

郭超,贾为卫,黄松,等.准噶尔盆地南缘楼庄子地区头屯河组下段赋铀砂岩地球化学特征及地质意义[J].世界核地质科学,2025,42(1):45-59. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2025.01.004

GUO Chao, JIA Weiwei, HUANG Song, et al. Geochemical characteristics and geological significance of uranium-bearing sandstone in the lower member of Toutunhe formation in Louzhuangzi area, southern margin of Junggar basin[J]. World Nuclear Geoscience, 2025, 42 (1): 45-59 (in Chinese).

准噶尔盆地南缘楼庄子地区头屯河组下段赋铀砂岩地球化学特征及地质意义

郭超,贾为卫,黄松,王国荣,廉刚

核工业二一六大队,新疆 乌鲁木齐 830011

摘要 通过地球化学分析、镜下鉴定和岩心观察等方法,分析楼庄子地区头屯河组下段赋铀砂岩的岩石学特征、地球化学特征、物源组成、构造背景及沉积环境,初步探讨其与铀成矿的关系。结果显示:头屯河组下段含矿砂岩源岩形成构造背景主要为活动大陆边缘和被动大陆边缘,特殊的构造背景为铀的迁移提供有利条件,同时也造就物源的多源性;砂岩碎屑物源以中性火成岩为主,母岩主要为花岗岩,此外少量花岗闪长岩类、火山碎屑岩、沉积岩及变质岩,反映物源的多源性,同时也说明物源区自身铀源较好;沉积时处于温暖湿润的古气候,U、Mo的高度富集和砂岩中富含还原性介质,反映头屯河组下段沉积时处于还原环境,具有良好的原生还原能力;主量元素含量呈现出含矿砂岩较无矿砂岩中 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 偏低、 $w(\text{CaO})$ 偏高的规律性,组分含量的差异在含矿段砂体的具体表现为含矿砂岩中明显的黏土化蚀变及碳酸盐化的发育;微量元素富集和亏损程度基本相似,U、Mo和Se相对富集,除Ga与中国沉积岩丰度相当外,其他微量元素相对亏损;微量元素含量亦呈现出一定规律性,即:同一钻孔含矿样品微量元素含量普遍较无矿样品含量偏高,特别是U、Mo、Se、V、Ge、Ti、Sc和Y等元素增高明显,并在含矿样品中更为富集;显示目的层砂体中微量元素在铀成矿过程也存在迁移富集现象。

关键词 楼庄子;头屯河组下段;赋铀砂岩;岩石地球化学

中图分类号 P619.14 文献标志码 A 文章编号 1672-0636(2025)01-0045-15

Geochemical characteristics and geological significance of uranium-bearing sandstone in the lower member of Toutunhe formation in Louzhuangzi area, southern margin of Junggar basin

GUO Chao, JIA Weiwei, HUANG Song, WANG Guorong, LIAN Gang

Geologic Party No. 216, CNNC, Urumqi 830011, China

Abstract: This article analyzes the petrological characteristics, geochemical features, provenance composition, structural background, and sedimentary environment of uranium bearing sandstone in the lower member of the Toutunhe formation in the Louzhuangzi area by the methods of geochemical analysis,

基金项目: 中国核工业地质局铀矿调查评价项目“新疆准噶尔盆地南缘金沟河—浅水河地区铀矿资源调查评价(编号:202107-2)”资助

收稿日期: 2024-12-30 **改回日期:** 2025-01-20

第一作者: 郭超,男,1983年生,工程师,主要从事铀矿地质勘查工作。E-mail: 616926119@qq.com

Supported by uranium investigation and evaluation project of China Nuclear Geology “Investigation and Evaluation of Uranium Resources in Jingouhe to Qianshuihe Area in the Southern Margin of the Junggar Basin, Xinjiang (No: 202107-2)”.

Received date: 2024-12-30 **revised date:** 2025-01-20

First author: GUO Chao, male, born in 1983, engineer, focusing on uranium geological exploration. E-mail: 616926119@qq.com

microscopic identification and core observation, and preliminarily explores their relationship with uranium mineralization. The results show that the tectonic background of the ore-bearing sandstone source rocks in the lower member of the Toutunhe formation is mainly the active continental margin and the passive continental margin. The special tectonic background provided favorable conditions for the migration of uranium. The source of sandstone debris was dominated by neutral igneous rock, and the parent rock was mainly calc-alkaline granite with a small amount of pyroclastic rock, sedimentary rock and metamorphic rock, which indicated the sandstone from multi-source nature, and has a good uranium source. The sandstone formed in a warm and humid paleoclimate and the source rock was strongly weathered. The sandstone is rich in reducing medium, reflecting that the lower member of Toutunhe formation was in a reducing environment and has good primary reduction ability. The content of major elements of the sandstone debris in the target layer has the characteristics of rich alkali, high silicon and weak aluminum, and the ore-bearing sandstone are of lower $w(\text{SiO}_2)$ and $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ and higher $w(\text{CaO})$ than those of the sterile sandstone. The difference of component content in the sand body of the ore-bearing member is characterized by strong clay alteration and carbonate development. U, Mo and Se are relatively enriched, and other trace elements are relatively depleted except for Ga, which is comparable to the sedimentary rocks in China. The content of trace elements in ore-bearing samples of the same borehole is generally higher than that in sterile samples, U, Mo, Se, V, Ge, Ti, Sc and Y are significantly increased, which indicated that the trace elements in the sand body of the target layer also have migrated and enriched in the uranium mineralization process.

Keywords: Louzhuangzi; lower member of Toutunhe formation; uranium-bearing sandstone; lithochemistry

楼庄子地区位于准噶尔盆地南缘,2019年在该区头屯河组取得砂岩型铀矿找矿突破,主要含矿层位为头屯河组下段的粗碎屑砂岩。近几年来,随着铀矿勘查力度不断加大,找矿成果日渐显著,发现长约 20 km 砂岩型铀矿(化)带,落实中型矿产地,并具有“大型”砂岩型铀矿找矿前景。前人对区内的构造条件、构造演化方面研究认为,早-中侏罗世的稳定拗陷沉降阶段有利于形成铀的早期预富集;晚侏罗世一早白垩世,该阶段的构造挤压隆升利于形成层间氧化带型铀矿体;晚白垩世—古近纪,较为稳定的构造环境有利于铀成矿作用的持续性;研究多认为楼庄子地区的铀成矿作用与构造活动关系密不可分^[1-3],也有研究认为受一定油气作用的影响^[4-5]。前人对沉积环境和砂体特征也进行研究,认为头屯河组下段辫状河相砂砾岩体为最有利的砂岩型铀成矿地质体,并控制工业铀矿化的空间分布^[6-10]。沉积岩碎屑物质的地球化学成分与源岩关系十分密切^[11-12],目前尚未对头屯河组下段赋矿砂岩的岩石地球化学特征、物源组成以及在成矿过程中砂岩碎屑主、微量元素含量的变化进行研究,仅有对侏罗系岩石地球化学特征的研究^[13]。本文通过岩心观

察、镜下鉴定和地球化学分析等方法,确定研究区内头屯河组含矿砂岩的地球化学特征及岩石学特征,探讨含矿砂岩的构造-沉积环境及源岩性质与铀成矿的关系,对比分析含矿砂岩与无矿砂岩中各主、微量元素以及 $C_{\text{有}}$ 、全 S 及 CO_2 等含量的变化规律,以及组分含量的差异性在矿段的具体表现。为今后该区研究铀成矿过程和铀成矿机理提供地质依据。

1 地质概况

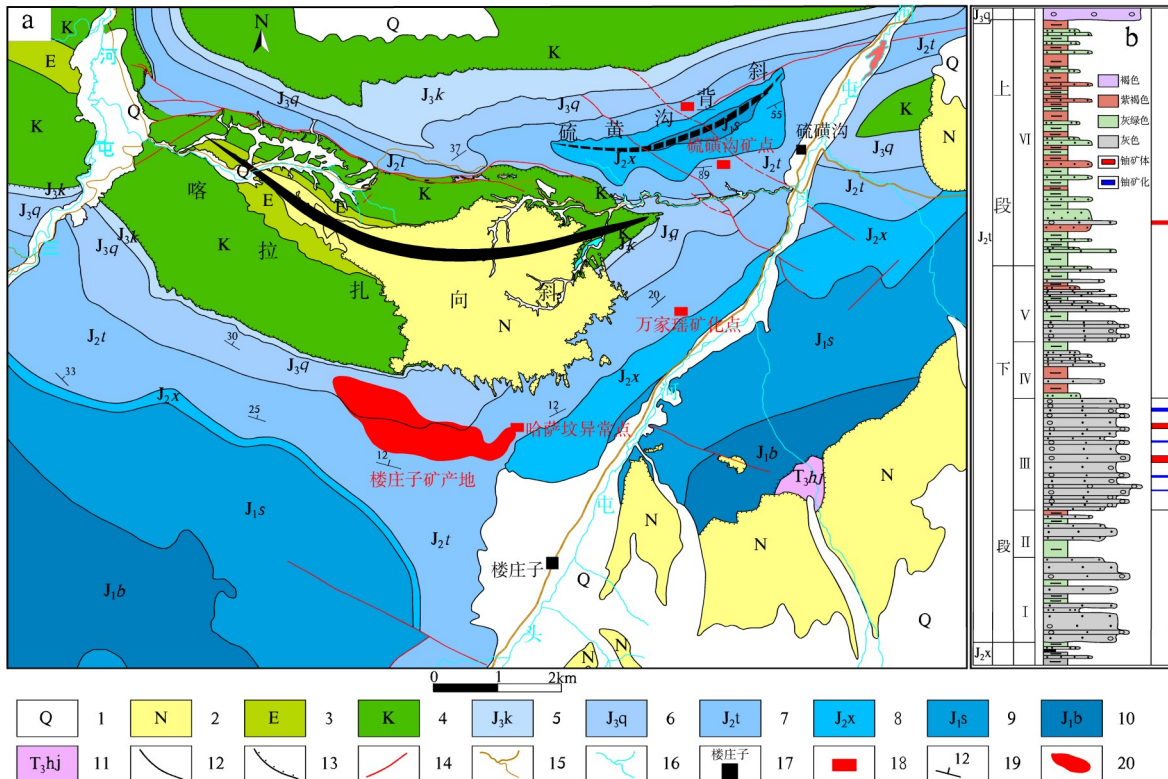
准噶尔盆地南缘位于北天山前山断褶带,发育多期次的构造变形。前人将山前断褶带自东向西划分为 4 个构造单元^[14],在南北方向上,自山前至盆地划分为三排近 EW 向延伸的构造带^[15],在山前第 1 排构造带发现多个铀矿(化)点,显示其良好的找矿潜力。

楼庄子地区位于准噶尔盆地南缘山前齐古断褶带的东部,中-新生界由三叠系、侏罗系、白垩系、古近系、新近系及第四系构成。头屯河组受喀拉扎向斜和硫磺沟背斜挟持,研究区位于喀拉扎向斜南翼(图 1a),呈向 NE 向倾斜的单斜构造,地层倾角介于 $10^\circ \sim 25^\circ$ 之间。

地表出露的头屯河组呈近 EW 向的不规则

带状分布,埋深介于 46.92~1 199.25 m 之间,向喀拉扎向斜中心逐渐变深,地层厚度介于 39.84~917.43 m 之间,平均厚度 512.28 m。整体上为一套河流相沉积,沉积跨度较大,由下部的辫状河流相向上过渡为曲流河相,古气候也由暖湿气候向干旱-半干旱转变。具体表现为岩性上段以褐色、紫褐色的杂色泥岩为主,杂色条带

增多;下段以灰色砂岩、灰绿色泥岩为主,具有典型的辫状河沉积特征(图 1b)。按沉积韵律将头屯河组划为 6 个旋回;本文主要论述的是头屯河组下段第 III 旋回砂体,亦是区内头屯河组主要含矿砂体,该层砂体为一套由多期河道叠加形成的厚层含砾粗砂岩、砂砾岩及砾岩,厚度介于 70~150 m 之间,沿走向发育宽度超过 15 km。



1—第四系; 2—新近系; 3—古近系; 4—白垩系; 5—喀拉扎组; 6—齐古组; 7—头屯河组; 8—西山窑组; 9—三工河组; 10—八道湾组; 11—郝家沟组; 12—地质界线; 13—地质界线(不整合); 14—断裂; 15—公路; 16—水系; 17—地名; 18—铀矿化点; 19—地层产状; 20—工业矿带。

1—Quaternary; 2—Neogene; 3—Eogene; 4—Cretaceous; 5—Kalaza formation; 6—Qigu formation; 7—Toutunhe formation; 8—Xishanyao formation; 9—Sangonghe formation; 10—Badaowan formation; 11—Haojiagou formation; 12—Geological Boundary; 13—Geological unconformity boundary; 14—Fracture; 15—Highway; 16—River syetem; 17—Place name; 18—Uranium mineralization point; 19—Stratigraphic occurrence; 20—Industrial ore belt.

图 1 准噶尔盆地南缘楼庄子地区地质略图及头屯河组柱状图

Fig. 1 The geological sketch map of Louzhuangzi area in the southern margin of Junggar basin and the columnar map of Toutunhe formation

2 样品采集与分析方法

本次研究所采用的样品均取自楼庄子地区铀矿工业孔或矿化孔中含矿目的层砂体,以便于对比同一层砂体中含矿砂岩与无矿砂岩的地区化学差异性。样品质量为 200 g/样,岩矿样加工粒度介于 0.050~0.074 mm 之间,化学分析样加工粒度介于 0.074~0.097 mm 之间,样

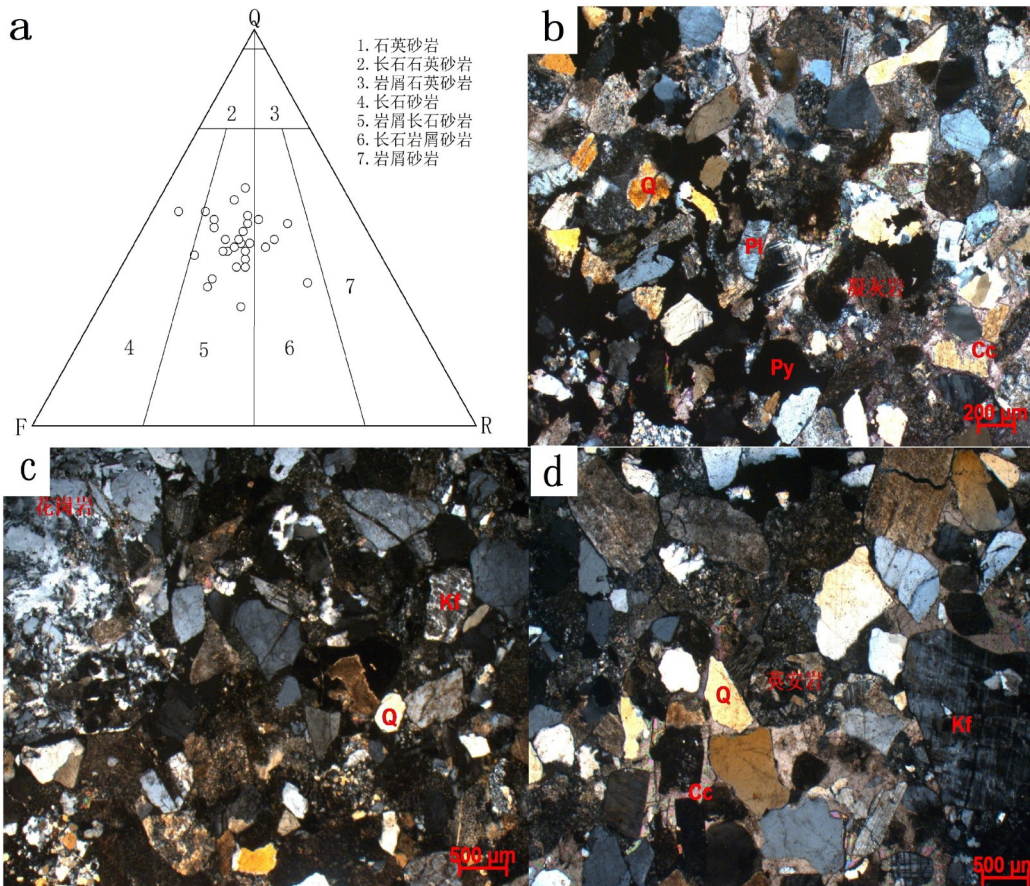
品加工依据《地质矿产实验室测试质量管理规范: DZ/T 0130—2006》^[16]、《铀矿样品加工和管理技术规范: EJ/T 1121—2000》^[17]的规定。主要元素(除 FeO)采用型号为 AxiosmAx 的波长色散型 X 荧光光谱仪进行测试, FeO 采用酸式滴定容量法分析;微量元素采用电感耦合等离子质谱仪进行分析;主、微量元素分析按照规范 GB/T 14506.28—2010^[18]、GB/T 14506.14—

2010^[19]和 GB/T 14506.30—2010^[20]的规定进行测试。CO₂、C_有和全S采用型号为HCS-801DS的高频红外碳硫分析仪,分别按照规范DZG 93-12-17^[21]、GB/T 19145—2003^[22]和GB/T 14506.13—2010^[23]的要求进行分析。样品加工和分析均由核工业新疆理化分析测试中心完成。

3 赋矿砂体岩石学特征

镜下鉴定显示,头屯河组下段赋矿层砂岩类型主要为岩屑长石砂岩,次为长石岩屑砂岩,少量长石砂岩(图2a)。碎屑成分以石英为主,长石次之,岩屑少量,及微量的鳞片状黑云母、白云母及绿泥石等。石英含量介于30%~

60%之间;长石含量介于17%~43%之间,岩屑介于6%~44%之间;成分成熟度指数一般介于0.43~1.50之间,平均为0.88,成分成熟度较低,属杂砂岩。填隙物主要由泥质杂基组成,并零星散布有黄铁矿胶结物(图2b)。杂基以细粒长石、石英和黏土为主,碎屑颗粒见明显的黏土化类蚀变,其边缘有明显的溶蚀作用,孔隙发育。碎屑颗粒之间以点接触为主,少量点-线接触,孔隙式胶结为主,磨圆呈次棱角状-次圆状,分选性差。石英以单晶石英为主,少量多晶石英。单晶石英具明显波状消光现象,多晶石英以石英岩为主,少量玉髓等;长石主要为钾长石和斜长石(图2b、c),部分钾长石具有轻微程度泥化,斜长石有轻微-中等程



a—砂岩分类三角图(1-石英砂岩;2-长石石英砂岩;3-岩屑石英砂岩;4-长石砂岩;5-岩屑长石砂岩;6-长石岩屑砂岩;7-岩屑砂岩);b—砂岩中凝灰岩岩屑和黄铁矿(正交偏光);c—砂岩中凝灰岩岩屑和花岗岩岩屑(正交偏光);d—砂岩中凝灰岩岩屑和英安岩岩屑(正交偏光);Q—石英;Kf—钾长石;Pl—斜长石;Cc—方解石;Py—黄铁矿。

a—Triangle diagram of sandstone classification (1-Quartz sandstone; 2-Feldspathic quartz sandstone; 3-Lithic quartz sandstone; 4-Arkose; 5-Lithic feldspar sandstone; 6-Feldspar lithic sandstone; 7-lithic sandstone); b—Orthogonal polarized photo of tuff debris and pyrite in sandstone; c—Orthogonal polarized photo of marl debris and granite debris in sandstone; d—Orthogonal polarized photo of tuff debris and dacite debris in sandstone; Q—Quartz; Kf—Potassium-feldspar; Pl—Plagioclase; Cc—Calcite; Py—Pyrite.

图2 砂岩分类三角图及镜下鉴定照片

Fig. 2 Triangle classification diagrams and thin section of sandstone

度绢云母化,部分斜长石双晶纹弯曲变形;岩屑主要为英安岩、凝灰岩、霏细岩、安山岩、玄武岩、千枚岩和泥岩等(图 2b、c 和 d),少量鳞片状白云母、黑云母和鳞片状绿泥石。岩屑部分呈轻微-中等程度绢云母化,个别具黄铁矿化。

4 赋矿层砂岩岩石地球化学特征

4.1 主量元素

通过对头屯河组下段目的层砂岩主量元素含量统计(表 1),可以看出主量元素总体上 SiO_2 含量最高,其次为 Al_2O_3 高,除 CaO 、 K_2O 和 Na_2O 存在一定差异外,其他主量元素差别甚微。

SiO_2 含量介于 64.62 % ~ 76.84 % 之间,平均 71.73 %;指示目的层砂岩中富含石英矿物及

硅质岩碎屑,与镜下鉴定结果一致。其次为 Al_2O_3 , 含量介于 9.49 % ~ 13.87 % 之间,平均 11.29 %; TiO_2 含量介于 0.66 % ~ 0.14 % 之间,平均 0.27 %; Al_2O_3 含量远大于 TiO_2 含量,反映物源以长英质物源区为主。 K_2O 含量介于 2.40 % ~ 4.30 % 之间,平均 3.23 %; Na_2O 含量介于 1.79 % ~ 3.32 % 之间,平均 2.38 %。 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 平均为 1.37,表明源岩中富钾矿物或钾长石含量高于斜长石。 CaO 含量介于 0.43 % ~ 7.09 % 之间,平均 3.27 %, MgO 含量介于 0.43 % ~ 1.24 % 之间,平均 0.67 %, CaO/MgO 平均为 5.75,表明目的层砂岩中方解石胶结物较多。综合而言,砂岩中 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 和 $w(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ 值高,反映目的层砂岩碎屑具有富碱、高硅和弱过铝的特点^[24]。

表 1 楼庄子地区头屯河组下段赋铀砂岩主量元素含量/%统计表

Table 1 Statistics of main element content /% of uranium-bearing sandstone samples in the lower member of Toutunhe formation in Louzhuangzi area

样号	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	P_2O_5	MnO	TiO_2	FeO	TFe_2O_3	备注
A301-3	72.94	10.82	1.01	4.28	0.50	3.13	1.89	0.048	0.106	0.139	1.14	2.05	含矿
A401-2	69.69	10.17	0.74	6.05	0.55	2.67	2.01	0.051	0.180	0.212	1.41	2.08	
A405-3	64.62	12.08	0.63	6.11	0.82	2.58	2.63	0.086	0.398	0.423	2.16	2.73	
A501-2	68.14	9.49	0.69	7.09	0.49	3.76	2.31	0.063	0.190	0.147	1.34	1.95	
A502-1	69.59	10.11	0.65	5.61	0.52	4.10	2.30	0.047	0.056	0.145	1.41	1.99	
A503-2	72.24	10.54	0.71	3.43	0.61	4.13	2.49	0.063	0.088	0.189	1.66	2.30	
A504-1	70.72	12.21	1.15	2.96	0.64	3.05	2.68	0.063	0.022	0.269	0.57	1.60	
A601-1	69.18	9.95	0.67	6.96	0.43	2.62	2.38	0.050	0.066	0.255	1.20	1.80	
A602-3	71.25	13.36	0.74	2.27	0.70	3.15	3.06	0.086	0.112	0.283	1.41	2.08	
A1101-4	72.62	10.61	0.89	3.96	0.45	2.88	2.20	0.055	0.057	0.162	0.31	1.11	
1102-3	65.43	10.89	1.14	7.06	0.67	2.57	1.99	0.077	0.325	0.599	0.66	1.68	
平均值	69.67	10.93	0.82	5.07	0.58	3.15	2.36	0.06	0.15	0.26	1.21	1.94	
A301-2	76.84	10.96	1.47	1.20	0.73	2.78	1.79	0.060	0.043	0.216	1.60	2.92	无矿
A401-3	71.86	12.20	0.88	1.98	0.72	2.87	2.62	0.062	0.064	0.232	2.05	2.84	
A405-2	71.43	12.95	1.50	1.56	1.07	3.23	2.48	0.079	0.041	0.380	0.77	2.11	
A501-3	75.61	10.33	0.53	2.15	0.47	4.30	2.56	0.051	0.045	0.158	1.35	1.83	
A502-2	73.89	11.81	0.66	1.44	0.60	4.29	3.32	0.070	0.055	0.237	1.74	2.33	
A503-1	75.67	10.85	0.75	0.70	0.82	4.29	2.17	0.055	0.030	0.225	1.41	2.09	
A504-2	65.46	13.87	4.22	0.43	1.24	2.40	2.18	0.079	0.033	0.661	1.37	5.17	
A601-3	76.07	11.28	0.85	0.99	0.76	3.01	2.31	0.057	0.026	0.270	1.03	1.80	
A602-2	75.64	11.99	0.78	1.26	0.48	3.43	2.76	0.058	0.037	0.269	0.51	1.21	
A1101-1	75.37	11.39	0.76	1.10	0.76	2.87	2.15	0.059	0.029	0.302	0.50	1.18	
1102-6	73.72	10.41	0.66	3.40	0.61	2.99	2.06	0.056	0.081	0.220	0.70	1.29	
平均值	73.78	11.64	1.19	1.47	0.75	3.31	2.40	0.062	0.044	0.288	1.18	2.25	

注: TFe_2O_3 代表全铁, $\text{TFe}_2\text{O}_3 = \text{Fe} + 0.9 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$

4.2 微量元素

对各微量元素测试结果进行统计(表 2), 将其与中国沉积岩丰度相比较^[25], 可以看出, U、Mo 和 Se 相对富集, U 在含矿砂岩中含量介于 $22.89 \times 10^{-6} \sim 3339.41 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 999.21×10^{-6} , 在无矿砂岩中含量介于 $3.27 \times 10^{-6} \sim 4.01 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 3.64×10^{-6} , 表明目的层砂岩中自身铀含量较高, 也是成矿的关键因素之一; Mo 在含矿砂岩中含量介于 $3.60 \times 10^{-6} \sim 327.83 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 118.84×10^{-6} , 在无矿砂岩中含量介于 $0.40 \times 10^{-6} \sim 2.48 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 1.30×10^{-6} ; Se 在含矿砂岩中含量介于

$0.24 \times 10^{-6} \sim 6.14 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 2.39×10^{-6} , 在无矿砂岩中含量介于 $0.12 \times 10^{-6} \sim 8.47 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 3.33×10^{-6} ; Ga 与中国沉积岩丰度相当, 介于 $9.91 \times 10^{-6} \sim 14.71 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 12.15×10^{-6} ; 其他微量元素相对亏损。

进一步对比含矿与无矿砂岩中各微量元素含量, 发现除 Se、Ga 外, 其他元素在含矿砂岩中含量明显高于无矿砂岩, 特别是 Y 在含矿砂岩中相对富集, 含量介于 $20.54 \times 10^{-6} \sim 53.94 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 29.75×10^{-6} ; 在无矿砂岩中相对亏损, 含量介于 $3.03 \times 10^{-6} \sim 15.41 \times 10^{-6}$ 之间, 平均 9.92×10^{-6} 。

表 2 楼庄子地区头屯河组下段赋铀砂岩样品微量元素分析结果

Table 2 Trace element analysis results of uranium-bearing sandstone samples in the lower member of Toutunhe formation in Louzhuangzi area

样号	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	Mo/ 10^{-6}	Se/ 10^{-6}	Ga/ 10^{-6}	V/ 10^{-6}	Ge/ 10^{-6}	Cu/ 10^{-6}	Ti/ 10^{-6}	Sc/ 10^{-6}	Y/ 10^{-6}	备注
A501-27	1435.52	10.32	232.14	6.14	11.82	42.75	1.60	30.26	2578.91	7.89	53.94	含矿
A602-16	3339.41	4.63	327.83	0.24	13.99	105.43	0.63	28.13	1235.31	4.46	24.45	
A502-14	167.30	11.17	20.6	3.54	14.71	60.78	1.45	14.52	3461.66	6.51	26.32	
A1102-9	30.92	5.52	3.60	0.42	11.39	46.67	1.00	9.26	1602.37	6.57	23.48	
A503-12	22.89	8.79	10.04	1.61	12.61	38.58	0.77	10.02	2528.13	8.87	20.54	
A501-14	3.76	4.20	0.40	4.03	9.91	26.28	0.60	8.37	1018.90	4.40	12.95	无矿
A602-19	3.27	4.77	2.18	0.12	12.15	38.91	0.69	31.12	1117.52	5.24	12.69	
A502-17	3.81	5.35	0.58	2.36	11.18	25.96	0.64	5.49	1398.78	4.22	15.41	
A1102-14	4.01	1.32	0.86	8.47	11.81	39.53	0.73	6.64	1398.45	1.13	3.03	
A503-13	3.37	2.53	2.48	1.68	11.94	27.54	0.77	6.25	1459.99	1.78	5.54	
中国沉积岩丰度	2.00	8.70	0.56	0.11	13.00	54.00	1.70	28.00	2650.00	10.00	20.00	

5 讨论

5.1 源区构造背景

研究表明, 可以利用主量元素投图来分析判别其源岩的形成构造背景^[26]。本文采用 $(\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 判别图、 $(\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ 判别图及 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$ 判别图来分析楼庄子地区头屯河组含矿目的层砂岩源岩形成的构造背景。在 $(\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$ 关系图解中(表 3, 图 3a), 样品主要投影在被动大陆边缘和活动大陆边缘及其相交区域; 在 $(\text{TFe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ 关系图解中(图 3b), 样品主要集中在活动大陆边缘与被动大陆边缘相交

部位及其附近; 在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$ 关系图解中(图 3c), 样品主要集中在活动大陆边缘区域, 少量分布在被动大陆边缘区域。

上述结果表明, 头屯河组下段含矿砂岩源岩形成构造背景主要为活动大陆边缘和被动大陆边缘, 也是导致其物源多样性的关键因素。这与耿英英等人^[28]研究认为的头屯河组沉积时期, 天山地区构造活动开始增强, 物源主要来自于北天山和中天山, 且北天山源区比例明显增多的结果相吻合。对天山地区发育的岩体的地球化学研究表明, 古生代岩体中铀含量平均值大于 3×10^{-6} ^[29-33], 如中天山北缘望峰地区花岗岩岩体铀含量高达 9.45×10^{-6} ^[34], 平均值高达 6.13×10^{-6} , 说明物源区赋铀地质体为楼庄子地区头屯河组

表 3 楼庄子地区头屯河组下段赋铀砂岩主量元素相关参数计算结果表/%

Table 3 Calculation results of main elements and related parameters of uranium-bearing sandstone samples in the lower member of Toutunhe formation in Louzhuangzi area /%

样号	TFe ₂ O ₃ +MgO	K ₂ O/Na ₂ O	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	Al ₂ O ₃ /TiO ₂	Al ₂ O ₃ /(Na ₂ O+CaO)	CaO/MgO	(Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃)/(MgO+CaO)	F1	F2	备注
A301-3	2.55	1.66	0.15	77.84	1.75	8.56	2.47	5.99	2.00	含矿
A401-2	2.63	1.32	0.15	47.97	1.26	11.05	1.65	7.14	2.22	
A405-3	3.55	0.98	0.19	28.57	1.38	7.46	1.83	8.46	2.78	
A501-2	2.44	1.63	0.14	64.67	1.01	14.46	1.34	6.28	4.69	
A502-1	2.51	1.78	0.15	69.52	1.28	10.85	1.76	5.31	4.52	
A503-2	2.91	1.66	0.15	55.68	1.78	5.62	2.78	4.31	3.75	
A504-1	2.24	1.14	0.17	45.39	2.16	4.63	3.71	5.74	2.59	
A601-1	2.23	1.10	0.14	38.99	1.07	16.22	1.44	7.69	3.31	
A602-3	2.78	1.03	0.19	47.12	2.51	3.23	4.74	6.31	2.88	
A1101-4	1.56	1.31	0.15	65.32	1.72	8.89	2.61	5.45	2.26	
1102-3	2.36	1.29	0.17	18.17	1.20	10.49	1.56	7.13	2.67	
A301-2	3.65	1.55	0.14	50.74	3.67	1.64	6.44	4.73 (0.43)		无矿
A401-3	3.56	1.09	0.17	52.57	2.65	2.74	4.83	6.20	1.40	
A405-2	3.18	1.30	0.18	34.13	3.21	1.46	5.50	4.55	1.42	
A501-3	2.31	1.68	0.14	65.22	2.20	4.54	4.15	3.12	3.78	
A502-2	2.93	1.29	0.16	49.86	2.48	2.39	6.11	4.03	4.44	
A503-1	2.91	1.98	0.14	48.33	3.79	0.84	7.64	1.91	2.15	
A504-2	6.41	1.10	0.21	20.99	5.32	0.35	10.78	6.85 (1.49)		
A601-3	2.57	1.30	0.15	41.74	3.41	1.30	6.90	3.79	0.86	
A602-2	1.69	1.24	0.16	44.58	2.98	2.62	7.32	4.07	2.76	
A1101-1	1.94	1.34	0.15	37.73	3.51	1.46	6.55	3.49	0.66	
1102-6	1.90	1.45	0.14	47.22	1.91	5.60	2.76	4.57	1.74	

注: TFe₂O₃为全铁, ICV=(Fe₂O₃+K₂O+Na₂O+CaO+MgO+MnO+TiO₂)/Al₂O₃ (单位均为摩尔分数); F1=-1.773TiO₂+0.607Al₂O₃+0.76TFe₂O₃-1.5MgO+0.616CaO+0.509Na₂O-1.224K₂O-9.09; F2=0.445TiO₂+0.07Al₂O₃-0.25TFe₂O₃-1.142MgO+0.438CaO+1.475Na₂O+1.426K₂O-6.861^[26]。

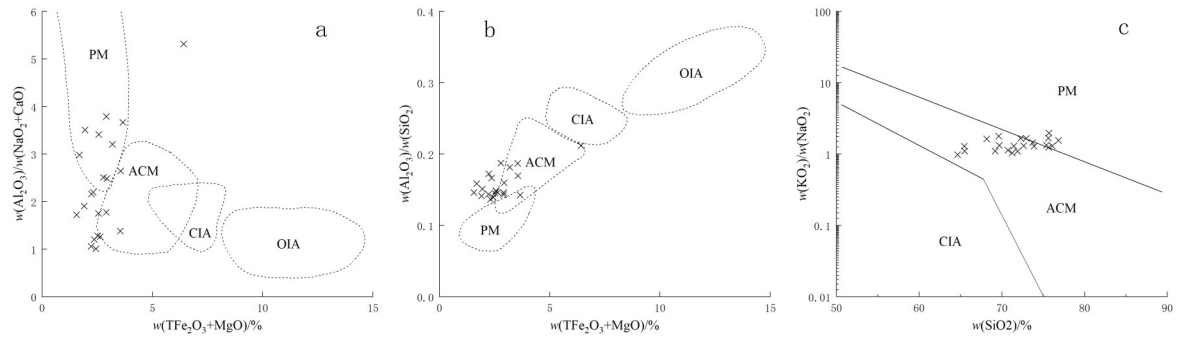


图 3 砂岩主量元素构造环境关系图解
 Fig. 3 Diagrams of the relationship between major elements and tectonic environment of sandstone
 a—(TFe₂O₃+MgO)-Al₂O₃/(Na₂O+CaO)图解, b—(TFe₂O₃+MgO)-Al₂O₃/SiO₂图解, c—SiO₂-K₂O/Na₂O图解, 底图均据文献^[27]。ACM—活动大陆边缘; PM—被动大陆边缘; OIA—大洋岛弧; CIA—大陆岛弧; A1—弧(Arc); A2—演化弧。
 a—The diagrams of the (TFe₂O₃+MgO)-Al₂O₃/(Na₂O+CaO), b—The diagrams of the (TFe₂O₃+MgO)-Al₂O₃/SiO₂, c—The diagrams of the SiO₂-K₂O/Na₂O, Base map according to reference^[27]。ACM—Active Continental Margin; PM—Passive Continental Margin; OIA—Ocean Island Arc; CIA—Continental Island Arc; A1—Arc; A2—Evolutionary Arc.

下段铀成矿提供了较好的铀源基础。

5.2 源区母岩类型

沉积岩的碎屑物质与源岩关系密切,它可

指示沉积岩源岩特征。在 F1-F2 源岩类型判别图解中^[35](图 4a),含矿目的层绝大部分样品投在中性火成岩物源区,仅一个样品落入镁铁

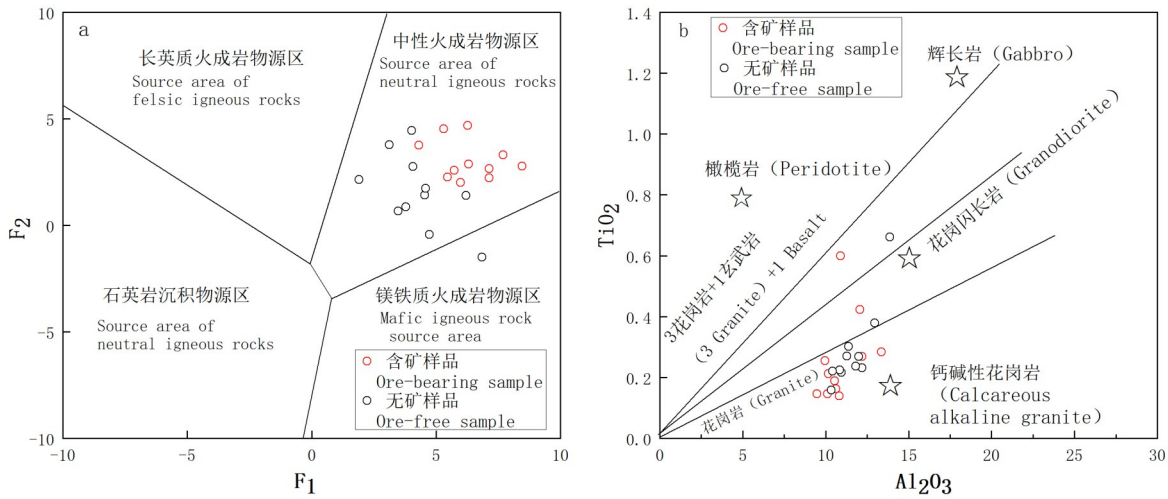


图 4 主量元素物源及源岩判别图

Fig. 4 Identification diagrams of provenance and source rock attribute of major elements

质火成岩物源区,反映出目的层砂岩碎屑物源以中性火成岩物源为主,少量的镁铁质火成岩物源混入。样品投点于 Schieber^[36] 提出的 Al₂O₃-TiO₂ 判别图,可知目的层砂岩样品绝大部分落在花岗岩区,仅个别投在花岗闪长岩区,表明源区母岩类型以花岗岩为主(图 4b),同时也伴有钙碱性花岗岩分布,这与砂岩碎屑中 K₂O 含量远大于 Na₂O 含量,以及低 TiO₂ 的特点相一致。

综上所述,目的层砂岩物源以中性火成岩物源为主,存在少量的镁铁质火成岩物源;其源区母岩以花岗岩为主,少量的花岗闪长岩类,物源主要来自于南侧天山物源区的古生代中酸性岩浆岩,源区岩浆岩呈富碱、高硅和弱过铝的特征。

5.3 赋矿砂体沉积地球化学环境

5.3.1 古气候分析

古气候和沉积环境通常利用沉积岩中的某些主量元素的比值来判别,Fe₂O₃ 和 Al₂O₃ 含量高表示暖湿环境,CaO 和 MgO 含量高表示相对于干旱或有干湿季节变化的环境,本文采用 (Fe₂O₃+Al₂O₃)/(CaO+MgO) 来判别环境的相对湿润程度^[37],目的层砂岩中 (Fe₂O₃+Al₂O₃)/(CaO+MgO) 值介于 1.34~10.78 之间,平均值为 4.31,指示古环境为较暖湿的环境。此外,还可利用 CaO/MgO 值来判别古环境的气温,高值指示相对较高的气温,反之则指示相对较低的气

温^[38]。目的层砂岩 CaO/MgO 平均值在 5.75,也反映了古环境气温相对较高。

5.3.2 沉积期地球化学环境分析

根据各钻孔揭露的情况来看,楼庄子地区头屯河组下段含矿目的层的灰色粗碎屑砂岩中多见条带状、块状炭化植物碎屑和有机质,以及细粒状、星点状黄铁矿等还原性介质(图 5a, b),尤其以含矿段部位的岩心往往呈现大量炭化植物碎屑和黄铁矿特征更为显著,铀品位越高,岩心颜色越深为特点(图 5b)。

微量元素中 U、Mo 为氧化-还原敏感元素,可以指示古氧化-还原环境,目的层砂岩碎屑中微量元素 U、Mo 的富集系数分别介于 1.63~1 669.710 之间和介于 0.71~585.41 之间,U、Mo 的异常富集反映含矿砂岩沉积时处还原环境。

以上证据均表明,目的层砂体沉积时处于还原环境,具备良好的原生还原能力。

5.4 铀成矿过程中主量元素变化特征

通过对头屯河组下段目的层砂岩主量元素含量进行投图(图 6),可以看出主量元素 w(SiO₂) 值最高,介于 64.62%~76.84% 之间,平均值为 71.73%; w(Al₂O₃) 次之,介于 9.49%~13.87% 之间,平均值为 11.30%;其他主量元素占比较小,除 w(CaO)、w(K₂O) 和 w(Na₂O) 存在微弱浮动外,整体上主量元素含量变化趋势相似。

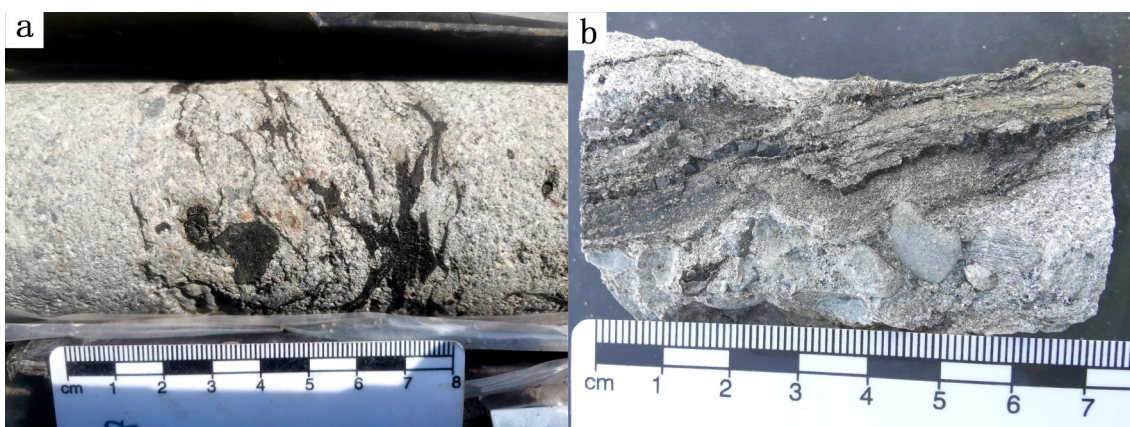


图 5 含矿砂岩中富含条带状炭化植物碎屑和细粒状黄铁矿

Fig. 5 The ore-bearing sandstone is rich in banded carbonized plant debris and fine-grained pyrite

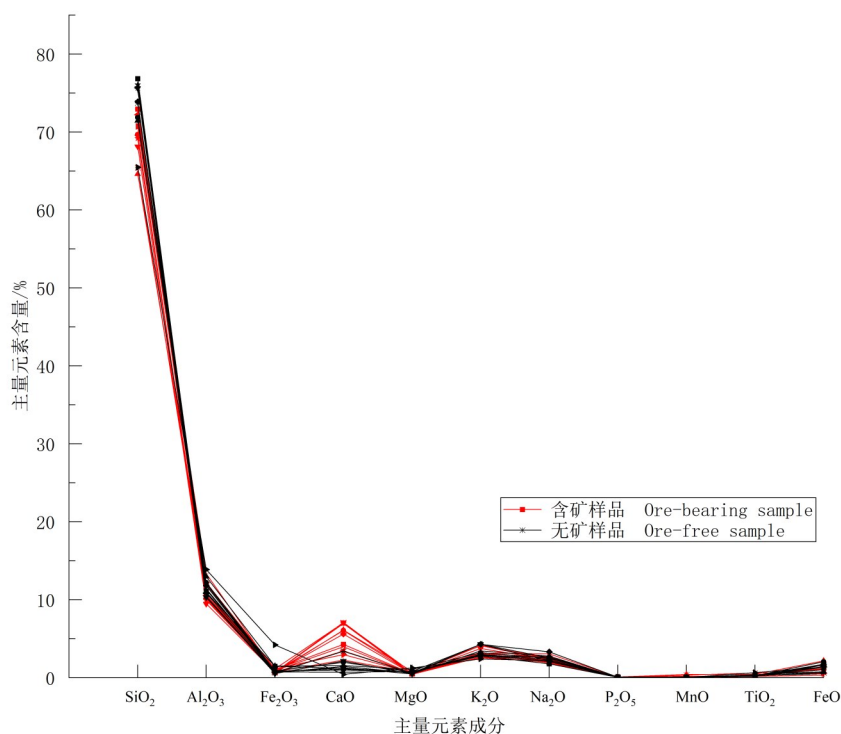


图 6 砂岩主量元素含量变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of main element content in sandstone

但对单个钻孔含矿样品和无矿样品进行分别统计投图,发现主量元素的含量变化在砂岩型铀成矿过程中具备一定的规律性,即:所有钻孔中含矿样品主量元素中 $w(\text{SiO}_2)$ 、 $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 值较无矿样品偏低,显示在楼庄子地区的砂岩型铀成矿作用中,有 SiO_2 和 Al_2O_3 组分的迁出,数据结果与含矿段砂体中长石类矿物具明显而强烈的黏土化蚀变现象相一致(图 7a)。同时,含矿砂岩中 $w(\text{CaO})$ 含量的增高,与含矿段砂体中发育的碳酸盐化现象相对应(图

7b)。并在含矿砂岩中表现为 $w(\text{SiO}_2)$ 与 $w(\text{CaO})$ 呈明显的负相关(图 8)。

5.5 铀成矿过程中微量元素变化特征

将目的层砂岩中的微量元素含量与中国沉积岩元素丰度进行对比,计算富集系数(表 4)。富集系数 $K: K=X \text{ 样品}/X \text{ 沉积岩}$ (X 样品—样品中元素含量, X 沉积岩—中国沉积岩元素丰度。富集系数大于 1 表明元素在样品中相对富集,小于 1 则表明相对亏损。从微量元素蛛网图(图 9)可以看出,各微量元素组分总体富

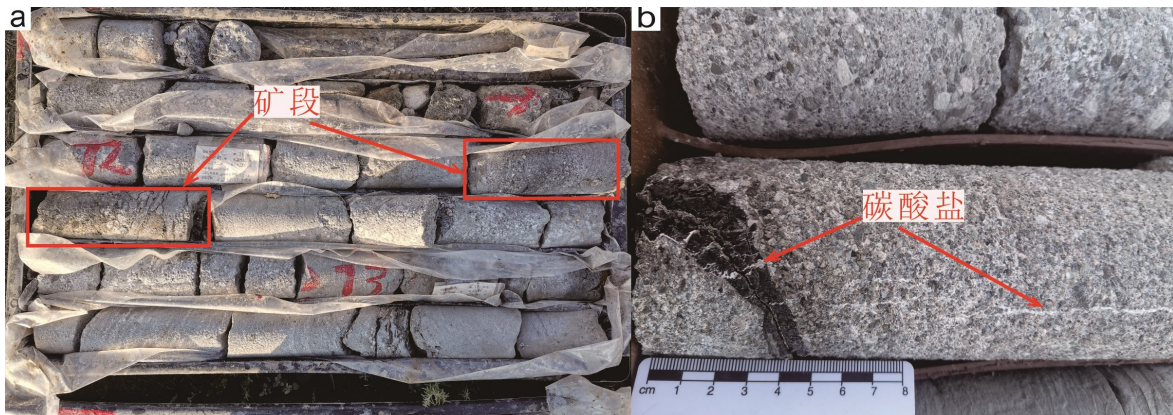


图 7 含矿砂岩中黏土化蚀变和碳酸盐化

Fig. 7 Clay alteration and carbonation in ore-bearing sandstones

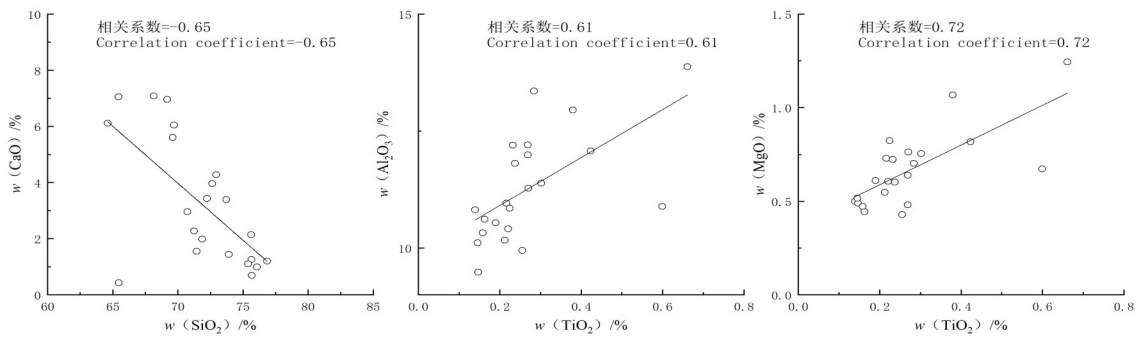


图 8 砂岩主要元素关系图

Fig. 8 Relationship diagram between major elements of sandstone

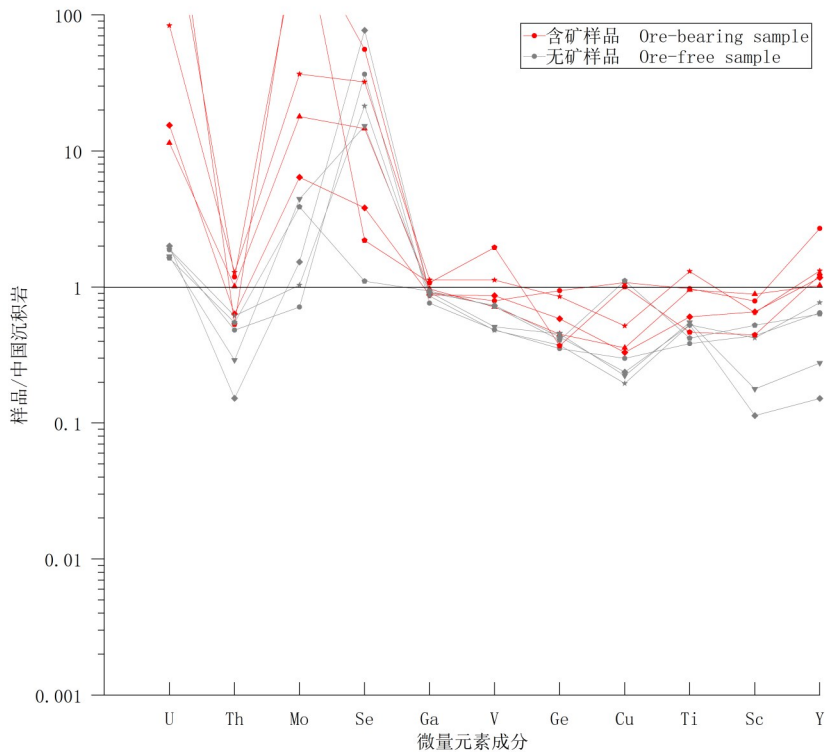


图 9 砂岩微量元素标准化蛛网图

Fig. 9 The standardized trace element spider diagram of sandstone

集、亏损程度具有一定相似性, U、Mo 和 Se 相对富集, Ga 与中国沉积岩丰度相当, 其他微量元素相对亏损。

通过各钻孔含矿和无矿样品微量元素含量的对比分析, 发现同一钻孔含矿样品微量元

素含量普遍较无矿样品含量偏高, 特别是 U、Mo、Se、V、Ge、Ti、Sc 和 Y 等元素增高明显。这一现象在不同钻孔均有普遍型, 即目的层砂体中微量元素在铀成矿过程亦存在迁移富集现象, 并在含矿样品中更为富集。

表 4 微量元素富集系数统计结果

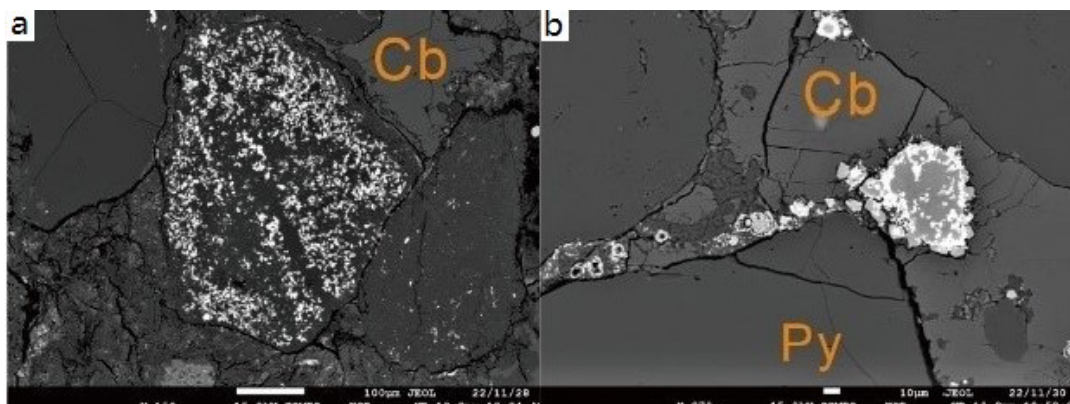
Table 4 Statistical results of enrichment coefficient of trace elements

样号	U	Th	Mo	Se	Ga	V	Ge	Cu	Ti	Sc	Y
DHA501-27	717.76	1.19	414.53	55.82	0.91	0.79	0.94	1.08	0.97	0.79	2.70
DHA501-14	1.88	0.48	0.71	36.66	0.76	0.49	0.35	0.30	0.38	0.44	0.65
DHA503-12	11.44	1.01	17.92	14.65	0.97	0.71	0.45	0.36	0.95	0.89	1.03
DHA503-13	1.68	0.29	4.43	15.29	0.92	0.51	0.45	0.22	0.55	0.18	0.28
DHA1102-9	15.46	0.63	6.42	3.83	0.88	0.86	0.59	0.33	0.60	0.66	1.17
DHA1102-14	2.00	0.15	1.53	76.96	0.91	0.73	0.43	0.24	0.53	0.11	0.15
DHA502-14	83.65	1.28	36.79	32.19	1.13	1.13	0.85	0.52	1.31	0.65	1.32
DHA502-17	1.91	0.62	1.03	21.42	0.86	0.48	0.37	0.20	0.53	0.42	0.77
DHA602-16	1 669.71	0.53	585.41	2.20	1.08	1.95	0.37	1.00	0.47	0.45	1.22
DHA602-19	1.63	0.55	3.89	1.11	0.93	0.72	0.41	1.11	0.42	0.52	0.63

5.6 其他组分的变化特征

由表 5 可见, 含矿样品中 $C_{有}$ 介于 0.18%~1.78% 之间, 平均值为 0.88%, 全 S 介于 0.96%~3.29% 之间, 平均值为 1.97%, CO_2 介于 5.79%~10.60% 之间, 平均值为 7.86%; 呈现 $C_{有}$ 、全 S 及 CO_2 含量均高于无矿砂岩的特点, 这以结果与岩心特征相吻合, U 矿化往往在砂岩还原能力更强的砂岩段进行沉淀富

集。同时, 含矿砂岩中较明显的黄铁矿化、碳酸盐化, 也揭示出砂岩型铀成矿过程中 Fe、S 和 CO_2 等组分的迁移和富集性; 以黄铁矿与 U 矿的空间伴生关系极为密切, 铀矿石呈分散状或团块状分布于碎屑颗粒表面(图 10a), 与黄铁矿共生或伴生, 或呈团块状分布于矿物颗粒之间碳酸盐胶结物边缘, 与黄铁矿伴生(图 10b)。



备注: Cb—碳酸盐, Py—黄铁矿。Remarks: Cb—Carbonate, Py—Pyrite.

图 10 铀矿物分布特征

Fig. 10 Distribution characteristics of uranium minerals

表 5 楼庄子地区头屯河组下段赋铀砂岩中 $C_{\text{有}}$ 、全 S 和 CO_2 含量统计表Table 5 Statistical of $C_{\text{有}}$, total S and CO_2 content of uranium-bearing sandstone samples in the lower member of Toutunhe formation in Louzhuangzi area

组分	含矿砂岩			无矿砂岩		
	最小值	最大值	平均值	最小值	最大值	平均值
$C_{\text{有}}/\%$	0.18	1.78	0.88	0.10	0.15	0.12
全 S/%	0.96	3.29	1.97	0.35	0.83	0.57
$CO_2/\%$	5.79	10.60	7.86	0.83	8.51	3.49

6 结 论

1) 砂岩主量元素的相关参数和判别图解、岩石地球化学特征表明,含矿目的层砂岩碎屑物源以中性火成岩物源为主,母岩类型主要为花岗岩,少量花岗闪长岩类、火山碎屑岩、沉积岩及变质岩,反映物源的多源性,同时也说明物源区自身铀源较好。

2) 目的层砂岩源岩形成构造背景主要为活动大陆边缘和被动大陆边缘,特殊的构造背景下,地层抬升和掀斜,加速蚀源区富铀地质体中铀的活化与迁移;同时造就物源的多源性。

3) 主量元素比值,指示头屯河组下段含矿砂岩沉积时,具有暖湿的古气候特点;垂向上泥-砂-泥的地层结构有利于含铀含氧水的渗入;辫状河相的厚层粗碎屑岩为铀的成矿流体的迁移和富集,提供有利的运移通道和良好的容矿空间;砂岩中富含有机质和黄铁矿等还原性介质,以及微量元素 U、Mo 的高度富集,指示头屯河组下段沉积时处于还原环境,同时还原性物质为铀的沉淀富集和后期改造提供较高的还原容量;为铀的成矿创造有利的沉积环境。

4) 主量元素含量变化趋势相似,并在砂岩型铀成矿过程中具有一定的规律性,即:所有钻孔含矿样品主量元素中 $w(SiO_2)$ 、 $w(Al_2O_3)$ 值较无矿样品偏低, $w(CaO)$ 含量的增高;组分含量的差异性具体表现为矿段砂岩中碳酸盐化的发育,以及明显的黏土化蚀变现象。

5) 微量元素富集和亏损程度基本相似, U、Mo 和 Se 相对富集,除 Ga 与中国沉积岩丰度相当外,其他微量元素相对亏损;微量元素含量亦呈现出一定的规律性,即:同一钻孔含矿样

品微量元素含量普遍较无矿样品含量偏高,特别是 U、Mo、Se、V、Ge、Ti、Sc 和 Y 等元素增高明显,并在含矿样品中更为富集;显示目的层砂岩中微量元素在铀成矿过程也存在迁移富集现象。

致谢:感谢唐湘飞、闫晶晶和杜默给予的支持和帮助!

参考文献

- 张驰,于兴河,姚宗全,等.准噶尔盆地南缘西段中、上侏罗统沉积演化及控制因素分析[J].中国地质,2021,48(1):284-296.
ZHANG Chi, YU Xinghe, YAO Zongquan, et al. Sedimentary evolution and controlling factors of the Middle-Upper Jurassic in the western part of the southern Junggar basin[J]. Geology in China, 2021, 48(1):284-296(in Chinese).
- 陈正乐,鲁克改,王果,等.准噶尔盆地南缘新生代构造特征及其与砂岩型铀成矿作用初析[J].岩石学报,2010,26(2):457-470.
CHEN Zhengle, LU Kegai, WANG Guo, et al. Characteristics of Cenozoic structural movements in southern margin of Junggar basin and its relationship to the mineralization of sandstone-type uranium deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(2):457-470(in Chinese).
- 闫晶晶,贾为卫,黄松.准噶尔盆地南缘硫磺沟地区中-新生代构造演化与侏罗系铀成矿的关系[J].铀矿地质,2022,38(6):1022-1031.
YAN Jingjing, JIA Weiwei, HUANG Song. Relationship between Mesozoic-Cenozoic structural evolution and Jurassic uranium mineralization in Liuhuanggou area, southern margin of Junggar basin [J]. Uranium Geology, 2022, 38(6):1022-1031(in Chinese).

- 4 贾为卫,王国荣,唐湘飞,等.准噶尔盆地南缘楼庄子地区头屯河组不同类型蚀变带与铀成矿关系探讨[J].世界核地质科学,2023,40(2):152-161.
JIA Weiwei, WANG Guorong, TANG Xiangfei, et al. Discussion on the relationship of different types of alteration zones to the uranium mineralization in Toutunhe formation of Louzhuangzi area, southern margin of Junggar basin[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(2): 152-161(in Chinese).
- 5 黄少华,秦明宽,刘章月,等.成岩作用与油气侵位对砂岩铀成矿的约束-以淮南硫磺沟地区头屯河组砂岩铀成矿为例[J].沉积学报,2016,34(2):250-259.
HUANG Shaohua, QIN Mingkuan, LIU Zhangyue, et al. Impact of diagenesis and hydrocarbon charging on sandstone uranium mineralization: An example of Toutunhe formation in Liuhuanguo area, southern Junggar basin [J]. Acta Sedimentologica, 2016, 34(2): 250-259(in Chinese).
- 6 耿英英,刘章月,黄少华,等.准噶尔盆地南缘头屯河地区砂岩型铀成矿环境与找矿方向[J].铀矿地质,2022,38(2):194-206.
GENG Yingying, LIU Zhangyue, HUANG Shaohua, et al. Metallogenic environment and prospecting direction of sandstone type uranium deposits in Toutunhe area, southern margin of Junggar basin [J]. Uranium Geology, 2022, 38(2): 194-206(in Chinese).
- 7 王国荣,贾为卫,杜默,等.准噶尔盆地南缘侏罗系辫状河沉积体系与铀成矿关系[J].铀矿地质,2021,37(3):342-354.
WANG Guorong, JIA Weiwei, DU Mo, et al. Relationship between Jurassic braided river depositional system and uranium mineralization in the southern margin of Junggar basin [J]. Uranium Geology, 2021, 37(3): 342-354(in Chinese).
- 8 鲁克改,杜默,孙潇,等.准噶尔盆地南缘楼庄子地区头屯河组下段砂岩型铀成矿控制因素和成因分析[J].铀矿地质,2023,39(4):507-521.
LU Kegai, DU Mo, SUN Xiao, et al. Metallogenic controlling factors and genetic analysis of sandstone uranium deposit in the lower member of Toutunhe formation in Louzhuangzi area, southern Junggar basin [J]. Uranium Geology, 2023, 39(4): 507-521(in Chinese).
- 9 李琪,吴柏林,周玉,等.准噶尔盆地南缘硫磺沟地区头屯河组沉积特征及其铀成矿远景分析[J].西北大学学报(自然科学版),2023,53(4):635-654.
LI Qi, WU Bailin, ZHOU Yu, et al. Sedimentary characteristics and uranium mineralization prospect analysis of the Toutunhe formation in the Liuhuanguo area of the southern margin of the Junggar basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2023, 53(4): 635-654(in Chinese).
- 10 黄松,贾为卫,闫晶晶.准噶尔盆地南缘楼庄子地区头屯河组下段砂体特征与铀成矿关系探讨[J].铀矿地质,2023,39(4):522-530.
HUANG Song, JIA Weiwei, YAN Jingjing. Discussion on the relationship between sand body characteristics and uranium mineralization in the lower member of Toutunhe formation in Louzhuangzi area, southern margin of Junggar basin [J]. Uranium Geology, 2023, 39(4): 522-530(in Chinese).
- 11 ROLLINSON H R. Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation [M]. London: Longman Scientific Technical Press, 1993: 1-352.
- 12 廉刚,唐湘飞,黄松.准噶尔盆地东部卡姆斯特地区头屯河组下段砂岩地球化学特征及地质意义[J].铀矿地质,2023,39(4):546-557.
LIAN Gang, TANG Xiangfei, HUANG Song. Geochemical characteristics of sandstone in the lower member of Toutunhe formation and its geological significance in Kamst area, eastern Junggar basin [J]. Uranium Geology, 2023, 39(4): 546-557(in Chinese).
- 13 周月.准噶尔盆地南缘侏罗系砂岩岩石地球化学特征对物源和古环境的约束[D].成都:成都理工大学,2022.
ZHOU Yue. Constraints of petrogeochemical characteristics of Jurassic sandstone on provenance and paleoenvironment in the southern margin of Junggar basin [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022(in Chinese).
- 14 邓起东,冯先岳,张培震,等.乌鲁木齐山前拗陷逆断裂-褶皱带及其形成机制[J].地学前缘(中国地质大学,北京),1999,6(4):191-201.
DENG Qidong, FENG Xianyue, ZHANG Peizhen, et al. Reverse fault and fold zone in the Urumqi range front depression of the northern Tianshan and its genetic mechanism [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing), 1999, 6(4): 191-201(in Chinese).
- 15 贾为卫,黄松,闫晶晶,等.新疆准噶尔盆地南缘金沟河-浅水河地区铀矿资源调查评价[R].乌鲁木齐:核工业二一六大队,2021:1-164.

- 16 地质矿产实验室测试质量管理规范: DZ/T 0130—2006 [S]: 1-45.
The specification of quality management for geological laboratories [S]: 1-45 (in Chinese).
- 17 铀矿样品加工和管理技术规范: EJ/T 1121—2000 [S]: 1-13
Standard of manufacturing and managerial technique for the uranium samples [S]: 1-13 (in Chinese).
- 18 硅酸盐岩石化学分析方法, 第 28 部分: 16 个主次成分量测定: GB/T 14506.28—2010 [S]: 1-7.
Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 28: Determination of 16 major and minor elements content [S]: 1-7 (in Chinese).
- 19 硅酸盐岩石化学分析方法, 第 14 部分: 氧化亚铁量测定 GB/T 14506.14—2010 [S]: 1-3.
Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 14: Determination of ferrous oxide content [S]: 1-3 (in Chinese).
- 20 硅酸盐岩石化学分析方法, 第 30 部分: 44 个元素量测定: GB/T 14506.30—2010 [S]: 1-14.
Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 30: Determination of elements [S]: 1-14 (in Chinese).
- 21 岩石矿物分析: DZG 93-12-17 [M]. 北京: 地质出版社, 2011.2: 195-197.
- 22 沉积岩中总有机碳测定: GB/T 19145—2003 [S].
Determination for total organic in sedimentary rock [S]: 1-3 (in Chinese).
- 23 硅酸盐岩石化学分析方法, 第 13 部分: 硫量测定 GB/T 14506.13—2010 [S]: 1-4.
Methods for chemical analysis of silicate rocks—Part 13: Determination of sulfur content [S]: 1-4 (in Chinese).
- 24 张博文, 展新忠, 端木常青. 东准噶尔卡姆斯特岩体地球化学特征及构造意义 [J]. 新疆大学学报 (自然科学版), 2018, 35(4): 502-512.
ZHANG Bowen, ZHAN Xinzong, DUANMU Changqing, et al. The study on petrogeochemistry of Kamusite granites in eastern Junggar and its tectonic significance [J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2018, 35(4): 502-512 (in Chinese).
- 25 黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度 [J]. 地球化学, 1994, 23(2): 140-145.
LI Tong. Element abundances of China's continental crust and its sedimentary layer and upper continental crust [J]. Geochimica, 1994, 23(2): 140-145 (in Chinese).
- 26 SCHIEBER J.A combined petrographical-geochemical provenance study of the Newland Formation, Mid-Proterozoic of Montana [J]. Geological Magazine, 1992, 129(2): 223-237 (in Chinese).
- 27 李强, 陈擎, 王继斌, 等. 柴达木盆地西缘砂岩型铀矿元素地球化学特征及其地质意义 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2022, 41(6): 9-10.
LI Qiang, CHEN Qing, WANG Jibin, et al. Elemental geochemical characteristics of the sandstone type uranium deposit in the western margin of Qaidam basin and their geological significances [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2022, 41(6): 9-10 (in Chinese).
- 28 耿英英, 刘章月, 何中波, 等. 准噶尔盆地南缘头屯河地区砂岩型铀矿铀源区及其成矿构造背景分析 [J]. 地质论评, 2020, 66(2): 393-409.
GENG Yingying, LIU Zhangyue, HE Zhongbo, et al. Provenance and ore-forming tectonic setting of sandstone-type uranium deposits in the southern margin of Junggar basin: Insights from U-Pb ages and Hf isotopes of detrital zircons [J]. Geological Review, 2020, 66(2): 393-409 (in Chinese).
- 29 贾晓亮, 翟明国, 郭瑞清, 等. 新疆南天山泥盆纪钙碱性侵入岩的形成时代、地球化学特征及构造意义 [J]. 岩石学报, 2017, 33(10): 3057-3075.
JIA Xiaoliang, ZHAI Mingguo, GUO Ruiqing, et al. Geochronology and geochemistry characteristics of the Devonian calcium-alkaline intrusive rocks in southern Tianshan and their tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(10): 3057-3075 (in Chinese).
- 30 冯光英, 杨经绥, 刘飞, 等. 新疆中天山干沟一带晚石炭世花岗岩的岩石成因及其地质意义 [J]. 中国地质, 2016, 43(5): 1545-1557.
FENG Guangying, YANG Jingsui, LIU Fei, et al. Petrogenesis and geological significance of the Late Carboniferous granites from Gangou, Central Tianshan Mountains, Xinjiang [J]. Geology in China, 2016, 43(5): 1545-1557 (in Chinese).
- 31 朱涛, 马中平, 徐学义, 等. 中天山南缘那拉提构造带达格特闪长岩的年龄、地球化学特征及其构造意义 [J]. 地质通报, 2012, 31(12): 1965-1972.
ZHU Tao, MA Zhongping, XU Xueyi, et al. Geochemical and geochronological studies of Dagete diorite in Nalati magmatic belt of Middle Tianshan mountains [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(12): 1965-1972 (in Chinese).
- 32 李平, 朱志新, 穆利修, 等. 新疆中天山巴伦台地区

- 花岗岩侵入体地球化学、年代学研究及其构造意义[J].地质学报,2017,91(1):80-93.
- LI Ping, ZHU Zhixin, MU Lixiu, et al. Geochemistry and geochronology of granitoids intrusions from the Baluntai area in Central Mountains, and its tectonic significance[J].Acta Geologica Sinica,2017,91(1):80-93(in Chinese).
- 33 刘飞,杨经绥,李天福,等.新疆北天山沙湾地区晚石炭世火山岩地球化学特征及地质意义[J].中国地质,2011,38(4):868-889.
- LIU Fei, YANG Jingsui, LI Tianfu, et al. Geochemical characteristics of Late Carboniferous volcanic rocks in northern Tianshan, Xinjiang, and their geological significance[J].Geology in China,2011,38(4):868-889(in Chinese).
- 34 杨猛,王居里,王建其,等.新疆中天山北缘望峰地区花岗岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素组成研究[J].岩石学报,2012,28(7):2121-2131.
- YANG Meng, WANG Juli, WANG Jianqi, et al. Studies on geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes of granite in Wangfeng area at the northern margin of Middle Tianshan, Xinjiang [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28 (7) : 2121-2131 (in Chinese).
- 35 ROSER B P, KORSCH R J. Provenance signatures of sandstone-mud-stone suites determined using discriminant function analysis of major-element data [J].Chemical Geology,1988,67(1/2):119-139.
- 36 SCHIEBER J. A combined petrographical-geochemical provenance study of the Newland Formation, Mid-Proterozoic of Montana[J].Geological Magazine,1992,129(2):223-237.
- 37 谢建磊,赵宝成,战庆,等.元素地球化学在古环境和古生态研究中的应用综述[J].上海国土资源,2015,36(3):64-74.
- XIE Jianlei, ZHAO Baocheng, ZHAN Qing, et al. Review of geochemical applications for paleoenvironmental and paleoecological analyses [J].Shanghai Land & Resources,2015,36(3):64-74(in Chinese).
- 38 孙潇,王国荣,王果,等.东准卡姆斯特地区中侏罗—渐新世古气候环境分析及对砂岩型铀矿的影响[J].新疆地质,2019,37(2):242-246.
- SUN Xiao, WANG Guorong, WANG Guo, et al. Middle Jurassic-Oligocene Paleoclimate environment and its influence on mineralization of sandstone-type uranium deposit in Kamuster area, eastern of the Junggar basin [J].Xinjiang Geology,2019,37(2):242-246(in Chinese).