

准噶尔盆地西部车排子地区铀成矿水文地质条件

胡志伟, 毛广振

(核工业二一六大队, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 准噶尔盆地西部车排子地区已发现砂岩型铀矿点, 其中新近系沙湾组铀矿化分布较广。前人对该地区铀成矿潜力和找矿方向进行了研究, 但铀成矿条件尚不明确。砂岩型铀矿的形成是水-岩相互作用的结果, 研究铀成矿水文地质条件非常重要。笔者通过古水文地质演化分析铀成矿的水动力条件, 通过水化学组分分析地下水水文地球化学特征, 并通过铀矿勘探和石油资料分析岩石地球化学特征、砂体特征、沉积相特征、古层间氧化带的发育特征和油气改造作用, 揭示了沙湾组一段3个砂组的铀成矿水文地质条件和铀成矿有利地段。研究表明, 在扇三角洲前缘与辫状河三角洲前缘水下分流河道交汇处、断裂带两侧, 128团地段砂体厚度稳定、连通性好, 铀成矿作用持续时间长, 具有最有利于铀矿富集的水文地质条件; 塔盆口次之, 126团的铀成矿条件最弱。各砂组中, 以3砂组最好、1砂组次之, 2砂组较差。

关键词: 水文地质条件; 砂岩型铀矿; 沙湾组; 铀成矿; 车排子; 准噶尔盆地西部

中图分类号: TD12; P619.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8063(2024)02-0001-12

DOI: 10.13426/j.cnki.yky.2023.10.03

在准噶尔盆地西部车排子地区石油探井中发现了高自然伽马异常孔, 主要层位为沙湾组一段(N_1s^1), 分布在春风油田和春光油田, 部分高自然伽马值异常与油气分布存在一定关系^[1]。前人对区内沙湾组铀矿勘探前景、成矿潜力及找矿方向、砂岩型铀矿成矿远景、控矿因素等^[2-6]进行了论述。2022—2023年, 中国核工业地质局进行了钻探查证工作, 在沙湾组一段(N_1s^1)发现了铀工业矿孔、铀矿化孔及铀异常孔, 该区域找矿潜力较大。 N_1s^1 段和鄂尔多斯盆地东北部古层间氧化带中绿色蚀变砂岩的成因类似, 即灰绿色蚀变带是经过油气还原改造的古氧化带^[7-8]; 在区内克拉玛依市西南侧发现了克拉玛依铀矿点, 该矿点是油气掩盖的古层间氧化带砂岩型矿^{[9]55}。

砂岩型铀矿是由六价铀随地下水向盆地深部迁移过程中被还原为四价铀, 并吸附于砂岩孔隙中而聚集成矿^[10]。地下水循环为铀迁移提供动力, 氧化还原环境控制了六价铀和四价铀的转化过程及其发生的部位, 水动力和水化学协同作用控制着铀成矿的规模和位置^[11-12]。笔者根据车

排子地区的地下水水流场和水化学特征, 分析车排子地区砂岩型铀矿形成的水动力、水化学条件等, 结合铀矿勘探和石油资料, 探讨车排子地区的水文地质条件差异及其与铀成矿的关系。

1 区域地质背景

车排子位于准噶尔盆地西缘, 凸起呈倒置的不规则三角形, 东部为红车断裂带及四棵树凹陷等, 北部是扎伊尔山, 西南为四棵树凹陷, 南北长约100 km, 东西宽20~95 km。凸起主体呈北西南东至东西走向, 在西北部扎伊尔山前隆升最高, 向东南部隆升幅度逐渐降低。

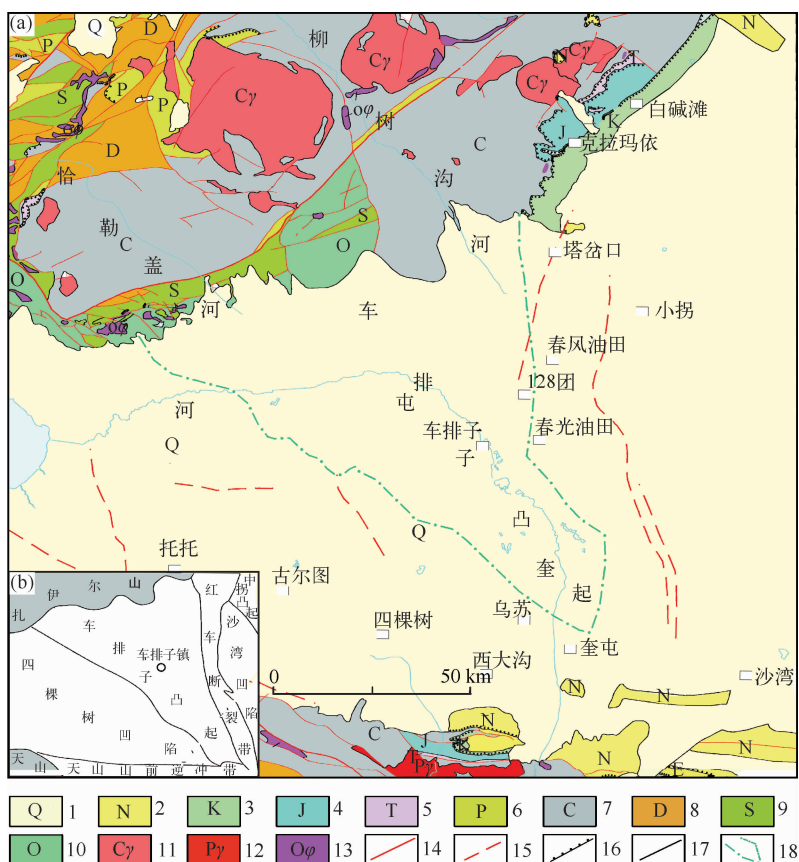
第四系广泛覆盖车排子地区, 从古至今依次为侏罗系、白垩系、古近系、新近系和第四系(图1)。钻孔内揭到的老地层多为石炭系。西北部扎伊尔山的庙尔沟、布尔克斯台、阿克巴斯套钾长花岗岩体, 活性铀浸出率为1.64%~3.59%, 平均铀浸出率为2.62%, 是准噶尔盆地周缘浸出率最高的岩体^{[9]122}。柳树沟河上流流经岩体, 河水中铀含量偏高, 是车排子地区铀异常主要区域。

收稿日期: 2023-10-14

基金项目: 中国核工业地质局地勘基金项目“新疆准噶尔盆地铀矿资源调查评价与勘查”(202206)。

第一作者简介: 胡志伟(1994—), 男, 辽宁朝阳人, 学士, 助理工程师, 主要从事铀成矿水文地质方面研究工作。

通信作者简介: 毛广振(1991—), 男, 山东东营人, 硕士, 工程师, 主要从事铀成矿地质方面研究工作。



1—第四系;2—新近系;3—白垩系;4—侏罗系;5—三叠系;6—二叠系;7—石炭系;8—泥盆系;9—志留系;10—奥陶系;11—石炭系斜长花岗岩;
12—二叠系花岗岩;13—奥陶系基性岩;14—断裂;15—隐伏断裂;16—不整合接触;17—整合接触;18—车排子凸起范围。

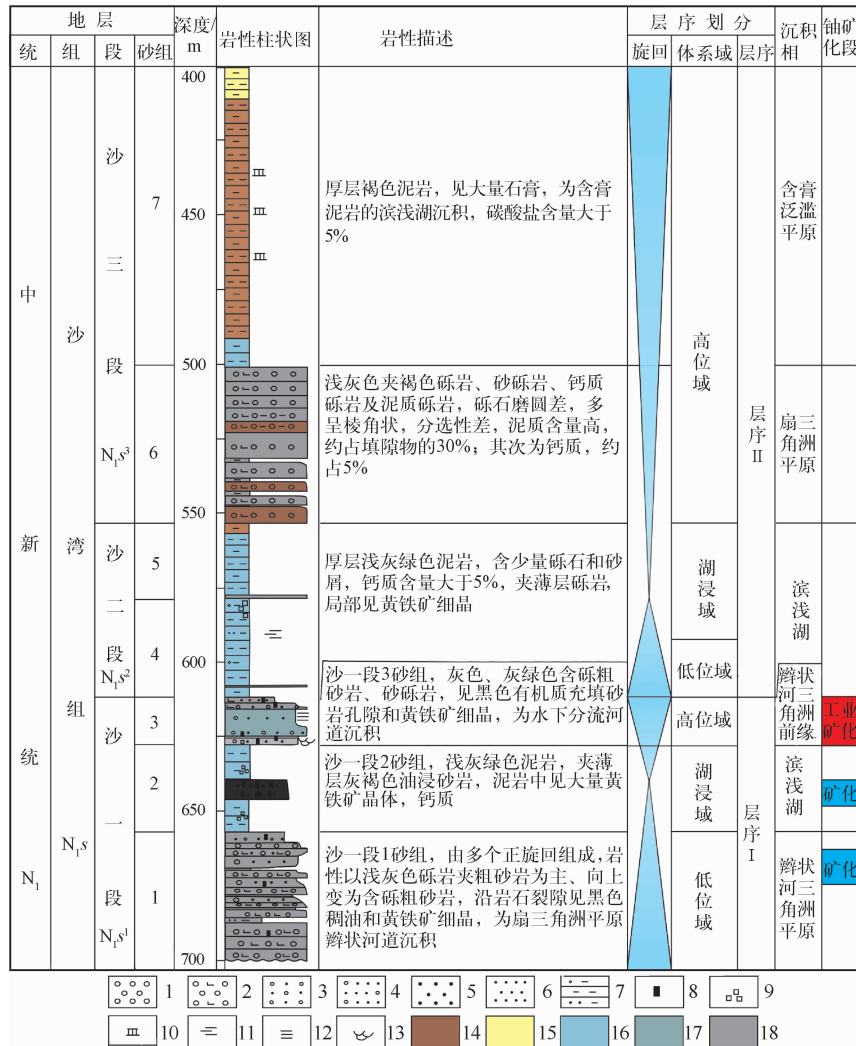
图1 准噶尔盆地西部区域地质图(a)和构造单元划分(b)

Fig. 1 Regional geological map (a) and division of tectonic units (b) in western Junggar Basin

2 古水文地质演化与铀成矿关系

在古近系沉积前,车排子凸起上经历了一期明显的挤压隆升活动,但强度较白垩系沉积前的构造抬升弱。车排子地区多期隆升与不整合面的发育,对铀成矿有利。但目的层沙湾组(N_1s)在沉积期前大规模的隆升导致目的层长时间埋藏较浅;后期在喜山运动应力作用下,北部抬升剥蚀出露地表为含氧含铀水补给开启窗口,且北高南低的地势条件,有利于发育层间渗入氧化作用。在新近纪—第四纪压扭掀斜的快速沉降阶段^[13],新近系从南向北广泛超覆。塔西河期以来,北部掀斜逐渐加强,东北部地段塔西河组(N_1t)与下伏被剥蚀的沙湾组(N_1s)呈不整合接触,盆地内部构造运动的差异造就了不同含水层结构和水动力条件,导致铀矿化分布不均匀。

车排子地区主要含水系统可分为上部新近系独山子组(N_2d)、第四系(Q)孔隙含水系统和下部新近系沙湾组(N_1s)孔隙含水系统。上部、下部含水系统被新近系塔西河组(N_1t)隔开,塔西河组(N_1t)为滨浅湖相沉积的泥岩夹薄层砂岩、砂砾岩。沙湾组(N_1s)分为一、二、三段,沙一段(N_1s^1)为辫状河三角洲和扇三角洲沉积体系的砂砾岩、砂岩、泥岩;沙二段(N_1s^2)为前三角洲和滨浅湖沉积体系的泥岩夹薄层砂岩;沙三段(N_1s^3)为冲积扇和冲积平原沉积体系的泥岩、泥质砾岩。其中砂岩型铀矿主要分布于沙一段(N_1s^1)的3个砂组中(图2)。砂体是含铀流体的运移通道和铀矿富集的储存空间^[14]。车排子构造运动对沙湾组一段地下水系统的演化可分为含水系统的形成、初次开启、封闭、再次开启和改造5个阶段(图3)。



1—砾岩; 2—钙质砾岩; 3—砂砾岩; 4—含砾粗砂岩; 5—粗砂岩; 6—中砂岩; 7—含砾泥岩、泥岩、粉砂质泥岩; 8—油浸作用; 9—黄铁矿; 10—石膏; 11—水平层理; 12—平行层理; 13—交错层理; 14—棕红色; 15—浅黄色; 16—浅灰绿色、绿灰色; 17—灰绿色; 18—灰色。

图 2 车排子地区沙湾组典型钻孔柱状图

Fig. 2 Typical borehole histogram of Shawan Formation in Chepaizi area

2.1 形成阶段

在沙一段沉积时, 古气候以潮湿为主, 沙一段沉积了 20~140 m 厚(平均地层厚约 75 m)的“泥-砂-泥”的辫状河、扇三角洲沉积体系, 区内沙一段发育 2 套物源体系的砂体, 为西南方向的浅水辫状河三角洲和北部扎伊尔山的扇三角洲。物源充足的是沙一段 1 砂组、3 砂组, 2 套物源在 128 团互相叠置交互沉积, 形成泛连通性较好的“毯砂”^[15]。大量来自山区的富铀岩石以砂、砾石形式在盆地内堆积, 构成了铀的预富集(图 3a)。

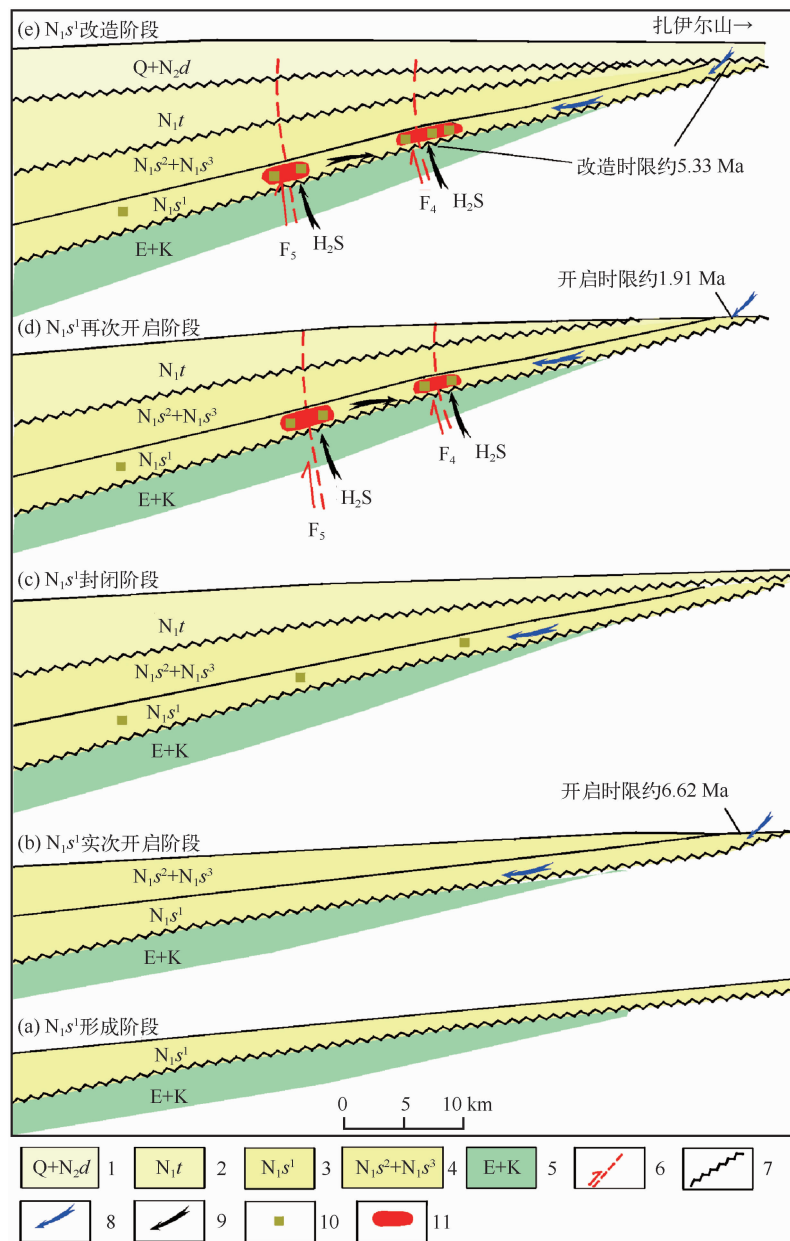
2.2 初次开启阶段

在沙二段到沙三段前期, 古气候仍以潮湿

为主; 在沙三段后期, 古气候逐渐变为半干旱, 沙一段含矿层位一直出露地表, 时限约 6.62 Ma (图 3b), 可接受含氧水补给, 为铀成矿初始阶段。

2.3 封闭阶段

在沙湾组之后, 为差异沉降阶段(新近纪早期), 沉降范围和幅度继续加大直至整体处于水下; 后期的塔西河组, 超覆于最初形成的沙一段含水系统之上, 地下水接受含氧水的入渗补给十分有限。当时古气候干湿交替, 地下水以封存的承压水为主, 处于封闭的还原状态, 灰色砂岩中可见黄铁矿(图 3c)。



1—第四系、新近系独山子组；2—新近系塔西河组；3—新近系沙湾组一段；4—新近系沙湾组二、三段；5—古近系、白垩系；6—正断层；7—不整合接触；8—地下水方向；9—油气运移方向；10—黄铁矿；11—铀矿化。

图 3 车排子地区古水文地质演化示意图

Fig. 3 The ancient hydrogeological evolution diagram of Chepaizi area

2.4 再次开启阶段

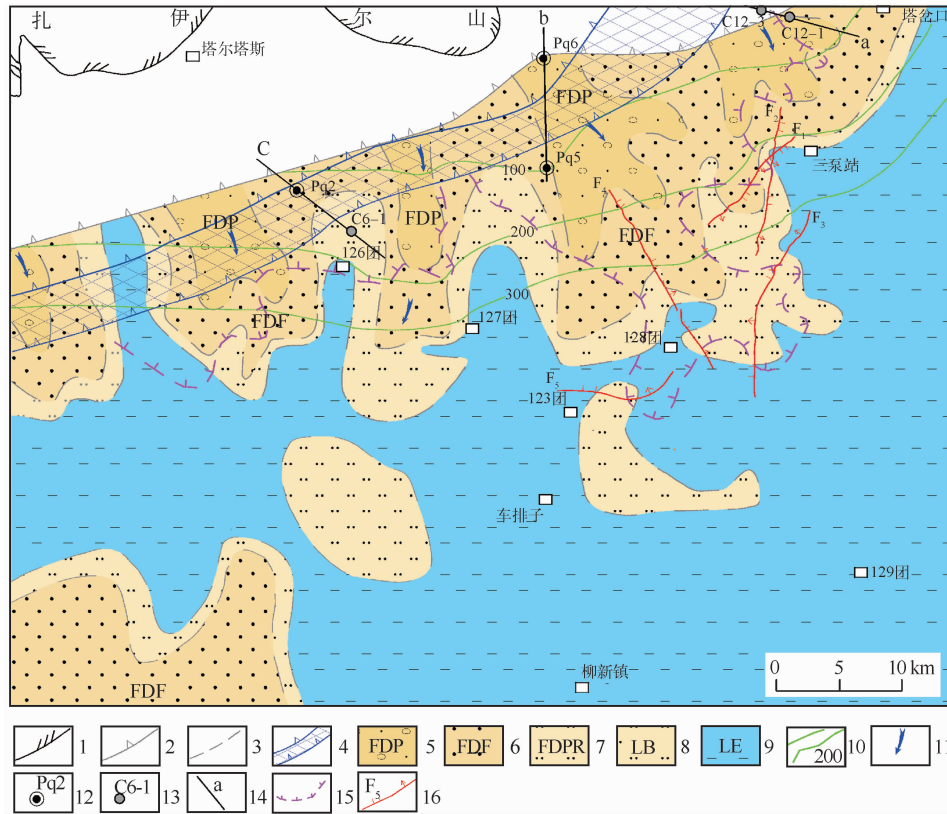
塔西河组沉积晚期,受喜山运动早期差异性沉降的影响,北天山隆升,向北的冲断导致准噶尔盆地南部地区急剧挠曲沉降,盆地向南掀斜;古气候变为半干旱,有利于扎伊尔山山前塔西河组地层被剥蚀。含矿层位直接出露地表、大面积塔西河组扇根的砂砾层与下伏沙一段含矿层位呈不整合面接触(图 4),剥蚀程度有较大差异(扎伊尔山构造抬升幅度东部最强,中部次之,西部最弱),导

致沙一段含矿层位接受含氧水的方式不一样,整体上山前塔西河组从东到西剥蚀逐渐减弱,东部受剥蚀最强。

塔岔口地段塔西河组完全被剥蚀,沙一段含矿层位直接出露地表接受大气降水补给(图 5a,平面位置见图 4),含氧水的补给条件最好;128 团北部塔西河组被剥蚀至扇根的砂砾层,沙一段含矿层位通过不整合面接受塔西河组扇根的砂砾层含氧水补给(图 5b),含氧水的补给条件较好;在

126 团北部塔西河组被剥蚀相对较弱,仍有泥岩隔水层未被剥蚀(Pq2 钻孔揭露 3 m 厚黄色泥

岩),沙一段含矿层位接受含氧水的补给条件较差(图 5c)。



1—古生代基岩露头边界线;2—塔西河组尖灭线;3—沉积相界线;4—沙湾组一段“天窗”;5—辫状河三角洲平原;6—辫状河三角洲前缘;
7—前辫状河三角洲;8—滩坝沉积;9—滨浅湖;10—塔西河组底埋深线及值(m);11—地下水方向;12—石油钻孔及编号;13—地质孔及编号;
14—剖面及编号;15—沙湾组含矿层古层间氧化带前锋线;16—正断层。

图 4 车排子地区塔西河组沉积相图

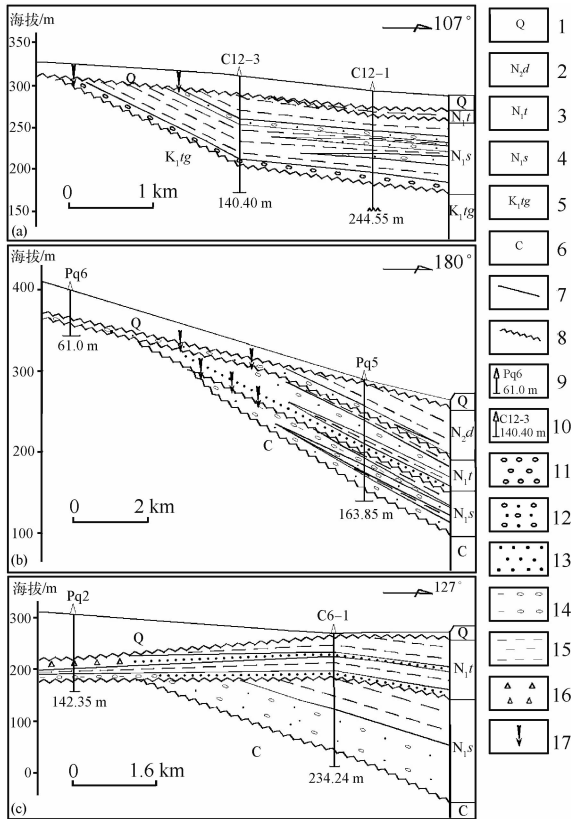
Fig. 4 Sedimentary facies diagram of Taxihe Formation in Chepaizi area

在开启了含铀含氧水补给窗口后(开启时限约 1.91 Ma),古气候变为半干旱,有利于含氧水入渗“天窗”,断裂(F₁~F₅)贯穿沙一段含水系统,导通了含矿含水层的水力联系、水循环交替增强,地下水完整的补给-径流-排泄系统已具雏形,断裂构造也具有油气运移通道的功能。钻孔资料显示,铀矿化分布在油砂层的上部或油藏的深部,说明油气渗出与层间氧化渗入同时发育,或者油气成藏应该比铀成矿作用发育的晚。这为砂体提供了一定的还原容量,车排子地区砂岩型铀矿形成,为铀成矿的主要阶段(图 3d)。

2.5 改造阶段

快速沉降阶段(新近纪晚期—第四纪),沉降范围和幅度继续加大,独山子组和第四系超覆沙

湾组、塔西河组之上。喜山运动晚期,又形成一系列断开基底—新近纪、第四系的正断层,为油气运移提供通道,含矿层位处于油气还原作用阶段。独山子组期间古气候为半干旱,塔盆口和 126 团北部的独山子组完全被剥蚀(图 5a~图 5c)。塔盆口构造“天窗”出露(图 5a);含氧水直接入渗,128 团北部的独山子组被剥蚀至底部砂砾层(图 5b),含氧水依次透过独山子组和塔西河组底部砂砾层向含矿层位“天窗”越流补给。第四纪气候变为干旱,第四系含水层可通过不整合面透水“天窗”(图 5b~图 5c),向沙一段含矿层位补给含氧水,铀成矿作用在前一阶段的基础上继续加强,并向深部、盆地内部推进,为铀成矿加强改造阶段,改造时限约 5.33 Ma(图 3e)。



- 1—第四系；2—新近系独山子组；3—新近系塔西河组；
4—新近系沙湾组；5—白垩系吐鲁群；6—石炭系；
7—整合接触；8—角度不整合接触；9—石油钻孔；
10—地质钻孔；11—砾岩；12—砂砾岩；13—砂岩；
14—泥质砾岩；15—泥岩；16—含砾岩；17—含氧水补给方向。

图5 沙湾组目的层砂体补给条件剖面示意图

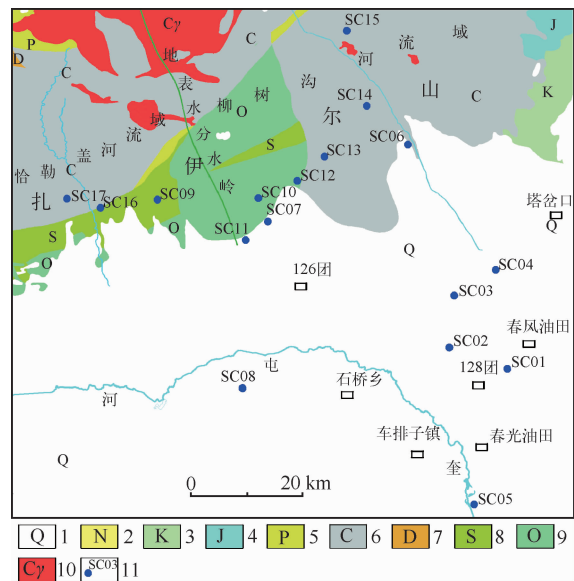
Fig. 5 Section diagram of sand body recharge conditions in the target layer of Shawan Formation

2.6 车排子地区古水文地质演化结果

从古水文地质演化来看,自沙一段含矿层位形成以来,车排子地区基本保持了北部扎伊尔山接受含氧水补给,向南部凹陷中心和断裂径流、排泄的总体特征;稳定的“泥-砂-泥”结构,以及油气带来的还原容量,为砂岩型铀矿提供了必要的水动力条件和氧化还原环境。不同地段的补给条件存在差异,塔岔口和128团北部补给条件较好,铀成矿作用持续时间长;126团北部的补给条件较差(图4中古层间氧化带的发育特征可以证实);越靠近塔西河组扇根、底板埋深越小的地段补给条件越好。塔西河组晚期是主要铀成矿期,沙二段和沙三段是次要铀成矿期,上新统一第四纪是铀成矿加强改造阶段。

3 水文地球化学特征与铀成矿的关系

地下水化学成分是水岩作用的结果,水化学特征反应地下水的水文地球化学作用和形成环境,为分析地下水氧化还原分带和预测铀成矿位置提供依据^[16]。笔者在2022—2023年,共采集了17组水样(SC01~SC17),水样分布见图6。在实验室测试了水样中的阴、阳离子、铀含量、硫化氢、铁离子,现场实测了 Eh 、溶解氧等参数,结果见表1。试验用主要设备有ICP-MS(型号:NexION350X,编号:85XN5072702);紫外可见分光光度计(型号:UV-6300,编号:UQD1901002);离子色谱仪(型号:ICS-1100,编号:15040957);电感耦合等离子体光谱仪(型号:15040957,编号:ICP20101906);pH计(型号:PHB-4,编号:600920N0021101214);溶氧仪(型号:AZ8403,编号:1280454)等。铀水文地球化学环境是铀在天然水中溶解、迁移、沉淀和富集的环境,水中 H_2S 、溶解氧、 $\rho(Fe^{2+})/\rho(Fe^{3+})$ 等与水的氧化还原性质关系密切。



- 1—第四系；2—新近系；3—白垩系；4—侏罗系；
5—二叠系；6—石炭系；7—泥盆系；8—志留系；9—奥陶系；
10—石炭系斜长花岗岩；11—采样点。

图6 车排子地区地下水采样点分布

Fig. 6 Distribution of groundwater sampling points in Chepaizi area

3.1 水化学组分分析

根据野外水文地质调查,发育扎伊尔山区的河流在出山口后大量渗漏补给第四系潜水,然后

含氧含铀水再通过第四系含水层补给沙一段窗口。2个流域的水化学组分对沙一段铀成矿至关重要。

柳树沟河流域补给区:矿化度低,平均为1.1 g/L;平均铀质量浓度为16.8 $\mu\text{g/L}$ (10 $\mu\text{g/L}$ <中

等铀<30 $\mu\text{g/L}$);为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 型水或 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水,pH为7.90~8.26, Eh 为+143~+188 mV,溶解氧平均为7.47 mg/L, H_2S 质量浓度平均为0.11 mg/L, $\rho(\text{Fe}^{2+})/\rho(\text{Fe}^{3+})$ 平均为0.74,整体为氧化中等铀水(表1)。

表1 车排子地区铀水文地球化学参数特征

Table 1 Characteristics of uranium hydrogeochemical parameters in Chepaizi area

编号	出露地层	pH	Eh/mV	$\rho_B/(\text{mg/L})$				$\rho(\text{Fe}^{2+})/\rho(\text{Fe}^{3+})$		$\rho(\text{U})/(\mu\text{g/L})$	矿化度/ (g/L)	水化学类型	备注
				O_2	H_2S	Fe^{2+}	Fe^{3+}	$\rho(\text{Fe}^{2+})$	$\rho(\text{Fe}^{3+})$				
SC01	N_2d 民井	8.90	+134	4.51	0.19	0.03	0.08	0.34	10.20	0.30	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$		
SC03	N_1s^1 机井	7.63	+153	7.86	0.05	0.03	0.18	0.15	10.40	1.00	$\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$		
SC04	N_1s^1 机井	7.50	+139	7.70	0.10	0.03	0.37	0.07	13.90	0.90	$\text{SO}_4 \cdot \text{Cl} \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$		
SC05	奎屯河	8.50	+159	8.20	0.13	0.06	0.20	0.29	10.50	0.50	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$		
SC06	河流	8.42	+173	7.69	0.14	0.12	2.65	0.04	10.70	0.70	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$	氧	
SC07	O 泉水	8.66	+143	8.28	0.04	0.05	0.09	0.53	25.80	1.30	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$	化	
SC10	O 泉水	7.96	+172	7.21	0.19	0.05	0.07	0.71	24.50	1.30	$\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl} - \text{Na} \cdot \text{Ca}$	水	
SC12	O 民井	8.10	+161	6.86	0.02	0.06	0.06	1.04	21.30	1.90	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$		
SC13	C 民井	8.32	+184	5.26	0.07	0.06	0.04	1.60	7.30	1.00	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$		
SC14	河流	8.05	+188	8.45	0.22	0.07	0.06	1.20	17.90	1.10	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$		
SC15	河流	8.49	+148	8.53	0.07	0.15	3.86	0.04	6.70	0.60	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$		
SC02	N_1s^1 机井	8.80	+158	2.10	0.19	0.02	0.02	1.00	15.10	0.50	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$		
SC08	N_1s^1 机井	8.26	+158	3.35	0.03	0.06	0.09	0.66	1.00	2.20	$\text{Cl} \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$	弱	
SC09	S 泉水	8.80	+211	6.46	0.15	0.10	0.05	2.16	14.00	0.90	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$	氧	
SC11	O 民井	7.89	+212	5.86	0.01	0.08	0.06	1.38	20.30	0.90	$\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$	化	
SC16	河流	8.68	+133	5.60	0.19	0.09	0.03	3.48	7.70	0.50	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$	水	
SC17	Q 泉水	8.39	+140	6.30	0.06	0.05	0.02	3.07	6.50	0.50	$\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$		

注:分析数据来源于核工业二一六大队检测研究院及现场测量。O为奥陶系火山熔岩和火山碎屑岩;S为志留系凝灰质碎屑岩、变质碎屑岩;C为石炭系凝灰质碎屑岩和火山熔岩; N_1s^1 为新近系沙湾组一段; N_2d 为新近系独山子组;Q为第四系。

恰勒盖河流域补给区:矿化度低,平均为0.6 g/L;平均铀质量浓度为9.4 $\mu\text{g/L}$ (低铀<10 $\mu\text{g/L}$),为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 型水,pH为8.39~8.80, Eh 为+133~+211 mV,溶解氧平均为6.12 mg/L, H_2S 质量浓度平均为0.13 mg/L, $\rho(\text{Fe}^{2+})/\rho(\text{Fe}^{3+})$ 平均为2.90,整体为弱氧化低铀水(表1)。

奥陶系火山熔岩和火山碎屑岩民井(SC10、SC11、SC12)以及泉水(SC07),地下水中铀质量浓度偏高;志留系凝灰质碎屑岩泉水、变质碎屑岩(SC09)和石炭系的凝灰质碎屑岩和火山熔岩民井(SC13),地下水中铀质量浓度为低-中等。SC02地下水向128团径流,根据数据分析可知,其进入了地下水系统的过渡带或过渡带边缘,附近存在氧化还原过渡带。SC03、SC04地下水向春风油田径流,根据数据分析可知,此处的沙一段砂体正在经历铀的氧化作用,其下游存在氧化还原过

渡带。根据SC08数据分析可知,此处为地下水系统的还原带(图4),其上游存在氧化还原过渡带。

铀在水中的存在形式主要取决于水的化学性质与pH,不同的酸碱度环境将形成不同的铀酰配合物。17组水样热力学计算结果显示:铀在水中以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 为主,平均分别占49.76%和49.83%,并有少量的 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)$ 和 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$,其pH平均为8.31。以这些形式存在的铀在遇到地下水 Eh 和pH急剧变化的地球化学障时,容易从水中析出。

3.2 车排子地区水化学特征综合结果

水中铀主要以 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2^{2-}$ 和 $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{4-}$ 形式存在,易从水中析出;2个流域的补给区为沙一段砂体沉积和后期氧化蚀变提供含氧含铀水,其中恰勒盖河流域补给区为126团提供弱氧化低铀水,柳树沟河流域补给区为128团和塔岔口提供氧化中等铀水;128团存在氧化还原过渡带,具有成矿潜力。

4 铀成矿水文地质条件综合分析

4.1 岩石地球化学特征与铀成矿的关系

钻孔资料表明,沙一段砂岩以灰色、灰绿色砂砾岩、含砾粗砂岩为主,其中灰绿色为氧化带,灰

色为还原带,2022年取了218个地球化学样,分析结果见表2。分析用设备有ICP-MS(型号:NexION350X,编号:85XN5072702);高频红外碳硫分析仪(型号:HCS-801DS,编号:202011-99);酸式滴定管(型号:0-10 mL,编号:Fe²⁺-1)。

表2 车排子地区砂岩地球化学参数统计

Table 2 Statistics of geochemical parameters of sandstone in Chepaizi area

分带	w(U)/ 10 ⁻⁶	w(Th)/ 10 ⁻⁶	w(有机碳)/ %	w(全S)/ %	w(Fe ²⁺)/ %	w(Fe ³⁺)/ %	w(Fe ²⁺)/ w(Fe ³⁺)	w(Th)/ w(U)	样品数/个
N _{1s} ¹ 氧化带	15.82	6.35	0.10	0.52	0.32	1.20	0.29	0.4	113
N _{1s} ¹ 过渡带	231.6	9.74	0.09	0.95	0.32	1.51	0.25	0.09	36
N _{1s} ¹ 还原带	7.67	4.96	0.12	0.48	0.29	0.94	0.37	1.9	40
N _{1t} 氧化带	2.95	7.45	0.12	0.06	1.25	1.39	0.90	2.53	9
N _{1t} 油砂	2.10	7.07	0.30	0.01	1.27	1.21	1.05	3.37	3
N _{2d} 氧化带	2.91	7.20	0.12	0.05	1.29	1.31	0.98	2.47	14
N _{2d} 油砂	1.98	7.54	0.28	0.02	1.3	1.23	1.06	3.81	3

注:分析数据来源于核工业二一六大队检测研究院,表中数据为平均值。区内N_{1t}、N_{2d}取样钻孔均在128团,揭露的N_{1t}、N_{2d}砂岩均为氧化砂岩。

从铀分析结果看,在氧化带、过渡带、还原带中的平均铀质量分数分别为 15.82×10^{-6} 、 231.60×10^{-6} 和 7.67×10^{-6} ,铀在过渡带最高,氧化带次之,还原带最低,氧化带中的铀存在迁移现象;说明除了沙一段砂体本身沉积的铀外,大气降水或地表水垂直入渗淋滤塔西河组、独山子组扇根砂砾层也带入了一定的铀。塔西河组、独山子组氧化带的平均铀质量分数分别为 2.95×10^{-6} 、 2.91×10^{-6} ,远低于沙一段氧化带中的铀含量;说明塔西河组、独山子组扇根砂砾层的铀一部分迁入了沙一段砂体。

从铁的地球化学特征看,w(Fe²⁺)明显低于w(Fe³⁺),w(Fe²⁺)/w(Fe³⁺)均小于1,显示砂体偏氧化的地球化学环境;氧化带、过渡带、还原带的w(Fe²⁺)/w(Fe³⁺)分别为0.29、0.25和0.37,表明在铀成矿过程中消耗了一定的有机物,符合氧化带的发育规律。

有机碳含量整体偏低,氧化带、过渡带、还原带的有机碳分别为0.10%、0.09%和0.12%,还原带最高,氧化带次之,过渡带最低;说明铀迁移过程中消耗了一部分有机碳,符合氧化带的发育规律。全硫含量反映了黄铁矿的含量,岩芯编录中也见大量黄铁矿颗粒,氧化带、过渡带、还原带的全硫分别为0.52%、0.95%和0.48%,过渡带最高,氧化带次

之,还原带最低,并且砂岩中有H₂S气体(臭鸡蛋味);说明岩层中饱含H₂S等还原性较强的气体,这也证实了油气还原对铀成矿起着重要作用,说明黄铁矿含量与铀含量成正相关。

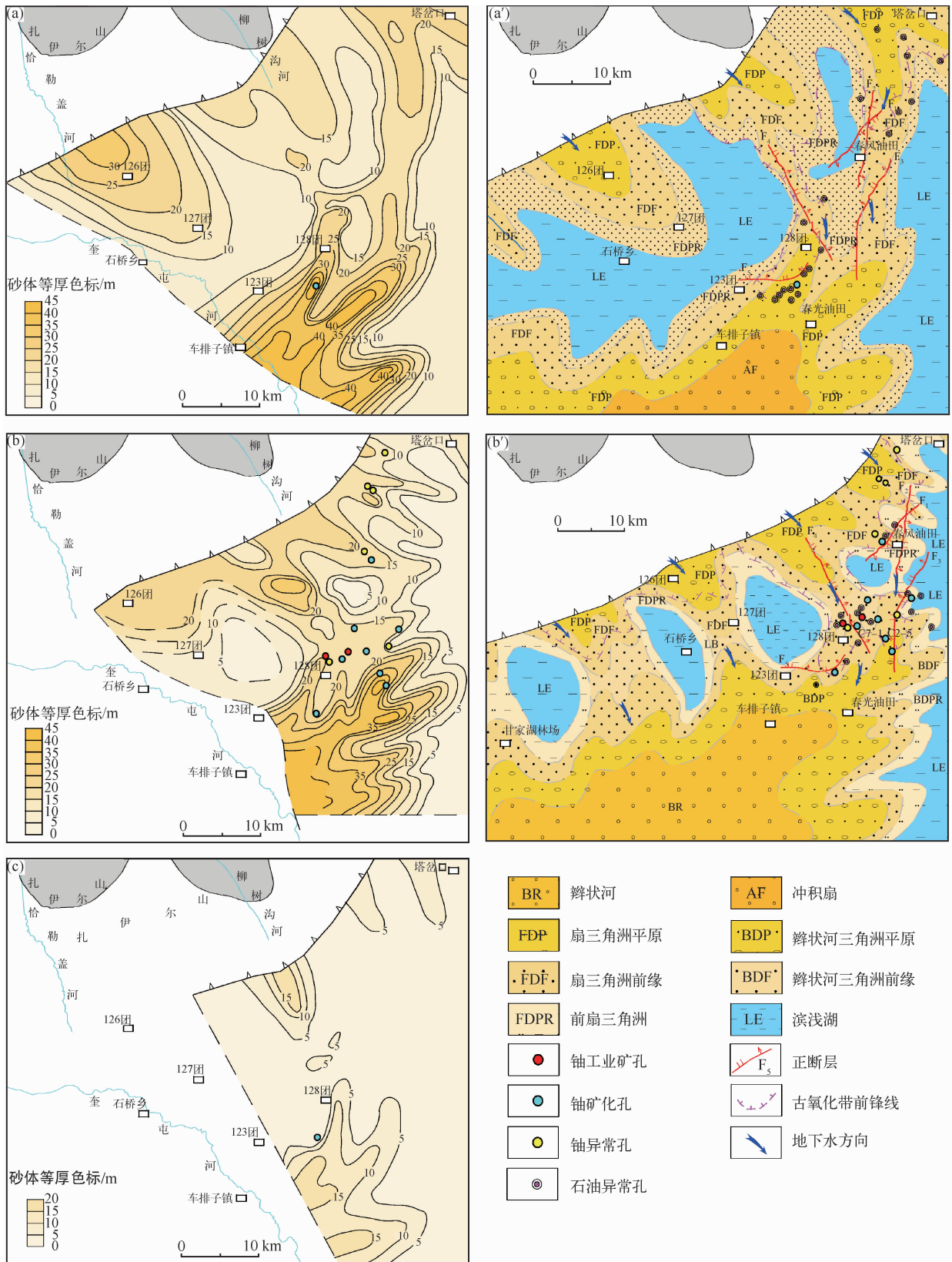
车排子地区沙一段总体为偏氧化的地球化学环境,根据钻孔揭露,3砂组见油气浸入,1砂组、2砂组见油层,是春风油田和春光油田的主采油层,塔西河组、独山子组也见油砂;说明其油气还原作用十分强烈,油浸到塔西河组、独山子组、甚至第四系,形成了较强的地球化学还原障,在断裂两侧易发育铀的富集,在这一地带中已发现了铀矿化,有较好的找矿前景。

4.2 砂体发育特征与铀成矿水动力条件

砂体的层间氧化与铀成矿关系密切,层间氧化带是砂岩型铀矿的重要找矿标志^[17-18],而砂体厚度和沉积相特征是影响砂体中水循环交替强度、层间氧化发育的重要因素之一。笔者根据车排子地区沙一段砂体特征(图7),及2022年取的5件孔隙度样品、7件渗透系数样品试验结果,结合上述古水文地质演化,分析沙一段含水系统在各时期、各区段、各层位的水动力条件。

4.2.1 砂体发育特征

沙一段1砂组(图7a、图7a'),在平面上南部砂体的规模和厚度大于北部。北部以扇三角洲沉



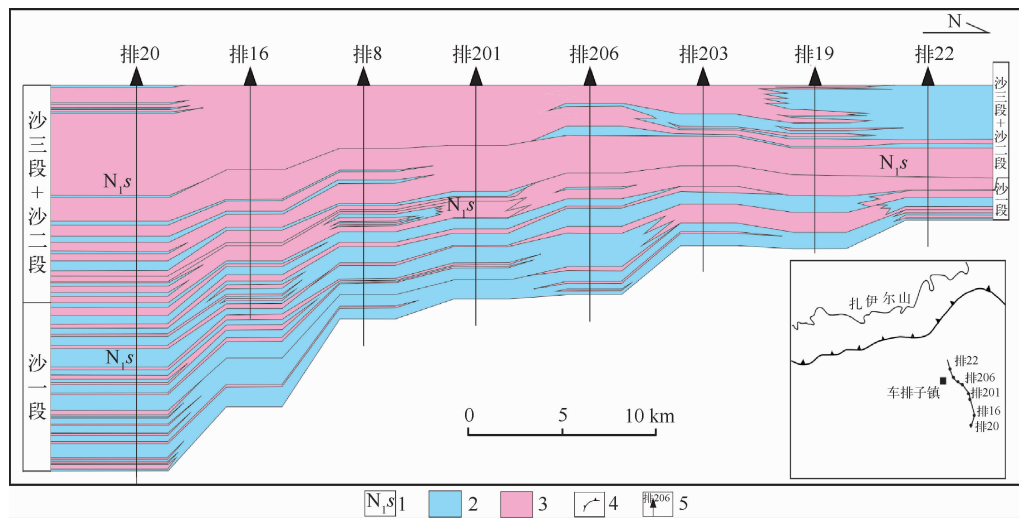
(a)沙湾组一段1砂组砂体厚度图;(a')沙湾组一段1砂组沉积相图;(b)沙湾组一段3砂组砂体厚度图;
(b')沙湾组一段3砂组沉积相图;(c)沙湾组一段2砂组砂体厚度图。

图 7 车排子地区沙湾组一段砂体特征

Fig. 7 The sand body characteristics of the first member of Shawan Formation in Chepaizi area

积为主,在扎伊尔山前分布 3 个扇三角洲“垛体”,往盆地内部延伸,向南东逐渐变薄,钻孔揭露砂体厚度为 10~32 m,最厚为 59 m,平均厚度为 17 m;剖面上多被泥质夹层分割为 2~3 层,泥质岩夹层一般厚 1~13 m,连续性较差。南部以远源辫状河三角洲平原辫状分流河道沉积为主,呈朵状往盆地内部延伸,向北西逐渐变薄,钻孔揭露砂

体厚度一般为 10~40 m,最厚达 58 m,砂体受分流河道控制,多数地段与北部扇三角洲沉积间被滨浅湖或分流间湾沉积相分隔,仅在春风油田-128 团地段呈双物源交汇沉积,是泛连通性较好的河道砂体(图 8)。隔水顶板由 2 砂组中厚层灰绿色泥岩组成,平均厚度为 24 m,隔水底板是与古近系、白垩系的不整合接触面。



1—沙湾组;2—含水层;3—隔水层;4—沙湾组剥蚀界线;5—石油钻孔。

图 8 车排子地区沙湾组南北向水文地质剖面图

Fig. 8 The north-south hydrogeological profile of Shawan Formation in Chepaizi area

2 砂组分布特征整体上和 1 砂组分布特征一致(图 7c),但砂体规模和厚度较小,连通性差。3 砂组(图 7b、图 7b')和 1 砂组砂体发育特征基本一致。北部发育 4 个扇三角洲“垛体”,向盆地内延伸,厚度向南东方向逐渐变薄,一般为 5~22 m,砂体连续性较好;剖面上夹 1 层泥质岩夹层,厚 1~10 m,连续性相对较好。南部为辫状河三角洲前缘沉积,呈朵状往盆地内部延伸,厚度向南东方向逐渐变薄,一般为 10~30 m,最厚达 48.8 m。中部为双物源交互沉积,泛连通性较好(图 8),与湖相接触带砂体厚度急剧变薄,128 团地段砂体厚度为 15~17 m;其孔隙度 16.6%~20.9%,平均为 18.6%;渗透系数为 0.086~0.131 m/d(表 3),平均为 0.109 m/d,渗透性较好。垂向上,3 砂组“泥-砂-泥”结构稳定,隔水顶板由沙二段厚层灰色、灰绿色泥岩组成,平均厚度为 26.3 m;隔水底板是 2 砂组中厚层灰绿色泥

岩,平均厚度为 19.1 m。

4.2.2 铀成矿水动力条件分析

结合沙一段砂体特征与古水文地质演化,对沙一段 1 砂组和 3 砂组的 3 个古水文地质时期的水动力条件进行分析。

4.2.2.1 在沙二段和沙三段期

铀成矿的次要阶段(古气候前期潮湿、后期半干旱)。1 砂组地下水通过窗口入渗后沿着扇三角洲砂体向南东径流,在 126 团,其底部不整合面是主要的排泄方式;在塔岔口和 128 团,沿途向底部不整合面局部排泄,在春风油田-128 团地段汇集,最终排泄于南部远源辫状河水下分流河道(图 7a')。3 砂组在 126 团和 128 团,地下水在南部水下分流河道排泄;在塔岔口,缺少排泄通道(图 7b');在双物源交汇处沉积砂体发生改变,导致地下水径流速率和方向发生变化,铀易富集。

4.2.2.2 在塔西河组晚期

铀成矿的主要阶段(古气候为半干旱)。1砂组在126团,其上覆塔西河组泥岩层未被剥蚀,“天窗”封闭,地下水不能入渗;在塔盆口和128团,构造“天窗”开启,大气降水、地表水直接补给,

或者通过塔西河组扇根砂砾层携带含氧含铀水越流补给,地下水沿着扇三角洲砂体向东南径流,在春风油田—128团地段汇集,沿途向底部不整合面局部排泄,最终排泄于南部水下分流河道和盆内正断层(图7a')。

表3 沙湾组一段3砂组孔隙度、渗透系数

Table 3 Porosity and permeability coefficient of 3 sand groups in the first member of Shawan Formation

岩性	样品编号	孔隙度/%	渗透系数/(m/d)	层位
灰色粗砂岩	KSC2-5-1	19.6	0.114	N ₁ s ¹
灰色粗砂岩(矿化)	KSC2-5-2		0.111	N ₁ s ¹
灰色粗砂岩(矿化)	KSC2-5-3	18.9	0.11	N ₁ s ¹
灰色粗砂岩	KSC2-5-4	17.2	0.102	N ₁ s ¹
灰绿色粗砂岩	KSC7-1-1	16.6	0.086	N ₁ s ¹
灰绿色细砂岩	KSC7-1-2		0.108	N ₁ s ¹
灰绿色细砂岩(矿化)	KSC7-1-3	20.9	0.131	N ₁ s ¹

注:分析数据来源于核工业二一六大队检测研究院。使用设备有液体孔隙率测定仪(型号:KX-90F,编号:15-06-006);气体渗透率测定仪(型号:DX-07G,编号:15-13-019)。

3砂组在126团与1砂组一样,在塔盆口和128团,补给、径流条件与1砂组相似;但在128团,地下水排泄于南部水下分流河道砂体和正断层,在塔盆口,地下水仅排泄于春风油田的正断层,同时油气通过正断层提供还原容量,铀易在正断层附近、双物源交汇处被还原富集(图7b')。

4.2.2.3 上新统一第四纪

铀成矿的加强改造阶段(古气候为半干旱、干旱)。独山子组和第四系超覆于沙湾组和塔西河组之上。在126团,构造“天窗”继续处于封闭状态。在塔盆口和128团,构造“天窗”局部被独山子组底部砂砾层或第四系超覆,地下水越流入渗含矿层位,在前一阶段继续加强铀成矿,同时又形成一系列的正断层,伴随着更加强烈的油气还原作用,黄色氧化带被改造为灰绿色。

4.3 铀成矿水文地质条件分析结果

从车排子地区沙一段砂体发育特征和古水文演化的角度,128团北部1砂组和3砂组在沙二段和沙三段期,天窗开启;自塔西河组晚期之后,天窗也一直处于直接或间接开启状态。在128团呈双物源交汇,砂体泛连通性较好,油气增加了砂体的还原容量,地下水排泄方式多样化,水循环交替强度高,铀成矿条件最好,持续时间最长。塔盆

口补给条件也较好,但其扇三角洲沉积砂体展布有限,且排泄方式相对单一,铀成矿条件次之。126团仅在沙二段和沙三段期间天窗开启,在塔西河组之后,窗口基本上处于封闭状态,铀成矿条件较差。目前已发现的铀矿化主要在128团,塔盆口次之,126团未见铀矿化,3砂组居多且见铀工业矿孔,1砂组次之,2砂组最少。

5 结论

1)车排子地区具有铀成矿有利的水动力条件。车排子地区沙湾组自北向南缓倾,沙一段沉积“泥-砂-泥”的双物源沉积体系的含水系统,在北部盆缘接受含氧含铀水的入渗补给;同时盆内断裂疏通了与其他含水系统的水力联系,建立了完善的补-径-排体系。塔盆口和128团的“天窗”开启与铀成矿持续时间长,126团较短,北部扇三角洲砂体多为含氧含铀地下水径流通道,在双物源交汇处径流条件发生改变,其铀易富集,南部远源辫状河三角洲砂体是最终排泄源。

2)车排子地区具有铀成矿必要的水化学特征。恰勒盖河流域和柳树沟河流域的补给区为北部沙一段砂体沉积和后期氧化蚀变提供物源、含氧含铀水;盆内深部油气通过正断层为目的层砂

体增强了还原性,断裂两侧六价铀易被还原为四价铀而富集成矿;铀水文地球化学特征和岩石地球化学特征整体上符合层间氧化带的发育规律,并相互对应。

3)车排子地区具有铀成矿有利的地下水循环交替强度及水文地质结构。沙一段整体上具备铀成矿的宏观地下水动力和水化学环境;但是不同区位、层位的水交替强度和稳定性的差异,导致铀矿的空间分布并不均匀。在砂体连通性好、隔水顶底板连续稳定,及隔水性能良好、地下水排泄方式多样化的区位,在双物源交汇处和断裂两侧,其水循环交替更强,铀成矿条件更好。3 砂组具有较好的水文地质结构,是其发育铀矿化的主要原因。

参考文献:

- [1] 余琪祥. 车排子凸起井下高 GR 砂岩分布特征与铀矿勘探前景[J]. 新疆地质, 2008(3):284-287.
- [2] 余琪祥,王津义,路清华,等. 准噶尔盆地车排子凸起铀砂与稠油分布特征及其叠置关系[J]. 石油实验地质, 2010, 32(5):428-433+441.
- [3] 党龙,唐湘飞. 西准噶尔车排子地区新近系砂岩型铀矿成矿远景[J]. 现代矿业, 2015, 31(10):119-121.
- [4] 赵磊,胡兆国,华北,等. 准噶尔盆地西缘车排子地区砂岩型铀矿成矿潜力及找矿方向[J]. 地质与勘探, 2021, 57(3):507-517.
- [5] 贺锋,何松,何中波,等. 准噶尔盆地车排子凸起沙湾组沉积特征及砂岩型铀矿成矿前景[J]. 世界核地质科学, 2021, 38(4):414-423.
- [6] 阿种明,伏多旺,王国荣,等. 准噶尔盆地车排子地区铀控矿因素分析——以沙湾组一段 3 砂组为例[J]. 铀矿地质, 2023, 39(1):46-58.
- [7] 王国荣,冯世荣,任满船,等. 准噶尔盆地胜利西部探区铀资源评价选区研究报告[R]. 乌鲁木齐:核工业二一六大队, 2016.
- [8] 刘武生,赵兴齐,史清平,等. 中国北方砂岩型铀矿成矿作用与油气关系研究[J]. 中国地质, 2017, 44(2):279-287.
- [9] 宋继叶. 准噶尔盆地基底特征与砂岩型铀矿成矿作用[D]. 北京:核工业北京地质研究院, 2014, 1-222.
- [10] 成建军,郭丽超,李书海. 伊犁盆地南缘铀水文地球化学特征及地下水铀成矿作用[J]. 现代矿业, 2017, 33(3):73-76+83.
- [11] 焦养泉,吴立群,荣辉,等. 铀储层结构与成矿流场研究:揭示东胜砂岩型铀矿床成矿机理的一把钥匙[J]. 地质科技情报, 2012, 31(5):94-104.
- [12] 邢东旭,康勇,王冰,等. 伊犁盆地南缘洪海沟地区铀矿主要含矿含水层及水文地球化学特征[J]. 新疆地质, 2014, 32(2):240-243.
- [13] 梁宇生. 准噶尔盆地西部车排子凸起的地质结构及形成演化[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019, 1-155.
- [14] 焦养泉,吴立群,杨琴. 铀储层——砂岩型铀矿地质学的新概念[J]. 地质科技情报, 2007(4):1-7.
- [15] 张善文,林会喜,沈扬. 准噶尔盆地车排子凸起新近系“网毯式”成藏机制剖析及其对盆地油气勘探的启示[J]. 地质论评, 2013, 59(3):489-500.
- [16] 何忧,荣辉,黄琨,等. 伊犁盆地水文地质条件与铀成矿的关系[J]. 地质科技通报, 2020, 39(5):139-147.
- [17] 苗爱生,陆琦,刘惠芳,等. 鄂尔多斯砂岩型铀矿床古层间氧化带中铀石的产状和形成[J]. 地质科技情报, 2009, 28(4):51-58.
- [18] 苗爱生,焦养泉,常宝成,等. 鄂尔多斯盆地东北部东胜铀矿床古层间氧化带精细解剖[J]. 地质科技情报, 2010, 29(3):55-61.

(下转第 23 页)

