

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.05.003

平庄盆地黑水地区氧化作用与铀成矿地质特征

董方升¹, 彭虎^{1,2*}, 张成勇³, 王生文¹, 张松¹, 安永海¹

DONG Fangsheng¹, PENG Hu^{1,2*}, ZHANG Chengyong³, WANG Shengwen¹, ZHANG Song¹, AN Yonghai¹

1. 辽宁省地矿集团能源地质有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000;

2. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074;

3. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330013

1. *Liaoning Province Geology and Minerals Group Energy Geology Co., Ltd., Shengyang 110000, Liaoning, China;*

2. *China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;*

3. *Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China*

摘要:黑水地区位于平庄盆地北部,砂岩型铀矿找矿目的层为白垩系孙家湾组,目前在盆缘发现了较好的氧化带和工业铀矿化线索,但成矿作用方式和类型并不清楚,困扰着下一步勘查方向的选择。为深入研究目的层氧化作用和铀成矿地质特征,通过系统采集样品,进行镜下鉴定、主量元素、环境地球化学指标、粘土矿物、电子探针、扫描电镜等分析。研究结果表明,黑水地区含矿目的层砂岩成熟度较低,为近物源沉积;后生氧化作用较强且存在明显的蚀变分带现象;目的层还原剂主要为黄铁矿,铀的富集方式主要为含铀含氧水不断渗入砂体,在层间氧化带前缘氧化还原过渡带富集成矿,铀矿物类型主要为沥青铀矿,其次为铀石,主要有 2 种赋存形式。对铀成矿地质特征进行探讨,认为该地区符合层间氧化带型砂岩型铀矿成矿模式,具有较大的成矿潜力。

关键词:砂岩型铀矿;氧化作用特征;铀矿化特征;铀成矿地质特征;平庄盆地;黑水地区

中图分类号:P619.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)05-0687-13

Dong F S, Peng H, Zhang C Y, Wang S W, Zhang S, An Y H. Oxidation and geological characteristics of uranium mineralization in Heishui area, Pingzhuang Basin. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(5): 687-699

Abstract: The Heishui area lies in the northern Pingzhuang Basin, where the Cretaceous Sunjiawan Formation is targeted for uranium exploration. Better oxidized zones and industrial uranium mineralization have been observed on the margins of the basin in recent years. However, the choice of the next exploration direction puzzles us because the pattern and type of mineralization are still unclear. To improve our understanding of the oxidation of aim stratum and geological characteristics of uranium mineralization, we conducted an integrated analysis of samples collected in study area, including microscopic identification, major element, environmental geochemical indicators, clay minerals, EPMA, and SEM in this study. The results show that the maturity of sandstone of ore bearing aim stratum is low, indicating a proximal provenance. There is strong post-growth oxidation and significant alteration zoning. Furthermore, the target layer reductant is dominated by pyrite. The uranium enrichment pattern is that uranium-oxygenated water continuously infiltrates the sand body. Enrichment and mineralization occurred in the oxidation-reduction transition zone of the frontal interlayer oxidation zone. Pitchblende, followed by coffinite, is the predominant uranium mineral type. The geological characteristics of the uranium

收稿日期:2021-08-25;修订日期:2021-11-13

资助项目:辽宁省省级基金项目《辽宁铁法-昌图盆地砂岩型铀矿地质调查》(编号:JH20-210000-05760)、《辽西北地浸砂岩型铀矿成矿地质条件研究》(编号:JH20-210000-05760)

作者简介:董方升(1990-),男,工程师,从事区域地质与矿产调查工作。E-mail:dfsh0536@163.com

*通信作者:彭虎(1988-),男,在读博士生,工程师,从事区域地质与矿产调查工作。E-mail:184444802@qq.com

mineralization in the study area are in accord with oxide zone-stratified sandstone-type uranium mineralization model, which has a high potential for mineralization.

Key words: sandstone-type uranium; oxidation characteristics; uranium mineralization characteristics; geological characteristics of uranium mineralization; Pingzhuang basin; Heishui area

砂岩型铀矿床是世界上最重要的铀矿类型之一,在全球铀矿资源中占有举足轻重的地位(黄世杰,1994;黄净白等,2007;Lehmann B,2008;苗培森等,2017;聂逢君等,2017)。砂岩型铀矿按形态和岩性、沉积相、矿床成因、流体迁移方式等因素有多种分类方式,其中多数学者将中国砂岩型铀矿床分为4个大类:层间氧化型、潜水氧化型、沉积成岩型和复合成因型(王果等,2000;陈戴生等,2003;张金带等,2010;刘武生等,2012;张金带,2012)。目前中国已探明的砂岩型铀矿主要分布在北方大型沉积盆地,如新疆伊犁盆地、吐哈盆地、准噶尔盆地、塔里木盆地西缘,内蒙古鄂尔多斯盆地北部、二连盆地、巴音戈壁盆地,东北松辽盆地等(张金带,2016)。平庄盆地紧邻松辽盆地,前人在平庄盆地西南部的古山、六家立井和北部黑水等地区发现了大量的铀异常信息,异常发育层位为白垩系阜新组和孙家湾组,铀源为燕山期—海西期酸性侵入岩,砂体成熟度较低,稳定性和连通性较好,后生氧化作用明显,还原剂主要为有机碳和黄铁矿,具有典型的层间氧化带砂岩型铀矿成矿特征(陈德兵等,2009;殷榕蔚等,2019;郑翠等,2020)。前人主要从铀源条件、沉积相等与铀矿化关系,对该区的成矿地质条件进行了基础分析,为该地区砂岩型铀矿的勘查奠定了基础。但该地区的工作程度依然很低,尤其是氧化流体作用特征、还原剂类型、铀的富集机理等成矿微观方面的控制因素研究薄弱,使该地区的铀矿勘查方向仍不明确。鉴于此,本文通过研究区施工的工业铀矿化孔,系统采集样品41件,进行镜下鉴定、主量元素、环境地化指标、粘土矿物、电子探针、扫描电镜等分析,研究目的层氧化作用特征、还原剂类型、铀矿物种类及赋存形式,并在此基础上,结合前人工作资料、宏观构造—沉积等方面的认识,深入探讨该地区砂岩型铀矿成矿地质特征,提出找矿思路和找矿建议,为平庄盆地砂岩型铀矿的勘查提供支持。

1 区域地质背景

平庄盆地位于内蒙古自治区东南部,其东北端

大部分坐落于辽宁省西部,行政区划属内蒙古赤峰市和辽宁省朝阳市,大地构造位置位于华北陆块北缘,北邻天山—兴蒙褶皱系(图1)。盆地北缘为赤峰—开原断层,其北部为天山—兴蒙褶皱区内蒙古中部褶皱系敖汉复向斜,南部属华北陆块北缘内蒙隆起带(即内蒙地轴)的喀喇沁断隆带(即建平台拱)(王宇林等,2007;赵博,2014)。平庄盆地为晚中生代断陷盆地,盆地东侧的北北东向美丽河—八里罕断裂和西侧的黑水—汐子断裂控制着中生代地层的发育(张亚明等,2002),平庄盆地面积2600 km²,其中沉积岩分布面积1350 km²,最厚达2016 m(田永庆等,2008)。平面上呈“厂”字形,在平庄以南为北北东向展布,北部黑水—马厂一线为东西向展布,盆地内部可划分为5个构造单元,包括上新井隆起、四楞子山隆起、建平隆起、马厂凹陷和平庄凹陷。盆地基底由前长城系、奥陶系、志留系、石炭系、二叠系等组成,盖层以中生代陆相湖盆沉积为主,自下而上依次充填了侏罗系蓝旗组及白垩系义县组、九佛堂组、阜新组和孙家湾组,地表见少量第四系覆盖。其中,白垩系阜新组和孙家湾组为该区主要的铀矿化层位。

2 地质特征

黑水地区位于平庄盆地北部平庄凹陷北部,紧邻上新井隆起。上新井隆起主要由燕山期花岗岩组成,U含量较高,为本区的主要铀源。研究区构造主要为断裂构造,其中东西向断裂6条、北东向断裂7条,断裂构造控制着地下水的补—径—排,进而控制着铀矿化作用的发生。2组断裂的交会处为地下水从径流向排泄的转换部位,也是铀成矿的有利部位。研究区东北部的336铀矿点,为层间氧化带型砂岩型铀矿点,铀矿化发育层位为白垩系孙家湾组。

研究区大部分被第四系黄土层覆盖,钻孔揭露,该区地层由老至新主要发育下白垩统义县组(K_{1y})、九佛堂组(K_{1jf})、上白垩统孙家湾组(K_{2s})和第四系(图2-a)。该地区的主要含矿目的层为孙

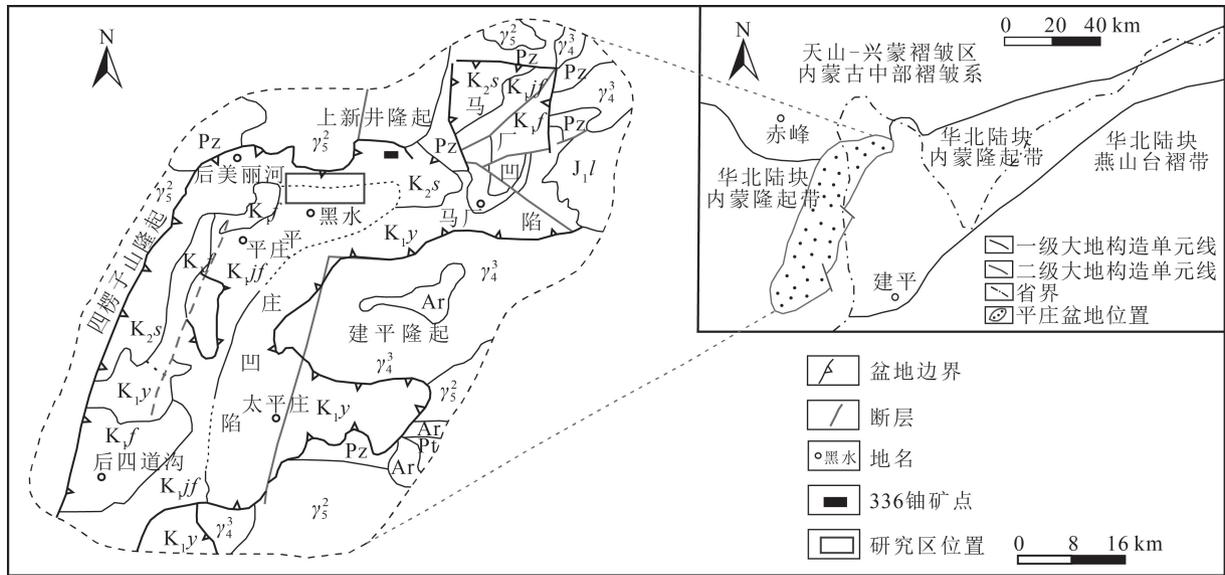


图 1 平庄盆地区域地质简图

Fig. 1 Simplified regional geological map of Pingzhuang Basin

K_{2s} —孙家湾组; K_{1f} —阜新组; K_{1jf} —九佛堂组; K_{1y} —义县组; J_1l —蓝旗组; Pz —古生界; Pt —元古宇;
 Ar —太古宇; γ_5^3 —燕山期花岗岩; γ_4^3 —海西期花岗岩

家湾组,其与下部的九佛堂组为平行不整合接触关系,其上为第四系覆盖。孙家湾组分为上、下 2 段,下段为灰色、灰绿色砂砾岩沉积建造,上段为红色、紫红色夹灰色杂色砂岩、含砾砂岩沉积建造,其中孙家湾组上段为该区主要的含铀矿目的层(席海银等,2010;赵忠华等,2010)。根据沉积和岩性组合,将孙家湾组上段划分为 3 个亚段,第一亚段为以泥石流、辫状河沉积为主体的旱地扇沉积,第二亚段为以辫状河、间湾沉积为主体的湿地扇沉积,第三亚段为以辫状河沉积为主体,有少量泥石流、洪泛细粒沉积的湿地扇沉积(图 2-b)。

本次钻孔发现的铀矿体位于孙家湾组上段第二、三亚段,矿体形态相对简单,平面上呈层状,剖面上呈透镜状、似层状(图 3)。孙家湾组第二、三亚段原生沉积为一套灰色或灰绿色细砾岩或含砾粗砂岩,受氧化流体改造后变为红褐色、浅红色、黄色、浅黄色等。

铀矿化赋存岩性为浅黄色—灰绿色含砾粗砂岩、粗砂岩、含砾中砂岩等,以长石石英砂岩、含砾砂岩为主,含少量泥岩、粉砂岩(图版 I-a~c)。镜下鉴定结果显示,该地区砂岩主要为长石石英砂岩,碎屑颗粒以长石石英、岩屑为主,含少量云母,

其中长石颗粒含量为 60%~75%,石英含量为 15%~30%,岩屑颗粒含量为 10%~15%。对碎屑颗粒粒径统计显示,粒径集中在 0.2~0.5 mm 和 0.5~2 mm 两个粒级范围,为中粒—中粗粒结构。碎屑颗粒分选性中等—差,磨圆度以次棱角—次圆状为主。填隙物为褐色粘土矿物和绢云母,含量约占 10%(图版 I-d~f)。镜下鉴定结果显示,黑水地区砂岩成分成熟度和结构成熟度较低,具近物源沉积的特点(张虎军等,2012;董方升等,2015)。

3 取样及测试

本次采集了黑水地区孙家湾组上段的 41 个样品,深度为 153.74~281.99 m。其中,主量元素分析样品 6 件,环境指标分析样品 22 件,粘土分析样品 6 件,电子探针和扫描电镜样品 7 件。岩矿鉴定、环境地化指标和粘土矿物分析均按照蚀变分带(氧化带、过渡带和还原带)采集,岩性为红褐色中粗砂岩、黄色中粗砂岩和灰色—灰绿色砂砾岩、中粗砂岩。主量元素、环境指标样和粘土矿物分析在辽宁省地质矿产研究院有限责任公司实验室完成,其中主量元素分析采用仪器为 PW2404 型 X 射线荧光光谱仪(XRF),入射光源为 CuK α 辐射,X 光管工

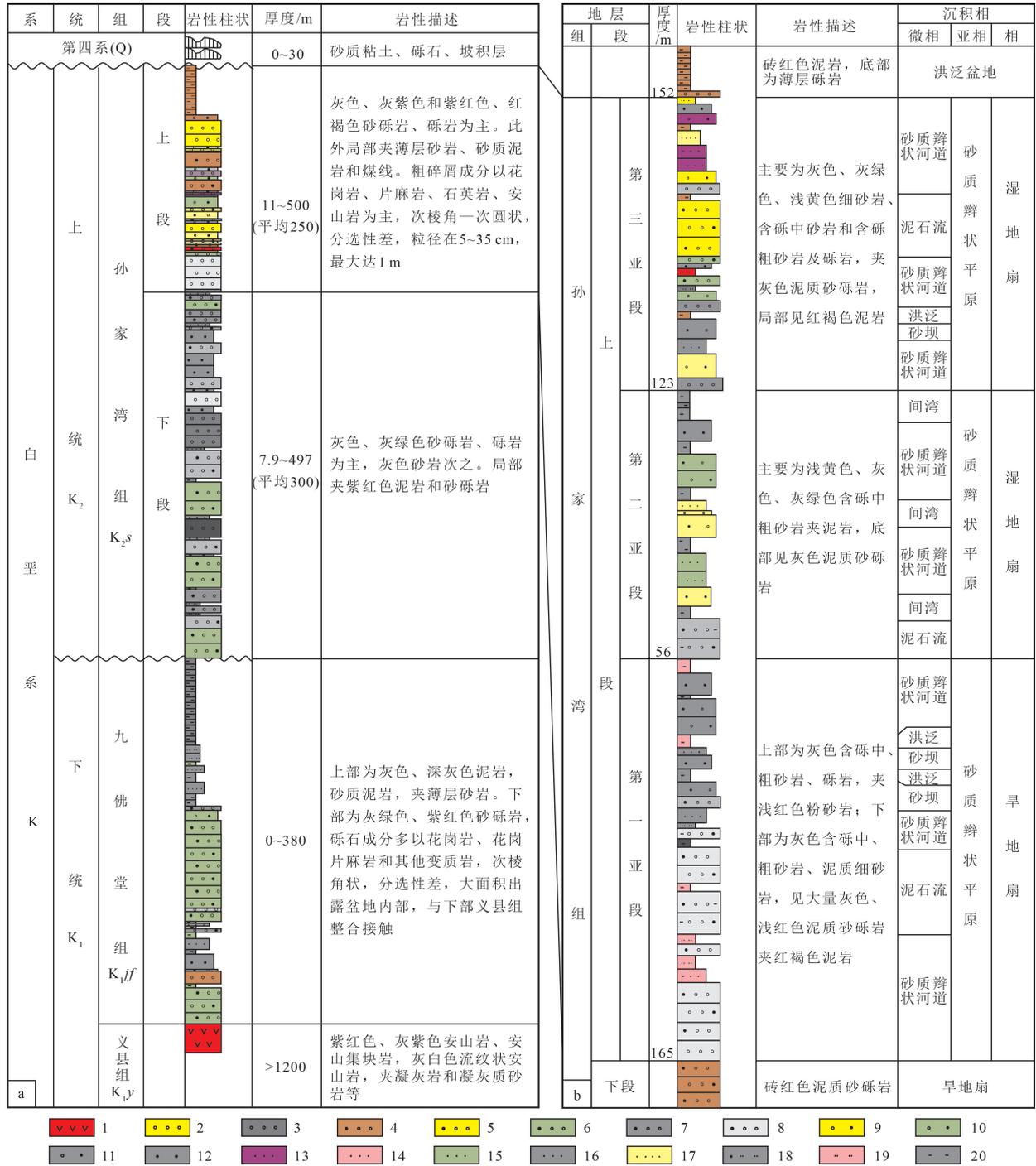


图2 黑水地区柱状图

Fig. 2 The histogram of Heishui area

a—黑水地区综合柱状图(白垩系部分); b—ZK05 钻孔柱状图(孙家湾组上段部分); 1—红色安山岩; 2—黄色砾岩; 3—灰色砾岩; 4—砖红色砂砾岩; 5—黄色砂砾岩; 6—灰绿色砂砾岩; 7—灰色砂砾岩; 8—灰白色砂砾岩; 9—黄色含砾粗砂岩; 10—灰绿色含砾粗砂岩; 11—灰色含砾粗砂岩; 12—灰色粗砂岩; 13—灰紫色中砂岩; 14—浅红色中砂岩; 15—灰绿色中砂岩; 16—灰色中砂岩; 17—浅黄色细砂岩; 18—灰色含砾粉砂岩; 19—浅红色粉砂岩; 20—灰色泥岩

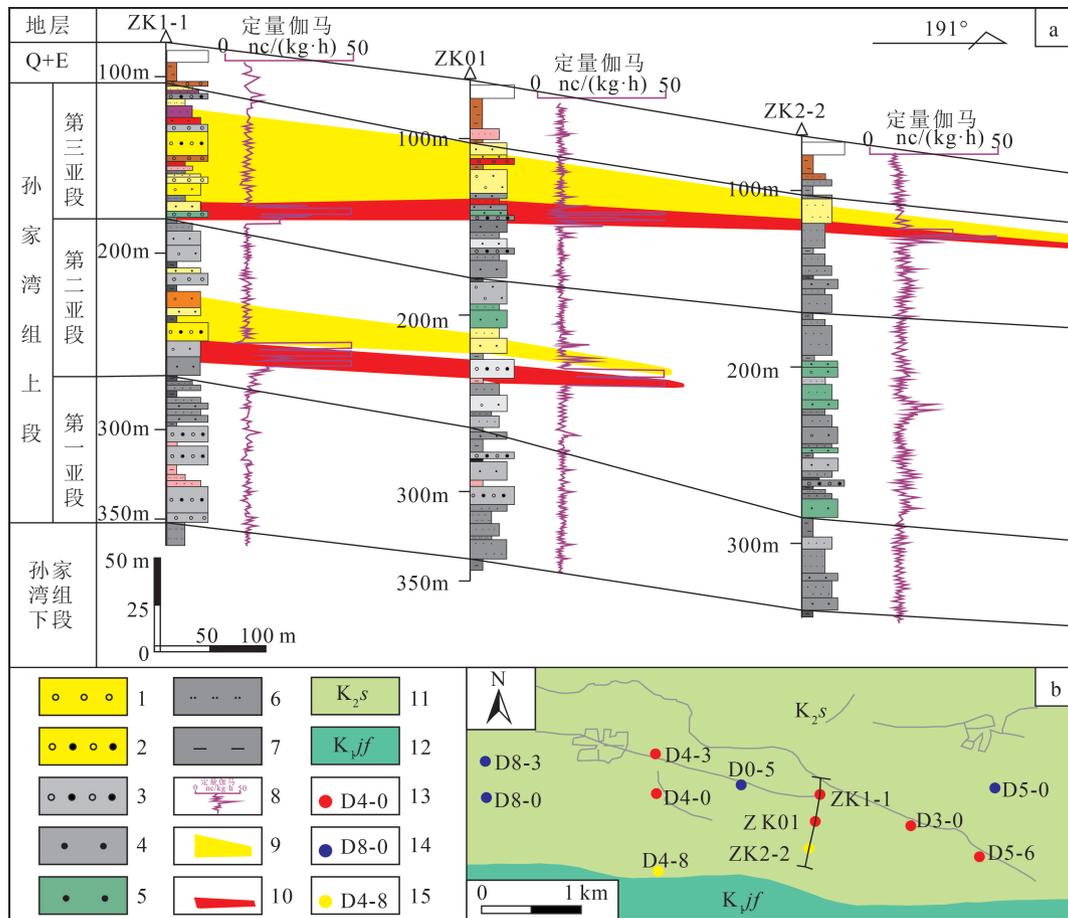


图 3 黑水地区近南北向钻孔剖面及平面位置图

Fig. 3 Map of near north-south borehole profile and planar position of Heishui area

a—近南北向钻孔剖面图;b—黑水地区平面简图;1—黄色砾岩;2—黄色砂砾岩;3—灰色砂砾岩;4—灰色砂岩;5—灰绿色砂岩;6—灰色粉砂岩;7—灰色泥岩;8—测井曲线;9—氧化砂体;10—铀矿体;11—孙家湾组;12—九佛堂组;13—工业孔;14—矿化孔;15—异常孔;Q+E—第四系+古近系

作电压为 40 kV, 电流为 100 mA; 环境指标样采用仪器为 iCAP-Q 电感耦合等离子体质谱仪、PW2404 型 X 射线荧光光谱仪、AFS9760 原子荧光光度计; 粘土矿物分析采用仪器为 D/max-rA X 射线衍射仪。电子探针和扫描电镜实验在东华理工大学核资源与环境国家重点实验室完成, 主要对采集的铀矿石开展分析, 采用仪器为 JXA-8100 电子探针和 Nova NanoSEM450 扫描电镜, 室内温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, 湿度小于 80%。

4 分析结果

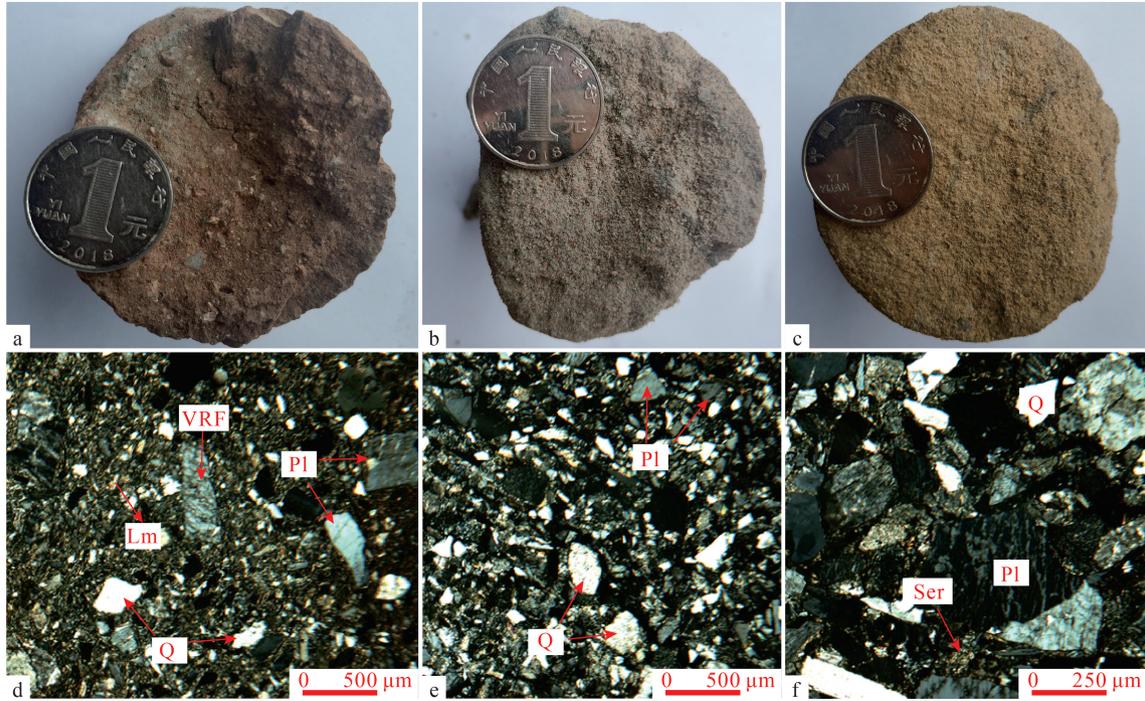
4.1 主量元素

对不同蚀变分带中主量元素含量的变化规律进行总结, 结合砂岩型铀矿在过渡带中富集的规

律, 对成矿期岩石地球化学变化特征及铀成矿作用的研究较重要。同时, 对主量元素之间相关性的分析, 可以研究沉积岩的物源性质和沉积作用的特征。

本次测试的砂岩主量元素结果见表 1。砂岩 SiO_2 含量变化范围较小 (72.17% ~ 74.05%), 平均为 73.18%。随着 SiO_2 含量升高, CaO (0.55% ~ 0.78%)、 Na_2O (2.19% ~ 3.33%) 含量逐渐升高, 呈正相关关系 (图 4-a, b), Al_2O_3 (11.22% ~ 12.96%)、 MgO (0.25% ~ 0.59%) 含量逐渐下降, 呈负相关关系 (图 4-c, d), 其余主量元素, 如 TiO_2 (0.18% ~ 0.30%)、 K_2O (0.30% ~ 0.61%)、 P_2O_5 (0.06% ~ 0.09%)、 Fe_2O_3 (1.67% ~ 2.20%)、 MnO (0.03% ~ 0.06%) 与 SiO_2 含量无明显相关关系。砂岩中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 值

图版 I Plate I



a.红褐色含砾中砂岩标本照片;b.灰色粗砂岩标本照片;c.黄色中砂岩标本照片;d.红褐色含砾中砂岩镜下照片;e.灰色粗砂岩镜下照片;f.黄色中砂岩镜下照片。Q—石英;Pl—斜长石;VRF—岩屑;Ser—绢云母;Lm—褐铁矿化

为 5.57~6.56, 平均 5.97, 反映了低的成分成熟度, 各样品的 Na_2O 和 K_2O 含量均较高, 说明围岩中长石含量较高, 同样证明岩石成分成熟度较低。另外, 对比发现 Fe_2O_3 与 MgO 、 TiO_2 含量呈正相关关系(图 4-e、f), 表明物源区大量存在岩浆岩, 且从源区到沉积区的搬运距离不远。砂岩的岩石化学蚀变指数 ($\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})] \times 100$) 为 57~64, 平均 61, 指示该地区属于温暖干燥气候条件下的中等风化(胡俊杰等, 2019)。

4.2 环境地球化学特征

本次样品的环境地球化学分析结果见表 2。环境地球化学指标参数在不同分带中差别较明显, 整体表现出较好的分带性(图 5)。

TOC 在原生还原带内的变化范围为 0.01%~0.22%, 平均 0.08%; 过渡带内为 0.02%~0.13%, 平均 0.06%; 氧化带内为 0.01%~0.09%, 平均 0.04%; 整体表现出氧化带-过渡带-还原带依次增高的规律。

表 1 平庄盆地黑水地区氧化还原分带主量元素含量

Table 1 Statistical table of constant elements content in redox zoning of Heishui area, Pingzhuang Basin

样品编号	SiO_2	Al_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	Fe_2O_3	MnO	烧失量	CIA	氧化还原分带
01C1	74.05	11.86	0.25	0.78	0.44	4.30	2.98	0.07	1.81	0.04	2.71	60	氧化带
01C2	72.71	12.76	0.30	0.55	0.59	4.44	2.58	0.08	2.20	0.03	3.14	63	
01C3	72.17	12.96	0.29	0.57	0.51	4.61	2.19	0.09	1.99	0.05	3.21	64	过渡带
01C4	72.82	12.35	0.30	0.60	0.41	4.53	3.32	0.08	2.07	0.05	3.45	59	
01C5	73.65	11.22	0.18	0.73	0.25	4.51	3.33	0.06	1.67	0.06	3.68	57	还原带
01C6	73.67	12.55	0.26	0.67	0.48	4.55	2.76	0.07	1.75	0.04	3.02	61	

注:测试单位为辽宁省地质矿产研究院有限责任公司实验室, CIA 为岩石化学蚀变指数

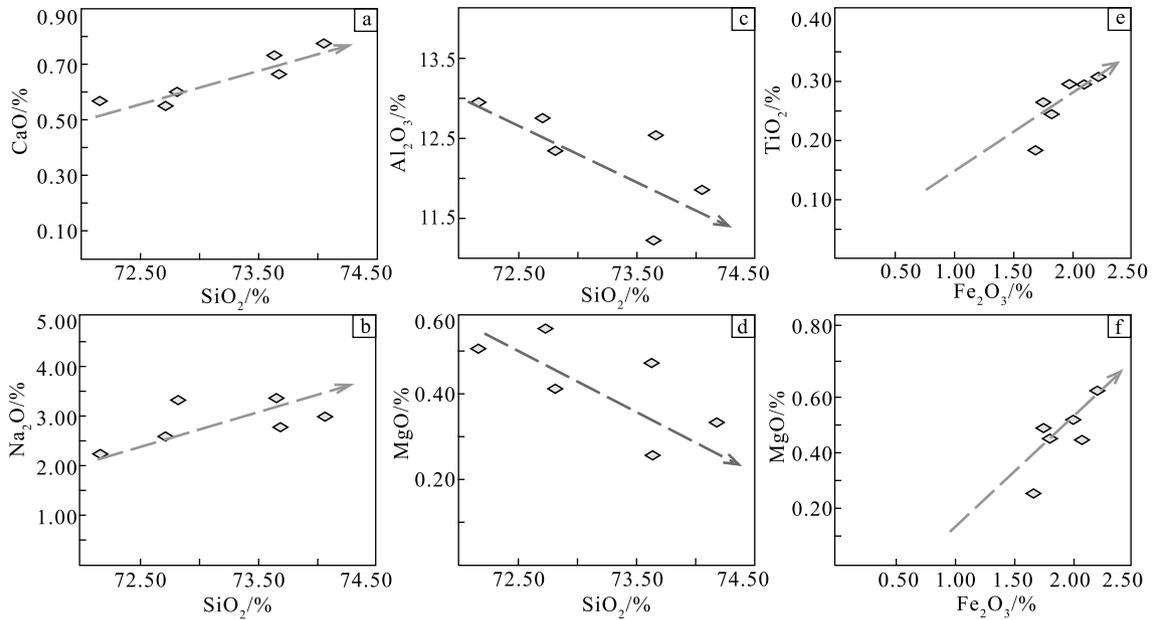


图 4 平庄盆地黑水地区砂岩常量元素 Harker 图解

Fig. 4 Harker diagrams of constant elements content in sandstone of Heishui area, Pingzhuang Basin

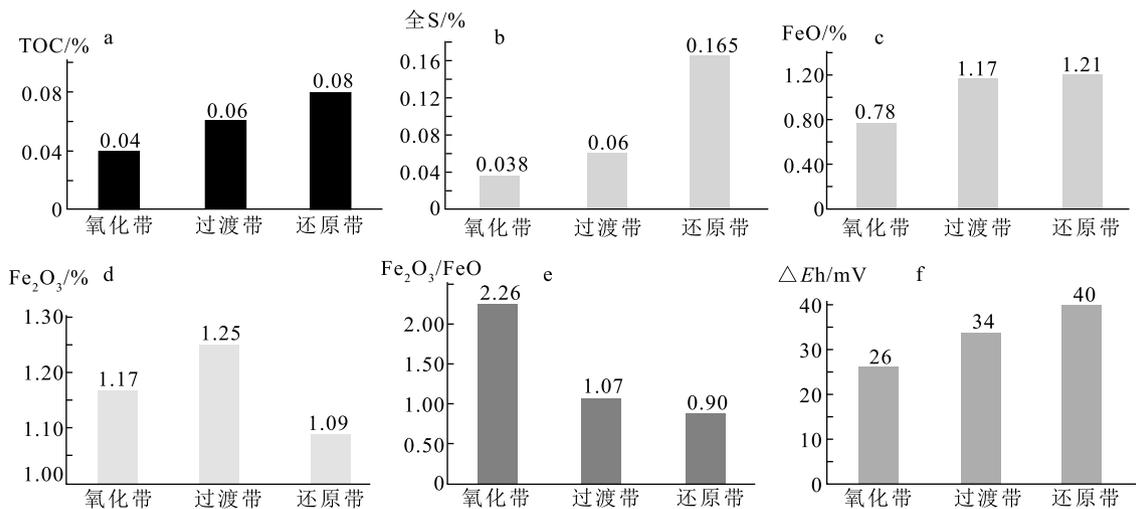


图 5 氧化还原分带环境地化指标直方图

Fig. 5 The histograms of environmental geochemical index in redox zoning

全 S 在原生还原带内的变化范围为 0.08% ~ 0.23%, 平均 0.165%; 过渡带内为 0.03% ~ 0.14%, 平均 0.06%; 氧化带内为 0.01% ~ 0.09%, 平均 0.038%; 整体表现出氧化带—过渡带—还原带依次增高的规律。

S²⁻在原生还原带内变化范围为 0.006% ~ 0.020%, 平均 0.013%; 过渡带内为 0.002% ~ 0.010%, 平均 0.004%; 氧化带内为 0.001% ~ 0.005%,

平均 0.003%; 整体表现出氧化带—过渡带—还原带依次增高的规律。

FeO 在原生还原带内的变化范围 0.45% ~ 2.21%, 平均 1.21%; 过渡带内为 0.79% ~ 1.57%, 平均 1.17%; 氧化带内为 0.23% ~ 1.58%, 平均 0.78%; 整体表现出氧化带—过渡带—还原带依次增高的规律。

Fe₂O₃在原生还原带内的变化范围为 0.23% ~

2.39%,平均1.09%;过渡带内为0.47%~2.29%,平均1.25%;氧化带内为0.92%~3.10%,平均1.17%;整体表现出过渡带—氧化带—还原带依次降低的规律。

Fe_2O_3/FeO 在原生还原带内的变化范围为0.10~3.46,平均0.90;过渡带内为0.30~2.90,平均1.07;氧化带内为0.58~5.44,平均2.26;整体表现出氧化带—过渡带—还原带依次降低的规律。

ΔEh 在原生还原带内的变化范围为22~62 mV,平均40 mV;过渡带内为18~56 mV,平均34 mV;氧化带内为16~37 mV,平均26 mV;整体表现出氧化带—过渡带—还原带依次降低的规律。

4.3 粘土矿物

砂岩中粘土矿物与铀成矿关系密切,主要体

现在粘土矿物影响砂体的孔隙度和渗透性及对铀的吸附作用上(权志高,2003;所世鑫等,2013;游伟华等,2015),同时粘土矿物组合对研究成矿期岩石环境酸碱度有指示意义。系统采集的平庄盆地黑水地区6个砂体样品中,包括氧化带2个、过渡带2个、还原带2个,根据测试数据绘制了氧化还原分带粘土矿物种类含量直方图(图6)。

本次样品的各矿物含量分析结果见表3。黑水地区氧化带砂岩粘土含量为20.8%和24.3%,平均22.55%;过渡带砂岩粘土含量为16.4%和15.7%,平均16.05%;还原带砂岩粘土含量为8.3%和14.1%,平均11.2%;粘土含量表现为氧化带>过渡带>还原带。

表2 氧化还原分带环境地化指标

Table 2 The data of environmental geochemical index in redox zoning

样品编号	岩性	TOC/%	全S/%	S ²⁻ /%	FeO/%	Fe ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ / FeO	ΔEh /mV	分带
01hj01	红褐色含砾粗砂岩	0.04	0.02	0.005	0.57	3.10	5.44	37	氧化带
01hj02	浅黄色砂砾岩	0.02	0.01	0.002	0.34	1.67	4.91	21	
01hj07	浅黄色砂砾岩	0.01	0.09	0.001	0.23	1.04	4.52	23	
01hj10	黄色粗砂岩	0.02	0.05	0.005	0.57	2.06	3.61	36	
02hj04	黄色中砂岩	0.04	0.02	0.001	1.58	0.92	0.58	22	
02hj06	紫红色砂砾岩	0.09	0.04	0.001	1.41	1.75	1.24	16	
01hj03	灰绿色—红褐色砂砾岩	0.02	0.03	0.010	1.02	2.06	2.02	56	过渡带
01hj05	红褐色—灰白色砂砾岩	0.02	0.05	0.005	0.79	2.29	2.90	43	
02hj01	灰白色—浅黄色含砾粗砂岩	0.12	0.14	0.002	1.57	0.47	0.30	18	
02hj02	灰绿色—红褐色含砾粗砂岩	0.03	0.07	0.002	1.02	1.36	1.33	31	
02hj03	灰白色粗砂岩	0.04	0.03	0.004	1.12	0.58	0.52	30	
02hj09	灰绿色—红褐色砂砾岩	0.13	0.05	0.003	1.48	0.74	0.50	26	
01hj04	灰绿色粗砂岩	0.02	0.16	0.014	0.95	1.38	1.45	62	还原带
01hj06	灰绿色砂砾岩	0.12	0.23	0.012	0.98	1.62	1.65	40	
01hj08	灰绿色砂砾岩	0.02	0.16	0.014	1.48	1.34	0.91	44	
01hj09	灰色粗砂岩	0.05	0.14	0.009	0.78	1.19	1.53	43	
01hj11	灰绿色砂砾岩	0.01	0.15	0.020	0.45	1.47	3.27	42	
01hj12	灰绿色砂砾岩	0.02	0.18	0.018	0.69	2.39	3.46	49	
02hj05	灰绿色粗砂岩	0.04	0.20	0.016	2.21	0.23	0.10	46	
02hj07	灰色含砾粗砂岩	0.22	0.18	0.008	1.30	0.30	0.23	23	
02hj08	灰色粗砂岩	0.22	0.17	0.006	1.66	0.36	0.22	22	
02hj10	灰色含砾粗砂岩	0.18	0.08	0.009	1.60	0.66	0.41	28	

注:测试单位为辽宁省地质矿产研究院有限责任公司实验室

从图 6 可知,还原带中蒙皂石含量最高(54%),过渡带中伊利石含量最高(30%),氧化带中高岭石含量最高(24%),还原带中伊蒙混层含量最高(75%),过渡带的混层比最高(97%)。从以上粘土矿物组合可以看出,黑水地区铀成矿期处于弱碱性—中性环境。

4.4 铀矿物种类及赋存形式

矿石砂岩中铀矿物电子探针分析结果见表 4。

黑水地区铀矿物主要为沥青铀矿、铀石、铀钍矿,含少量铁钛铀矿。沥青铀矿中 UO_2 含量为 81.35%~86.34%, SiO_2 含量为 3.98%~6.84%;铀石中 UO_2 含量为 66.35%~72.48%, SiO_2 含量为 19.25%~24.26%;铀钍矿中 UO_2 含量为 34.58%~40.62%, ThO_2 含量为 38.96%~40.67%, SiO_2 含量为 7.24%~8.94%;铁钛铀矿中 UO_2 含量为 51.86%~54.35%, TiO_2 含量为 10.28%~13.57%, FeO 含量为 18.39%~27.15%, SiO_2

表 3 氧化还原分带矿物含量

Table 3 The list of mineral contents in redox zoning

序号	原始编号	样品岩性	分带	矿物含量/%								
				粘土含量	石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	菱铁矿	黄铁矿	赤铁矿
1	01NT02	黄色含砾粗砂岩	氧化带	20.8	23.3	25.6	15.9	14.4	/	/	/	/
2	01NT04	红褐色含砾粗砂岩		24.3	24.9	21.1	22.7	/	/	2.8	/	4.2
3	01NT03	黄色—灰绿色含砾中砂岩	过渡带	16.4	28.3	26.3	25.8	/	/	3.2	/	/
4	01NT01	浅黄色—灰色含砾粗砂岩		15.7	25.9	26.7	18.9	12.8	/	/	/	/
5	01NT05	灰绿色砂砾岩	还原带	8.3	23.2	29.6	21.2	17.7	/	/	/	/
6	01NT06	灰绿色含砾粗砂岩		14.1	32.0	27.9	21.7	/	/	4.3	/	/

注:测试单位为辽宁省地质矿产研究院有限责任公司实验室,“/”代表低于检出极限

表 4 铀矿物电子探针成分分析结果

Table 4 Analytical results of uranium minerals by electronic-probe

测点号	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	CaO	MgO	Na_2O	ThO_2	Y_2O_3	PbO_2	NiO	UO_2	总计	名称
1	5.79	0.34	1.35	1.05	2.15	0.08	0.17	/	/	0.07	0.03	85.46	96.49	沥青铀矿
2	4.67	0.28	1.37	1.39	2.43	0.02	0.08	0.08	/	0.67	0.02	87.23	98.24	沥青铀矿
3	6.84	0.96	1.64	0.91	1.68	0.01	0.26	0.12	/	0.25	0.02	84.35	97.04	沥青铀矿
4	4.16	0.41	0.98	0.78	3.27	0.09	0.04	/	/	0.12	/	85.29	95.14	沥青铀矿
5	3.98	0.29	1.07	1.53	2.34	/	0.01	/	/	0.09	0.01	86.34	95.66	沥青铀矿
6	8.94	0.18	0.04	3.57	1.08	0.11	0.51	40.67	1.45	0.24	0.03	38.58	95.4	铀钍矿
7	7.58	0.09	0.09	3.12	1.34	0.04	0.04	38.96	0.93	0.06	0	44.62	96.87	铀钍矿
8	7.24	0.14	0.13	4.03	1.97	0.07	0.02	39.24	1.29	0.31	0.05	43.41	97.9	铀钍矿
9	19.25	0.89	0.58	0.83	2.69	/	0.16	2.56	0.02	0.07	0.04	72.48	99.57	铀石
10	21.32	1.27	0.97	1.07	2.87	0.01	0.31	1.98	/	0.32	/	66.35	96.47	铀石
11	24.26	0.09	1.04	0.95	2.45	0.06	0.42	2.07	/	0.14	/	67.27	98.75	铀石
12	20.84	0.14	0.85	1.92	1.59	0.02	0.09	1.16	/	0.07	0.03	70.21	96.92	铀石
13	2.32	13.57	0.12	27.15	1.68	0.07	0.64	0.14	0.89	0.32	0.01	51.86	98.77	铁钛铀矿
14	3.76	10.28	0.17	18.39	1.72	0.01	0.17	0.21	0.76	0.26	0.02	54.35	90.1	铁钛铀矿

注:测试单位为东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,“/”代表低于检出极限

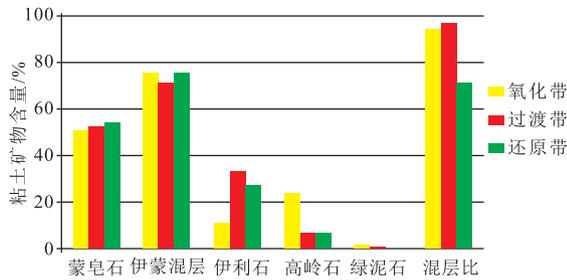


图6 氧化还原分带粘土矿物种类含量直方图

Fig. 6 The histogram of contents of different clay minerals in redox zoning

含量为 2.32%~3.76%。

平庄盆地黑水地区铀矿物主要赋存在矿化砂岩的填隙部位及碎屑物或矿物的解理中,交代黄铁矿、云母等;部分分散形式的铀矿被砂岩填隙物中的粘土矿物、碎屑物或矿物颗粒表面或裂隙面吸附。

5 讨论

5.1 氧化作用与蚀变分带特征

砂岩型铀矿氧化带一般沿盆缘发育,氧化流体的渗入和运移方向也与物源方向一致,这与沉积和

后期构造的继承性有直接关系。平庄盆地黑水地区氧化带沿北部上新井隆起边缘分布,整体表现为自北向南向西发育的规律。钻孔揭露和控制显示,该地区孙家湾组上段中氧化带发育规模较大,自北向南发育的宽度为 3~4.5 km(陈德兵等,2007;崔家瑞等,2017),氧化带走向延伸大于 7 km。氧化带在剖面上表现为 2 层,分别位于孙家湾组上段第二亚段和第三亚段中,厚度较大且稳定发育。其中第三亚段氧化带厚度较大,厚度 50~100 m,砂岩主要为黄色、红褐色,第二亚段氧化带厚 10~30 m,砂岩为浅黄色、灰白色。目前揭露的工业铀矿化主要位于第二、第三亚段氧化带底部,矿层厚度较大且相对稳定。实验测试数据中砂岩的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值介于 0.10~5.44 之间,平均为 1.87,反映较强氧化的沉积环境;全 S 含量为 0.01%~0.23%,平均为 0.10%,低价态硫含量偏低,反映弱的还原环境。另外,与伊犁盆地蒙其古尔地区砂岩的主量元素及各环境指标含量对比发现(图 7),黑水地区主量元素 K_2O 、 Na_2O 和 Al_2O_3 含量明显较高,说明黑水地区与蒙其古尔地区相比更近物源沉积,且氧化作用更强; P_2O_5 含量较高,可能与砂岩近物源,含有较多磷钇矿有关; FeO 与 Fe_2O_3 含量明显较高,可能与黄铁矿为主要

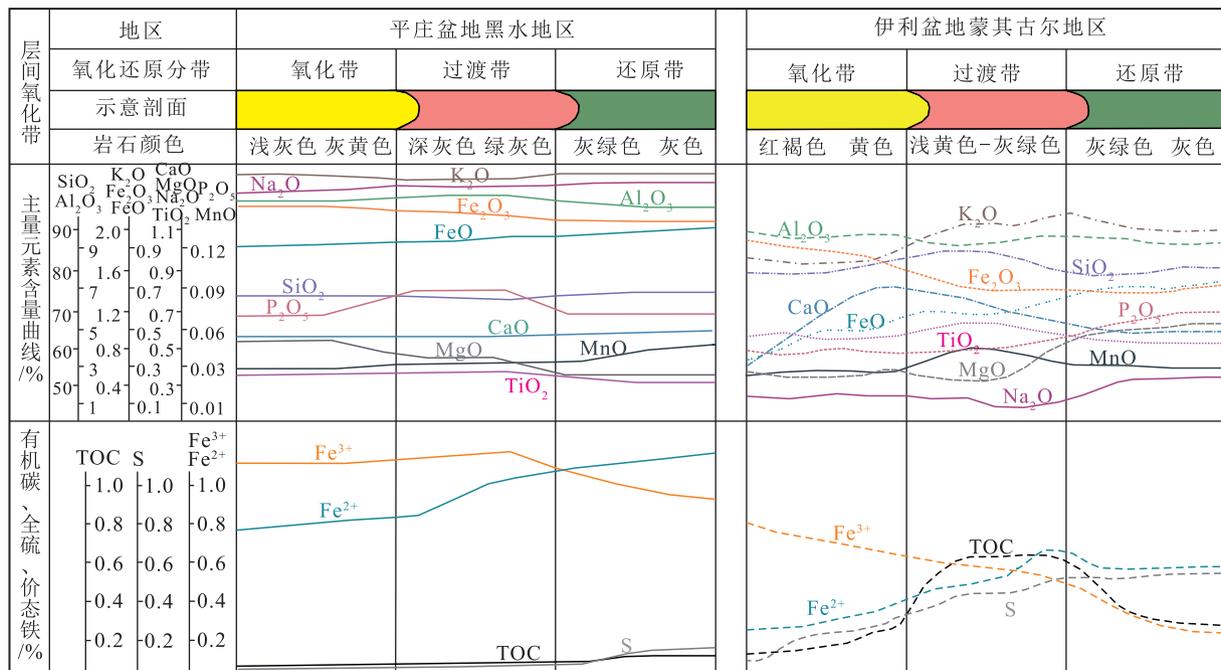


图7 黑水地区和蒙其古尔地区主量元素及环境指标含量对比图

Fig. 7 Content comparison chart of constant elements content and environmental geochemical index content in Heishui area and Mongolian area

的还原介质有关;CaO 与 MgO 含量相近且均较低,说明岩石的碳酸盐矿物含量偏低。环境指标中 TOC 含量较低,说明砂岩中有机质含量较低;S 含量较低且 Fe^{3+}/Fe^{2+} 值较高,说明大量黄铁矿被氧化。以上指标对比发现,相比蒙其古尔地区,黑水地区砂岩成熟度更低、更近物源沉积,且岩石受到的后生氧化作用更强烈,包括层间氧化和潜水氧化。氧化流体作用的强弱与铀的淋滤迁移密切相关,大规模发育的氧化带说明该地区具有成矿潜力。

在砂岩层间氧化作用过程中,随着成矿流体—含氧、含铀地下水的运移和水—岩反应的进行,介质的物理化学条件(Eh、pH、温度、压力等)必然发生显著的改变(Harshman, 1974;吴柏林等,2006),同时出现元素迁入与迁出,造成主量、微量元素的蚀变分带现象。砂岩型铀矿勘查表明,氧化还原过渡带是铀矿沉淀富集的主要部位(陈祖伊等,2007;赵凤民,2017),环境地球化学、矿物学等指标的标记,显示该地区过渡带以低 pH、Eh 为主要特征,同时不同类型的变价元素在该地区集中沉淀,例如 Al_2O_3 和 K_2O 在该分带中含量较高,说明该地区过渡带为富钾的弱碱性环境,使高岭石向伊利石转化,这也与过渡带中粘土矿物的测试结果(过渡带伊利石含量最高,高岭石含量最低)相耦合。相对于氧化带和还原带,弱碱化、还原电位降低和有机碳增高,是过渡带的主要特征,前人研究也发现,在过渡带内存在明显的生物分解产生的有机气体(刘红旭等,2015;赵龙等,2022)。总之,黑水地区从氧化带、过渡带(铀矿化带)到还原带,有机碳、低价铁和 Eh 均表现为逐步增高的规律,同时主量元素、岩石化学蚀变指数(CIA)及粘土矿物含量在不同分带中的变化趋势,都指示了该地区明显的后生蚀变分带特征。

5.2 还原剂与铀的富集方式

对施工钻孔进行编录时未发现炭屑等有机质,只发现少量黄铁矿,环境指标中有机碳含量很低,结合扫描电镜中发现较多的黄铁矿,显示平庄盆地黑水地区的还原剂主要为黄铁矿,扫描电镜下发现的黄铁矿类型主要为中细粒半自形黄铁矿,部分存在裂隙,铀矿物主要与黄铁矿共生(图 8)。铀的富集方式主要为含铀含氧水不断渗入砂体,在层间氧化带前缘氧化还原过渡带富集成矿,铀矿物类型主

要为沥青铀矿,其次为铀石,表现为 2 种赋存形式:①铀矿物呈细脉状分布于黄铁矿周边与裂隙中(图 8-a、b),以沥青铀矿为主,其次为铀石。②铀矿物充填于长石、石英孔隙和裂隙及黑云母节理中(图 8-b~d),主要的赋存形式为铀矿物围绕黄铁矿周边发育,原因为溶液中的 Fe^{3+} 和 U^{6+} 先后被还原,形成 FeS_2 和 UO_2 ,但在 Eh 值降低过程中 Fe^{3+} 总是先于 U^{6+} 还原沉淀,故后沉淀的 UO_2 常围绕新生的 FeS_2 分布(陈祖伊等,2007)。在弱酸性—弱碱性的介质中,黄铁矿总是先于沥青铀矿、铀石从溶液中沉淀出来。因此,沥青铀矿、铀石围绕新生黄铁矿分布是一种沉淀顺序的关系。

5.3 黑水地区铀成矿地质特征

黑水地区的北侧为上新井隆起多期次燕山期中酸性岩浆岩,多期次多旋回的岩浆活动形成了富铀钍的花岗岩体,大量的花岗岩的风化既为孙家湾组沉积提供沉积物源,也为层间氧化带提供铀源。新鲜花岗岩 $U_{平均}$ 为 5.97×10^{-6} ,风化花岗岩 $U_{平均}$ 为 1.40×10^{-6} ,说明该岩体存在铀的迁移,铀矿物中富含铀钍矿和磷钷矿(图 9),较低的岩石成熟度、主量元素组合及 Fe-Mg、Ti-Fe 正相关线性关系,也说明了目的层近物源快速沉积的特点(张晓,2012)。断陷的构造背景在盆缘形成了一系列半潮湿环境下

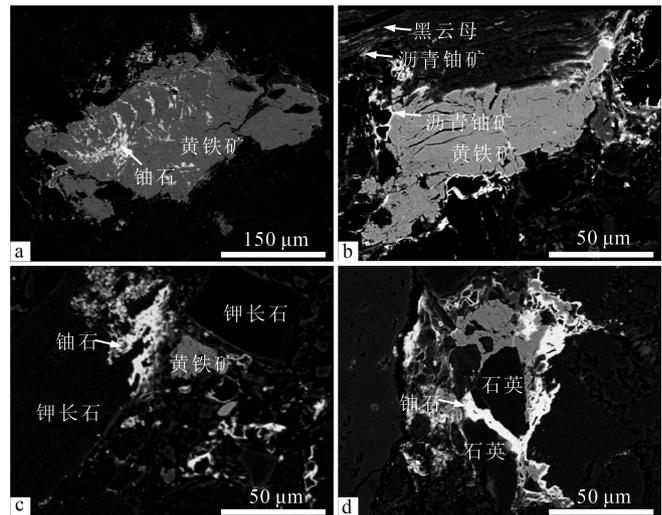


图 8 铀矿物赋存状态背散射图

Fig. 8 Backscattered electron image of occurrence state of uranium mineral

a—铀石呈细脉状充填于黄铁矿裂隙中;b—沥青铀矿分布于黄铁矿周边及黑云母节理中;c—铀石与黄铁矿共生与钾长石孔隙中;d—铀石与黄铁矿分布于石英周边及裂隙中

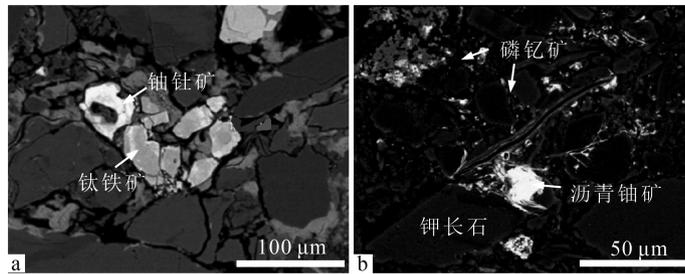


图9 铀钍矿和磷钇矿赋存状态背散射图

Fig. 9 Backscattered electron image of occurrence state of uranium thorium ore and xenotime

- a—铀钍矿与钛铁矿共生于碎屑孔隙中;
b—沥青铀矿与磷钇矿混合物充填于碎屑孔隙中

的冲积扇(图10),冲积扇相形成的中粗粒沉积砂体为良好的铀储层,层间氧化带发育,氧化作用及后生蚀变作用强烈,有利于铀成矿作用的发生。目的层孙家湾组沉积之后,新生代为间断性掀斜、上升隆起阶段,存在3个大的停滞期、3个大的上升期(古近纪、新近纪和第四纪),第四纪又可分为3个小的上升期、3个小的停滞期,表现出继承性块状运动和掀斜特点,长时间的沉积间断和构造抬升为铀成矿创造了构造条件,间断性抬升隆起的新构造运

动为地下水的下渗运移和后生化作用的作用提供了有利条件。孙家湾组上段沉积时期为潮湿的古气候,形成还原容量较大的灰色沉积建造,利于铀的沉淀富集;之后的新近纪为较干旱的古气候,利于铀的活化迁移和铀成矿作用的发生。

黑水地区孙家湾组氧化带蚀变分带和铀赋存特征显示,氧化还原作用是造成铀沉淀富集的关键。充足的铀源、稳定的砂体、砂泥互层、埋深不大、含水性好、透水性强、层间氧化带发育、富含还原剂等成矿地质条件,显示了黑水地区符合层间氧化带型砂岩型铀矿成矿模式(黄世杰,1994)。

5.4 找矿启示与找矿方向

从本次研究看,黑水地区符合层间氧化带型砂岩型铀矿成矿模式,砂体连通性及渗透性较好,区域上氧化带发育,规模较大,还原剂主要为黄铁矿,铀的富集与其形态与成因密切相关。该地区距蚀源区较近,氧化作用特征明显,氧化还原前锋线有向盆地内部延伸的趋势,因此按照砂岩型铀矿成矿理论,下一步应加强对该地区沉积相和砂体蚀变分带特征的研究,细致剖析氧化带空间展布形态,在

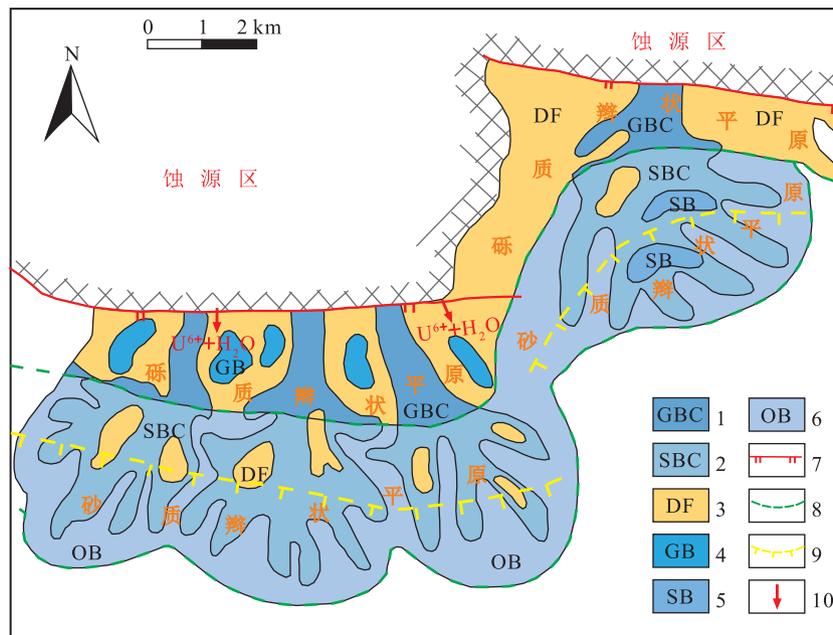


图10 黑水地区沉积相简图

Fig. 10 The diagram of sedimentary facies in Heishui area

- 1—砾质辫状河;2—砂质辫状河;3—泥石流;4—砾质坝;5—砂质坝;6—洪泛细粒沉积;7—断层;
8—相界线;9—氧化带前锋线;10—物源方向

目前勘查基础上往还原介质发育且砂体物性相对较好的盆地内部寻找突破。同时,前人在研究区西南部六家立井地区阜新组含煤地层中发现了铀异常,下一步亦可针对该地区阜新组做进一步勘查工作。

6 结 论

(1)平庄盆地黑水地区氧化作用较强且存在明显的蚀变分带现象,铀矿的富集与岩石地球化学变化及粘土矿物含量密切相关,主要表现为随着成矿流体(含氧、含铀地下水)的运移和水-岩反应的进行,铀在氧化还原过渡带富集,在此过程中砂体表现出明显的后生蚀变分带的特征,符合层间氧化带型砂岩型铀矿成矿规律。

(2)黑水地区还原剂主要为黄铁矿,铀的富集方式主要为含铀含氧水不断渗入砂体,在层间氧化带前缘氧化还原过渡带富集成矿,铀矿物类型主要为沥青铀矿,其次为铀石,表现为 2 种赋存形式,其中主要的赋存形式为铀矿物围绕黄铁矿周边发育。

(3)通过本次氧化作用及铀成矿地质特征的研究,认为黑水地区符合层间氧化带型砂岩型铀矿成矿机制与模式,下一步应加强对该区沉积相和砂体蚀变分带特征的研究,剖析氧化带空间展布形态,在目前勘查基础上向还原介质发育且砂体物性相对较好的盆地内部寻找突破。

致谢:成文过程中得到项目组全体成员的帮助和支持,东华理工大学聂逢君教授对本文提出了宝贵意见,在此一并表示感谢。

参考文献

Harshman J P. Appreciation from an affiliate [J]. Canadian Medical Association Journal, 1974, 110(9): 1018

Lehmann B. Uranium ore deposits [J]. Economic Geology, 2008, 2: 16-26.

陈戴生,李胜祥,蔡煜琦.我国中新生代盆地砂岩型铀矿研究现状及发展方向的探讨[J].沉积学报,2003,(1): 113-117.

陈德兵,田永庆,董庆勋,等.辽宁黑水地区构造特征及其控矿作用[J].世界核地质科学,2009,26(2): 87-90.

陈德兵,田永庆.辽宁省黑水地区孙家湾组铀矿成矿因素分析[J].世界核地质科学,2007,(1): 7-11.

陈祖伊,郭庆银.砂岩型铀矿床硫化物还原富集铀的机制[J].铀矿地质,2007,(6): 321-327,334.

崔家瑞,罗敏.辽宁省建平黑水地区砂岩型铀矿化特征及控矿因素分析[J].地质与资源,2017,26(3): 265-267.

董方升,聂逢君,张成勇.吐哈盆地布尔加地区含铀矿目的层岩石学特征及其意义[J].科学技术与工程,2015,15(33): 109-114,131.

胡俊杰,马寅生,吴祎,等.柴达木盆地侏罗纪古气候演变过程:来自化

学风化特征的证据[J].高校地质学报,2019,25(4): 548-557.

黄净白,李胜祥.试论我国古层间氧化带砂岩型铀矿床成矿特点、成矿模式及找矿前景[J].铀矿地质,2007,(1): 7-16.

黄世杰.层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件及找矿判据[J].铀矿地质,1994,(1): 6-13.

刘红旭,张晓,丁波,等.伊犁盆地南缘砂岩型铀矿成矿模式与找矿方向[J].铀矿地质,中国核学会,2015,(增刊): 9.

刘武生,贾立城,刘红旭.全国砂岩型铀矿资源潜力评价[J].铀矿地质,2012,28(6): 349-354.

苗培森,李建国,汤超,等.中国北方中新生代盆地深部砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向[J].地质通报,2017,36(10): 1830-1840.

聂逢君,严兆彬,夏菲,等.内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用[J].地质通报,2017,36(10): 1850-1866.

权志高.层间氧化带边界类型划分与铀成矿潜力评价[J].地质找矿论丛,2003,(4): 225-228.

所世鑫,刘红旭,张晓,等.蒙古古尔矿床层间氧化带各亚带粘土矿物含量变化及其地质意义[J].世界核地质科学,2013,30(1): 7-11.

田永庆,陈德兵,张书义.平庄盆地地浸砂岩型铀成矿条件分析[J].地质与资源,2008,(2): 127-131.

王果,华仁民,秦立峰.中、新生代陆相沉积盆地砂岩型铀矿床流体作用研究[J].高校地质学报,2000,(3): 437-446.

王宇林,何保,姜志刚,等.平庄盆地地质构造及演化特征[J].煤炭学报,2007,(10): 1036-1040.

吴柏林,刘池阳,张复新,等.东胜砂岩型铀矿后生蚀变地球化学性质及其成矿意义[J].地质学报,2006,(5): 740-747.

席海银,陈德兵,饶明辉,等.内蒙古平庄盆地黑水地区上白垩统孙家湾组上段沉积相及其与铀矿化关系[J].矿床地质,2010,29(6): 1079-1087.

殷榕蔚,霍超,吕永华,等.平庄盆地六家立井地区找铀目标层岩石学特征及其找矿意义[J].中国煤炭地质,2019,31(3): 39-44.

游伟华,李满根,胡宝群,等.二连盆地巴彦乌拉铀矿床目的层粘土矿物特征及其意义[J].科学技术与工程,2015,15(36): 15-20,41.

张虎军,聂逢君,饶明辉,等.伊犁盆地蒙古古尔地区水西沟群砂岩型铀矿目的层岩石学特征及其意义[J].地质与勘探,2012,48(1): 132-139.

张金带.中国北方中新生代沉积盆地铀矿勘查进展和展望[J].铀矿地质,2012,28(4): 193-198.

张金带.我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J].铀矿地质,2016,32(6): 321-332.

张金带,徐高中,林锦荣,等.中国北方 6 种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J].中国地质,2010,37(5): 1434-1449.

张晓.伊犁盆地南缘蒙古古尔铀矿床成因研究[D].核工业北京地质研究院硕士学位论文,2012.

张亚明,王丽华,高常青.平庄盆地构造特征及演化[J].辽宁工程技术大学学报,2002,(4): 483-485.

赵博.平庄-马厂盆地地质构造及演化特征[D].辽宁工程技术大学硕士学位论文,2014.

赵凤民.重新认识还原作用在铀成矿中的贡献[J].铀矿地质,2017,33(4): 193-198,214.

赵龙,陈浩,蔡春芳,等.松辽盆地西南部钱家店铀矿床富矿砂岩中烃类地球化学特征[J].地质通报,2022,41(2/3): 498-508.

赵忠华,席海银,陈德兵,等.辽西黑水地区白垩系孙家湾组上段沉积相及其演化[J].铀矿地质,2010,26(4): 208-214.

郑翠,霍超,张恒利,等.平庄盆地北缘六家立井地区铀成矿条件分析[J].中国煤炭地质,2020,32(2): 74-78.