



鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿 目标层灰绿色砂岩成因

李子颖* 方锡珩 陈安平 欧光习 肖新建 孙 晔
刘池洋 王 毅

(① 核工业北京地质研究院, 北京 100029; ② 核工业 208 大队, 包头 014010; ③ 西北大学地质学系, 西安 710069;
④ 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要 东胜砂岩型铀矿床产于鄂尔多斯盆地北部侏罗纪直罗组灰绿色砂岩与灰色砂岩之间的过渡带中. 该矿床目标层中出现的灰绿色砂岩具有独特的特征, 不同于一般层间氧化带砂岩型铀矿. 从岩石学、矿物学和地球化学较系统地研究了灰绿色砂岩的特征和成因, 指出它是古氧化作用后经油气二次还原的产物. 灰绿色砂岩之绿色主要是由覆盖于砂岩颗粒表面的针叶状绿泥石引起. 鉴别铀成矿目标层灰绿色砂岩的成因、识别古氧化带不仅对查明该砂岩型铀矿床的形成机理具有理论意义, 而且对指导同类砂岩型铀矿的找矿具有重要的实际意义.

关键词 鄂尔多斯 砂岩型铀矿床 灰绿色砂岩 油气 成因

鄂尔多斯盆地北部东胜砂岩铀矿床是近年铀矿勘查在鄂尔多斯盆地北部直罗组中发现的较大规模的铀矿床. 它的发现使鄂尔多斯盆地作为重要能源资源盆地又增加了一种重要的能源矿产. 铀矿化产于侏罗纪直罗组灰绿色砂岩与灰色砂岩之间的过渡带中. 矿化目标层砂岩颜色均呈还原色调. 东胜砂岩铀矿的这一独特特征不同于一般的砂岩型铀矿床^[1~3], 即铀矿化产于氧化色的黄色调和还原色的灰色调之间^[4~6]. 国内外对与砂岩铀矿有关的氧化带砂岩再还原的系统研究不多见, 比较有代表性的工作是美国学者对得克萨斯州与油气有关的砂岩铀矿床的研究^[7,8]. 东胜砂岩铀矿床的发现及其独特的成矿现象, 是与盆地的地质构造演化和地球化学作用密不可分的^[6,9,10]. 研究区除铀矿外, 还有产于中下侏罗统延安组中的大型煤矿和较强的油气作用显示^[9,11]. 因此, 阐明与铀矿化密切相关的灰绿色砂岩的成因不仅对

拓宽找矿思路、指导砂岩型铀矿勘查具有重要的实际意义, 而且对阐明砂岩型铀矿的成矿机理及铀矿化与其它能源矿产油气和煤的关系也具有重要的理论意义.

1 地质背景概况

研究区位于鄂尔多斯盆地东北部伊盟隆起南缘, 北邻河套地堑. 主要出露在中生代沉积地层^[12](图 1), 上三叠统延长组主要是含砾砂岩和泥岩与粉砂岩互层, 产油和煤; 中下侏罗统延安组岩性主要是长英质砂岩、泥岩和粉砂岩组成, 产煤; 中侏罗统直罗组是含矿目标层, 主要由灰色、灰绿色砂岩及杂色粉砂岩和泥岩组成, 平行或局部角度不整合于延安组之上; 安定组主要岩性为灰绿色泥质砂岩、紫红色细砂岩、泥岩夹钙质胶结的白色细砂岩, 与下伏直罗组呈平行不整合接触关系; 上侏罗统汾河组在研究区基

收稿日期: 2006-08-04; 接受日期: 2006-10-11

国家重点基础研究发展计划项目(编号: 2003CB214608)和核工业地质局科学研究项目(批准号: HDKY20020501)共同资助

*E-mail: zyli9818@126.com

本不发育. 下白垩统岩性主要是紫红、灰绿砂砾岩、砂岩和紫红、棕红色粉砂质泥岩夹砂岩、砾岩薄层, 与上下地层均为角度不整合关系. 第三纪地层基本缺失, 第四纪砂土厚度数米到数十米不等. 研究区经历多期次的构造活动, 其与铀矿化有着密切的关系^[6,9,10], 铀矿化产于直罗组灰绿色砂岩与灰色砂岩之间的过渡带中^[6,13].

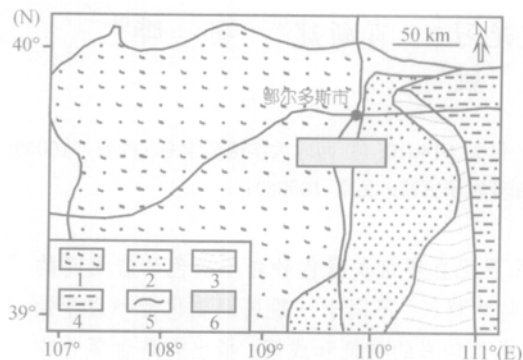


图 1 研究区地质简图

1. 下白垩统; 2. 侏罗系; 3. 三叠系; 4. 古生界; 5. 公路; 6. 重点研究区

2 矿化目标层砂岩岩石学一般特征

2.1 结构构造

目标层一般为粒序层, 有粗细韵律性变化, 见交错层理. 岩石结构疏松, 碎屑颗粒磨圆度和分选性均较差, 颗粒多呈次棱角状-次圆状. 岩性大多数为含砾粗砂岩、中粗粒砂岩、含粗砂中粒砂岩、中细粒砂岩等, 矿物成分主要是石英、长石和岩屑、云母.

砂岩中杂基含量一般 $<10\%$, 碳酸盐含量 $<0.5\%$, 以接触胶结为主, 孔隙式胶结为辅. 部分砂岩碳酸盐化强烈, 碳酸盐含量可达 $10\% \sim 20\%$ 或更高, 呈基底式胶结. 有时碳酸盐含量 $>50\%$, 形成“砂屑灰岩”. 碳酸盐几乎全为方解石, 方解石多为粒径较大的亮晶方解石, 少数为粒径 $0.002 \sim 0.005 \text{ mm}$ 的微晶方解石集合体, 有时可见碳酸盐球粒.

2.2 矿物学特征

砂岩碎屑成分比较复杂, 以石英为主, 并含有较多的长石和岩屑, 云母也较多, 还含有一些重砂矿物, 其碎屑特征简述如下:

石英: 石英是碎屑的主要成分, 约占碎屑总量的 $40\% \sim 45\%$, 它比较稳定的矿物, 无明显蚀变, 仅在碳酸盐化强烈的岩石中部分被碳酸盐交代.

长石: 长石约占碎屑总量的 $30\% \sim 35\%$, 其中以钾长石为主, 约占长石总量的三分之二左右, 其次为斜长石. 钾长石多为具格子状双晶的微斜长石及具钠长石条带的条纹长石. 多数斜长石具细而密的聚片双晶, 为酸性的更长石, 少数斜长石双晶条带较宽、消光角大, 为中长石. 长石碎屑大部份都未遭受明显蚀变, 但部分长石粘土化较强, 钾长石主要是高岭石化, 斜长石主要为水云母化、绿泥石化和绿帘石化.

岩屑: 砂岩中含有较多岩屑, 约占碎屑总量的 $20\% \sim 25\%$, 其成分主要为变质岩碎屑, 岩性以石英岩、云母石英岩为主. 由于花岗岩结晶较粗, 一般不易形成岩屑, 故花岗岩碎屑相对较少, 此外还见有花岗斑岩、流纹岩、安山岩及粉砂岩等岩屑. 砂岩中岩屑成分直接说明其来源的多成分特征.

云母: 云母碎屑含量变化较大, 一般为 $2\% \sim 5\%$, 局部可多达 $8\% \sim 10\%$, 常近于平行排列. 一般来说, 粗砂岩和中粗粒砂岩含云母碎屑较少, 而中细粒砂岩或细砂岩含云母碎屑较多, 反应云母是在相对弱的水动力条件下沉淀的. 云母碎屑中以黑云母为主, 有少量白云母. 黑云母又以褐色黑云母为主, 其次为绿色黑云母, 它多为褐色黑云母蚀变的产物. 此外, 黑云母常遭受不同程度的绿泥石化, 形成叶绿泥石.

炭化植物或有机质碎屑: 它在砂岩中分布很不均匀, 一般含量少于 $<0.5\%$, 但局部砂岩中可高达 $5\% \sim 10\%$. 其中炭化植物碎屑相对较少, 多为有机质条带, 其成分多是煤屑^[14].

重砂矿物: 重砂矿物总量一般很少, $<0.5\%$, 但在中细粒砂岩中可局部富集成层产出, 达 1% 以上. 其中最常见的矿物是石榴石, 其次为锆石, 独居石碎屑颗粒相对较大, 无色. 此外, 还有黑电气石、榍石、褐帘石、磷灰石; 金属矿物以黄铁矿为主, 局部见有球粒状黄铁矿, 为成岩期形成的, 其次为钛铁矿, 多遭受不同程度氧化. 强烈氧化的钛铁矿, 最终形成锐钛矿晶簇.

综上所述, 东胜地区直罗组下段目标层砂岩含长石碎屑及岩屑较多, 应定名为岩屑长石砂岩. 此外, 砂岩中含长石碎屑和岩屑多, 云母碎屑含量也较高, 这反映出近源沉积的特征, 距蚀源区不远. 从岩屑的成分来看, 蚀源区主要岩石为花岗质和变质岩岩石, 少量火山岩.

3 灰绿色砂岩基本特征

灰绿色砂岩总体分布于研究区的北部和东北部, 呈半环状包围灰色砂岩, 在剖面上呈舌状体插入灰色砂岩之中, 与层间氧化带的空间分布形态极为相似。

灰绿色砂岩具较致密的手标本特征, 呈不同色调的绿色(图 2(a)), 肉眼或放大镜下基本上看不到黄铁矿及炭屑(或有机质细脉), 局部可见泥砾有一很薄的氧化圈。但有时灰绿色砂岩中夹有碳酸盐含量很高的灰紫色钙质砂岩夹层, 其中可见遭受强烈氧化的炭化植物残屑(图 2(b))。灰绿色砂岩的宏观特征表明, 它在形成灰绿色颜色之前, 曾经遭受强烈的氧化作用。这种氧化的残留没有被完全绿色化是由于较强的碳酸盐化作用封闭包裹得以保存^[15]。

岩矿鉴定结果表明, 目标层灰绿色砂岩与灰色砂岩在矿物成分上并无明显差异, 只是灰绿色砂岩中绿泥石含量相对多一些, 为叶绿泥石和鳞绿泥石, 含量一般小于 1%。叶绿泥石多数为黑云母的蚀变产物, 而鳞绿泥石则为斜长石或片岩等蚀变的产物。但岩石中大部分的黑云母呈褐色、未遭受明显蚀变, 仅部分蚀变为绿色黑云母。岩石中还有一些绿帘石, 胶结物中有较多绿色水云母, 一般不含黄铁矿, 偶见少量黄铁矿大颗粒。部份灰绿色砂岩碳酸盐化较强, 局部见黑云母遭受强烈氧化(氧化残余), 并部份被碳酸盐交代(图 2(b))。此外, 灰绿色砂岩中一般钛铁矿保留很少, 多被锐钛矿晶簇取代。

3.1 灰绿色砂岩的矿物学特征

砂岩的全岩 X-射线定量分析结果列于表 1 中。灰绿色砂岩含钾长石较灰色砂岩明显高, 分别是 24.7% 和 16%; 而方解石和黄铁矿则明显低, 方解石的含量分别是 0.4% 和 5.6%, 黄铁矿的含量分别是 0.1% 和 1.1%; 二者的斜长石和石英的含量基本相当。灰色砂岩的粘土含量为 17.5%~35.4%, 平均值 25.6%; 灰绿色砂岩的粘土含量为 20.8%~37.4%, 平均值 28.2%, 灰绿色砂岩粘土含量要高于灰色砂岩。这些特征反映出灰绿色砂岩曾经历过较强的后生改造蚀变作用。而作为原生带的灰色砂岩, 无明显的后生改造现象, 所以粘土总量较低。灰色砂岩与灰绿色砂岩之间在粘土分成上的差异主要表现在高岭石和绿泥石的含量上, 二者的粘土矿物相对含量见表 2。灰色砂岩中高岭石含量较高, 平均值为 45.0%, 绿泥石含量较低, 平均值只有 3%; 而灰绿色砂岩高岭石平均

含量为 26%, 绿泥石平均含量值高达 20.75%。灰色砂岩与灰绿色砂岩蒙皂石和伊利石含量相当, 二者均不含混层矿物(表 2)。可见灰绿色砂岩中绿泥石含量高是砂岩呈绿色调的主要原因。

3.2 灰绿色砂岩粘土矿物扫描电镜研究

为进一步阐明灰绿色砂岩绿泥石的特征, 对其进行了扫描电子显微镜研究, 发现灰绿色砂岩与灰色砂岩的最大区别, 在于灰绿色砂岩碎屑颗粒表面覆盖有极薄的一层针叶状绿泥石(图 2(c), (d)), 这是岩石呈绿色的主要原因。此外, 灰绿色砂岩中也含有一些片状和绒球状绿泥石(图 2(d))及蒙皂石、高岭石。而灰色砂岩中仅见少量片状的绿泥石, 碎屑颗粒表面则为蜂巢状的蒙皂石, 粒间主要是蠕虫状的高岭石(图 2(e), (f))。扫描电子显微镜对粘土矿物的成分定量能谱分析结果列于表 3 中。分析结果表明, 灰绿色砂岩中的蒙脱石较灰色砂岩中的蒙脱石具有较高的铁和镁的含量, 说明灰绿色砂岩蚀变相对处于较碱性的环境。灰色砂岩中的蒙脱石更接近高岭石, 并大部分转为高岭石, 其主要是长石水解的产物。灰绿色砂岩中绿泥石铁的含量高于镁, 属于铁镁绿泥石。灰绿色砂岩特征的绿泥石化说明发生后期蚀变时处于较碱性的环境, 不同于灰色砂岩中以高岭石为主的酸性蚀变^[16]。

4 灰绿色砂岩的地球化学特征

4.1 主要元素地球化学特征

矿物学研究结果表明, 灰绿色砂岩与灰色砂岩相比, 其最大差别在于基本不含黄铁矿和炭屑。这一结论进一步由它们的岩石化学全分析结果所证实。如表 4 所示: 灰色砂岩硫含量平均值为 0.75%; 而灰绿色砂岩硫含量平均值为 0.04%, 确实反映出绝大多数灰绿色砂岩基本不含黄铁矿。其次有机质含量也有差异, 灰色砂岩有机碳含量平均值为 0.68%; 而灰绿色砂岩有机碳含量平均值仅为 0.11%。由于取样时未取含大量有机质脉的灰色砂岩样品进行分析, 所以灰色砂岩的有机碳含量平均值明显偏低, 实际还要高。尽管如此, 同样反映出灰绿色砂岩有机碳含量较低, 与宏观上见不到炭化植物碎屑或有机质细脉是一致的。灰绿色砂岩的 FeO 含量平均值为 2.36%, Fe₂O₃ 含量平均值为 0.91%, Fe₂O₃/FeO 比值平均值为 0.41。灰色砂岩 FeO 含量平均值为 3.02%, Fe₂O₃ 含量

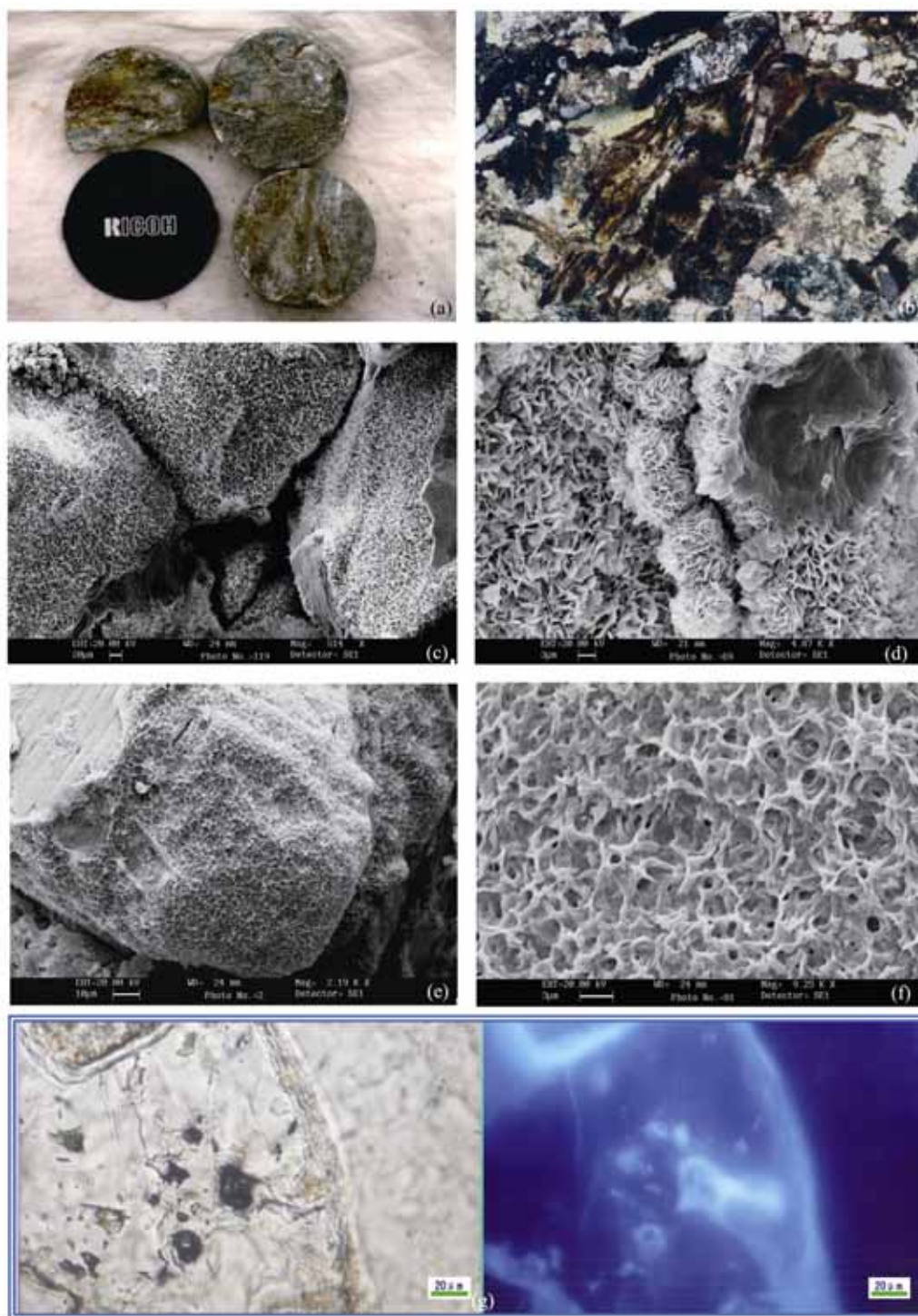


图 2 目标层砂岩宏观和微观特征

(a) 钻孔岩芯中灰绿色岩屑长石砂岩及其中氧化残留物; (b) 灰绿色砂岩层中灰紫色钙质砂岩强烈氧化的黑云母残留(+) $\times 120$; (c) 灰绿色岩屑长石砂岩碎屑颗粒表面覆盖极薄的一层针叶状绿泥石, 扫描电镜照片; (d) 灰绿色岩屑长石砂岩碎屑颗粒表面的针叶状绿泥石和绒球状绿泥石, 扫描电镜照片; (e) 灰色岩屑长石砂岩碎屑颗粒表面覆盖极薄的一层蜂巢状的蒙皂石, 扫描电镜照片; (f) 灰色岩屑长石砂岩碎屑颗粒表面的蜂巢状蒙皂石, 扫描电镜照片; (g) 直罗组晚期亮晶方解石中呈灰色、无色-灰色、显示浅蓝色荧光的气烃、气液烃包裹体(左为单偏光、右为 UV 激发荧光照片)

表 1 东胜铀矿床全岩 X-射线衍射定量分析结果表^{a)}

样号	岩性	矿物种类和含量(%)					
		石英	钾长石	斜长石	方解石	黄铁矿	粘土
DS-104	浅灰色中粗粒岩屑长石砂岩	40.6	18.8	12.3	5.6	0.7	22.0
DS-127	浅灰色中粒岩屑长石砂岩	36.5	13.0	12.9	0.9	1.3	35.4
DS-168	浅灰色粗粒岩屑长石砂岩	42.7	12.4	16.0	5.2	0.9	22.8
DS-172	浅灰色粗粒岩屑长石砂岩	38.7	20.0	13.4	1.1	/	26.8
DS-174	浅灰色粗粒岩屑长石砂岩	43.3	20.0	9.7	0.4	0.8	25.8
DS-182	浅灰色粗粒岩屑长石砂岩	33.6	14.5	14.3	8.1	0.5	29.0
DS-183	浅灰色粗粒岩屑长石砂岩	29.6	13.0	17.9	18.2	3.8	17.5
平均	浅灰色中-粗粒岩屑长石砂岩	37.9	16.0	13.8	5.6	1.1	25.6
DS-123	灰绿色中粒岩屑长石砂岩	46.2	19.0	13.0	0.6	0.4	20.8
DS-129	灰绿色中粒岩屑长石砂岩	23.7	38.8	9.9	0.7	/	26.9
DS-166	灰绿色中粗粒岩屑长石砂岩	28.6	21.8	13.4	/	/	36.2
DS-169	灰绿色粗粒岩屑长石砂岩	30.4	22.7	9.5	/	/	37.4
DS-181	灰绿色粗粒岩屑长石砂岩	42.3	21.9	13.4	/	/	22.4
DS-186	灰绿色中粗粒岩屑长石砂岩	33.2	33.0	12.2	/	/	21.6
DS-187	灰绿色粗粒岩屑长石砂岩	36.2	15.8	14.9	1.3	/	31.8
平均	灰绿色中-粗粒岩屑长石砂岩	34.4	24.7	12.3	0.4	0.1	28.2

a) 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心分析。/为未检测

表 2 东胜铀矿床粘土样品 X-射线衍射分析结果表^{a)}

样号	岩性	粘土矿物相对含量(%)				混层比(%)			
		S	I/S	I	K	C	C/S	I/S	C/S
DS-109	浅灰色中粒岩屑长石砂岩	41	/	2	54	3	/	/	/
DH-220	浅灰色中粒岩屑长石砂岩	58	/	3	36	3	/	/	/
平均	浅灰色中粒岩屑长石砂岩	49.5		2.5	45	3	/	/	/
DH-247	淡灰绿色中粒岩屑长石砂岩	58	/	2	24	16	/	/	/
DS-108	灰绿色中粒岩屑长石砂岩	63	/	5	27	5	/	/	/
DS-123	灰绿色中粒岩屑长石砂岩	44	/	2	30	24	/	/	/
DS-129	灰绿色中粒岩屑长石砂岩	37	/	2	23	38	/	/	/
平均	灰绿色中粒岩屑长石砂岩	50.5	/	2.75	26	20.75			

a) 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心分析。S 示蒙皂石; I 示伊利石; K 示高岭石; C 示绿泥石。/为未检测

表 3 东胜铀矿床粘土矿物扫描电镜能谱分析结果表^{a)}(%)

岩性	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	总量
灰色中-粗粒岩屑长石砂岩	蒙脱石	57.46	0.17	19.28	2.18	3.76	2.27	0.28	1.19	86.77
	蒙脱石	57.56	0.00	21.17	1.17	4.76	1.70	0.10	1.49	87.94
	蒙脱石	56.65	0.10	20.58	1.78	4.94	1.58	0.28	1.94	87.87
	蒙脱石	58.28	0.24	21.64	0.79	5.08	1.21	0.48	2.30	90.02
	蒙脱石	57.25	0.21	21.16	0.71	4.39	1.18	0.28	2.54	87.73
	蒙脱石	58.01	0.20	20.36	1.10	4.26	1.32	1.91	1.50	88.65
	平均	57.5	0.2	20.7	1.3	4.5	1.5	0.6	1.8	88.2
	高岭石	49.49	0.05	36.03	0.24	0.75	0.27	0.15	0.37	87.35
	高岭石	48.18	0.07	37.90	0.12	0.39	0.09	0.06	0.17	86.97
	高岭石	47.54	0.05	35.55	0.21	0.52	0.11	0.07	0.35	84.40
	平均	48.4	0.1	36.5	0.2	0.6	0.2	0.1	0.3	86.2
	绿泥石	30.32	0.11	21.02	22.84	11.77	0.31	0.16	0.92	87.58
灰绿色中-粗粒岩屑长石砂岩	绿泥石	32.75	0.10	20.05	22.92	10.40	0.42	0.14	0.91	87.77
	绿泥石	31.42	0.10	21.94	20.12	11.67	0.24	0.14	0.90	86.54
	绿泥石	36.05	0.10	21.61	18.22	10.58	0.37	0.13	0.98	88.04
	平均	32.6	0.1	21.2	21.0	11.1	0.3	0.1	0.9	87.5
	蒙脱石	53.68	0.27	21.16	2.81	4.61	1.22	0.52	1.70	85.98

a) 中国石油勘探开发研究院石油地质实验研究中心分析

表 4 东胜铀矿床砂岩岩石化学全分析结果^{a)}(%)

元素	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O ⁺	CO ₂	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	S	Fe ₂ O ₃ / FeO	总量
平均值(6) ^{b)}	68.16	11.51	0.91	2.36	1.33	3.96	1.91	3.14	2.68	2.83	0.55	0.08	0.10	0.04	0.41	99.55
平均值(6) ^{c)}	70.92	12.06	0.36	3.02	1.12	1.64	2.09	3.32	2.38	1.02	0.46	0.14	0.05	0.75	0.12	99.33

a) 数据由核工业北京地质研究院化学分析方法分析; b) 灰绿色中-粗粒岩屑长石砂岩; c) 灰色中-粗粒岩屑长石砂岩(括号中数据为统计样品数)

表 5 东胜铀矿床微量元素的不同分带统计^{a)}($\times 10^{-6}$)

元素	Th	U	Mo	Se	Pb	Y	Sn	V	Sc	Zr	Nb	Th/U
平均值(10) ^{b)}	6.02	3.38	3.43	1.63	18.39	21.41	1.92	58.78	8.19	193.65	13.35	1.78
平均值(5) ^{c)}	4.46	14.33	25.21	0.89	18.38	7.40	2.26	71.56	6.12	151.60	9.62	0.31

a) 数据由核工业北京地质研究院等离子体质谱方法分析, 相对误差小于 5%; b) 灰绿色中-粗粒岩屑长石砂岩; c) 灰色中-粗粒岩屑长石砂岩(括号中数据为统计样品数)

平均值为 0.36%, Fe₂O₃/FeO 比值平均值为 0.12. 总体来说, 灰绿色砂岩与灰色砂岩之间全铁的含量差别不大, 灰绿色砂岩的 Fe₂O₃/FeO 比值略高于灰色砂岩(表 4). 灰绿色砂岩具有较低的硫和有机质含量及略高的 Fe₂O₃/FeO 比值均说明其在成为绿色之前曾遭受较强的氧化作用.

4.2 微量元素地球化学特征

表 5 列出了灰绿色和灰色岩屑长石砂岩的放射性元素铀、钍和砂岩型铀矿化中常伴生的钼、硒、钒及铅、铋、锡、钨、锆和铀等元素的分析结果. 数据表明, 灰绿色砂岩中铀的含量较灰色砂岩明显偏低, 前者铀含量平均值为 3.38×10^{-6} , 而后者为 14.33×10^{-6} , 二者钍含量变化不大, 因此, 它们的钍/铀比值是前者大, 平均值为 1.78, 后者小为 0.31. 灰绿色砂岩中铀、钍含量及钍/铀比值说明其中铀有明显的迁出, 这也说明灰绿色砂岩曾遭受了较强的氧化作用. 这一过程也被灰绿色砂岩中钼和钒的含量所证实. 钼和钒在氧化作用过程中常和铀共迁移, 并在还原环境中沉淀富集^[17]. 从表 5 中数据还可得知, 灰绿色砂岩较灰色砂岩具有较高的钼、锆和铀等元素的含量, 这些偏碱性的元素富集却是与灰绿色砂岩绿色(绿泥石化)过程中, 由于碱性流体带入所致^[15]. 灰绿色砂岩微量元素地球化学特征也表明其在较早的时候经历了偏酸性的氧化作用, 而后又经历了偏碱性的绿泥石化蚀变作用.

5 灰绿色砂岩成因和找矿意义

5.1 灰绿色砂岩成因

岩石学、矿物学和地球化学的研究结果均表明:

灰绿色砂岩经历了早期氧化作用和晚期再还原作用.

灰绿色砂岩早期氧化作用之证据:

(1) 灰绿色砂岩在平面上总体分布于研究区的北部和东北部, 呈半环状包围灰色砂岩, 在剖面上呈舌状体插入灰色砂岩之中, 与层间氧化带的空间分布形态相似.

(2) 灰绿色砂岩中的泥砾具有一薄层氧化边, 其中的钙质夹层中由于钙质杂基全被碳酸盐交代, 岩石的渗透性极低, 保存有早期的氧化矿物和植物碎屑残迹.

(3) 矿物上和灰色砂岩相比基本不含黄铁矿, 有机质脉小, 但粘土矿物含量高, 钛铁矿也基本上被氧化.

(4) 地球化学上具有较低的硫和有机碳含量, 略高的 Fe₂O₃/FeO 比值, 这与矿物研究结果相一致; 矿化元素铀和伴生元素钼、钒等明显迁出, 含量较低.

晚期再还原作用导致砂岩由氧化色(黄色调)转化成现今所看到的还原色(灰色调). 晚期还原作用的性质为潜育化作用, 即非硫化氢的还原作用, 尽管高价铁被还原成低价铁, 但不形成黄铁矿, 所以硫含量低. 研究表明, 灰绿色砂岩绿色的主要原因是其碎屑颗粒表面覆盖有极薄的一层针叶状绿泥石. 这种绿泥石化的还原蚀变作用与晚期的油气作用有着密切的关系. 首先, 宏观上, 油气不仅在灰绿色砂岩中, 而且在研究区出露的其它地层(如白垩纪地层)中均发现有油苗和相关的油气漂白蚀变作用, 事实上, 研究区是鄂尔多斯盆地油气的逸散区^[18]; 微观上, 在砂岩中也发现大量的油气包裹体, 从酸解烃样品的分析结果来看, 岩石的烃含量较高, 其中以甲烷、乙烷、丙烷、乙烯和丙烯为主(表 6). 岩石烃含量与

表 6 目标层岩石中烃含量^{a)}

样号	岩性	分析结果/ $\mu\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$								
		甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	乙烯	丙烯
TW-102	灰绿色细砂岩	573.7	81.5	24.1	1.1	7.8	2.0	3.6	52.0	36.1
TO2-07	灰绿色细砂岩	316.8	40.7	14.2	0.8	4.0	1.7	11.2	26.8	16.4
TW-107	灰色细砂岩	402.4	44.1	14.7	0.9	4.7	0.8	3.9	32.4	20.1
TO2-09	灰色细砂岩	339.2	53.2	25.3	1.6	6.7	2.3	13.2	43.2	30.3
TO2-14	灰色细砂岩	23.9	3.3	1.2	0.1	0.4	1.0	3.5	2.1	1.3
TW-108	绿色中细砂岩	831.9	102.3	20.7	1.2	9.0	2.0	3.5	61.8	9.9
TW-109	绿色中细砂岩	409.1	60.4	26.4	1.4	8.2	2.2	3.6	36.4	21.7
TW-104	灰色中细砂岩	435.0	58.6	17.8	1.1	5.8	1.4	8.2	44.1	30.3
TW-003	灰色中细砂岩	236.9	35.7	16.7	0.9	5.3	1.3	3.1	21.7	14.0
TO2-04	灰色中细砂岩	102.0	14.3	4.9	0.4	1.5	1.1	2.3	8.5	5.3

a) 中国石油勘探开发研究院分析

表 7 东胜矿区直罗组砂岩方解石胶结物碳、氧同位素测试结果^{a)}

样品编号	层位	样品名称	岩性	$\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{V-SMOW}}/\text{‰}$
B19-56-3	J ₂ Z ₁	方解石	灰绿色砂岩	-6.9	-12.3	+18.2
B19-64-3	J ₂ Z ₁	方解石	灰绿色砂岩	-12.8	-13.8	+16.7
B19-64-5	J ₂ Z ₁	方解石	灰绿色砂岩	-18.2	-12	+18.5
B19-64-9	J ₂ Z ₁	方解石	灰绿色砂岩	-31.0	-9.9	+20.7
B19-80-1	J ₂ Z ₁	方解石	灰绿色砂岩	-23.9	-10.2	+20.3

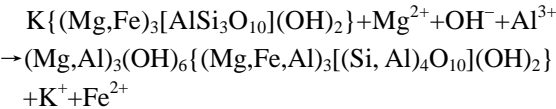
a) 中国地质科学院矿产资源研究所实验室分析, 误差±0.2‰

岩性有一定关系, 以钙质砂岩含量为最高, 其次为中细粒砂岩, 而粗砂岩和中粗粒砂岩最低, 这进一步证明油气作用的存在^[19]. 其次, 由于油气的作用在灰绿色砂岩中产生了较强的碳酸盐化, 并在碳酸盐方解石中发现了较多的油气包裹体(图 2(g)), 它们是油气作用的直接显示^[20,21].

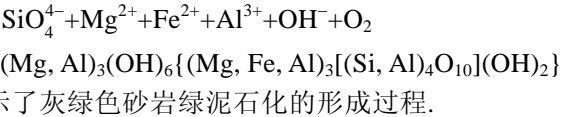
对灰绿色砂岩中的碳酸盐胶结物进行了分离提纯和测定了其中的碳、氧同位素组成(见表 7). 表 7 中碳同位素结果表明, 有机油气成因碳的确参与了碳酸盐胶结物的形成, 而氧同位素组成说明形成碳酸盐的流体主要为大气降水、卤水性质^[22].

此外, 对目标层中黑色有机质碳同位素组成进行了分析, 其 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-26.1‰ ~ -23.9‰, 介于下部延长组地层原油(-32.7‰ ~ -29.9‰)、油页岩、泥岩(-28‰ ~ -30‰)与延安组煤样(-22.4‰ ~ -24.5‰)之间^[23]. 这种有机碳同位素特征表明, 研究区目标层砂岩层中的黑色有机质脉体具有煤成气及油气混合来源, 这也表明在砂岩形成后发生了强烈的油气作用. 研究表明鄂尔多斯盆地北部也存在良好的油气圈闭存在条件^[24-26].

油气流体总体偏碱性, 具有很强的还原作用, 高价铁被还原成低价铁^[7,8]. 在这种还原和偏碱性的流体条件下, 黑云母产生绿泥石化^[16], 反应过程是



同时, 流体中的硅、镁、铁、铝等也会形成绿泥石, 并沉淀附着在矿物颗粒表面, 反应过程是



5.2 灰绿色砂岩对铀矿化的指示意义

众所周知, 灰绿色砂岩指示的是还原地球化学环境. 如没有真正认识它的成因则很容易把它当做未氧化过的层位, 这对铀矿的勘查产生适得其反的工程部署影响, 从而越是揭露越是远离矿化带, 达不到发现矿床的目的. 相反, 认识到它是古氧化作用再还原的产物, 则能透过现象看到本质, 在鄂尔多斯盆地北部灰绿色砂岩指示的是较强的古氧化作用, 即发生了较强的层间氧化铀成矿作用, 这就是为什么东胜铀矿化受灰绿色砂岩和灰色砂岩之间的过渡部位控制. 这一规律认识对鄂尔多斯盆地北部砂岩铀矿化的扩大产生重大指导作用, 对勘查同类矿床, 特别是在富产油气、煤的盆地中寻找类似砂岩型铀矿具有重要的实际指导意义.

致谢 本文在研究过程中,核工业地质局陈跃辉副局长、张金带总工程师、简晓飞处长给予大力支持,得到了赵风民、黄世杰、黄净白、胡绍康、陈祖伊等专家热情的帮助,核工业 208 大队彭云彪、苗爱生、杨建新、刘雄等在野外工作过程中给予了大力协助,在此一并致以衷心感谢。

参 考 文 献

- 1 王正邦. 国外地浸砂岩型铀矿地质发展现状与展望. 铀矿地质, 2002, 18(1): 9—21
- 2 Crawly R A. Sandstone Uranium Deposits in the United States: A Review of the History, Distribution, Genesis, Mining Areas and Outlook. U.S. Department of energy Assistant Secretary for Nuclear Energy Grand Junction Area Office, Colorado, Match, 1983
- 3 Finch W I. Uranium Provinces of North America—Their Definition, Distribution, and Models. U S Geol Surv Bull, 1996, 2141: 18
- 4 黄世杰. 层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件和判据. 铀矿地质, 1994, 10(1): 6—13
- 5 李胜祥, 陈戴生, 王瑞英, 等. 伊犁盆地含煤系地层沉积相特征及其与层间氧化带砂岩型铀矿成矿关系. 铀矿地质, 1996, 12(3): 129—134
- 6 Li Z Y, Chen A P, Fang X H, et al. Metallogenetic conditions and Exploration Criteria of Dongsheng Sandstone type uranium deposit in Inner Mongolia, China. In: Mao J W, Bierlein F B, ed. Mineral Deposit Research. Springer, 2005. 291—294
- 7 Adams S S, Smith R B. Geology And Recognition Criteria for Sandstone Uranium Deposits in Mixed Fluvial-shallow Marine Sedimentary Sequences, South Texas. U.S. Department of Energy, Grand Junction Office, Colorado, USA, 1981
- 8 Goldhaber M B, Reynolds R L, Rye R O. Origin of a South Texas Roll-Type Uranium Deposit: II. Sulfide Petrology and Sulfur Isotope Studies. Econ Geol, 1978, (73): 1690—1705
- 9 何自新, 著. 鄂尔多斯盆地演化与油气. 北京: 石油工业出版社, 2003
- 10 张抗. 鄂尔多斯断块构造和资源. 西安: 陕西科学技术出版社, 1989
- 11 内蒙古自治区地矿局. 内蒙古自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1991
- 12 李思田, 程守田, 杨士恭, 等. 鄂尔多斯盆地东北部层序地层及沉积体系分析. 北京: 地质出版社, 1992
- 13 焦养泉, 陈安平, 杨琴, 等. 砂体非均质性是铀成矿的关键因素之一——鄂尔多斯盆地东北部铀成矿规律探讨. 铀矿地质, 2005, 21(1): 8—16
- 14 Sun Y, Li Z Y. Study on the relationship between coal-derived hydrocarbon and formation of sandstone-type uranium deposits in the basins of North China. In: Mao J W, Bierlein F B, ed. Mineral Deposit Research, Springer, 2005. 315—316
- 15 欧光习, 杜乐天, 张剑峰, 等. 北方砂岩型铀矿中的油气渗漏及其与铀成矿的关系. 见: 第二届中国地球物理年会论文集. 西安: 西安地图出版社, 2004. 21—26
- 16 黄志章, 李秀珍, 蔡根庆, 著. 热液铀矿床蚀变场及蚀变类型. 北京: 原子能出版社, 1999. 34—37
- 17 Li Z Y, Dong W M, Guo Q Y. Metallogenetic features and perspective evaluation of sandstone-type uranium mineralization in Hailaer Basin, NE China. In “Recent developments in uranium resources and production with emphasis on in situ leach mining” IAEA-TECDOC-1396, IAEA, 2004. 91—100
- 18 张金山. 试论鄂尔多斯盆地印支、燕山运动及其油气的关系. 石油地质文集——构造(2). 北京: 地质出版社, 1981. 90—95
- 19 Karlsen D A, Nedkvitne T, Larter S R, et al. Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: application to elucidation of petroleum reservoir filling history. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1993, 57: 3641—3659
- 20 卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 等. 流体包裹体. 北京: 科学出版社, 2004
- 21 施继锡, 李本超, 傅家谟, 等. 有机包裹体及其与油气的关系. 中国科学, B 辑, 1987, (3): 318—325
- 22 郑永飞, 陈江峰, 编著. 稳定同位素地球化学. 北京: 科学出版社, 2000
- 23 肖新建, 李子颖, 陈安平. 东胜地区砂岩型铀矿床后生蚀变矿物分带特征初步研究. 铀矿地质, 2004, 20(3): 136—140
- 24 孙晔, 李子颖, 肖新建. 油气圈闭与鄂尔多斯盆地北部铀成矿关系的探讨. 铀矿地质, 2004, (6): 337—343
- 25 王凤国. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区油气化探特征及含油气远景评价. 物探与化探, 2003, 27(2): 104—114
- 26 袁志祥. 鄂北塔巴庙、杭锦旗地区古生界天然气勘探前景分析. 天然气工业, 2001, (增刊): 5—9