



引文格式: 林周洋, 吴柏林, 周玉, 等. 三塘湖盆地汉水泉地区昌吉河群层间氧化带识别与铀成矿条件分析[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 246–263. DOI: 10.12401/j.nwg.2025108

Citation: LIN Zhouyang, WU Bailin, ZHOU Yu, et al. Identification of Interlayer Oxidation Zones and Analysis of Uranium Mineralisation Conditions of the Changjihe Formation in the Hanshuiquan Area of the Southern Margin of the Santanghu Basin[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 246–263. DOI: 10.12401/j.nwg.2025108

三塘湖盆地汉水泉地区昌吉河群层间氧化带识别与铀成矿条件分析

林周洋¹, 吴柏林^{1,*}, 周玉², 刘珉², 李琪¹, 王苗¹, 张效瑞¹, 杨梦迪¹, 刘明义¹

(1. 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069;

2. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830057)

摘要: 三塘湖盆地目前发现的砂岩铀矿化主要分布在汉水泉地区, 赋矿地层主要为新近系昌吉河群。为了准确客观评价三塘湖盆地汉水泉地区成矿条件及找矿前景, 其中层间氧化带的识别及铀成矿条件的认识是关键。笔者以新近系昌吉河群为重点, 通过蚀变砂岩的地球化学指标、岩矿石常量和微量元素分析、流体作用的物理化学参数等手段, 确定区内黄色砂岩为控矿氧化带, 含矿或异常显示的灰绿色砂岩、灰色砂岩、灰白色砂岩属于过渡带; 无矿的红色砂岩和灰色砂岩为还原带。研究区存在的大量的原生沉积氧化红色砂岩是干旱气候条件下原生沉积的产物, 黄色砂岩才是后生氧化作用形成的层间氧化带且控制铀矿化的产出。找矿应追踪黄色砂岩蚀变前锋而非红色砂岩与灰色砂岩的界限。如果不加以区分, 找矿时就会误以为红色砂岩也是氧化带而加以追踪而增加勘探成本。部分特征的地球化学指标提供了该红色砂岩是沉积成岩作用产物认识的相关证据, 如红色砂岩中有机碳 (Orgc)、CaO、Cu/Al、Ni/Al 和 Cd/Al 含量均高于黄色砂岩, 且形成的流体作用温度低等, 均表明红色砂岩为浅层表生沉积成岩环境的产物。微区原位黄铁矿硫同位素特点反映了矿床成因是层间氧化带型铀矿, 白色砂岩和绿色砂岩分布极为局限, 说明虽受到了油气作用影响但程度较弱。笔者从构造、地形地貌及水文条件、岩性岩相及后生蚀变条件等准则分析, 认为研究区具备一定的铀成矿条件, 但也存在一些关键方面的不足。含矿层中新统昌吉河群发现多层层间氧化带, 其还原剂容量有所不足, 尤其是油气耗散作用存在但影响和分布程度极为有限, 在一定程度上不利于铀矿的规模性富集。

关键词: 砂岩型铀矿; 层间氧化带识别; 三塘湖盆地; 成矿条件; 昌吉河群; 还原剂容量

中图分类号: P619.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0246-18

收稿日期: 2024-03-21; 修回日期: 2025-06-11; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC2906702), 陕西省自然科学基金基础研究计划 (重点) 项目 (2022JZ-18), 中国地质调查局项目 (DD20211550), 新疆维吾尔自治区自然科学基金青年基金项目 (2023D01B19), 中核铀业“揭榜挂帅”科技攻关项目 (202302) 联合资助。

作者简介: 林周洋 (1998–), 男, 硕士, 从事铀矿勘查研究。E-mail: lzy1450892171@163.com。

* 通讯作者: 吴柏林 (1967–), 男, 教授, 博士生导师, 从事铀矿地质学、盆地分析、盆地有机-无机矿产相互作用等研究。E-mail: wbailin@126.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

Identification of Interlayer Oxidation Zones and Analysis of Uranium Mineralisation Conditions of the Changjihe Formation in the Hanshuiquan Area of the Southern Margin of the Santanghu Basin

LIN Zhouyang¹, WU Bailin^{1,*}, ZHOU Yu², LIU Min², LI Qi¹, WANG Miao¹, ZHANG Xiaorui¹,
YANG Mengdi¹, LIU Mingyi¹

(1. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Urumqi 830057, Xinjiang, China)

Abstract: The sandstone uranium mineralisation found in the Santang Lake Basin is primarily located in the Hanshuiquan area, with the ore-endowed stratigraphy concentrated in the Neoproterozoic Changji River Group. In order to accurately and objectively evaluate the mineralisation conditions and prospects of the Hanshuiquan area in the Santang Lake Basin, the identification of interlayer oxidation zones and an understanding of the uranium mineralisation conditions are crucial. In this paper, the focus is on the Neoproterozoic Changji River Group. In order to identify the yellow sandstones, geochemical indexes of altered sandstones, constant and trace element analyses of rocks and ores, and physicochemical parameters of fluid action are employed. The grey-green, grey and grey-white sandstones containing minerals or anomalies are considered to be the transition zone, while the red sandstones and grey sandstones are the reductive zone. The grey-green, grey and grey-white sandstones are the result of oxidation, while the red sandstones and grey sandstones are the result of reduction. The oxidised red sandstones present in this area are the result of primary deposition under arid climatic conditions, while the yellow sandstones are interlayer oxidation zones formed by post-oxidation and control uranium mineralisation. It would be beneficial to trace the alteration front of the yellow sandstone in order to reduce the cost of exploration. Some of the geochemical indicators provide evidence that this red sandstone is a product of sedimentary diagenesis. This is evidenced by the higher organic carbon (Orgc), CaO, Cu/Al, Ni/Al and Cd/Al contents in the red sandstone than in the yellow sandstone, and the low temperature of fluid action at which it was formed. The in situ pyrite sulfur isotope signature of the microzone indicates an interstratified oxidized zone type of uranium deposit. The very restricted distribution of white and green sandstones suggests a weak but hydrocarbon-influenced influence. The analysis of tectonic, topographic, geomorphological and hydrological conditions, lithology, petrography and post-generation alteration conditions indicates that this area has certain conditions conducive to uranium mineralisation. However, there are some key deficiencies, including insufficient reductant capacity, weak oil and gas dissipation and the absence of uranium ore enrichment.

Keywords: Sandstone-type uranium deposit; identification of interlayer oxide zones; Santanghu basin; mineralisation conditions; Changji River Group; reducing agent capacity

铀矿床类型众多(张金带, 2016), 其中砂岩型铀矿以污染小、易开采等特点在铀矿床储量类型中占据重要的地位(张金带, 2012)。20世纪90年代, 在三塘湖盆地先后开展过不同小比例尺铀矿资源调查评价, 不同学者从水文地质条件、地貌、基底、沉积相、铀源等不同角度对三塘湖盆地进行了部分研究与铀成矿条件分析(金和海, 2003; 赵宝光等, 2004a; 白志民等, 2009; 唐湘飞等, 2009; 黄大友等, 2012; 白铭等, 2015; 韩芳芳等, 2018; 洪涛, 2018; 郑国栋等, 2022), 初步认

为研究区内铀矿找矿目标类型为层间氧化带型, 找矿目的层为新近系昌吉河群, 找矿潜力层位为侏罗系西山窑组、头屯河组等。

三塘湖盆地铀矿地质工作始于20世纪50年代中期, 50年代在三塘湖盆地进行了1:10万航空伽玛测量, 发现了数个异常点, 并在纸房地区西山窑组中发现含铀煤型铀矿点。20世纪90年代, 在纸房地区及汉水泉凹陷西部进行了1:20万地面伽玛能谱测量、开展了1:50万铀矿区域预测、1:20万铀矿区调(带

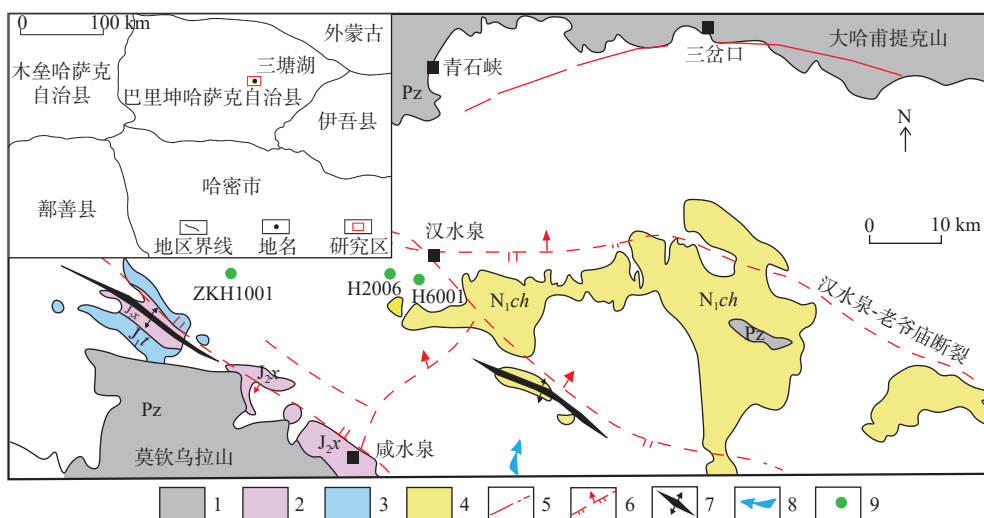
钻),共施工钻孔 10 个,圈出了可地浸砂岩型铀成矿远景区。例如,三塘湖北东斜坡带,汉水泉南部斜坡带,淖毛湖北部斜坡带等地段。21 世纪初,在三塘湖盆地开展了 1:50 万铀矿资源评价,划出了包括汉水泉地区在内的部分找矿远景区。2004~2005 年,在三塘湖盆地汉水泉地区施工少量钻孔,发现了 1 个铀矿化孔和 2 个铀异常孔,铀矿化赋存于上新近系中新统昌吉河群砂体中。矿化受层间氧化带的控制。但是有关研究也认为,该研究区昌吉河群原生灰色砂岩中炭化植物碎屑不是特别丰富,砂体的还原容量偏低(唐湘飞等,2009),该套层位的成矿条件与成矿远景可能受到一定影响,需要深入研究加以确认和评价。

研究区昌吉河群氧化蚀变有黄色和红色两套砂岩。笔者工作从野外调研、钻井岩心观察、矿化的特征地球化学参数、流体包裹体温度分析、后生蚀变类型、常微量元素分析等方面区分出了控矿层间

氧化带为黄色砂岩而不是红色砂岩,红色砂岩只是干旱条件下成岩和氧化作用形成,不具控矿的层间氧化带性质,找矿实践中应该寻找黄色砂岩层间氧化带而非红色砂岩。从而明确了找矿的层间氧化带标志和方向。在此基础上,进一步分析了成矿条件和找矿前景。

1 地质背景

三塘湖盆地位于新疆东北部的北天山与中蒙边界的阿尔泰山之间,呈 NW—SE 向延伸的长条形,面积约为 23 000 km²(欧阳征健等,2006;鲁海鸥等,2012)。总体表现为南、北高,中央低以及西高东低的地形格局。盆地南为北天山支脉的巴里坤北山和麦钦乌拉山;北部和东北部为大哈甫提山和苏海图山;中部为中低山丘陵区及戈壁荒漠区(图 1)。



1.古生界; 2.西山窑组; 3.头屯河组; 4.昌吉河群; 5.断裂; 6.逆冲断裂; 7.背斜轴; 8.地下水流向; 9.矿化或异常孔

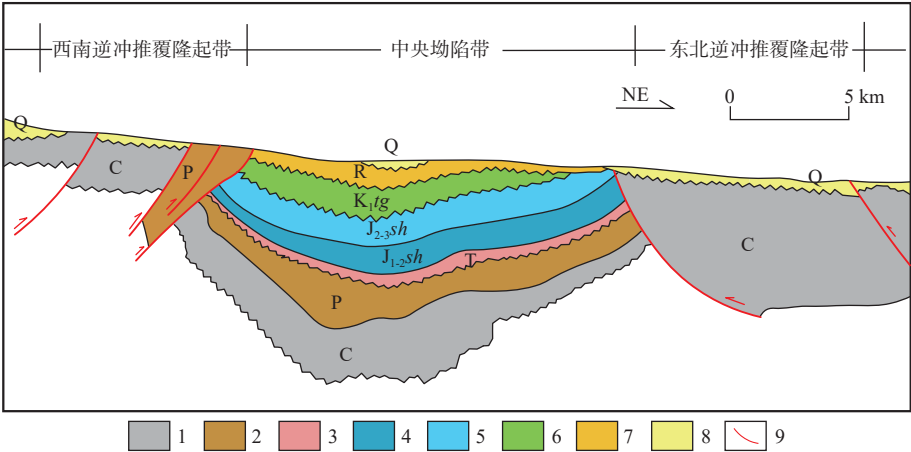
图1 汉水泉地区构造-铀矿地质略图

Fig. 1 Tectonic-uranium geological sketch of the Hanshuiquan area

盆地构造格局表现为东北逆冲推覆隆起带与西南逆冲推覆带夹持的中央坳陷带(图 2)。中央坳陷带以岔哈泉隆起为界分为东、西两个次级坳陷;汗井断裂带和白衣山断裂带控制了盆地两隆夹一坳的基本构造格局,两大断裂带逆冲上升盘发育强烈的剥蚀作用,造成二叠系—白垩系的剥蚀及前二叠系基底大面积裸露。盆地基底目前普遍认为是前寒武纪结晶基底与其上的华力西期褶皱基底构成的陆壳双层基底(朱伯生等,1997;刘学锋等,1998;孙自明等,2001;赵泽辉等,2003)。基底活动带经历了多期褶皱、岩浆和

交代作用,各种花岗岩和中酸性火山岩发育;其中上石炭统及二叠系为具大陆喷发相的沉积。基底古陆块属性对盆地铀矿的形成是有利的(赵宝光等,2004;汪双双,2013)。

中新世盆地盖层由中上三叠统小泉沟群($T_{2+3}xq$)、侏罗系(J)、下白垩统吐谷鲁群(K_1tg)、新近系(R)和第四系(Q)组成(表 1),主要分布于三塘湖盆地中央坳陷带中部的条湖凹陷和马朗凹陷以及纸房坳陷的中部地带,地层总厚度最大可达 8 000 m。侏罗系是盖层中沉积厚度最大,发育最齐全的地层。



1.石炭系; 2.二叠系; 3.三叠系; 4.水西沟群; 5.石树沟群; 6.吐谷鲁群; 7.第三系; 8.第四系; 9.断裂

图2 三塘湖盆地南北向地震地质剖面略图(据赵宝光等, 2004b 修改)

Fig. 2 Sketch of the north-south seismic geological profile of the Santanghu Basin

表 1 三塘湖盖层地层划分简表

Tab. 1 Summary table of the stratigraphic division of the Three Ponds Lake cover

界	系	统	地层	接触关系	地层 代号	构造 活动
新生 界	第四系			角度不整合	Q	喜山 运动
	新近系	中新统	昌吉河群	整合	N ₁ ch	
		始-渐 新统	乌伦古河组	整合	E ₂₋₃ w	
		古-始 新统	紫泥泉子组	角度不整合	E ₁₋₂ z	
中生 界	白垩系	下统	吐谷鲁群	角度不整合	K ₁ tg	燕山 运动
	侏罗系	上统		整合	J ₃ k	
			齐古组	整合	J ₃ q	
		中统	头屯河组	整合	J ₂ t	
			西山窑组	整合	J ₂ x	
		下统	三工河组	整合	J ₁ s	
			八道湾组	角度不整合	J ₁ b	
	三叠系	上统	小泉 沟群	整合	T ₃ h	印支 运动
			郝家沟组	整合	T ₃ hs	
		中统	克拉玛依组	角度不整合	T ₂ k	
		下统	上仓房沟群	角度不整合	T ₁ ch	

汉水泉凹陷位于三塘湖盆地中央坳陷带的西部。面积约为 2 400 km²。凹陷西北高, 东南低。总体表现为向北抬升的单斜, 地层倾角较小。该单斜构成局部的斜坡带, 是铀成矿的有利构造。凹陷内沉积有三叠系—第四系, 西缘三叠系出露地表; 石炭系、二叠系构成凹陷的基底及南北边界。中下侏罗统由北向南逐渐变深, 顶板埋深一般为 200 m 以下。由于头屯河期晚期盆地的持续隆升作用, 以致汉水泉地区头屯河组基本已被剥蚀, 中生代地层几乎已剥蚀殆尽, 新近系

直接覆盖于古生界及少量的侏罗系之上(唐湘飞等, 2009; 郑国栋等, 2022)。

盆地新近系发育较齐全, 分为下新近系紫泥泉子组(E₁₋₂z)、乌伦古河组(E₂₋₃w)及上新近系昌吉河群(N₁ch)。主要出露于三塘湖乡—老爷庙公路两侧、岔哈泉以北及鸭子泉周围地区, 属河流相—湖泊相类磨拉石建造, 沉积厚度由坳陷的中部向边缘变薄。昌吉河群广泛分布于盆地中部, 沿山麓地带零星出露, 岩层呈近水平产出, 属内陆河湖相建造。

新近系(R)在汉水泉地区揭露仅为上新近系昌吉河群(N_1ch),分布范围大大超过下新近系,岩层呈近水平或微倾斜($5^{\circ}\sim 10^{\circ}$)。总体为一套红层夹局部灰色层。沉积厚度为 100 ~280 m。其岩性上部为红色、褐红色泥岩、含砾泥岩、泥质砂岩夹石膏;下部为黄色、灰色、灰白色石英长石砂岩、砂砾岩夹粉砂岩、泥岩薄层。不整合于中—上石炭统哈尔加乌组和中侏罗统西山窑组之上,其上又为第四系所覆盖。

三塘湖盆地汉水泉地区砂岩型铀矿找矿的目的层位为中新统昌吉河群(N_1ch),而探索层位为中侏罗统西山窑组(J_2x)。西山窑组为一套灰色层位,砂体好,还原容量相对其他大,是下一步找矿的潜力层位。

从钻井资料分析,中新统昌吉河群(N_1ch)上部砂体为辫状河三角洲沉积特征,下部砂体为辫状河沉积。

均发现有层间氧化带及铀异常,总体为一套红层夹局部灰色层并在其中发育黄色层间氧化带。但铀矿化发育较好主要是在工区范围内出露的中下部的砂体。

2 样品采集及分析方法

本次共选取八口钻井,共计 19 个样品,目标层位均为新近系昌吉河群,岩心以粉砂岩、中细砂岩为主(表 2)。根据采样岩石样品颜色类型,样品分为黄色砂岩、红色砂岩、白色砂岩、灰绿色砂岩、灰色砂岩,其中灰色砂岩根据含铀量分为矿化砂岩及非矿化砂岩。本研究进行了一些蚀变流体性质、特征地球化学参数、微量元素及反映矿床成因的微区原位硫同位素测试。

表 2 样品登记表

Tab. 2 Registration form example

样品号	采样层位	岩性	钻井号	含铀量(10^{-6})
S2022-3	昌吉河群	灰色粉砂岩	ZK98-6U	5.00
S2022-4		深灰色粉砂岩		5.48
S2022-6		浅灰绿色细砂岩	ZK106-1U	3.25
S2022-9		红色粉砂岩		4.66
S2022-12		浅灰白色粉砂岩		3.00
S2022-15		灰白色粉砂岩(碳酸盐化)	ZK104-4U	/
S2022-16		浅灰白色细砂岩	ZK110-1U	1.50
S2022-21		淡黄色细砂岩(碳酸盐化)		/
S2022-25		浅红色细砂岩(碳酸盐化)		/
S2022-31		黄色中砂岩	ZK114-2U	2.00
S2022-35		深灰色细砂岩		9.25
S2022-38		浅红色中砂岩	ZK116-2U	9.26
S2022-41		灰绿色粉砂岩		4.1
S2022-42		白色中砂岩	ZK110-2U	21.4
S2022-43		灰色细砂岩		70.8
S2022-44		灰色细砂岩	ZK114-8U	59.2
S2022-46		灰色细砂岩		93.2
S2022-47		灰色中砂岩	ZK68-8	/
S2022-49		黄色中砂岩	ZK150-3U	2.50

包裹体测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,试验仪器选取 LINKAM THMS600 型显微冷热台,共获得 16 个包裹体物理化学性质(表 3)。根据上述划分岩石蚀变类型进行归类,黄色蚀变砂岩均一温度为 113.3~163.4 $^{\circ}\text{C}$,冰点温度为-2.6~-24.3 $^{\circ}\text{C}$;

平均分别为 135.35 $^{\circ}\text{C}$ 和-8.80 $^{\circ}\text{C}$;红色蚀变砂岩均一温度为 115.20 $^{\circ}\text{C}$,冰点温度为-7.20 $^{\circ}\text{C}$;白色蚀变砂岩一温度为 95.70~134.10 $^{\circ}\text{C}$,冰点温度为-5.10~-24.20 $^{\circ}\text{C}$,平均分别为 119.34 $^{\circ}\text{C}$ 和-13.10 $^{\circ}\text{C}$;灰色矿化砂岩均一温度为 101.00~123.00 $^{\circ}\text{C}$,冰点温度为-2.20~

表 3 矿区包裹体物理化学参数数据表

Tab. 3 Data sheet on physico and chemical parameters of inclusions

序号	样品号	分类	均一温度(℃)	冰点温度(℃)	盐度(wt%)	密度	pH	Eh
1	S2022-49-5	黄色砂岩	142.50	-2.60	4.35	0.96	5.84	0.82
2	S2022-49-6		113.30	-6.50	.94	1.00	6.02	0.78
3	S2022-49-1		134.80	-9.10	13.12	1.01	5.89	0.81
4	S2022-49-4		148.60	-15.10	19.17	1.09	5.81	0.82
5	S2022-49-2		109.50	-24.30	26.33	1.17	6.05	0.77
6	S2022-21	红色砂岩	163.40	-8.80	12.78	1.10	5.74	0.84
	平均		135.35	-11.07	14.28	1.06	5.89	0.81
7	S2022-25		115.20	-7.20	10.84	1.02	6.01	0.78
	平均		115.20	-7.20	10.84	1.02	6.01	0.78
8	S2022-42	白色砂岩	117.30	-5.10	8.05	0.96	6.00	0.78
9	S2022-42-3		117.30	-24.20	26.26	1.14	5.85	0.30
10	S2022-42-2		134.10	-23.40	25.68	1.13	5.74	0.33
11	S2022-15-1		95.70	-23.40	25.68	1.15	6.01	0.33
12	S2022-15-2		132.30	-13.10	17.33	1.06	5.75	0.34
	平均		119.34	-17.84	18.97	1.08	5.89	0.48
13	S2022-44-1	灰色矿化砂岩	123.00	-17.10	20.88	1.09	5.81	0.30
14	S2022-44-2		101.00	-23.70	25.90	1.15	5.97	0.33
15	S2022-44-3		118.30	-2.20	3.72	0.97	5.84	0.30
	平均		114.10	-14.33	16.83	1.07	5.87	0.31
16	S2022-47-2	灰色砂岩	81.60	-10.50	14.68	1.05	6.29	0.73
	平均		81.60	-10.50	14.68	1.05	6.29	0.73

-23.70℃, 平均分别为 114.10℃ 和 -14.33℃; 灰色蚀变砂岩均一温度为 81.60℃、冰点温度为 -10.50℃ (表 3)。从均一温度可以发现, 黄色蚀变砂岩与白色蚀变砂岩、灰色矿化砂岩、红色蚀变砂岩温度较为接近, 属于低温环境; 灰色蚀变砂岩温度较低, 接近常温环境。

本次样品特征地球化学参数测试由核工业二〇三研究所完成, 实验选取 X-Series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定; 微量元素及稀土元素由西北大学国家动力实验室完成, 试验仪器选取 Agilent-7500a, 标准物为 BHVO-2、AGV-2 测试结果。灰绿色砂岩 ΣREE 含量为 113.13×10^{-6} , LREE/HREE 值为 8.92, Eu 值为 0.84, Ce 值为 1.15; 红色砂岩 ΣREE 含量为 93.90×10^{-6} , LREE/HREE 值为 6.31, Eu 值为 0.82, Ce 值为 0.98; 黄色砂岩 ΣREE 含量为 127.65×10^{-6} , LREE/HREE 值为 8.00, Eu 值为 0.77, Ce 值为 0.98; 白色砂岩 ΣREE 含量为 75.50×10^{-6} , LREE/HREE 值为 9.31, Eu 值为 0.92,

Ce 值为 1.21; 灰色细砂岩平均 ΣREE 含量为 94.3×10^{-6} , LREE/HREE 值为 8.3, Eu 值为 0.9, Ce 值为 1.2; 灰色矿化细砂岩平均 ΣREE 含量为 109.0×10^{-6} , LREE/HREE 值为 6.6, Eu 值为 0.8, Ce 值为 1.0(表 4)。

S 同位素测试情况, 共选取铀含量较高的 S2022-44、S2022-46 样品制作 60~80 μm 厚的加厚电子探针片。在电子探针镜下观察及成分测试, 选定合适的黄铁矿矿物, 利用 fs-LA-MC-ICP-MS 进行原位微区的黄铁矿 S 同位素测定, 意在分析铀矿物形成与黄铁矿等金属硫化物的关系。电子探针实验在中国地质调查局西安地质调查中心完成, 仪器为日本电子公司(JEOL)日本电子株式会社生产, 该仪器型号 JXA-8230。硫同位素微区原位分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室进行。实验测定利用 fs-LA-MC-ICP-MS 和膜去溶装置。采用 NuPlasma II 多接收等离子体质谱仪, 该质谱仪器购自英国 Nu 公司。飞秒激光剥蚀系统选用美国 ESI 公司的 NWRUPFemto。

表 4 各蚀变岩石的稀土元素分析数据
Tab. 4 Rare earth element analytical data for each altered rock

岩性	样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/ HREE	(La/Yb) _N	Eu	Ce
灰绿色砂岩	S2022-6	20.9	50.4	5.17	20.2	4	1.06	3.58	0.52	2.94	0.57	1.66	0.24	1.64	113.13	113.13	101.73	11.40	8.92	9.14	0.84	1.15
红色砂岩	S2022-9	18.2	36.5	4.32	17.4	3.67	0.97	3.49	0.55	3.36	0.69	2.04	0.31	2.08	93.90	93.90	81.06	12.84	6.31	6.28	0.82	0.98
黄色砂岩	S2022-31	24.5	53	6.02	24	4.78	1.17	4.39	0.63	3.66	0.72	2.1	0.31	2.05	127.65	127.65	113.47	14.18	8.00	8.57	0.77	1.04
白色砂岩	S2022-42	14.8	35.2	3.13	12	2.35	0.7	2.23	0.32	1.82	0.36	1.09	0.17	1.15	75.50	75.50	68.18	7.32	9.31	9.23	0.92	1.21
	S2022-12	20.4	51.2	5.19	21	4.48	1.1	4.37	0.69	4.18	0.84	2.5	0.37	2.45	119.15	119.15	103.37	15.78	6.55	5.97	0.75	1.19
灰色细砂岩	S2022-35	13.5	31.9	3.03	11.7	2.25	0.73	1.99	0.29	1.62	0.31	0.92	0.14	0.92	69.44	69.44	63.11	6.33	9.97	10.53	1.03	1.17
	平均	16.95	41.55	4.11	16.35	3.365	0.915	3.18	0.49	2.9	0.575	1.71	0.255	1.685	94.3	94.3	83.2	11.1	8.3	8.2	0.9	1.2
	S2022-43	21.4	45.6	4.78	19.2	3.98	0.99	3.99	0.59	3.64	0.76	2.3	0.35	2.34	110.29	110.29	95.95	14.34	6.69	6.56	0.75	1.06
灰色矿化	S2022-44	21.9	44.1	4.71	19.1	3.88	0.99	3.98	0.59	3.68	0.77	2.35	0.36	2.42	109.21	109.21	94.68	14.53	6.52	6.49	0.76	1.02
细砂岩	S2022-44R	21.1	44.7	4.56	18.3	3.77	0.93	3.83	0.58	3.55	0.75	2.27	0.35	2.34	107.39	107.39	93.36	14.03	6.65	6.47	0.74	1.07
	平均	21.5	44.8	4.7	18.9	3.9	1.0	3.9	0.6	3.6	0.8	2.3	0.4	2.4	109.0	109.0	94.7	14.3	6.6	6.5	0.8	1.0

3 控矿层间氧化带标志识别

3.1 蚀变砂岩类型

汉水泉地区主要识别出了黄色砂岩蚀变、浅红色或浅棕色砂岩氧化蚀变、少部分灰白色砂岩和灰绿色砂岩蚀变。

3.1.1 黄色氧化砂岩

黄色氧化砂岩是研究区层间氧化带的主体蚀变岩石类型,蚀变作用较强的则呈褐黄色、黄色、黄褐色(图 3a、图 3b)。岩石主体呈碎屑结构、中细砂粒状结构。碎屑颗粒一般直径为 0.1~0.43 mm,颗粒之间以点线接触为主,颗粒支撑,孔隙式胶结类型。碎屑特征以岩屑占绝大多数,长英质含量较少;基质为黄褐色硅铁隐晶,部分区域出现较多的凝块状不透明褐铁矿、钛铁矿等(图 3b)。

本次研究认为,黄色砂岩是后生氧化的结果,是控矿的层间氧化带蚀变(见后面有关的证据),也是找矿的标志(图 4)。

3.1.2 浅红色或浅棕色砂岩蚀变

岩石具有碎屑结构、细砂粒状结构、凝灰细砂结构特征(图 5a、图 5b)。碎屑磨圆差、分选差,质-碎屑联合支撑,基底式-孔隙式胶结类型;碎屑组分主要为石英、长石、岩屑(灰屑)、沸石-石英(玉髓)质,硅铁质凝团、铁质凝聚团;其中岩屑含量大,占碎屑组分一半;粒径普遍为 0.12~0.35 mm。岩石浅棕色特征主要由絮状钛铁矿-褐铁矿(赤铁矿)组分凝聚浸染粉晶碳酸盐所呈现。

本次研究认为,浅红色或浅棕色砂岩多是沉积成岩作用的氧化蚀变,是地层在炎热干旱的环境条件下形成的,而不是控矿的层间氧化带的蚀变,因此与成矿无关。

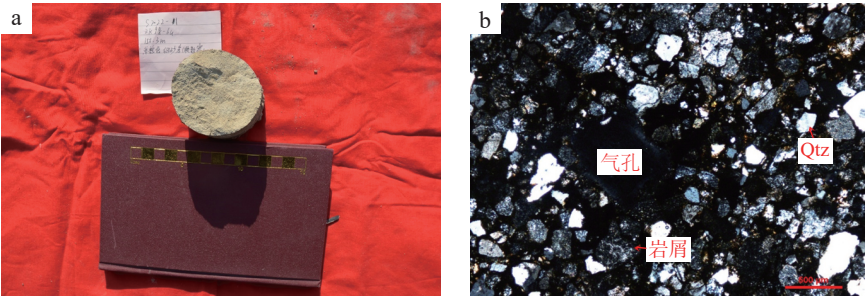


图3 ZK98-6U 井新近系昌吉河群黄色细砂岩(a)和 部分褐铁矿及硅铁质浸染的黄色岩屑中细砂岩(b)

Fig. 3 (a)Yellow fine sandstone of the Tertiary Changji River Group in well ZK98-6U and (b)Yellow clastic medium-fine sandstone partially impregnated with limonite and silica-ferrite

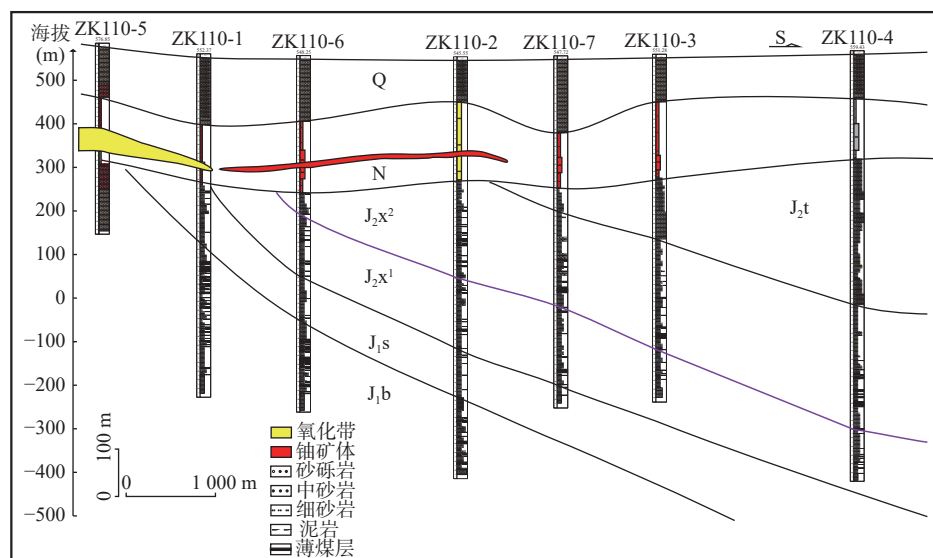


图4 110号勘探线剖面黄色砂岩层间氧化带控矿示意图(资料来自中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心)

Fig. 4 Schematic diagram of mineralisation control in the interlayer oxidation zone of yellow sandstone in the profile of exploration line 110 (Data from: Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey)

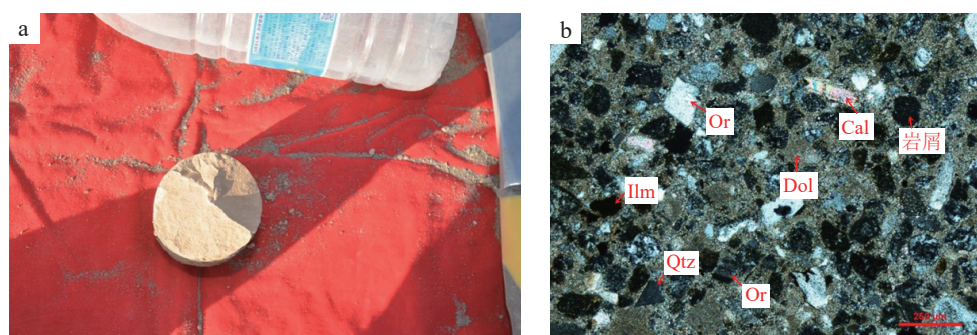


图5 ZK114-2U 井新近系昌吉河群(N_1ch)红色粉砂岩(a)和浅棕色碳酸化岩屑细砂岩(b)

Fig. 5 (a) Reddish siltstone of the Tertiary Changji River Group (N_1ch) in well ZK114-2U and (b) Light brown carbonated clastic fine sandstone

3.1.3 浅灰绿色砂岩蚀变

岩石具有气孔结构、细砂粒状结构、凝灰细砂结构和碳酸盐化结构特征(图 6a、图 6b)。碎屑磨圆差、分选差,多数为颗粒支撑,孔隙式胶结类型;碎屑组分主要为石英、长石、岩屑(灰屑)、铁质凝聚团;其中岩屑含量大,占碎屑组分 2/3;粒径普遍为 0.12~0.35 mm;胶结物:主要为钛铁质+硅镁质+碳酸质混合物;有较多的鳞片状绿泥石结晶。

灰绿色砂岩被认为是氧化砂岩遭受油气还原作用的产物,但在研究区却偶然可见,分布上极为少见;可见油气作用现象是可见的,但作用程度却极弱。

3.1.4 灰白色砂岩蚀变

岩石具有熔岩碎屑结构、碳酸盐化结构(图 7a、图 7b);斑晶粒径为 0.05~0.2 mm,含量约为 40%,基

质约为 55%,成分为高岭土质;斑晶组份为棱角状石英、长石、方解石等。白色砂岩被认为是油气蚀变作用使黏土矿物发生了大规模的高岭石化,目前已在鄂尔多斯盆地东胜铀矿和松辽盆地钱家店铀矿床证实。本次灰白色砂岩在镜下观察到的发育大量的高岭土质,其形成可能与该区的油气作用关系密切。但因为高岭石化总体较弱,因此认为该区油气作用有显示,但却较弱。

3.1.5 原生灰色砂岩

岩石具有碎屑结构、细砂粒状结构、凝灰细砂结构特征(图 8a、图 8b)。碎屑磨圆差、分选差,质-碎屑联合支撑,基底式-孔隙式胶结类型;碎屑组分主要为石英、长石、岩屑(灰屑)、沸石-石英(玉髓)质,硅铁质凝聚团、铁质凝聚团;其中岩屑含量较多,粒径普遍介

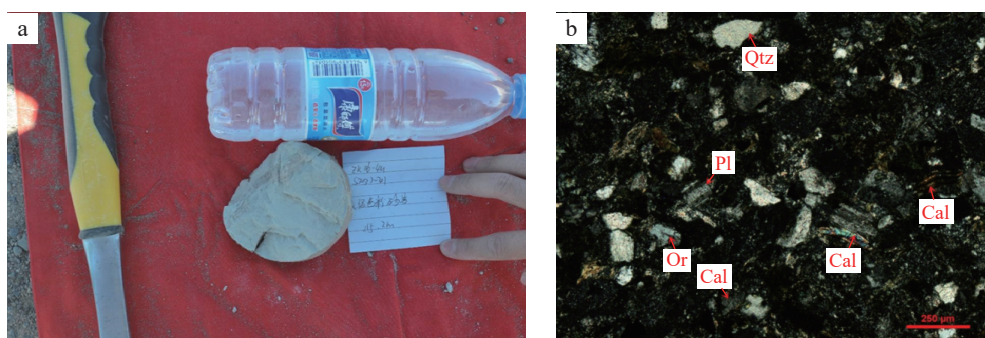


图6 ZK116-2U 井灰绿色粉砂岩(a)和灰绿色绿泥石化、碳酸盐化岩屑中-细砂岩(b)

Fig. 6 (a) Grey-green siltstone from well ZK116-2U and (b) Grey-green chloritised, carbonatised clastic medium-fine sandstone

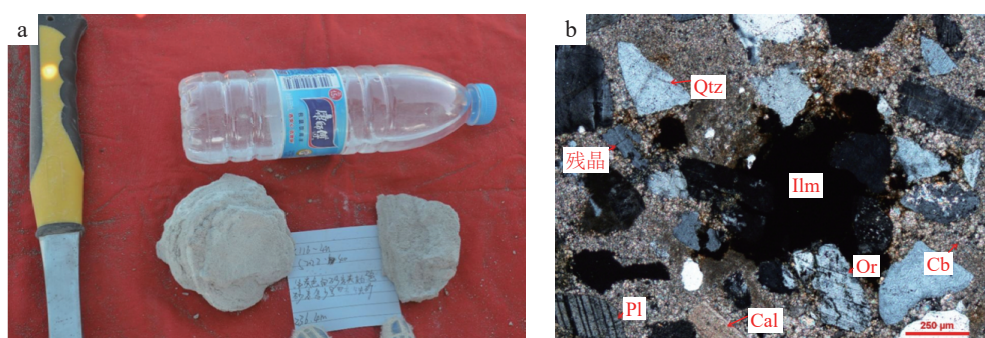


图7 ZK116-2U 井灰白色细砂岩, 含少量黄铁矿(a)和风化状碳酸盐化灰白色中砂岩(b)

Fig. 7 (a) Greyish-white fine sandstone with minor pyrite from well ZK116-2U and

(b) Weathered carbonatised greyish-white medium sandstone

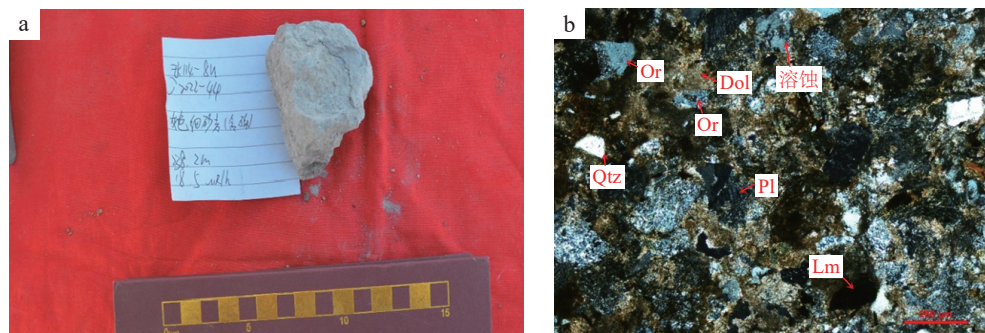


图8 ZK114-8U 井矿化段灰色含砾细砂岩(a)和灰色铁镁质浸染碳酸盐化岩屑中细砂岩(b)

Fig. 8 (a) Grey conglomeratic fine sandstone in the mineralised interval of ZK114-8U and (b) Grey ferromagnesian infiltrated carbonatised clastic medium fine sandstone

于 0.12~0.35 mm。填隙物以碳酸盐+硅质+铁镁质混合物为主,发育部分空隙,铁质凝聚物为含钛硅铁质、褐铁矿等。岩石的整体灰色色调由基质的铁镁质+粉晶碳酸盐+钛铁矿混合物所呈现。

这种岩石类型一般是还原带的砂岩,不过与红色砂岩相比,总体上分布却极为局限,与原生的大量的红色砂岩构成还原带,是原生沉积的产物。

3.2 蚀变砂岩地球化学特征及标志

各个砂岩类型除了岩石学特点明显差别之外,在

某些地球化学指标或参数方面也有明显的差别。例如在 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 、 ΣS 、U、Th、Orgc 方面的特点比较明显(表 5,图 9)。铀矿化砂岩和灰色还原带砂岩其 ΣS 和 Orgc 明显高于其他类型砂岩含量(表 5,图 9a、图 9b),反映成矿所需还原剂的作用,还原剂含量越高越有利铀成矿过程。氧化蚀变(红色和黄色砂岩)的数值则最小,说明遭受氧化的结果。白色和灰绿色砂岩的指标偏小,说明早期氧化砂岩遭受了后期的还原改造,继承了 ΣS 和 Orgc 指标小的特点。

表 5 特征地球化学参数测试结果表

Tab. 5 Table of test results for characteristic geochemical parameters

样品编号	岩性描述	检测结果 (10 ⁻⁶)		检测结果 (%)			
		U	Th	orgC	ΣS	Fe ²⁺	Fe ³⁺
S2022-43	灰色细砂岩	70.8	3.73	0.35	0.239	0.42	0.85
S2022-44	灰色细砂岩	59.2	9.36	0.37	0.227	0.90	0.77
S2022-46	灰色细砂岩	93.2	3.58	0.27	0.297	0.37	0.78
S2022-3	灰色粉砂岩	5.00	3.11	0.32	0.026 2	1.98	0.74
S2022-4	深灰色粉砂岩	5.48	1.21	1.80	0.028 0	18.4	5.95
S2022-35	深灰色细砂岩	9.25	2.02	0.42	0.576	0.29	0.69
S2022-38	浅红色中砂岩	2.20	4.07	0.12	0.039 9	0.44	2.96
S2022-16	浅灰白色细砂岩	1.50	2.90	0.14	0.028 9	0.47	1.54
S2022-42	白色中砂岩	21.4	3.47	0.07	0.023 8	0.16	0.74
S2022-6	浅灰绿色细砂岩	4.66	6.95	0.22	0.027 0	0.36	1.09
S2022-41	灰绿色粉砂岩	4.10	6.36	0.08	0.039 3	0.78	1.41
S2022-49	黄色中砂岩	2.50	2.43	0.09	0.052 1	0.36	2.88

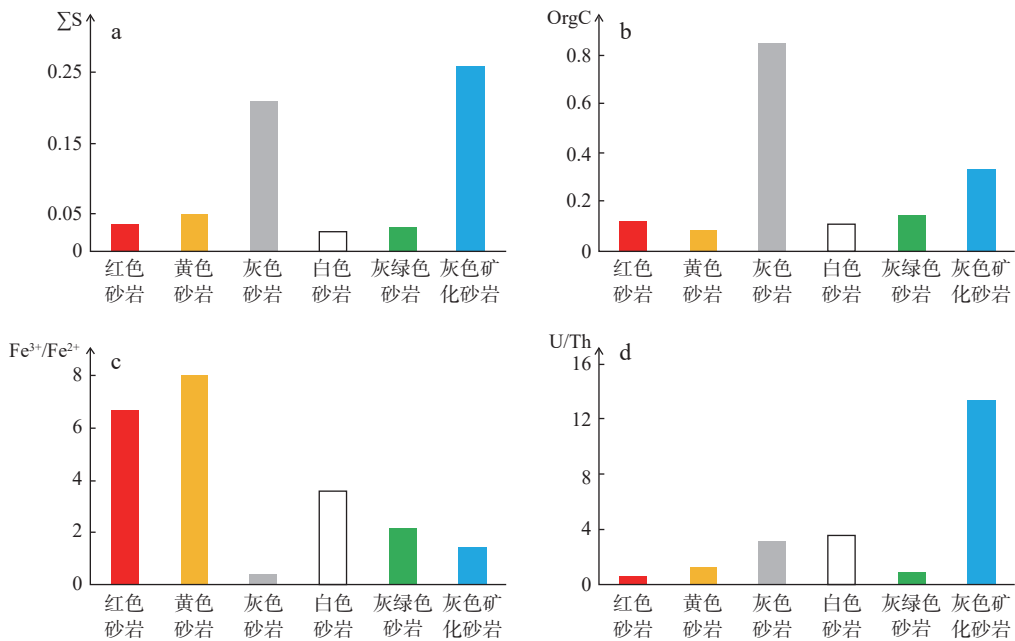


图9 各类砂岩的 ΣS 指标对比示意(a)、各类砂岩的 Orgc 指标对比示意(b)、各类砂岩的 Fe^{3+}/Fe^{2+} 指标对比示意(c)、各类砂岩的 U/Th 指标对比示意图(d)

Fig. 9 (a)Schematic comparison of ΣS metrics for various sandstones, (b) Schematic comparison of Orgc index of various sandston; (c) Schematic comparison of Fe^{3+}/Fe^{2+} indexes for various, (d) sandston Schematic comparison of U/Th index for various sandston

沉积岩中有机质作为还原剂,是影响碎屑岩颜色的因素之一。研究区红色砂岩中有机碳(Orgc)含量比黄色氧化的要高,进一步说明红色砂岩总体是沉积成岩环境中的产物,而黄色砂岩是后生作用氧化的结果。

Fe^{3+}/Fe^{2+} 的值可以反映砂岩所受到的氧化作用或还原作用。红色砂岩与黄色砂岩 Fe^{3+}/Fe^{2+} 数值大(表 5,图 9c),反映了氧化作用的存在;而白色、灰绿色、灰色(矿化)砂岩的数值小,说明它们的形成是受还原作用的结果。

通过对比不同类型砂岩 U/Th 值大小,反映不同类型砂岩中铀元素在成矿过程中特点。矿化砂岩中 U/Th 最高,说明铀的成矿作用,铀元素得到富集;红色砂岩与黄色砂岩 U/Th 值小,说明可能铀元素发生迁移作用,即提供一定量的铀源参与铀成矿过程;白色砂岩 U/Th 相对较高,说明油气在漂白砂岩的过程中与含铀地表氧化水发生氧化还原作用,使白色砂岩中铀得到一定程度的富集,但白色砂岩分布极为有限,说明油气作用范围有限、程度极弱,对铀成矿所起作用是有、但贡献较小(图 9d)。

各蚀变稀土元素配分曲线基本一致(图 10),为轻稀土富集的右倾型,说明物质来源于上地壳,形成于同一的外生环境中。白色蚀变总稀土略低于其他类型砂岩样品,而稀土元素一般被认为是不活动元素。对比各类砂岩的成因,白色砂岩受还原性流体作用,即油气漂白形成,其稀土含量有所亏损,推测是由于略受到深部来源的油气作用的影响导致。这在受油气作用明显的东胜铀矿和钱家店铀矿的这种特征已经得到验证(吴柏林等, 2022; 王苗, 2022)。

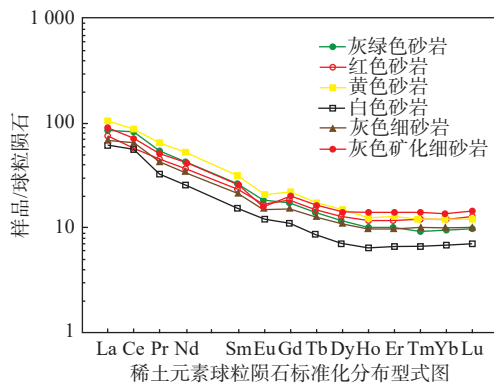


图10 稀土元素配分曲线图(据 Taylor et al., 1985)

Fig. 10 Rare earth element distribution curve

总之,氧化蚀变(黄色、红色蚀变) Fe_2O_3 含量高, Th/U 值大,说明氧化过程中砂岩提供了铀源;而还原性蚀变(白色、绿色) Fe_2O_3 含量低,说明还原环境形成的特征,其 Th/U 值小,说明还原蚀变形成过程中铀得到了一定程度的富集,白色蚀变砂岩可能受到一定深部流体作用的影响,导致稀土含量略有亏损。然从分布范围来看,绿色砂岩偶然可见,白色砂岩局部可见,说明研究区油气还原作用可见,但程度极弱。

3.3 部分常量和微量元素指示的信息

3.3.1 Ca 元素含量

在红色砂岩中, CaO 含量偏大,即某些层位出现

高 CaO 含量;而在灰色砂岩和黄色砂岩中,则 Ca 元素含量低。而已有研究成果表明, CaO 并不是主要来源于陆源碎屑,而可能为沉积时或成岩作用早期形成的自生矿物;在碎屑岩沉积为相对干旱的气候条件下,碱金属离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等会因强烈地蒸发作用发生化学沉淀。因此,红色砂岩是成岩作用下的产物。而灰色砂岩和黄色砂岩其可能形成于温暖潮湿气候条件下,沉积水体中氧化还原界面相对较高,底层水溶解氧含量相对较低, CaO 含量变化小(图 11)。而 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 、U、Orgc 等方面与前述特征相同。

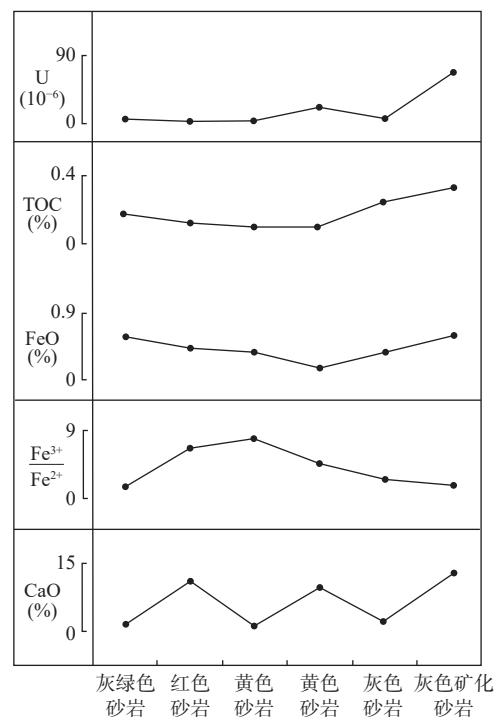


图11 砂岩蚀变类型与部分元素地球化学指标比值变化曲线图示

Fig. 11 Graphical representation of the variation in the ratio of sandstone alteration type to some elemental geochemical indicators

3.3.2 氧化还原敏感元素的含量或比值变化

这些数据是现代或古代沉积环境中最广泛使用的氧化还原条件指标之一。其应用原理是,氧化还原敏感元素大多数具有多种价态,在还原条件下存在的低价态更容易发生有机酸络合作用或形成难溶的金属硫化物、或沉淀为不溶的氢氧化物等。但由于砂岩中氧化还原敏感元素的含量部分来自物源区陆源碎屑输入,为了消除陆源碎屑的影响,对元素进行 Al 标准化,标准化后的数据就可以较好反映其形成时环境特征(图 12)。因为碎屑岩中 Al 元素主要来源于物源

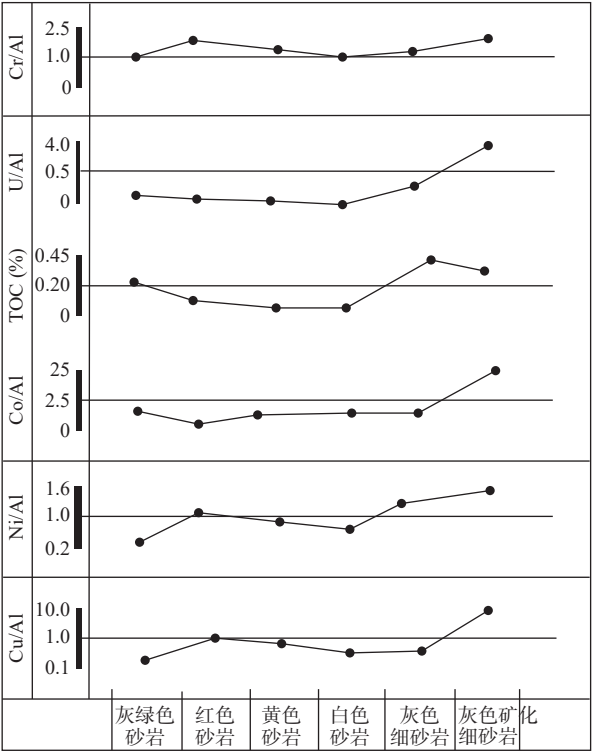


图12 砂岩蚀变类型与部分微量元素地球化学指标比值变化曲线图示

Fig. 12 Graphical representation of the variation in the ratio of sandstone alteration type to some trace element geochemical indicators

区母岩,在沉积过程中不会因环境改变而发生富集或亏损,且在后期成岩作用过程中也不会发生迁移,其含量主要取决于陆源碎屑的输入量,因此,可以用某元素与 Al 之间的相关性来判断该元素是否主要来源

于物源碎屑的输入。
红色砂岩中 Cu/Al、Ni/Al 和 Cd/Al 高于灰色砂岩和黄色砂岩(表 6,图 12),红色砂岩主要来源于物源碎屑的输入,环境的氧化程度要高于灰色和黄色砂岩。灰色啥样成岩时期为整体干旱氧化环境,黄色砂岩形成于后生流体作用的层间氧化改造环境。

3.4 蚀变流体物理化学性质的指示

采用均一法测温,实验测得流体捕获时的均一温度和冰点温度及盐度结果(表 3,图 13a)。砂岩的次生包裹体均一温度分布范围较宽,为 81.6~163.4℃。根据温度区与砂岩类型可以分为 3 种情况:①黄色氧化样品中的测温,平均结果为 135.35℃,属于低温环境;②矿化、白色蚀变和红色氧化样品,数据较为接近,平均约为 114.10~119.34℃,也属于低温环境;③还原带的灰色砂岩,数据为 81.60℃,已接近常温的环境,即该类矿化确为地下水作用的层间氧化带型矿床,温度不高,为常温或低温。氧化作用期间温度最高,有利于铀源从地层中充分地带出,利于成矿。此外,同属氧化作用,黄色蚀变作用温度高,达 150℃左右,而红色氧化作用温度范围较低,约 114℃,说明两者形成环境不同。前者为成矿的层间氧化作用,与成矿作用关系密切;后者为成岩作用的氧化作用,与成矿关系不大。

层间氧化带型铀矿床的含铀含氧流体为地表低温流体,只有受到后期的热流体作用的叠加改造,才可能出现上述较高的温度特征。按成矿热液的划分标准(≥350℃为高温,150~250℃为中温,≤150℃

表 6 蚀变岩石的微量元素分析数据

Tab. 6 Trace element analytical data for altered rocks

样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	
灰绿色岩 S2022-6	14.7	2.07	6.23	36.6	24.5	43.7	14.2	8.35	27.2	13.7	0.68	92.9	336	16.8	229	8.28	2.68	720	5.52	0.8	17.7	3.25	3.25	
红色砂岩 S2022-9	31.2	1.47	11.2	85.9	46.6	13.9	25.9	25.9	64	13.6	0.86	58.9	336	19.8	119	7.24	4.18	496	3.14	0.48	13	1.88	1.88	
黄色砂岩 S2022-31	21.7	2	8.4	54.7	40.2	33.1	19.3	22.1	45.4	14.3	0.84	95.7	274	21.1	229	9.94	3.8	653	5.59	0.86	19.5	2.00	2.00	
白色砂岩 S2022-42	12	1.03	4.03	20.7	16.5	32.6	9.42	10.2	19.8	8.52	0.44	78.8	200	11.3	78.6	3.69	2.33	627	1.94	0.4	16.2	0.81	0.81	
灰色细砂岩	S2022-12	36.3	1.62	12.6	81.5	57.5	18.3	29.7	44.1	69.6	15	0.83	63	351	24.6	183	9.49	4.24	349	4.71	0.66	12.2	3.00	3.00
	S2022-35	9.47	1.17	2.29	16.4	7.36	67.9	7.17	4.57	12.2	9.12	0.54	89.2	228	9.6	80.9	4.12	1.69	800	1.98	0.62	13.7	9.26	9.26
	平均	22.8	1.395	7.445	48.95	32.43	43.1	18.43	24.33	40.9	12.06	0.685	76.1	289.5	17.1	131.9	6.805	2.965	574.5	3.345	0.64	12.95	6.13	6.13
	S2022-43	14.8	1.36	5.26	36.9	34.2	410	27.5	299	211	10.1	0.62	64.5	328	24.3	148	6.24	2.03	558	3.69	4.35	15.6	69.2	69.2
灰色矿化细砂岩	S2022-44	14.4	1.26	5.12	38.4	60.5	799	40.2	103	107	9.3	0.61	60	340	26	146	4.65	1.76	502	3.57	4.28	14.5	76.1	76.1
	S2022-44r	13.6	1.21	4.88	35.6	47.4	770	38.2	97.9	92.1	8.85	0.58	58.3	326	25.1	131	6.18	1.91	476	3.28	6.19	14.8	72.2	72.2
	平均	14.3	1.3	5.1	37.0	47.4	659.7	35.3	166.6	136.7	9.4	0.6	60.9	331.3	25.1	141.7	5.7	1.9	512.0	3.5	4.9	15.0	72.5	72.5

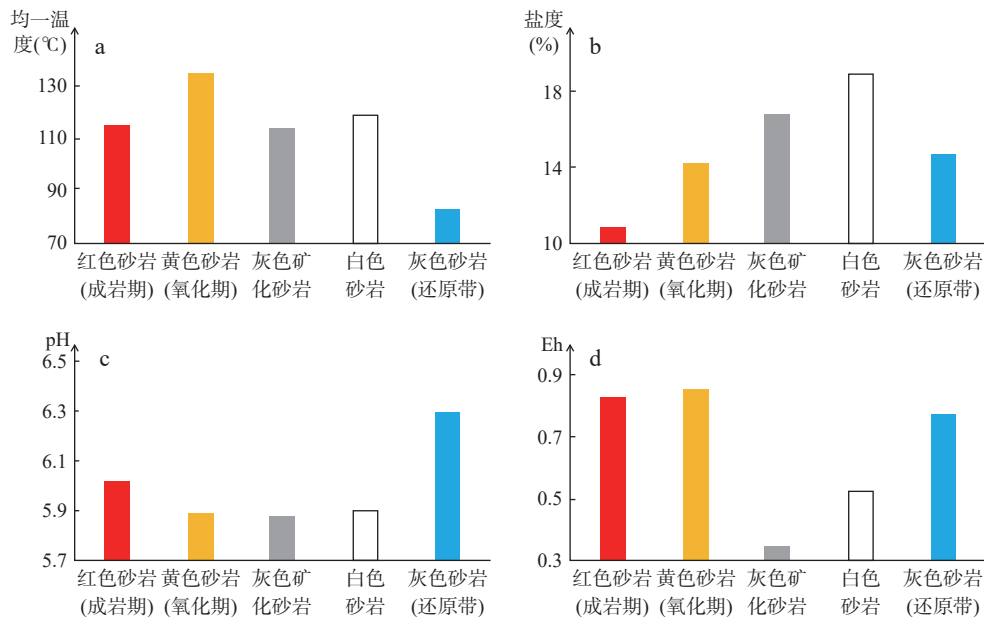


图13 各类砂岩形成时的均一温度对比(a)、各类砂岩形成时的均一盐度对比(b)、各类砂岩形成时的 pH 值对比(c)、各类砂岩形成时的 Eh 值对比(d)

Fig. 13 (a) Comparison of homogeneous temperatures at formation of various sandstones, (b) Comparison of homogeneous salinity at the formation of various sandstones, (c) Comparison of Ph values at the formation of various sandstones, (d) Comparison of Eh values for various types of various sandstones

为低温), 可将含矿层流体作用分为二期: 一期是小于 100 °C 的常-低温流体, 另一期为 100~150 °C 的低温流体。黄色层间氧化作用这类蚀变控制铀矿床的形成。

层间氧化、油气漂白及矿化作用时期 pH 值明显更低(图 13c、图 13d), 酸性程度高; 而还原带及成岩作用时期 pH 值酸性程度要小一些。白色化是高岭石的形成时期, 自然酸性程度更低。成矿期及白色化时期 Eh 值明显更小(图 13d), 说明更强的还原环境, 证明了白色化不是弱氧化作用而是还原作用, 且与铀矿化有一定的关系。

综合上述特征, 可以认为从红色氧化(成岩期)→黄色层间氧化作用→矿化→白色化→正常还原带, 各蚀变形成的 Ph-Eh 环境变化过程依次为弱酸性氧化→酸性氧化→弱酸还原→酸性弱还原→弱酸性还原的流体环境性质的变化特点。

4 成矿条件和找矿前景分析

4.1 新近系昌吉河群层间氧化带控矿特征

4.1.1 控矿层间氧化带的纵向分布

工区汉水泉地区基底及蚀源区主要由泥盆系(D)、石炭系(C)构成, 盖层由侏罗系(J)、新近系(R)及第

四系(Q)构成。侵入岩体主要为华力西中期的辉绿岩、辉长岩及霏细斑岩。古生界仅在盆地南北缘出露(刘惠华, 2014; 司学强等, 2015)。

侏罗系主要为中侏罗统西山窑组及头屯河组, 出露于盆地南缘。西山窑组(J_{2x})为黄褐、灰绿、暗黄色长石岩屑砂岩夹砂质泥岩、含砾粗砂岩及煤层。头屯河组(J_{2t})在汉水泉一带多被剥蚀, 仅在局部井中可见, 如 ZK112-5。

新近系(R)在汉水泉地区揭露仅为上新近系昌吉河群(N_1ch), 分布范围大大超过下新近系, 岩层呈近水平或微倾斜($5^\circ \sim 10^\circ$)。总体为一套红层夹局部灰色层。沉积厚度为 100~280 m。其岩性上部为红色、褐红色泥岩、含砾泥岩、泥质砂岩夹石膏; 下部为黄色、灰色、灰白色石英长石砂岩、砂砾岩夹粉砂岩、泥岩薄层。沉积厚度为 100~280 m。汉水泉地区出露的仅为该群的上部, 岩性为黄、褐黄、褐红色、浅褐色泥质粉砂岩、泥岩及砂岩、含砾砂岩、砾岩等, 泥岩及砂岩中偶夹石膏层。不整合于中—上石炭统哈尔加乌组和中侏罗统西山窑组之上, 其上又为第四系所覆盖。

三塘湖盆地汉水泉地区砂岩型铀矿找矿的目的层位为中新统昌吉河群(N_1ch), 而探索层位为中侏罗统西山窑组(J_{2x})。西山窑组为一套灰色层位, 砂体好,

还原容量相对其他大,是下一步找矿的潜力层位。

从钻井资料分析,中新统昌吉河群(N_1ch)砂体可以分上下两部分,上部砂体为辫状河三角洲沉积特征,下部砂体为辫状河沉积。均发现有层间氧化带及铀异常,总体为一套红层夹局部灰色层并在其中发育黄色层间氧化带。但铀矿化发育较好主要是在中下部的砂体中。工区范围内出露的地层多为昌吉河群(N_1ch)上部及中部的砂体。

4.1.2 层间氧化带的横向分布

从上面各蚀变的地球化学性质来看,红色蚀变砂岩为沉积成岩期氧化的产物;而黄色蚀变为后生氧化的产物,形成层间氧化带,与研究区矿化关系最为密切。白色砂岩为后期油气还原改造的还原性蚀变,使铀矿化也有一定程度的富集,但作用程度弱、分布极为局限。而灰色砂岩是还原带,矿化则赋存在黄色砂岩与灰色砂岩渐变的氧化-还原过渡带上。层间氧化带前锋线在汉水泉南部大致呈近北西向展布,前锋线距南部蚀源区约为10~25 km,氧化带长度约为10 km。层间氧化带顶板埋深为190~220 m,底板埋深为265~290 m。

黄色砂岩与灰色砂岩界限处产铀矿化,黄色砂岩为控矿的层间氧化带,也为找矿标志。而大量的红色砂岩夹局部的灰色砂岩为还原带,为原生沉积的产物,红色砂岩并不控矿。

4.1.3 水文及构造特征因素

矿区存在地下水排泄源-汉水泉逆冲断裂带(汗井断裂带),对成矿有利,矿化沿汉水泉断裂南部的边防公路一带分布。该断裂西起乌通苏依泉,经汉水泉、刘家井子向东延伸至鸭子泉一带,总体呈NW走向,倾向NE,倾角为50°~70°,呈上陡下缓的铲式,长约为240

km,地表被第四系覆盖。在地表呈线状构造,两侧均分布有树丛砂丘带、泉和泥火山(金和海等,2003;黄大友等,2012)。断裂北面出露零散的古生代地层,以南为洼地,基底埋深达3 km。该断裂带包括了老爷庙断裂、汉水泉南断裂、刘家井子断裂、兔子滩北断裂等(图1),控制了盆地内中生界的残留范围。局部地区断层上盘的石炭系基底逆冲于下盘的中新生代地层之上,垂直断距大于1500 m。形成于华力西期,至印支期—燕山早期在南北压扭作用下复活,接受新生代的沉积。

汉水泉地区在空间上可划分为补给区、径流区、排泄区三大水平分带。盆地两侧的基岩山区是盆地地下水的主要补给来源。区内周边高,中间低,汉水泉地势最低(图14),海拔由1000 m降为500 m。根据地下水补给条件,地下水主要自南北山前向中部汉水泉、刘家井子一带径流汇集。排泄区在汉水泉、刘家井子一带,地下水的排泄方式主要通过汗井断裂带,以上升泉的形式溢出,在地表表现为草丛沙丘。野外踏勘汉水泉地下水径流区与排泄区具明显分界线(戈壁与绿植界限)。东侧绿植区即排泄区,西侧戈壁即径流区,中间以汗井断裂带为界限,铀矿化应沿该断裂带附近分布。绿植区域内可见径流蒸发后留下盐迹(排泄区)(图15)。

4.1.4 油气还原剂的提供程度

三塘湖盆地油气勘探始于1993年,经过长期的石油勘探,在盆地内5个油田、2个含油气构造,分布于马朗凹陷和条湖凹陷,油气资源较为丰富。马朗凹陷以寻找二叠世为油源的自生自储原生油藏和古生新储的次生油藏为主;条湖凹陷以寻找侏罗系为油源的自生自储油藏为主。二叠纪芦草沟组是三塘湖盆地主要的生油层,自身发育良好的碳酸盐岩,是盆地

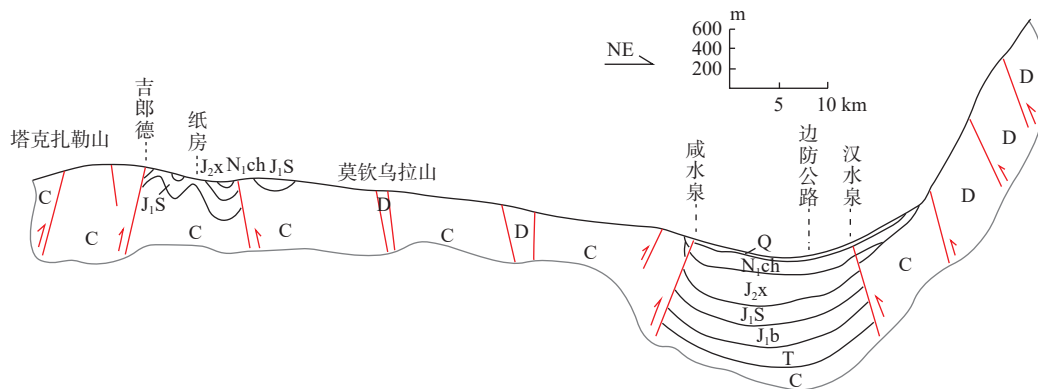


图14 汉水泉-纸房地区 NE 向构造剖面略图(据唐湘飞等, 2009 修改)

Fig. 14 Sketch of the north-east tectonic section in the Hanshuiquan-Paperhouse area



图15 排泄区蒸发后留下盐迹现象

Fig. 15 The phenomenon of salt trails after evaporation from excretory areas

内优质储集岩层,但受晚华力西运动影响遭受抬升剥蚀,目前仅在马朗凹陷和条湖凹陷可见(刘延莉等,2004;朱玉双等,2009)。

结合盆地内的断裂构造发育特征来看(图1、图2、图14),断裂构造延伸到J、K底层逐渐消失,但贯穿中新世代盖层断裂较为局限,因此油气中含有的大量还原性气体(CH_4 等)(洪涛,2018),对新生代地层耗散有限,对新近系昌吉河群(N_1ch)作用程度弱,也是该区铀成矿前景受到影响的一个重要因素。

根据原位S同位素测试结果数据,制作矿区矿石中微区原位黄铁矿硫同位素分布图(表7,图16),硫同位素正值多说明受到深源的油气热液作用硫源的影响较大,从数据说明研究区成矿与深源的含油气热液作用关系较小,油气提供还原剂程度较弱。硫同位素负值大指示微生物的作用,多为受到浅部沉积作用

流体系统的影响。该硫同位素特征与伊犁盆地南部铀矿的特征极为相似,即矿床形成主要是受到浅部地下水作用影响,成因上主要为层间氧化带型铀矿(吴柏林,2005)。因此,三塘湖盆地汉水泉地区铀矿床受到油气作用影响较弱,成因上主要为层间氧化带型铀矿。

4.2 找矿前景分析

三塘湖盆地汉水泉地区目前找到层间氧化带型铀矿化点或发现较好的显示已是事实,无论从构造准则、地形地貌及气候准则、铀源准则、渗入型自流水盆地准则、还是岩性岩相及后生蚀变条件等,都具备一定的成矿条件。但事实是目前虽有发现,但却未找到具相当规模的矿床。通过本次工作已经确认存在合适的铀成矿条件,但是欲具备较大规模的找矿潜力,仍存在一些不足的因素。

研究区的含矿层位是昌吉河群,但这套地层不是含煤地层,且钻孔揭露的层间灰色砂岩中炭化植物碎屑含量较少(王盛鹏,2013;孙丽雯,2018)。对于典型的层间氧化带控矿的砂岩铀矿,依靠地层自身内部还原剂需要较长的成矿时间;当有外源性还原介质如油气,参与铀成矿过程时,可以缩短成矿时间。虽然三塘湖盆地内含有良好的油气资源,但发育切穿新生代盖层、如昌吉河群地层的断裂不明显,这为油气运移参与铀成矿的不足条件。

通过钻井岩心的观察,发现研究区中白色蚀变、绿色等还原性蚀变发育程度较弱,且分布极为零星和局部,说明油气作用不强。从硫同位素反映的矿床成因来看,矿化成因为浅表层的地下水作用的层间氧化

表7 黄铁矿微区原位S同位素测试结果

Tab. 7 Results of in situ S isotope testing of pyrite microzonation

样品号	$^{33/32}\text{S}$	$^{34/32}\text{S}$	$\delta^{33}\text{S}_{\text{ref}}$	$\delta^{33}\text{S}_{\text{V-CDT}}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{ref}}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$	2SE
s2022-44-4-4	0.008 161	0.046 671	-23.86	-23.01	-44.87	-43.25	0.24
s2022-44-4-5	0.008 172	0.046 665	-23.05	-22.20	-45.08	-43.46	0.23
s2022-44-4-6	0.008 143	0.046 422	-25.94	-25.09	-49.96	-48.35	0.26
s2022-44-4-7	0.008 127	0.046 428	-27.85	-27.00	-49.84	-48.22	0.24
s2022-44-4-8	0.008 166	0.046 674	-23.77	-22.92	-44.90	-43.28	0.21
平均	0.008 154	0.046 572	-24.89	-24.04	-46.93	-45.31	0.23
s2022-46-1	0.008 141	0.044 784	-28.86	-28.01	-83.44	-81.88	402.82
s2022-46-2	0.009 055	0.049 971	82.55	83.50	22.57	24.31	39.46
s2022-46-3	0.008 235	0.047 278	-17.61	-16.75	-32.41	-30.76	0.80
平均	0.008 477	0.047 344	12.027 6	12.913 63	31.090 1	29.443	147.694 52

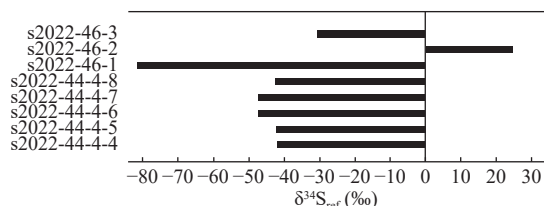


图16 矿区矿石中微区原位黄铁矿硫同位素对比

Fig. 16 Comparison of sulphur isotopes of microzonally in situ pyrite in mine ores

作用,深源低温含油气流体作用程度较弱,油气对铀成矿作用有限,一定程度上影响铀成矿的前景。

砂体还原剂不足,在后期较强的地下水径流条件下,层间氧化带前锋线向灰色还原带的推进将非常迅速,地下水中的铀将因为砂体的低还原容量而难以大量富集从而降低铀矿化品位。目前昌吉河群层间氧化作用已将该地层南部大面积还原砂岩氧化完全,层间氧化带前锋线已自南向北、自西向东推进至局部排泄源汉水泉一带,这势必制约层间氧化带前锋线的延伸长度及其含矿性。

目前已揭露到铀矿化的钻孔,矿化砂岩却都很薄,厚度未超过1 m,品位也不太高,从而导致平方米铀量偏低。再者,同一套砂体层间氧化发育的多层性,也是不利因素之一,导致铀的富集有所分散。已发现层间氧化带向北发育被泥岩夹层分成三层,这种多层性使铀的富集在各层中均有发育,减小了铀集中富集的可能性,也导致矿层较薄的现象。

5 结论

(1)区分了本区氧化蚀变和还原蚀变的类型及其作用性质和程度。研究区主要的氧化蚀变表现为早期的黄色和红色砂岩,还原蚀变的类型有铀矿化和伴生的黄铁矿化以及少量白色砂岩和灰绿色砂岩蚀变。氧化蚀变性质为酸性氧化环境;白色与灰绿色蚀变为酸性还原、弱碱性还原;铀矿化形成于(弱酸-弱碱)-还原性环境。白色砂岩和灰绿色砂岩分布极为局限,说明油气作用影响存在但作用程度却较小。

(2)从蚀变的部分特征地球化学指标、对氧化一还原敏感的元素特征等确定了红色砂岩形成于干旱沉积成岩作用环境,黄色蚀变为后生氧化作用形成且控矿的成因特点,黄色蚀变才是本区的层间氧化带而非红色砂岩,找矿应追踪黄色砂岩与灰色砂岩的界限。

(3)明确了本区成矿作用的前景及主要影响因素。研究区含矿层中新统昌吉河群发现多层黄色蚀变类型层间氧化带,矿床成因是层间氧化带型铀矿;从本区构造、地形地貌及气候演变、自流水盆地、岩性岩相及后生蚀变条件等准则分析,认为昌吉河群虽具备一定的铀成矿条件,但由于受到油气作用影响程度偏弱、地层中还原剂容量有所不足,对成矿前景产生一定程度的不利影响。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 白铭,张静,李续续,等.新疆巴里坤三塘湖盆地地下水赋存分布特征[J].新疆地质,2015,33(2):270-274.
- BAI Ming, ZHANG Jing, LI Xuxu, et al. Distribution Characteristic of Ground water Storage in Santanghu Basin of Balikun County, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2015, 33(2): 270-274.
- 白志民,段力,王宇.新疆三塘湖盆地铀成矿条件及远景的分析[J].科技信息,2009,(19):759+746.
- BAI Zhiming, DUAN Li, WANG Yu. Analysis of uranium metallogenetic conditions and prospect in Santanghu basin, Xinjiang [J]. Scenice Technology Information, 2009, (19): 759+746.
- 唐湘飞,周宏伟,孙鹏飞,等.新疆三塘湖盆地砂岩型铀成矿前景及新区找矿思路[J].新疆地质,2009,27(1):75-79.
- TANG Xiangfei, ZHOU Hongwei, SUN Pengfei, et al. The analysis of uranium minerlization prospects of Santanghu Basin In XinJiang and the discuss of new ideain new areas[J]. Xinjiang Geology, 2009, 27(1): 75-79.
- 韩芳芳,师德扬.新疆三塘湖盆地汉水泉—库木苏地下水赋存条件分析[J].西部探矿工程,2018,30(2):97-99.
- HAN Fangfang, SHI Deyang. Occurrence Condition of the Ground-water in Hanshuiquan-Kumusu Area of Santanghu Basin in Xinjiang[J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(2): 97-99.
- 洪涛.三塘湖盆地层间氧化带砂岩型铀矿成矿条件[J].四川地质学报,2018,38(3):441-444.
- HONG Tao. Metallogenetic Conditions of Interlayer Oxidation Zone Sandstone Type Uranium Deposit in the Santanghu Basin[J]. Acta Geologica Sichuan, 2018, 38(3): 441-444.
- 黄大友,徐伟,陈玉梁,等.新疆三塘湖盆地水文地质条件及铀成矿前景分析[J].铀矿地质,2012,28(4):227-232.
- HUANG Dayou, CHEN Wei, CHEN Yuliang, et al. Analysis on the

- hydrogeological condition and uranium mineralization prospect in Santanghu Basin, Xinjiang[J]. Uranium Geology, 2012, 28(4): 227-232.
- 金和海. 新疆三塘湖盆地盖层特征及层间氧化带砂岩型铀矿成矿远景分析[J]. 铀矿地质, 2003, 17(2): 88-93+118.
- JIN Hehai. Characteristics of cover rocks and analysis on uranium metallogenic prospect in Santanghu basin Xinjiang Autonomous Region[J]. Uranium Geology, 2003, 17(2): 88-93+118.
- 刘延莉, 柳益群. 三塘湖盆地二叠纪芦草沟组分布及其意义[J]. 西北地质, 2004, 37(2): 36-41.
- LIU Yanli, LIU Yiqun. The distribution and significance of Lucaogou Formation of Permian in Santanghu basin[J]. Northwestern Geology, 2004, 37(2): 36-41.
- 刘学锋, 张或丹, 袁誉琴. 三塘湖盆地北西向构造变形带的正演[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 1998(1): 15-18+3.
- LIU Xuefeng, ZHANG Huodan, YUAN Yuqin. Discussion on the Exploration of Coalbed Gas in Xinjiang[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 1998(1): 15-18+3.
- 刘惠华. 三塘湖盆地地貌对形成层间氧化带砂岩型铀矿的作用[J]. 西部探矿工程, 2014, 26(8): 137-140.
- LIU Huihua. Effect of geomorphology on the formation of interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits in Santanghu Basin[J]. West-China Exploration Engineering, 2014, 26(8): 137-140.
- 鲁海鸥, 袁炳强, 李玉宏, 等. 三塘湖盆地断裂构造特征[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(3): 293-296.
- LU Haiou, YAN Bingqiang, LI Yuhong, et al. Characteristics of Fault Structures in Santanghu Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(3): 293-296.
- 欧阳征健, 周鼎武, 冯娟萍, 等. 三塘湖盆地中央拗陷南缘构造特征与油气勘探[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2006, 36(2): 285-289.
- OU Yangzhengjian, ZHOU Dingwu, FENG Juanping, et al. Tectonic features and prospecting for oil and gas in the south of center geotectogeny in Santanghu Basin[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2006, 36(2): 285-289.
- 司学强, 郭沫贞, 杨志力, 等. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷侏罗系西山窑组沉积特征及沉积模式[J]. 古地理学报, 2015, 17(4): 553-564.
- SI Xueqiang, GUO Mozhen, YANG Zhili, et al. Sedimentary characteristics and models of the Jurassic Xishanyao Formation in Malang Depression, Santanghu Basin Xinjian[J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17(4): 553-564.
- 孙自明, 熊保贤, 李永林, 等. 三塘湖盆地构造特征与有利勘探方向[J]. 石油实验地质, 2001, 23(1): 23-26+37.
- SUN Ziming, XIONG Baoxian, LI Yonglin, et al. Tectonic features and favourable exploration directions in the Santanghu Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(1): 23-26+37.
- 孙丽雯. 三塘湖盆地牛圈湖地区西山窑组西二段储层微观孔隙结构研究及定量评价[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- SUN Liwen. Study on micropore structure and quantitative evaluation of NiuJuanHu Oil Field in SanTangHu Basin. [D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- 汪双双. 新疆三塘湖地区中二叠世岩浆活动与成盆动力学背景示踪[D]. 西安: 西北大学, 2013.
- WANG Shuangshuang. Mid-Permian magmatic activities and dynamic background for basin forming in Santanghu Area of XinJiang[D]. Xi'an: Northwest University, 2013.
- 王苗. 松辽盆地钱家店铀矿成矿热流体作用研究[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- WANG Miao. Study on metallogenic hydrothermal process of Qianjiadian uranium deposit in the Songliao Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- 王盛鹏. 三塘湖盆地致密油地质评价及有利探区[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.
- WANG Shengpeng. The geological evaluation and prospective exploration of dense oil in Santanghu Basin[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2013.
- 吴柏林, 刘池洋, 杨松林, 等. 沉积盆地有机矿产(油-气-煤)对铀成矿的作用机理及进展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(6): 1044-1065.
- WU Bailin, LIU Chiyang, YANG Songlin, et al. Mechanistic and progress of uranium mineralization by organic minerals (oil, gas and coal) in sedimentary basins[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2022, 52(6): 1044-1065.
- 吴柏林. 中国西北地区中生代盆地砂岩型铀矿地质与成矿作用[D]. 西安: 西北大学, 2005.
- WU Bailin. Geology and Mineralization of Sandstone-type Uranium Deposits in Mesozoic-Cenozoic Basins of Northwest China [D]. Xi'an: Northwest University, 2005.
- 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.
- ZHANG Jindai. Innovation add development of metallogenic theory for sandstone type uranium deposit in China[J]. Uranium Geology, 2016, 32(6): 321-332.
- 张金带. 中国北方中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.
- ZHANG Jindai. Progress and outlook of Uranium exploration in Meso-Cenozoic Basin in North China[J]. Uranium Geology, 2012, 28(4): 193-198.
- 赵泽辉, 郭召杰, 张臣, 等. 新疆东部三塘湖盆地构造演化及其石油地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2003, 39(2): 219-228.
- ZHAO Zehui, GUO Zhaojie, ZHANG Chen, et al. Tectonic Evolution of the Santanghu Basin, East Xinjiang and Its Implication for the Hydrocarbon Accumulation[J]. Acta Scientiarum Nat-

- uralium Universitatis Pekinensis, 2003,39(2): 219–228.
- 赵宝光,尹海生,何发扬,等.三塘湖盆地基底特征对砂岩型铀矿成矿条件的影响[J].世界核地质科学,2004,21(4): 187–192.
- ZHAO Baoguang, YI Haisheng, HE Fayang, et al. Basement feature of Santanghu Basin and its effect on metallogenetic conditions for sandstone-type uranium deposits[J]. World Nuclear Geoscience, 2004, 21(4): 187–192.
- 赵宝光,何发扬,陈志国,等.三塘湖盆地基底特征及砂岩型铀矿成矿的铀源条件分析[J].铀矿地质,2004,20(4): 225–229+244.
- ZHAO Baoguang, HE Fayang, CHEN Zhiguo, et al. Geological Features of Basement of the Santanghu Basin Xinjiang and Uranium Sources of Sandstone-type Uranium Deposit in the Basin[J]. Uranium Geology, 2004, 20(4): 225–229+244.
- 郑国栋,罗强,黄国龙,等.新疆三塘湖盆地牛圈湖地区盖层特征及砂岩型铀成矿条件分析[J].西北地质,2022,55(2): 185–198.
- ZHEN Guodong, LUO Qiang, HUANG Guolong, et al. Characteristics of Cap Rocks and Metallogenic Condition Analysis of Sandstone-type Uranium in Niuquanhu Area, Santanghu Basin, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(2): 185–198.
- 朱伯生,冯建新,胡斌,等.对三塘湖盆地基底的认识[J].新疆石油地质,1997,18(3): 197–200+191.
- ZHU Baisheng, FENG Jianxin, HU bin, et al. An understanding of the basement of Santanghu Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1997, 18(3): 197–200+191.
- 朱玉双,柳益群,周鼎武.三塘湖盆地中二叠统芦草沟组白云岩成因[J].西北地质,2009,42(2): 95–99.
- ZHU Yushuang, LIU Yiqun, ZHOU Dingwu. Origin of Dolostone in Lucaogo Formation of Middle Permian in Santanghu Basin, 2009, 42(2): 95–99.
- Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[J]. 1985.

关于《西北地质》编辑部未与任何中介机构合作的郑重声明

为保障广大作者的合法权益,防范各类欺诈行为,《西北地质》编辑部就期刊出版事宜,郑重声明如下:

- 1.《西北地质》的组稿、收稿、审稿、录用及发表等全部出版流程,均由编辑部内部专职人员独立完成,从未与任何中介机构、代理公司或个人建立合作关系,也从未授权任何第三方机构/个人开展上述业务。
- 2.任何以《西北地质》编辑部“代发核心期刊”“包过审稿”“快速录用”等名义收取费用、承诺发表的机构或个人,其所有承诺及行为均属虚假消息,其行为与编辑部无任何关联,编辑部对其行为及后果不承担任何责任。
- 3.敬请广大作者提高警惕,投稿时务必通过期刊官方渠道(期刊官方网站)获取投稿信息、联系编辑人员,切勿轻信非官方渠道的中介信息,切勿向任何个人账户或非官方指定账户缴纳“中介费”“审稿费”“发表费”等费用,谨防上当受骗。
- 4.广大作者投稿可点击《西北地质》期刊官网: <https://xbdz.net.cn/>; 论文版面费是在定稿后通过编辑部邮箱(xbdzbjb@163.com)发送给作者,作者在支付时请注意查看邮箱地址或联系编辑部(电话:029-89238533)确认。
- 5.若发现有中介机构或个人冒用《西北地质》期刊名义开展欺诈活动,欢迎广大作者向《西北地质》编辑部(举报邮箱: xbdzbjb@163.com)举报,我们将保留依法追究其法律责任的权利。

特此声明!

《西北地质》编辑部
2026年05月18日