0.3800
$J_2 x^2(4)$	0.23 ~ 0.77	0.4788
$J_2 x^3(3)$	0.38 ~ 0.92	0.6100

测试单位:核工业西北分析测试中心;测试方法及条件:用单向气体渗透率法在 10℃ 和 20℃ 条件下测试,然后换算成渗透系数。() 内为求平均值的样品数。

3 常量和微量元素地球化学

研究区内铀矿化最主要的地质特征,也是主要的找矿标志,就是区域层间氧化带的存在。该带是含氧浅层流体沿渗透性砂岩地层向地下水排泄源区运移时对原生灰色砂岩产生氧化的结果,而铀矿化则产在层间氧化带尖灭区(氧化-还原过渡带)。因此,为了准确反映铀矿化的地球化学特征,有必要对含矿目的层分别就原生岩石(还原带)、层间氧化带及过渡带(矿石带)进行讨论。

3.1 铀、钍及常量元素氧化物含量特征

表 2 列出了研究区西山窑组常量元素氧化物及铀、钍含量的分析结果,从中可见:① 过渡带(矿化带)铀含量最高,原生带(还原带)次之,氧化带最低;② 由于钍的地球化学性质相对稳定,钍/铀比值(Th/U 的质量分数之比)往往反映铀的变化迁移;氧化带岩石 Th/U 比值大大高于矿化带,也大于原生带,说明从原生带变为氧化带时铀被活化带出,并迁移至过渡带沉淀富集(铀被带入)成矿;③ 氧化带中 Fe_2O_3/FeO 比值明显偏大,反映了原生带岩石经氧化后变为氧化带的氧化过程的存在;④ 从常量元素氧化物含量看,在各地球化学分带中,除了 Fe_2O_3 、 FeO 含量有明显的变化外,其他常量元素没有明显的差别;只是过渡带中 CaO 含量有所增加,说明在成矿作用过程中,伴随有钙的带入,这对矿山地浸生产有一定的影响。

3.2 有机碳、全硫、二氧化碳及部分伴生元素含量特征

找矿实践表明,铀的沉淀、富集程度往往与岩石中还原性物质(如有机质、黄铁矿等)的含量有关;伴随着铀的沉淀,伴生元素钒(V)、钼(Mo)、硒(Se)、铼(Re)往往有不同程度的富集。表 3 列出了该方面的测试结果。由表 3 可见:① 原生带和过渡带岩石的有机碳含量明显较高,而氧化带岩石的则最低;全硫(ΣS)含量反映了黄铁矿的含量,以矿化带岩石中最高,氧化带最低,表明有一部分黄铁矿是在铀的沉淀过程中与铀矿物同时形成。另外,二氧化碳含量在过渡带中偏高,也反映了碳酸盐(据常量元素含量分

表 2 吐哈盆地西南缘西山窑组砂岩地层铀、钍及常量元素氧化物的含量^{①②}Table 2 Characteristics of uranium, thorium and major element oxides in sandstone ($J_2 x$) on the southwestern edge of Turpan-Hami basin

	w_U	w_{Th}	w_{Th}	$w(B) / \%$														$w(Fe_2O_3)$
	$/ 10^{-6}$	$/ 10^{-6}$	$/ w_U$	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	烧失量	合计	$/ w(FeO)$	
氧化带(10)	4.81	8.04	2.34	75.93	11.56	2.00	0.74	0.73	0.97	0.02	0.35	0.15	2.86	0.97	3.62	99.90	3.18	
过渡带(矿化带)(7)	353.8	9.47	0.03	70.79	10.63	1.13	1.22	4.63	0.94	0.07	0.39	0.10	2.53	1.01	6.13	99.57	0.95	
还原带(原生带)(11)	6.28	7.25	1.76	75.4	10.8	0.57	1.86	1.19	0.94	0.03	0.37	0.09	2.77	0.89	3.43	98.34	0.34	

测试单位:核工业西北分析测试中心;测试方法:常量铀钍及化学全分析用溶剂滴定之容量法测试,微量铀钍用光度法测定。() 内为样品数。

① 李占双,权志高,等. 2002. 新疆托克逊县苏巴什善县迪坎儿地区铀矿评价. 中国核工业地质局 203 研究所.(内部资料).

② 吴伯林,黄志章,等. 2002. 吐哈盆地南缘白嘴山至迪坎儿地段控矿因素及资源潜力评价. 中国核工业地质局 203 研究所.(内部资料).

表 3 吐哈盆地西南缘西山窑组岩石有机碳、全硫、二氧化碳及部分伴生元素的含量^{①②}

Table 3 Characteristics of organic carbon, sulfur, carbon dioxide and partial associated elements in Xishanyao Formation on the southwestern edge of Turpan-Hami basin

地球化学分带	地 区	w(有机碳)/%	w(ΣS)/%	w(CO ₂)/%	伴生元素 w _B /10 ⁻⁶			
					V	Se	Mo	Re
氧化带	十红滩、八仙口、	0.049(20)	0.058(15)	1.35(13)	50.6(19)	1.48(16)	2.13(19)	0.09(19)
过渡带	白嘴山、迪坎儿	0.279(16)	0.462(13)	3.94(11)	59.3(15)	2.05(11)	10.14(15)	0.60(15)
还原带		0.33(14)	0.12(14)	1.53(12)	55.5(16)	1.19(16)	2.65(17)	0.11(16)

测试单位:核工业西北分析测试中心及核工业北京地质研究院;测试方法:有机碳用气相色谱法,二氧化碳用气体体积法,全硫及伴生元素用等离子体发射光谱法(ICPS)。() 内为样品数。

析,主要是方解石)在矿化岩石中偏高的特征。②伴生元素 V、Se、Mo、Re 有在矿化岩石中富集的趋势,但 Se 和 V 有时也在氧化(水解)岩石中富集。与铀一起富集且规律最明显的是 Re 及 Mo,在地浸开采中可考虑综合利用。在浅层水溶液条件下,Re 可形成[ReO₄]⁻¹络离子,具强酸性,在有碱金属与碱土金属时发生沉淀;Re 也可能伴随硫化物得到富集。在水体循环过程中,特别是在强氧化条件下,钼酸络离子变得较活泼,而在还原条件下则可混入硫化铁矿物中,因此,Mo 往往有在氧化还原过渡带与铀同步聚集的现象。

3.3 微量元素及稀土元素特征

(1) 微量元素含量特征

据十红滩矿床目的层砂岩的微量元素含量(表 4 及图 3),并将其与地壳克拉克值相比,可见各元素并未得到明显富集,且其含量变化在各地球化学分带中是基本同步的。这说明,铀成矿对微量元素 Sc、Cr、Rb、Sr、Y、Zr、Nb、Cs、Ta、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Ge、Sb、Pb、Bi 等未起富集作用。

(2) 稀土元素含量

蚀源区及十红滩矿床稀土元素的含量(表 5)总体反映出它们并未得到明显的富集,但仍然可以反映一定的规律性:①蚀源区和各地球化学分带岩石的稀土元素配分型式表现出良好的一致性(图 4),表明整个含矿目的层具有统一的物质来源、沉积环境、构造背景等,且物质来源源于蚀源区。②蚀源区中各稀土元素含量最高,反映源区各碎屑物质在沉积成岩过程中稀土元素从矿物、岩屑等碎屑中有所释

放。③过渡带中稀土元素含量最低,氧化带次之,还原带较高。这是因为原生带中砂体处于相对稳定的地球化学环境,后生蚀变较弱;而过渡带则是一个地球化学变化带,是元素带出带入较活跃的場所,稀土元素分馏作用增强,岩石中稀土元素被带出而进入流体相。因此,在铀矿成矿作用过程中,过渡带中稀土元素的含量是相对降低的。

表 4 十红滩矿床各地球化学分带岩石的微量元素分析结果($w_B/10^{-6}$)(彭新建,2003)Table 4 Analytical data of minor elements in every geochemical zone of the Shihongtan deposit ($w_B/10^{-6}$)

元 素	氧化带(8)	过渡带(13)	还原带(11)
Sc	5.984	6.044	8.510
Cr	42.060	46.927	40.018
Rb	99.313	97.586	102.234
Sr	63.010	73.288	71.783
Y	14.194	13.08	18.078
Zr	126.251	113.079	129.393
Nb	6.568	6.028	6.859
Cs	2.52	2.536	3.406
Ta	0.792	0.712	0.761
Co	6.625	6.279	6.962
Ni	12.533	12.819	16.019
Cu	5.788	5.775	11.770
Zn	33.215	29.263	46.678
Ga	11.828	11.316	13.829
Ge	1.175	1.143	1.119
Sb	1.356	1.36	1.828
Pb	12.378	12.116	16.124
Bi	0.129	0.136	0.185

测试仪器:德国菲尼根质谱公司产 Finigan Mat Element 型质谱仪;
测试单位:中国科学院矿床地球化学开放研究实验室(贵阳)。() 内为样品数。

① 李占双,权志高,等.2002.新疆托克逊县苏巴什善县迪坎儿地区铀矿评价.中国核工业地质局 203 研究所.(内部资料)。

② 吴伯林,黄志章,等.2002.吐哈盆地南缘白嘴山至迪坎儿地段控矿因素及资源潜力评价.中国核工业地质局 203 研究所.(内部资料)。

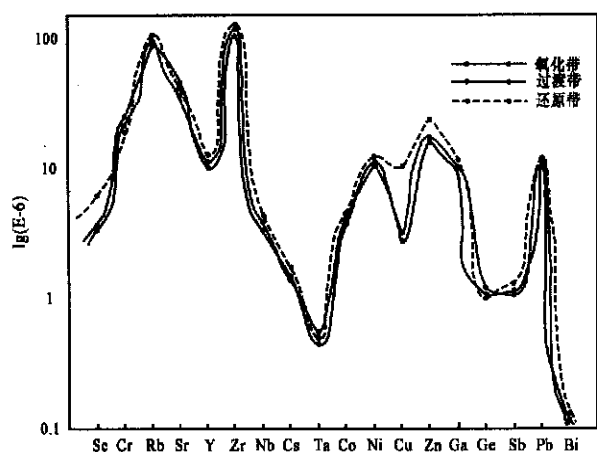


图 3 吐哈盆地西南缘各地球化学分带微量元素含量特征

Fig.3 Characteristics of minor elements in every geochemical zone on the southwestern edge of Turpan- Hami basin

表 5 十红滩矿床蚀源区和矿石样品稀土元素分析结果 ($u_H/10^{-6}$)^①(彭新建,2003)

Table 5 Analytical data of rare earth elements (REE) of the corrosion remaining area and ores from the Shihongtan deposit ($u_H/10^{-6}$)

元素	蚀源区(25)	氧化带(8)	过渡带(13)	还原带(11)
La	24.757	21.059	19.309	22.197
Ce	54.613	44.664	41.052	47.824
Pr	6.157	4.668	4.24	5.106
Nd	36.781	16.875	15.576	18.978
Sm	4.815	3.094	2.863	3.681
Eu	1.491	0.707	0.67	0.853
Gd	6.994	2.975	2.781	3.675
Tb	0.955	0.425	0.391	0.536
Dy	6.284	2.496	2.24	3.091
Ho	0.963	0.503	0.454	0.625
Er	2.485	1.451	1.331	1.801
Tm	0.44	0.21	0.196	0.262
Yb	2.59	1.432	1.281	1.706
Lu	0.455	0.212	0.191	0.257
LREE	135.608	94.042	86.491	102.314
HREE	14.172	6.729	6.084	8.278
ΣREE	149.78	100.771	92.575	110.592
LREE/HREE	9.569	13.976	14.216	12.360

测试单位:核工业西北分析测试中心;测试方法:等离子体发射光谱法(ICPS)。()内为样品数。

3.4 铀的赋存状态及铀矿物特征

通过放射性照相、矿石矿物电子探针分析等手段的鉴定,认为矿石中铀的存在形式主要有两种:即

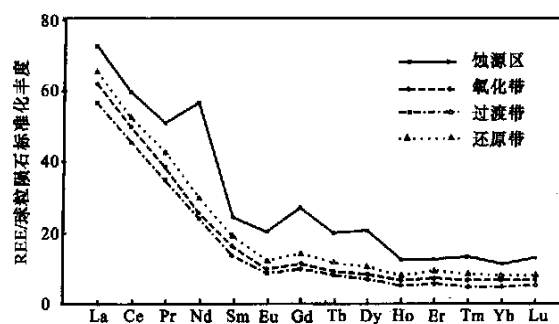


图 4 吐哈盆地西南缘蚀源区及各地球化学分带岩石稀土元素配分型式

Fig.4 Chondrite-normalized REE patterns of rocks in corrosion remaining area and in every geochemical zone on the southwestern edge of Turpan- Hami basin

表 6 研究区矿石矿物(铀矿物、黄铁矿)成分特征 ($u_H/\%$)^②

Table 6 Electron microprobe analytical data of ore minerals (uranium minerals and pyrite) in ores from the study area ($u_H/\%$)

矿 物	U	Th	S	Pb	Al	Si	Ca	Ti	Se	ΣFe	Re
沥青铀矿(4)	67.18	0.24	0.82	1.47	0.76	2.06	0.34	0.41	1.7	1.34	1.34
铀石(5)	47.36	0.26	0.47	1.79	2.87	9.37	1.21	1.03	0.97	1.98	1.03
钛铀矿(3)	20.36	0.05	-	-	0.28	20.19	0.79	39.44	0.14	3.91	-
黄铁矿(2)	0.08	0.00	50.88	0.00	0.14	0.17	0.22	0.22	0.19	47.90	-

测试单位:国土资源部西安地质矿产研究所;测试方法:电子探针微区分析法。()内为样品数。“-”为未检出。

呈吸附状态的铀及呈铀矿物状态的铀;另有少量含铀矿物。吸附状态铀主要是由矿石中的粘土矿物、粉末状黄铁矿、碳屑物等的吸附作用所形成。

据显微镜下观察及矿石矿物电子探针成分分析(表6),铀矿物主要是沥青铀矿,还有少量铀石及含铀钛铁氧化物(推测为钛铀矿氧化后的产物)。

4 铀成矿年龄

对十红滩矿床的矿石进行了全岩铀-铅同位素测定(权志高等,2002),获得3个铀-铅等时线年龄,分别是(104 ± 1) Ma、(24 ± 1) Ma、(7 ± 0) Ma,为早白垩世晚期、渐新世末期、中新世晚期,说明该区成矿具多阶段性和长期性。据该区盆地形成演化史及层间氧化带型铀矿的特点,认为早白垩世晚期为初

① 吴伯林,黄志章,等.2002.吐哈盆地南缘白嘴山至迪坎儿地段控矿因素及资源潜力评价.中国核工业地质局203研究所.(内部资料).

② 李占双,权志高,等.2002.新疆托克逊县苏巴什善县迪坎儿地区铀矿评价.中国核工业地质局203研究所.(内部资料).

次改造(贫矿化)阶段,渐新世末期为铀矿化富集阶段,中新世晚期为后期改造阶段。

另外,以夏毓亮等(2003)对矿石进行铀-钍平衡修正后得出的铀含量参与铀-铅等时线年龄的计算,得到(28±4) Ma 及(48±2) Ma 的铀成矿年龄,即为始新世末和渐新世末,这也说明铀成矿主要集中于喜马拉雅期,尤其是第三纪期间。

5 古流体作用地球化学

5.1 古流体后生蚀变地质作用概述

据吴伯林等(2002)对盆地西南缘西山窑组后生蚀变及包裹体的研究,认为该区存在两次较明显的古流体地质作用,一是早期的酸性氧化古流体,形成由“红色、黄色”蚀变岩石(针铁矿、水针铁矿、黄钾铁矾等蚀变)组成的层间氧化带,从铀-钍平衡关系(强烈偏钍)看,该期流体蚀变使铀元素从高背景值的目标地层中活化迁移至流体,在层间氧化带前锋边缘沉淀富集,故而具有成矿并控矿的作用。二是晚期流体,其碱性还原性质造成该区较广泛的碳酸盐化(当然碳酸盐化有一部分是成岩阶段形成的)及部分黄铁矿化,与铀成矿关系不太密切,但对矿山地浸采矿有一定影响。

5.2 古流体成分、同位素地质特征及其成因、来源讨论

5.2.1 成分特征

通过后生蚀变岩石碎屑矿物石英沿裂隙分布的次生包裹体及新生矿物方解石中原生包裹体成分的

测试(吴伯林等,2002),反映出流体成分以 H_2O 、 CO_2 为主,含有一定量的有机烃类气体,个别含有较多的 SO_2 、 N_2 、 H_2 。这种成分特征有两点是明确的,一是浅层古流体(液)以 H_2O 占绝对优势;二是气体成分中存在的组合,如 CO_2 、 SO_2 、 N_2 、 H_2 及有机烃类气体,比较类似于天然气的组分(戴金星等,1989)。为证实这一点,笔者对含矿目标层直接现场钻孔的岩芯采集了用于“岩屑顶气”分析的新鲜样品,其所含气体成分组成见表7;同时,为了区别它是煤成气还是油气成因气,还相应做了甲烷及乙烷气的碳同位素分析(表7)。从中可见,岩层中含有 N_2 、 CO_2 、 H_2 及部分有机气体如 CH_4 、 C_2H_2 、 C_3H_8 等。一般来说,甲烷气碳同位素即 $\delta^{13}C_1$ (PDB) 为 $-15\% \sim -45\%$,乙烷气碳同位素即 $\delta^{13}C_2$ (PDB) 为 $0\% \sim -23.2\%$,多为煤成气成因;而当 $\delta^{13}C_1$ (PDB) 为 $-30\% \sim -55\%$, $\delta^{13}C_2$ (PDB) 为 $-25\% \sim -50\%$ 则多为油气成因;当 $\delta^{13}C_1 < -55\%$ 时即为生物成因气(戴金星等,1995)。从该区甲烷和乙烷气的碳同位素数据看,无疑应属煤成气成因。其中所含丰富的氢气,无疑为铀成矿作用提供了极强的还原环境,是铀元素从六价还原成四价而沉淀的重要原因。

5.2.2 古流体物理化学参数

对碎屑矿物石英内次生(增生边)流体包裹体及方解石内原生流体包裹体进行了均一法测温、冷冻法测盐度等,所获古流体的物理化学参数如表8所示。由表8可见,早期流体(石英)温度为 $72 \sim 113^\circ C$,而碳酸盐化(方解石)温度为 $71 \sim 80^\circ C$,后期

表7 吐哈盆地西南缘中下侏罗统“岩屑顶气”成分及碳同位素特征

Table 7 Carbon isotope characteristics and composition of Middle-Lower Jurassic lithic sandstone gas on the southwestern edge of Turpan-Hami basin

样号	层位	岩性	岩石中气体组分的体积微升数/($\mu l/kg$)							$\delta^{13}C_{V-PDB}/\%$	
			甲烷	乙烷	乙烯	丙烷	氮气	氢气	二氧化碳	甲烷气	乙烷气
MCQ-1	ZK112-2 M ₂	煤黑色褐煤	42.542	4.613	4.226	0.280	100.4×10^4	1.887×10^4	2.442×10^4	-31.0	-12.8
MCQ-2	ZK112-3 J ₂ x ²	浅玫瑰红色粗砂岩	6.263	0.507	2.039	0.651	4.065×10^4	231.724	8161.103	-28.6	-
MCQ-3	ZK112-4 J ₂ x ²	浅灰色细砂岩	13.422	4.721	-	1.938	19.01×10^4	9476.129	3684.194	-27.0	-26.6
MCQ-4	ZK64-6 J ₁ s	浅灰色细砂岩	3.276	-	-	-	17.35×10^4	111.176	4292.206	-40.4(+5)	-
MCQ-5	ZK40-3 J ₂ x ¹	浅灰色粗砂岩	7.500	0.951	-	0.774	8.489×10^4	426	1887	-34.6	-23.7

测试仪器及精度:HP5790 气相色谱仪,精确至 0.001;Deltaplus XP 质谱仪,精确至 0.1‰。测试单位:前者为国土资源部华西石油地质中心实验室(咸阳);后者为中国科学院兰州分院气体地球化学实验室。 $\mu l/kg$ 为每千克岩石含某气体组分的体积微升数。

表 8 吐哈盆地西南缘中下侏罗统流体包裹体的物理化学性质

Table 8 Physical-chemical properties of the fluid inclusions from Middle-Lower Jurassic series on the southwestern edge of Turpan-Hami basin

	WBQ-85	WBQ-72	WBQ-81	WBQ-76
主矿物	石英	石英	石英	方解石
包裹体性质	次生	次生	次生	原生
大小/ μm	3~5	3~5	3~5	3
气相百分数/%	5	5	5	5
$t_h/^\circ\text{C}$	86~111 6 个数据平均为 98.7	78~113 5 个数据平均为 99	72~101 6 个数据平均为 88.2	71~80 3 个数据平均为 75.3
$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	0.9~3.4 5 个数据平均为 1.94	1.6~4.8 3 个数据平均为 3.03	1.9~5.0 3 个数据平均为 3.8	
$p/10^5\text{ Pa}$	1.0	1.0	0.7	
$\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	0.972	0.983	0.079	
流体演化	早期	早期	早期	晚期
液、气相主要成分 (吴柏林等,2003a)	以 H_2O 、 CO_2 为主,含 CH_4 、 N_2 、 SO_2 、 H_2 及 SO_4^{2-} , Cl^- 、 HS^- 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} , Ca^{2+}	以 H_2O 、 CO_2 为主,含 CH_4 、 N_2 、 SO_2 、 H_2 及 SO_4^{2-} , Cl^- 、 HS^- 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} , Ca^{2+}	以 H_2O 、 CO_2 为主,含 CH_4 、 N_2 、 SO_2 、 H_2 及 SO_4^{2-} , Cl^- 、 HS^- 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} , Ca^{2+}	H_2O 、 CO_2 、 F^- 、 O_4^{2-} 、 Cl^- , K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+}

测试单位及测试者:中国地质大学(武汉)包裹体实验室,栗春芳。测试时间:2003 年。

温度偏低,总体属低温低压浅成环境。流体由早期富 H_2O 、 CO_2 、 Cl_2 、 Mg 、 Ca 、 H_2S 向晚期含 H_2O 、 CO_2 、 SO_4 、 K 、 Na 、 Ca 的碱性流体演化;流体演化至晚期,盐度逐渐增大。

5.2.3 古流体同位素地质特征及其成因、来源

前已述及,古流体后生蚀变导致该区层间氧化带岩石的形成以及粘土化、黄铁矿化、铀矿化及后期碳酸盐化的发生。因此,通过对后生蚀变岩石以及矿石中新生矿物如粘土矿物(主要是高岭石)、黄铁矿等的相关同位素分析,可以追踪古流体的成因或来源。

彭新建等(2003)对研究区后生蚀变岩石中的粘土矿物进行了分离及氢、氧同位素研究,结果认为,蚀变流体主要来源于大气降水;研究区矿化岩石中黄铁矿的硫同位素组成 $\delta^{34}\text{S} = -16.86\% \sim -27.2\%$,以负值为主,极差为 44.06% ,均值为 -2.40% (5 个样品)。据 Rollinson(1993),自然界中幔源硫 $\delta^{34}\text{S} = 0 \pm 3\%$;现代海水硫 $\delta^{34}\text{S} = 20\%$;沉积岩中的还原硫具有较大负值和变化范围(煤和石油中的硫 $\delta^{34}\text{S}$ 多为负值且变化范围大)。该区 $\delta^{34}\text{S}$ 值的总体特征是变化范围大,且矿化岩石以负值为主(彭新建,2003),表明古流体内混有沉积岩层中的硫,而且这种硫具有煤层来源的特点。

综上所述,该区造成后生蚀变及成矿作用的古流体具有低温浅成(及表生)热液的特点,主要来源

于大气降水,并具混有煤成气的特征。蚀变矿物学初步反映,古流体总体经历了由氧化酸性向还原碱性演化的过程。

6 结 论

经过以上几方面的论述,可以认为:

(1) 十红滩和迪坎儿地区,西山窑组地层延伸稳定,发育完整,是找矿的重点地区;白嘴山地区,西山窑组上部地层较稳定,也是找矿的重点地区;八仙口地区,地层变化较大,可作一般关注。

(2) 该区找矿目的层的渗透性能属弱渗透-渗透性地层,这一特征对砂岩型铀矿的形成比较有利。

(3) 通过对该区常量和微量元素地球化学特征的分析,认为铀成矿作用存在着明显的地球化学分带性,据此可定量指导找矿工作。其中尤以 Th/U 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 、 Ra/U 、 ΣS 、 Mo 、 Re 及有机质等的含量差别在氧化带、过渡带、还原带中反映最为明显。对铀矿石中的钼和铼可考虑综合利用。稀土元素和微量元素(如 Cr 、 Co 、 Ni 、 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Sb 、 Y 等)在成矿过程中未能得到明显富集;其中稀土元素在矿石带中相对亏损。

(4) 成矿作用具有多期次、年代较新(主要集中于第三纪)的特点。铀的赋存状态为吸附状态铀及铀矿物铀;铀矿物以沥青铀矿为主,还有少量铀石及

含铀钛铁氧化物。

(5) 造成后生蚀变及成矿作用的古流体具有低温浅成(及表生)热液的特征,主要来源于大气降水;煤成气造成了目的层的还原性环境,对铀矿成矿无疑起了重要作用。

致 谢 笔者在吐鲁番盆地工作期间,曾与彭新建博士、朱夕阳博士、管太阳博士等进行过交流,并受到启迪,在此表示感谢。

References

- Dai J X, Qi H F and Hao S S. 1989. Summary of natural gas geology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press. 1 ~ 50 (in Chinese).
- Dai J X, Song Y and Sun Y X. 1993. The coal bed gas in Turpan- Hami basin [J]. Oil Exploration and Exploitation, 20 (2): 6 ~ 10 (in Chinese with English abstract).
- Dai J X, Li X Q and Song Y. 1995. The geochemistry feature in the east of central- Asia coal-formed gas accumulation domains [J]. Oil Exploration and Exploitation, 22 (4): 1 ~ 5 (in Chinese with English abstract).
- Li B X and Li Z S. 2003. Geological and geochemical characteristics of section first to be mined, Shihongtan uranium deposit, Turpan- Hami basin [J]. Uranium Geology, 19 (4): 193 ~ 202 (in Chinese with English abstract).
- Ma R S, Shu L S and Sun J Q. 1997. Tectonic evolution and metallogeny of eastern Tianshan mountains [M]. Beijing: Geol. Pub. House. 1 ~ 20 (in Chinese with English abstract).
- Peng X J. 2003. Mineralization geochemistry research of Shihongtan uranium deposit in Xinjiang [D]. Tutor: Ming M Z. Nanjing: Department of Earth Science, Nanjing University. 72 ~ 74 (in Chinese).
- Quan Z G and Li Z S. 2002. Geological characteristics and genesis of the Shihongtan sandstone type uranium deposit, Xinjiang [J]. Geological Review, 43 (6): 430 ~ 436 (in Chinese with English abstract).
- Rollinson H R. 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation [M]. London: Longman scientific technical Press.
- Wu B L, Huang Z Z, Li X Z, et al. 2003a. Initial discussion on paleo-fluid geologic process and sandstone type uranium metallogenesis at southwestern edge of Turpan- Hami basin [J]. Uranium Geology, 19 (6): 326 ~ 332 (in Chinese with English abstract).
- Wu B L, He J G and Gong B L. 2003b. Ore-controlling regularities of neotectonic activity at southwestern margin of Turpan- Hami basin and prognosis of metallogenically favorable areas adjacent to Shihongtan uranium deposit [J]. Uranium Geology, 19 (5): 271 ~ 276 (in Chinese with English abstract).
- Wu B L, Quan Z G, Xu G Z, et al. 2004a. Meso-Jurassic series Xishanyao Group geology-geochemical feature and the optimization of uranium mineralization favorable strathorizon in Baizuishan to Dihaoer area in south edge of Turpan- Hami basin [J]. Uranium Geology, 20 (1): 16 ~ 22 (in Chinese with English abstract).
- Wu B L, Xu G Z, Li W H, et al. 2004b. Metallogenic conditions of in-situ leachable sandstone type uranium deposit and dynamic evolution in the Turpan- Hami basin [J]. Geology in China, 31 (1): 101 ~ 107 (in Chinese with English abstract).
- Wang B Q. 2000. Analysis of metallogenic conditions and prospect forecasting for the interlayer oxidation zone sandstone type uranium deposit in Turpan- Hami basin [J]. Uranium Geology, 16 (6): 321 ~ 326 (in Chinese with English abstract).
- Xia Y L, Lin J R, Liu H B, et al. 2003. Research on geochemistry of sandstone-hosted uranium ore-formation in major uranium-productive basins, northern China [J]. Uranium Geology, 19 (3): 129 ~ 136 (in Chinese with English abstract).
- Xu G Z. 2003. Tectonic evolution and its control over ore-formation of interlayer oxidized zone sandstone type uranium deposit at southern margin of Turpan- Hami basin [J]. Uranium Geology, 19 (3): 137 ~ 140 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Q S and Li Z Y. 2003. Geologic feature and prospecting for the in-situ leachable sandstone type uranium deposit in the southwest edge of Turpan- Hami [J]. Geology in China, 30 (2): 186 ~ 191 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 戴金星, 戚厚发, 郝石生. 1989. 天然气地质学概论 [M]. 北京: 石油工业出版社. 1 ~ 50.
- 戴金星, 宋岩, 孙永祥. 1993. 吐鲁番-哈密盆地的煤成气 [J]. 石油勘探与开发, 20 (2): 6 ~ 10.
- 戴金星, 李先奇, 宋岩, 等. 1995. 中亚煤成气聚集域东部煤成气的地球化学特征 [J]. 石油勘探与开发, 22 (4): 1 ~ 5.
- 李保侠, 李占双. 2003. 十红滩铀矿床首采段地质、地球化学特征 [J]. 铀矿地质, 19 (4): 193 ~ 202.
- 马瑞士, 舒良树, 孙家齐. 1997. 东天山构造演化与成矿 [M]. 北京: 地质出版社. 1 ~ 20.
- 彭新建. 2003. 新疆十红滩铀矿床成矿作用地球化学研究 [博士论文] [D]. 导师: 闵茂中. 南京: 南京大学地球科学系. 72 ~ 74.
- 权志高, 李占双. 2002. 新疆十红滩砂岩型铀矿床基本特征及成因分析 [J]. 地质论评, 43 (6): 430 ~ 436.
- 吴伯林, 黄志章, 李秀珍, 等. 2003a. 吐哈盆地西南缘古流体地质作用与砂岩型铀矿成矿作用初探 [J]. 铀矿地质, 19 (6): 326 ~ 332.
- 吴伯林, 贺建国, 龚斌利. 2003b. 吐哈盆地西南缘新构造控矿规律及十红滩矿床外围成矿有利区预测 [J]. 铀矿地质, 19 (5): 271 ~ 276.
- 吴伯林, 权志高, 徐高中, 等. 2004a. 吐哈盆地南缘白咀山至迪哈尔地区中侏罗统西山窑组地质地球化学特征与成矿有利层位 [J]. 铀矿地质, 20 (1): 17 ~ 22.
- 吴伯林, 徐高中, 李卫红, 等. 2004b. 吐哈盆地地浸砂岩型铀矿成矿条件与盆地动力学演化 [J]. 中国地质, 31 (1): 101 ~ 107.
- 王保群. 2000. 吐哈盆地层间氧化带砂岩型铀矿成矿条件分析及远景预测 [J]. 铀矿地质, 16 (6): 321 ~ 326.
- 夏毓亮, 林锦荣, 刘汉彬等. 2003. 中国北方主要产铀盆地砂岩型铀

矿成矿年代学研究[J]. 铀矿地质, 19(3):129~136.
徐高中. 2003. 吐哈盆地南缘构造演化及其对层间氧化带砂岩型铀
矿成矿作用的控制[J]. 铀矿地质, 19(3):137~140.

周巧生, 李占游. 2003. 吐哈盆地西南缘地浸砂岩型铀矿地质特征及
找矿前景[J]. 中国地质, 30(2):186~191.

Basic geological and geochemical characteristics of sandstone type uranium deposits in southwestern margin of Turpan-Hami Basin

WU Bo-lin^{1,2}, QUAN Zhi-gao², WEI Guan-hui², PENG Xin-jian³, WANG Jin-ping²,

LI Zhan-you², XU Gao-zhong², LIU Chi-yang¹ and ZHANG Fu-xin¹

(1 Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2 No.203 Research Institute, Bureau of Geology, CNNC, Xianyang 712000, Shaanxi, China; 3. Bureau of Geology, CNNC, Beijing 100013, China)

Abstract

In order to understand clearly the favorable geological and geochemical factors for mineralization and reveal the physical-chemical characteristics or genesis of ore fluids as well as the metallogenic environment and its dynamic evolutionary process in this area, the authors have studied comprehensively geochemical characteristics of the sandstone type uranium deposits. The means adopted included the analysis of the target stratum and its permeability, the determination of major and minor elements and the analysis of partial characteristic geochemical indexes such as organic-carbon, total sulfur and $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ratios as well as physical-chemical parameters, together with the uranium, carbon, lead, oxygen and sulfur isotopic determination. It is held that the stratigraphic structure of the interbedded sandstone and mudstone on the southwestern margin of Turpan-Hami basin is perfect and stretches persistently, and that the weak to strong stratigraphic permeability is favorable for the formation of sandstone type uranium deposits. According to the analysis of major and minor elements, the authors considered that there exists prominent geochemical zoning in the uranium deposit. The oxidized zone is characterized by low organic carbon and sulfur and high Th/U, $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ and Ra/U ratios. The transitional zone is noted for low Th/U ratio and high S, Mo and Re contents. The reduction zone is featured by low $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ and Ra/U ratios and high organic carbon content. Other minor elements such as Cu, Pb, Zn, Cr, Co and Ni as well as REE like Zr were not obviously concentrated in the process of mineralization. According to equilibrium coefficients of uranium and radium, features of fluid inclusions, isotopic characteristics of lead-uranium ratio, carbon, hydrogen, oxygen and sulfur, it is thought that the uranium mineralization is relatively young in age and multiple in stage, with the main ore-forming phases concentrated in Tertiary period, that the coal bed gas in the ore-bearing target stratum provided the reduction environment for mineralization, that the ore source was from the ore-bearing target stratum itself, and that the paleo-fluid was the low-temperature epithermal hydrothermal solution derived mainly from meteoric water.

Key words: sandstone type uranium deposit, geology and geochemistry, mineralization of uranium deposit, geochemical zonation, paleo-fluid, isotope, permeability, coal bed gas