何中波,冀华丽,胡宝群,等.准噶尔盆地北部晚白垩世至新近纪沉积介质环境演化特征及其对铀成矿的制约.吉林大学学报(地球科学版),2024,54(3):800-810. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220238.
He Zhongbo, Ji Huali, Hu Baoqun, et al. Environmental Evolution Characteristics of Sedimentary Media from Late Cretaceous to Neogene in the Northern Junggar Basin and Its Constraints on Uranium Mineralization. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2024,54(3):800-810. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220238.

准噶尔盆地北部晚白垩世至新近纪沉积介质环境演化特征及其对铀成矿的制约

何中波[1,2],冀华丽[2],胡宝群[1],孙 萧[3],钟 军[2],杨 喆[2],陈 虹[3]

1.东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌 330013
2.核工业北京地质研究院中核铀资源勘查与评价技术重点实验室,北京 100029
3.核工业216大队,乌鲁木齐 830011

摘要:沉积地层原生沉积介质的环境对砂岩型铀矿成矿作用及潜力分析具有重要意义。本文以准噶尔盆地北部铀矿地质探井N3006中上白垩统至新近系16件泥岩样品中的微量元素测试结果为基础,结合露头及钻孔岩心发育特征,选用对沉积介质环境反映比较敏感的锂(Li)、锶(Sr)、镓(Ga)、钡(Ba)、铜(Cu)、铀(U)、钒(V)、镍(Ni)等微量元素指标,探讨了研究区晚白垩世至新近纪沉积介质环境演化特征及其对铀成矿作用的制约。研究结果表明:晚白垩世至新近纪古沉积环境总体表现为干旱炎热且富氧的淡水-微咸水沉积;据原生沉积环境判断,研究区内上白垩统至新近系各层组砂体总体上不利于传统的层间氧化和潜水氧化砂岩型铀矿化的发育;强氧化的古环境有利于铀元素的迁移,局部特殊环境形成的原生灰色层和后期遭受还原流体改造的灰色层是该区砂岩型铀矿找矿的重要突破方向。

关键词:晚白垩世;新近纪;泥岩;微量元素;古沉积环境演化;铀成矿;准噶尔盆地

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220238 **中图分类号**:P548;P597 **文献标志码**:A

Environmental Evolution Characteristics of Sedimentary Media from Late Cretaceous to Neogene in the Northern Junggar Basin and Its Constraints on Uranium Mineralization

He Zhongbo[1,2], Ji Huali[2], Hu Baoqun[1], Sun Xiao[3], Zhong Jun[2], Yang Zhe[2], Chen Hong[3]

1. *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang* 330013, *China*
2. *Key Laboratory of Uranium Resources Prospection and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology CNNC, Beijing* 100029, *China*
3. *Geologic Party No.*216, *CNNC, Urumqi* 830011, *China*

收稿日期:2022-10-21

作者简介:何中波(1980—),男,正高级工程师,博士研究生,主要从事盆地分析、砂岩型铀矿成矿条件、成矿机理及成矿预测研究工作,E-mail:hzb100029@163.com

基金项目:中国核工业地质局铀矿勘查项目(202006-4);中核集团集中研发项目(2021-143)
Supported by the Uranium Exploration Project of China Nuclear Industry Geological Bureau (202006-4) and the China National Nuclear Corporation's Centralized Research and Development Project (2021-143)

Abstract: The environment of the primary sedimentary medium in the sedimentary strata is of great significance to the mineralization and potential analysis of sandstone-type uranium deposits. In this study, trace element analyses of 16 mudstoness derived from the Upper Cretaceous to Neogene in the uranium geological exploration well N3006 in the north of Junggar basin, were conducted. By combination with observations form outcrops and drill cores, the lithium (Li), strontium (Sr), gallium (Ga), barium (Ba) Copper (Cu), uranium (U), vanadium (V), nickel (Ni) and other trace element indicators are utilized to discuss the environmental evolution characteristics of the Late Cretaceous to Neogene sedimentary media in the study area and their constraints on uranium mineralization. All the results suggest that, the paleosedimentary environment from the Late Cretaceous to Neogene was generally characterized by dry, hot and oxygen rich fresh water brackish water deposits; Judging from the primary sedimentary environment, the sand bodies of each formation from Upper Cretaceous to Neogene in the study area are generally not conducive to the development of traditional interlayer oxidation and phreatic oxidation sandstone-type uranium mineralization; However, the presence of strongly oxidized paleoenvironment is conducive to the migration of uranium elements. Significantly, the primary gray layer formed in a local special environment and the gray layer transformed by reducing fluid in the later period are the important breakthrough directions for the exploration of sandstone type uranium deposits in the area.

Key words: Late Cretaceous; Neogene; mudstone; trace elements; evolution of paleosedimentary environment; uranium mineralization; Junggar basin

0　引言

沉积地层原生沉积介质的环境研究对砂岩型铀矿找矿目标层的确定、找矿方向的探讨具有重要的意义[1-2]。盆地沉积介质的地球化学环境控制着元素分布的规律[3-9]，因此，可通过研究特定元素的质量分数及其比值来识别沉积环境[10-15]，恢复物源及古沉积环境[16-17]。

研究区位于准噶尔盆地北部，南以三个泉凸起为界，北至德伦山—杜热一线。前人[18-19]针对研究区北部古近系挤压推覆构造与沉积耦合特征及新生代构造特征与铀成矿的关系开展了尝试性分析，并重点针对研究区东部构造演化开展了大量的研究，基本理清了研究区东部构造演化的期次及影响范围[20-26]；针对沉积盖层主要开展了局部地区侏罗系沉积特征研究，明确了研究区东部侏罗系主要发育辫状河三角洲、扇三角洲及沼泽沉积环境[27]；受限于石油地质和煤田地质主要目标层位的限制，针对上白垩统至新近系沉积特征及古沉积环境仅见少量报道[28-29]。在铀矿地质研究方面，针对研究区东部侏罗系砂岩型铀矿成矿条件、成矿机理、成矿远景和找矿方面开展了大量的研究[30-33]；其次，在二十世纪初，前人针对区内顶山已有矿点铀矿化特征、水文地质条件及含矿层岩石地球化学特征等方面开展了较为详细的解剖研究[34-38]；但受限于目标层沉积环境和浅部构造格局等方面基础研究的薄弱，该地区砂岩型铀矿的科研及找矿工作陷入停滞状态。近年来，关于顶山矿点及其周边黄花沟地区的砂岩型铀矿成矿条件的研究再次引起部分学者的关注，主要针对顶山地区铀镭平衡特征、氧化带地球化学特征及黄花沟地区成矿条件等方面开展了研究[39-40]；但针对研究区上白垩统至新近系原始沉积环境和砂岩型铀矿找矿方向等问题研究较为薄弱，导致研究区内大面积发育的上白垩统红砾山组和古近系乌伦古河组找矿方向和成矿潜力不明。本文利用乌伦古坳陷典型铀矿地质钻孔 N3006 中泥岩样品的微量元素数据，力求恢复研究区上白垩统至新近系各层组沉积时期的古沉积环境，探讨沉积介质环境演化特征，综合分析上白垩统至新近系各层组的原生沉积环境，以期对研究区上白垩统红砾山组和古近系乌伦古河组砂岩型铀矿找矿方向、成矿潜力评价工作提供关键的支撑。

1　区域地质背景

研究区位于准噶尔盆地北部，构造区划上包含乌伦古坳陷和陆梁隆起北部的大部分地区，西起夏子街地区，东到卡姆斯特，南起三个泉北，北至杜热南，面积约 $2.6\times10^4\ km^2$（图 1）。坳陷内发育厚层

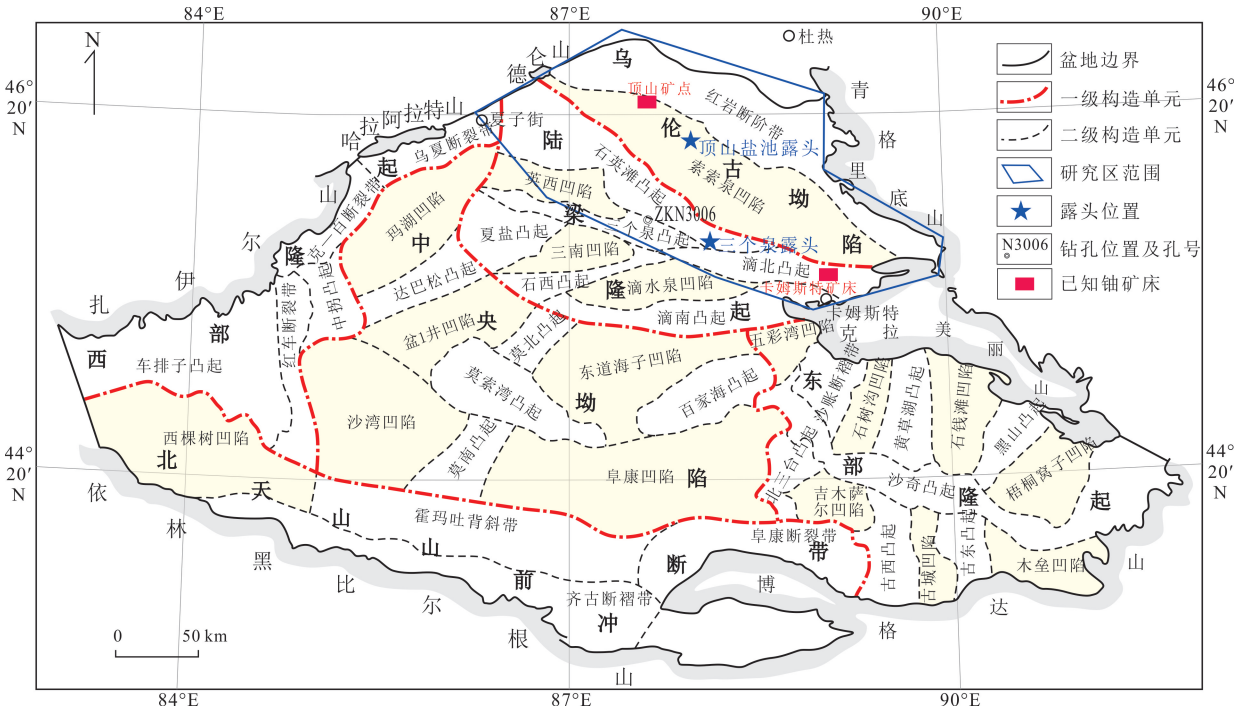


图1 准噶尔盆地构造分区图

Fig.1 Tectonic zoning map of Junggar basin

中、新生代盖层,白垩纪至今主要发育下白垩统吐谷鲁群、上白垩统红砾山组、古近系乌伦古河组、新近系索索泉组及第四系,各系之间发育区域性不整合。

上白垩统红砾山组(K_2h)、古近系乌伦古河组($E_{1-3}w$)典型露头和N3006井典型岩石照片分别如图2、3。上白垩统红砾山组岩性以黄褐色、褐黄色细砂岩和中砂岩为主夹砖红色泥岩(图2 a、b、c、d,图3 a、b、c);古近系乌伦古河组岩性以白色、灰白色砂岩与褐色、褐黄色泥岩互层为主(图2 e、f、g、h,图3 d、e、f);新近系索索泉组(N_1s)以红色-杂色的浅湖相泥质岩为主,夹细碎屑沉积物,钙质质量分数高(图3 g、h、i)。

2 样品与测试

采集了研究区钻孔N3006中40件样品,重点选取了具有代表性的16件泥岩样品进行测试和分析,自下而上分别属于上白垩统红砾山组(5件)、古近系乌伦古河组(8件)及新近系索索泉组(3件),涵盖了晚白垩世至新近纪该地区发育的所有泥质盖层,测试的元素主要有:Li、Be、Sc、V、Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Ga、Rb、Sr、Cs、Ba、La、Ce、Eu、Gd、Tb、Th、U。所有样品的微量元素地球化学测试均在核工业北京地质研究院分析测试中心实验室测试完成。测试系用NexION300Dd等离子体质谱仪(ICP-MS)。全岩分析采用GB/T14506.30—2010[41]硅酸盐岩石化学分析方法测定主量元素和微量元素质量分数,仪器精密度优于±5%,具有较高的精确度。测试结果见表1。

3 讨论

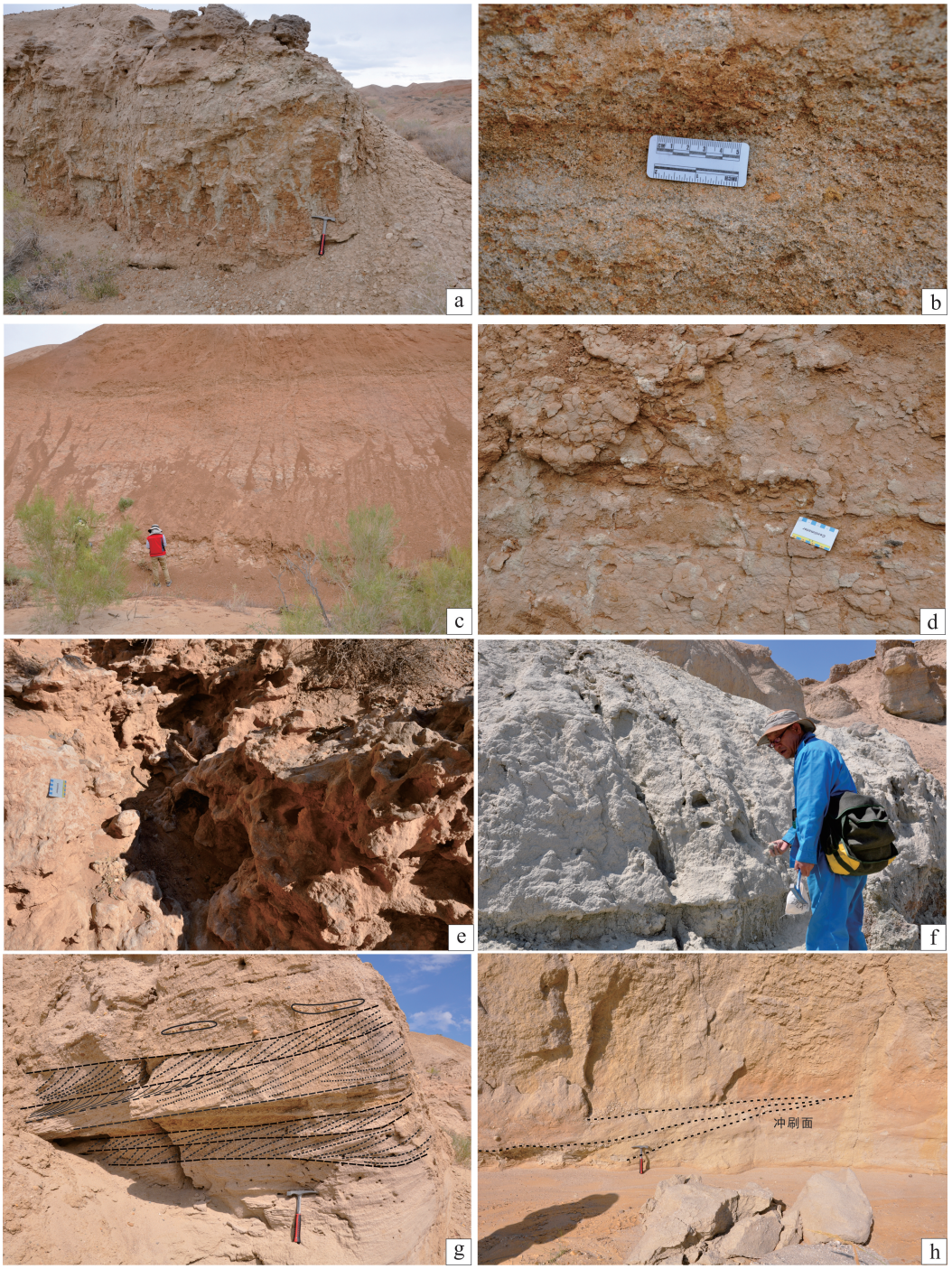
3.1 古盐度特征及其对铀成矿的制约

1)古盐度特征

Li、Sr、Ni、Ga等微量元素的质量分数对水体盐度的变化有很好的指示作用[12];Sr/Ba值也常用来作为区分淡水和咸水沉积的标志[8,12-13]。研究表明:咸水环境中,w(Li)大于150×10^{-6}、w(Sr)为$(800\sim1\,000)\times10^{-6}$、$w$(Ni)大于$40\times10^{-6}$、$w$(Ga)小于$8\times10^{-6}$;淡水环境中,$w$(Li)小于$90\times10^{-6}$、$w$(Sr)为$(100\sim500)\times10^{-6}$、$w$(Ni)为$(20\sim25)\times10^{-6}$、$w$(Ga)大于$17\times10^{-6}$;一般认为,淡水沉积物中Sr/Ba值小于1(1.0~0.6为半咸水相,小于0.6为微咸水相),而盐湖(海相)沉积物中Sr/Ba值大于1。

上白垩统红砾山组5件样品,w(Li)为$(17.7\sim38.1)\times10^{-6}$,平均值为$26.3\times10^{-6}$,质量分数远小于$90\times10^{-6}$;$w$(Sr)为$(167\sim206)\times10^{-6}$,平均值为$187\times10^{-6}$,质量分数介于$100\times10^{-6}\sim500\times10^{-6}$

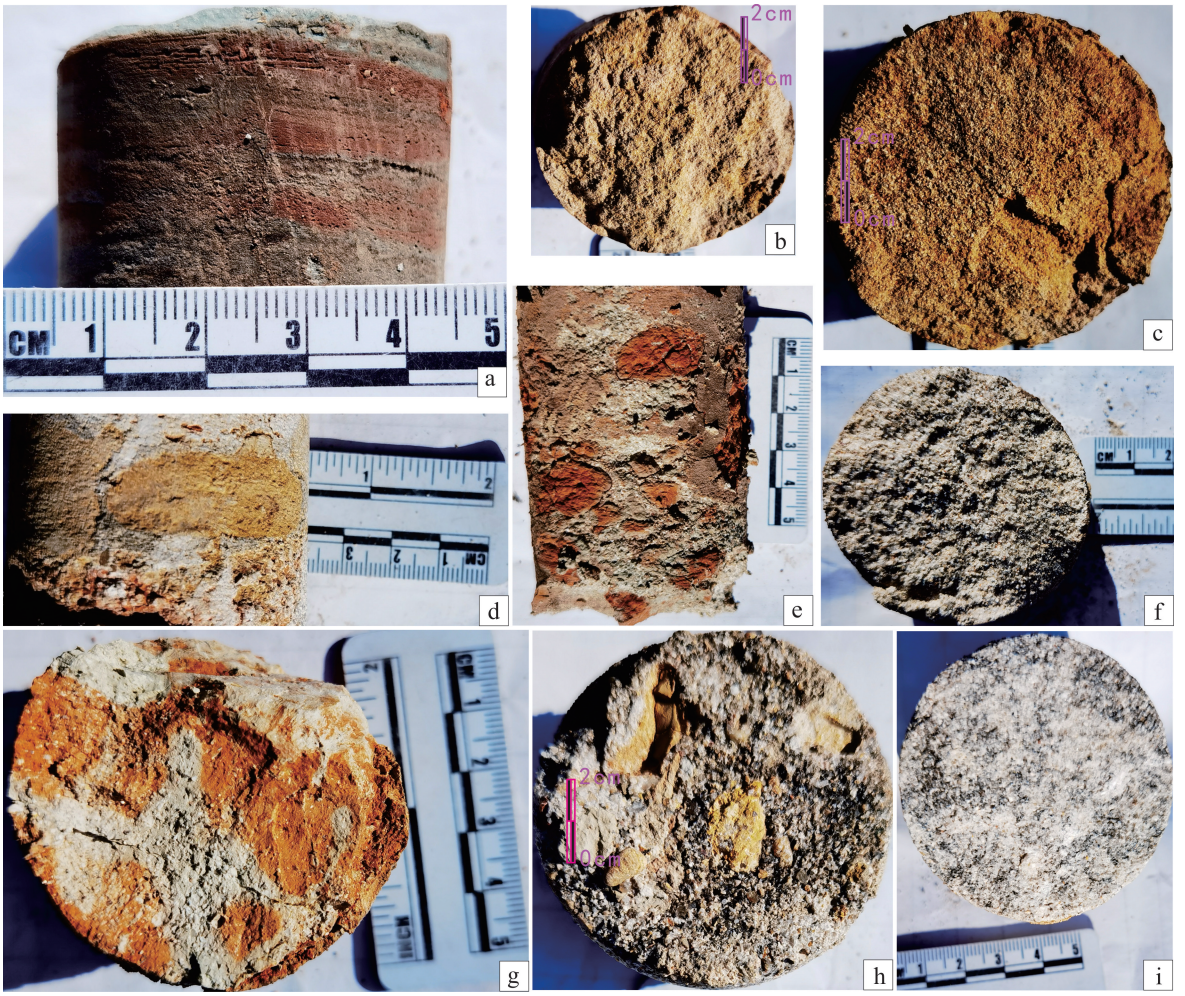
之间；w(Ni)为(20.3～41.0)×10^{-6}，平均值为 30.7×10^{-6}，大部分质量分数介于 25×10^{-6}～40×10^{-6}之间；w(Ga)为(13.2～20.2)×10^{-6}，平均值为 15.6×10^{-6}，大部分质量分数介于 8×10^{-6}～17×10^{-6}之间；Sr/Ba 值为 0.28～0.76，平均值为 0.57，小于 0.6(表 1，图 4)；综合以上数据结果，研究区上白垩统红



a. 三个泉，上白垩统红砾山组浅黄-褐黄色泥岩；b. 三个泉，上白垩统红砾山组褐黄色细砂岩，钙质胶结；c. 三个泉，上白垩统红砾山组顶部砖红色泥岩；d. 三个泉，上白垩统红砾山组顶部褐黄色粉砂岩、泥质粉砂岩；e. 顶山盐池东，古近系乌伦古河组棕红色泥岩；f. 顶山盐池东，古近系乌伦古河组灰白色钙质泥岩；g. 顶山盐池西，古近系乌伦古河组黄色泥岩与粉砂岩互层，发育板状交错层理、楔状交错层理，夹平行层理，在粉砂岩中可见叠瓦状砾石排列；h. 顶山盐池西，古近系乌伦古河组浅黄色泥岩，泥岩底部可见砾岩层组成的冲刷面。

图 2　研究区上白垩统红砾山组和古近系乌伦古河组典型露头

Fig.2　Typical outcrops of Upper Cretaceous Honglishan Formation and Paleogene Wulunguhe Formation in the study area



a. 591.8 m 处上白垩统红砾山组灰色粉砂岩与砖红色泥岩互层;b. 539.5 m 处上白垩统红砾山组黄色细砂岩;c. 504.6 m 处上白垩统红砾山组褐黄色粗砂岩; d. 265.2 m 处古近系乌伦古河组灰色含砾砂岩,泥砾砾径约 5 cm,次圆状;e. 327.9 m 处古近系乌伦古河组棕红色含砾砂岩,泥砾呈铁红色,磨圆较好;f. 405.5 m 处古近系乌伦古河组灰白色粗砂岩;g. 64.2 m 处新近系索索泉组清灰—棕红色泥岩;h.91.7 m 处新近系索索泉组灰色含砾砂岩;i. 131.8 m 处新近系索索泉组灰白色粗砂岩。

图 3 N3006 井典型岩石照片

Fig.3 Typical rock photos of N3006 Well

砾山组沉积时,水体总体上为淡水,短期内表现为微咸水环境。

古近系乌伦古河组 8 件样品,w(Li)为(14.0～51.9)$\times10^{-6}$,平均值为 31.4$\times10^{-6}$,质量分数远小于 90$\times10^{-6}$;w(Sr)为(159～281)$\times10^{-6}$,平均值为 219$\times10^{-6}$,质量分数介于 100$\times10^{-6}$～500$\times10^{-6}$之间;w(Ni)为(21.1～49.9)$\times10^{-6}$,平均值为 39.6$\times10^{-6}$,12.5%样品小于 25$\times10^{-6}$,25%样品质量分数介于 25$\times10^{-6}$～40$\times10^{-6}$之间,62.5%样品质量分数大于 40$\times10^{-6}$;w(Ga)为(9.2～24.5)$\times10^{-6}$,平均值为 17.6$\times10^{-6}$,50%样品质量分数介于 8$\times10^{-6}$～17$\times10^{-6}$之间,50%样品质量分数大于 17$\times10^{-6}$;Sr/Ba 值为 0.24～1.03,平均值为 0.63,50%样品质量分数小于 0.6$\times10^{-6}$,50%样品质量分数大于或等于 0.6$\times10^{-6}$(表 1,图 4);综合以上数据结果,研究区乌伦古河组沉积时,水体总体上为淡水偏咸,较晚白垩世水体含盐度明显增高。

新近系索索泉组 3 件样品,w(Li)为(37.0～41.7)$\times10^{-6}$,平均值为 39.8$\times10^{-6}$,质量分数远小于 90$\times10^{-6}$;w(Sr)为(159～218)$\times10^{-6}$,平均值为 188$\times10^{-6}$,质量分数介于 100$\times10^{-6}$～500$\times10^{-6}$之间;w(Ni)为(38.5～45.3)$\times10^{-6}$,平均值为 41.3$\times10^{-6}$,大部分质量分数大于 40$\times10^{-6}$;w(Ga)为(20.0～21.5)$\times10^{-6}$,平均值为20.6$\times10^{-6}$,质量分

表 1　N3006 孔上白垩统至新近系各层位泥岩样品部分微量元素质量分数及其比值

Table 1　Statistical table of some trace elements in mudstone samples at each layer of N3006 hole

样号	层位	深度/m	Li	Sr	Ga	V	Ba	Cu	Zn	Ni	Sr/Ba	Sr/Cu	Cu/Zn	V/(V+Ni)	U/Th
W18	N_1s	11.3	37.0	218	21.5	211	763	40.0	75.2	38.5	0.29	5.45	0.53	0.85	0.49
W21	N_1s	68.7	40.6	188	20.0	101	288	33.5	64.6	45.3	0.65	5.61	0.52	0.69	0.45
W20	N_1s	79.0	41.7	159	20.4	108	301	30.0	58.2	40.0	0.53	5.30	0.52	0.73	0.32
	平均值		39.8	188	20.6	140	451	34.5	66.0	41.3	0.49	5.45	0.52	0.76	0.42
W19	$E_{1-3}w$	102.0	29.3	205	16.8	118	412	35.2	55.4	33.6	0.50	5.82	0.64	0.78	0.56
W17	$E_{1-3}w$	121.0	51.9	222	24.5	183	633	44.3	79.4	49.9	0.35	5.01	0.56	0.79	0.33
W16	$E_{1-3}w$	131.0	40.9	196	20.9	148	356	38.4	65.9	49.7	0.55	5.10	0.58	0.75	0.31
W15	$E_{1-3}w$	151.2	22.6	279	15.5	147	1 151	35.5	56.2	44.9	0.24	7.86	0.63	0.77	0.31
W13	$E_{1-3}w$	232.0	36.2	236	19.3	123	237	42.4	77.5	48.6	1.00	5.57	0.55	0.72	0.32
W12	$E_{1-3}w$	240.0	33.1	281	18.9	79	274	32.4	70.9	41.0	1.03	8.67	0.46	0.66	0.35
W10	$E_{1-3}w$	268.5	14.0	159	9.2	79	265	19.5	38.7	28.4	0.60	8.15	0.50	0.74	0.16
W9	$E_{1-3}w$	271.0	23.4	173	15.3	117	216	28.4	51.5	21.1	0.80	6.09	0.55	0.85	0.30
	平均值		31.4	219	17.6	124	443	34.5	61.9	39.6	0.63	6.54	0.56	0.76	0.33
W8	K_2h	318.5	27.8	200	15.2	132	262	27.8	50.3	37.5	0.76	7.19	0.55	0.78	0.57
W6	K_2h	360.8	19.4	167	13.3	108	276	22.4	42.4	21.0	0.61	7.46	0.53	0.84	0.31
W5	K_2h	374.5	17.7	206	13.2	76	288	19.9	32.5	20.3	0.72	10.35	0.61	0.79	0.32
W3	K_2h	414.5	28.7	173	16.0	84	349	31.1	62.4	33.7	0.50	5.56	0.50	0.71	0.30
W4	K_2h	437.5	38.1	187	20.2	130	678	33.3	63.0	41.0	0.28	5.62	0.53	0.76	0.37
	平均值		26.3	187	15.6	106	371	26.9	50.1	30.7	0.57	7.24	0.54	0.78	0.37

注：质量分数单位为 10^{-6}。

数大于 17×10^{-6}；Sr/Ba 值为 0.29～0.65，平均值为 0.49，大部分比值小于 0.6（表 1，图 4）；综合以上数据结果，N3006 井区索索泉组沉积时，水体总体上为淡水-微咸水，较古近纪水体含盐度有所降低。

2）古盐度演化及其对铀成矿的制约

综上所述，N3006 井区自晚白垩世至新近纪均为淡水-微咸水沉积，其中，古近纪的水体盐度高于晚白垩世及新近纪。一般而言，盐度的变化会影响古生物的生长，导致地层中缺少还原物质。但总体来看，N3006 井区古盐度仅略高于一般淡水，不是导致沉积物中缺少还原物质的关键因素。N3006 井中自下而上地层中还原物质均较为贫乏，可能是其他原因造成的。

3.2　古气候特征及其对铀成矿的制约

1）古气候特征

一般认为，喜湿型元素主要有 Cr、Ni、Mn、Cu、Fe、Ba、Br、Co、Cs、Hf、Rb、Sc、Th 等，而喜干型元素主要为 Sr、Pb、Au、As、Ca、Na、Ta、U、Zn、Mg、Mo、B 等。本文选取了喜干型元素 Sr 和喜湿型元素 Cu 的比值作为对古气候变化研究的参数。通常 Sr/Cu 值介于 1～5 之间指示温湿气候，而大于 5 指示干热气候[11]。

上白垩统红砾山组 5 件样品，Sr/Cu 值为 5.56～10.35，平均值为 7.24，大于 5（表 1，图 4）；结果显示，N3006 井区上白垩统红砾山组沉积时，古气候环境为干热古气候。

古近系乌伦古河组 8 件样品，Sr/Cu 值为 5.01～8.67，平均值为 6.54，大于 5（表 1，图 4）；结果显示，N3006 井区古近系乌伦古河组沉积时，古气候环境为干热古气候，据平均数据来看，气候干热程度较晚白垩世有所缓解。

新近系索索泉组 3 件样品，Sr/Cu 值为 5.30～5.61，平均值为 5.45，大于 5（表 1，图 4）；结果显示，N3006 井区新近系索索泉组沉积时，古气候环境为干热古气候，总体来看较古近纪干热程度进一步缓解。

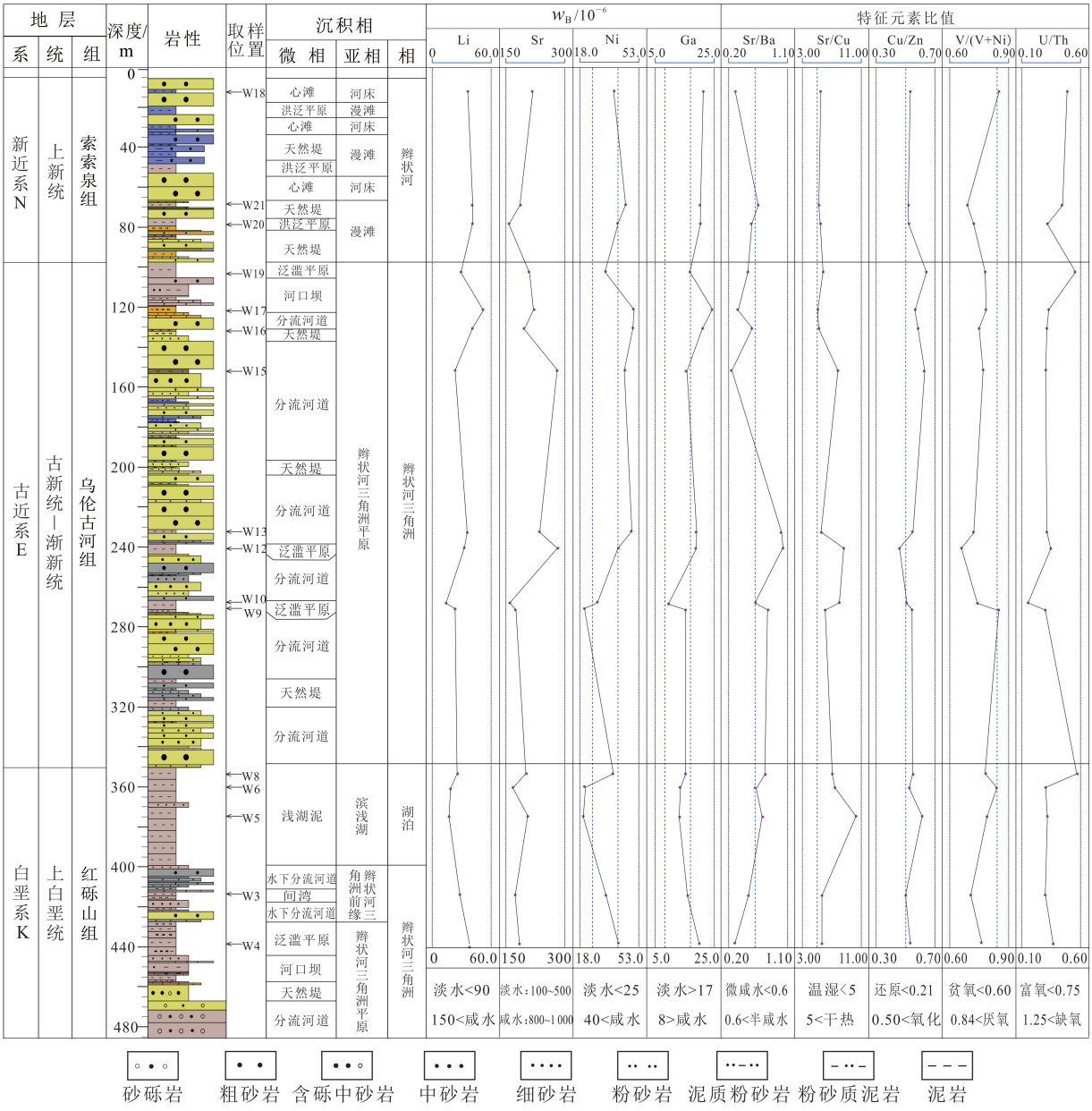


图4 N3006井沉积相、特征元素质量分数和比值图

Fig.4 Sedimentary facies, characteristic element content and ratio of characteristic elements of N3006 Well

2)古气候演化及其对铀成矿的制约

综合以上数据结果,N3006井区自晚白垩世至新近纪均表现为干热古气候环境,总体上由晚白垩世至新近纪干热程度有逐渐缓解的现象。

宏观上据地层露头及钻孔岩心显示,晚白垩世至新近纪发育大规模红色泥岩层及杂色砂岩层,也是干热古气候环境的直接证据。干热古气候环境不利于古生物的发育,导致地层中少见古生物残留,不能为后期铀元素沉淀富集提供丰富的还原物质。但从另一方面来说,干热古气候环境下较为有利于铀元素的迁移。

3.3 古氧化-还原环境特征及其对铀成矿的制约

1)古氧化-还原环境特征

V、Ni同属于铁族类元素,化学性质较活泼。其中:V来自磁铁矿,容易在氧化环境、酸度较高的条件下被吸附从而富集;Ni则容易在还原环境、碱度较高的条件下富集。故V/(V+Ni)值可以用来反映沉积水体的氧化-还原环境[9,14-15]。V/(V+Ni)值较高(>0.84),反映水体分层和底层水体出现H_2S的厌氧环境;V/(V+Ni)值在0.60~0.84之

间，反映水体分层中等的厌氧环境；V/(V+Ni)值较低(0.46～0.60)，反映水体较弱的贫氧环境。

利用 Cu/Zn 值也可以很好地反映环境的氧化-还原程度，前人曾对其进行了研究，计算出各“氧化-还原过渡相”的临界值：Cu/Zn 值＜0.21，对应还原环境；Cu/Zn 值在 0.21～0.35 之间，对应弱还原环境；Cu/Zn 值在 0.35～0.50 之间，对应还原-氧化环境；Cu/Zn 值＞0.50，对应富氧的氧化环境。

铀元素在自然界水体中因易与还原剂作用生成铀黑或其他物质吸附而沉淀；钍的络合物在弱碱性溶液中易水解，变成氧化物或氢氧化物沉淀[42]。基于这两种元素的地球化学性质差异，常利用铀钍比值法判断沉积环境的氧化-还原状态；U/Th 值大于 1.25 时指示缺氧的还原环境，U/Th 值在 0.75～1.25之间指示过渡环境，U/Th 小于 0.75 时代表富氧的氧化环境[43]。

上白垩统红砾山组 5 件样品，V/(V+Ni)值为 0.71～0.84，平均值为 0.78，介于 0.60～0.84 之间(表 1，图 4)；Cu/Zn 值为 0.50～0.61，平均值为 0.54，绝大部分比值大于 0.5(表 1，图 4)；U/Th 值为 0.30～0.57，平均值为 0.37，比值小于 0.75(表 1，图 4)；综合以上数据结果，N3006 井区上白垩统红砾山组沉积时，水体总体上为富氧的强氧化环境。

古近系乌伦古河组 8 件样品，V/(V+Ni)值为 0.66～0.85，平均值为 0.76，大部分介于 0.60～0.84 之间(表 1，图 4)；Cu/Zn 值 0.46～0.64，平均值为 0.56，大部分大于 0.5(表 1，图 4)；U/Th 值为 0.16～0.56，平均值为 0.33，小于 0.75(表 1，图 4)；综合以上数据结果，N3006 井区古近系乌伦古河组沉积时，水体总体上为富氧的强氧化环境。

新近系索索泉组 3 件样品，V/(V+Ni)值为 0.69～0.85，平均值为 0.76，比值大部分介于 0.60～0.84之间(表 1，图 4)；Cu/Zn 值为 0.52～0.53，平均值为 0.52，大于 0.5(表 1，图 4)；U/Th 值为 0.32～0.49，平均值为 0.42，小于 0.75(表 1，图 4)；综合以上数据结果，N3006 井区新近系索索泉组沉积时，水体总体上为富氧的强氧化环境。

2)古氧化-还原环境演化及其对铀成矿的制约

综合以上特征微量元素数据分析结果，研究区晚白垩世至新近纪整体沉积环境中表现为富氧的强氧化环境，在这种环境下发育的沉积物中极度缺乏还原物质(不排除局部地区例外，如顶山地区)，不利于铀元素的沉淀富集，这也是导致研究区内除顶山铀矿点外，相关盖层中目前未发现铀元素富集现象的原因。

此外，强氧化的古环境有利于铀元素的迁移，迁移过程中遭遇还原地质体极有可能还原沉淀，乃至富集成矿，研究区东南部卡姆斯特地区头屯河组中砂岩型铀矿的发育正是受益于侏罗纪之后长期的干旱炎热的古气候环境[29,31]。如何在强氧化环境形成的地层中寻找还原地质体是研究区砂岩型铀矿找矿的关键问题，笔者认为可以从两方面入手：1)在强氧化环境中寻找局部还原的古沉积环境，如研究区现今的乌伦古河流域就发育在极度干旱炎热环境中，局部还原，植被发育的地区可能会形成具有相当还原容量的沉积物；2)寻找后期遭受还原流体改造过的地质体，如油气渗出改造原生沉积建造。

4　结论

1)研究区晚白垩世至新近纪古沉积环境总体表现为干旱炎热且富氧的淡水-微咸水沉积，古沉积环境具有较好的继承性。

2)在干旱炎热且强烈氧化环境中发育的上白垩统至新近系各层位砂体中缺乏还原容量的沉积物(局部特殊环境除外)，从原生沉积环境判断，总体上不利于传统的层间氧化和潜水氧化砂岩型铀矿化的发育。

3)强氧化的古环境有利于铀元素的迁移，迁移过程中遭遇还原地质体极有可能还原沉淀，乃至富集成矿；因此，局部特殊环境形成的原生灰色层和后期遭受还原流体改造的灰色层是该区砂岩型铀矿找矿的重要突破方向。

参考文献(References)：

[1] 何中波，冀华丽，卫三元，等.黑龙江省三江盆地砂岩型铀矿找矿方向探讨[J].吉林大学学报(地球科学版)，2021，51(2)：367－379.
He Zhongbo，Ji Huali，Wei Sanyuan，et al. Discussion on Prospecting Direction of Sandstone-Type Uranium Deposits in Sanjiang Basin，Heilongjiang Province[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition)，2021，51(2)：367－379.

[2] 师志龙. 准噶尔盆地北部古近系挤压推覆构造与沉积耦合分析[J].新疆地质，2002，20(2)：115－117.
Shi Zhilong. Compressional and Thrust Structures of the Early Paleogene and Their Coupling Sedimentary Processes in the Northern Junggar Basin of Xinjiang

[J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(2): 115-117.

[3] Bhatia Mr. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones[J]. Journal of Geology, 1983, 91(6): 611-627.

[4] Bhatia Mr, Crook K A W. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 92(2): 181-193.

[5] Lerman A, Baccini P. Lakes-Chemistry, Geology, Physics[J]. Journal of Geology, 1978, 88(2): 249-250.

[6] 邓宏文, 钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社, 1993: 95-104.
Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis[M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 95-104.

[7] Jones B, Manning D A C. Comparison of Geological Indicesused for the Interpretation of Palaeoredox Conditions in Ancient Mudstones[J]. Chemical Geology, 1994, 111: 111-129.

[8] 李进龙,陈东敬.古盐度定量研究方法综述[J].油气地质与采收率,2003, 10(5): 1-3.
Li Jinlong, Chen Dongjing. Petroleumgeology and Recovery Efficiency[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003, 10(5): 1-3.

[9] 王争鸣.缺氧沉积环境的地球化学标志[J]. 甘肃地质学报, 2003,12(2): 55-58.
Wang Zhengming. Geochemical Indicators for Diagnosing Anoxic Sedimentary Environment[J]. Acta Geologica Gansu, 2003,12(2): 55-58.

[10] 陈会军,刘招君,柳蓉, 等.银额盆地下白垩统巴音戈壁组油页岩特征及古环境[J].吉林大学学报(地球科学版),2009,39(4):669-675.
Chen Huijun, Liu Zhaojun, Liu Rong, et al. Characteristic of Oil Shale and Paleoenvironment of the Bayingebi Formation in the Lower Cretaceous in Yin'e Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition),2009,39(4):669-675.

[11] 王鹏,严小鳙,谭开俊. 沉积地球化学在准东石炭系沉积环境分析中的应用[J].延安大学学报(自然科学版),2013, 32(2):70-73.
Wang Peng, Yan Xiaoyong, Tan Kaijun. Application of Sedimentary Geochemistry to the Late Carboniferous Sedimentary Environment Analysis in Eastern Junggar Basin[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2013, 32(2): 70-73.

[12] 陶树, 汤达祯, 周传祎, 等. 川东南—黔中及其周边地区下组合烃源岩元素地球化学特征及沉积环境意义[J]. 中国地质, 2009, 36(2): 397-403.
Tao Shu, Tang Dazhen, Zhou Chuanyi, et al. Element Geochemical Characteristics of the Lower Assemblage Hydrocarbon Source Rrocks in Southeast Sichuan-Central Guizhou (Chuandongnan-Qianzhong) Region and Its Periphery Areas and Their Implication Stosedimentary Environments[J]. Geology in China, 2009, 36(2): 397-403.

[13] 田景春,张翔.沉积地球化学[M].北京: 地质出版社, 2016:63-64.
Tian Jingchun, Zhang Xiang. Sedimentary Geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 63-64.

[14] 王宝萍, 李艳承, 董小刚.鄂尔多斯盆地伊陕斜坡西部山西组古沉积环境及烃源岩评价[J]. 非常规油气, 2017, 4(1): 14-22, 29.
Wang Baoping, Li Yancheng, Dong Xiaogang. Sedimentary Paleoenvironment Analysisand Evaluation of Source Rock of Shanxi Formation in the West of Yishaan Slope, Ordos Basin[J]. Unconventonal Oil & Gas, 2017,4(1): 14-22, 29.

[15] 芦云飞, 孟万斌, 冯明石, 等.峨眉山中三叠统绿豆岩特征及其沉积环境指示[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(3): 626-636.
Lu Yunfei, Meng Wanbin, Feng Mingshi, et al. Characteristics of the Middle Triassic Mung Beans Rock in the Mount Emei Area and Their Implications for Sedimentary Environmen[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2020, 39(3): 626-636.

[16] 程先钰,张天福,程银行, 等. 准噶尔盆地东缘中—晚侏罗世细碎屑岩地球化学特征:物源与古沉积环境恢复[J]. 地质通报,2022,41(11):1950-1966.
Cheng Xianyu, Zhang Tianfu, Cheng Yinhang, et al. Element Geochemical Characteristics of the Middle-Late Jurassic Microclastic Rock in the Easthern Junggar Basin: Implications for Tracing Sediment Sources and Paleoenvironment Estoration[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(11): 1950-1966.

[17] 刘英辉. 准噶尔盆地乌—夏地区风城组云质岩类沉积环境及成因探讨[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2022,52(1):80-93.
Liu Yinghui. Origin of Dolomitic Tuff in Permian

Fengcheng Formaiton in Wu-Xia Area of Junggar Basin[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2022,52(1):80-93.

[18] 陈正乐，刘健，宫红良，等.准噶尔盆地北部新生代构造活动特征及其对砂岩型铀矿的控制作用[J]. 地质学报，2006，80(1):101-111.
Chen Zhengle, Liu Jian, Gong Hongliang, et al. Cenozoic Tectonic Movement and Its Control on Sandstone-Type Uranium Deposits in Northern Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 101-111.

[19] 刘俊榜，李培俊，胡智，等.准噶尔盆地东部地区燕山运动期断裂控藏机制[J]. 新疆石油地质，2014，35(1):5-11.
Liu Junbang, Li Peijun, Hu Zhi, et al. Hydrocarbon Accumulation Mechanisms Controlled by Yanshanian Faults in Eastern Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(1):5-11.

[20] 孙文军，赵淑娟，李三忠，等. 准噶尔盆地东部中生代构造迁移规律[J].大地构造与成矿学，2014，38(1):52-61.
Sun Wenjun, Zhao Shujuan, Li Sanzhong, et al. Mesozoic Tectonic Migration in the Eastern Junggar Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2014, 38(1): 52-61.

[21] 王学斌，赵淑娟，李三忠.准噶尔盆地东北缘乌伦古坳陷中生代逆冲推覆构造[J]. 大地构造与成矿学，2014,38(1):62-70.
Wang Xuebin, Zhao Shujuan, Li Sanzhong. Mesozoic Thrust and Nappe Structures in the Wulungu Depression of the Northeastern Junggar Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia,2014,38(1):62-70.

[22] 赵淑娟，李三忠，刘鑫，等. 准噶尔盆地东缘构造：阿尔泰与北天山造山带交接转换的陆内过程[J]. 中国科学：地球科学，2014,44(10): 2130-2141.
Zhao Shujuan, Li Sanzhong, Liu Xin, et al. Structures of the Eastern Junggar Basin: Intracontinental Transition Between the North Tianshan and the Altai Orogens[J]. Scientia Sinica Terrae, 2014, 44(10): 2130-2141.

[23] 李涛，赵淑娟，李三忠，等.准噶尔盆地东北部逆冲推覆构造特征[J]. 地质论评，2015，61(2):356-366.
Li Tao, Zhao Shujuan, Li Sanzhong, et al. The) Features of Nappe Structure in the Northeastern Junggar Basin[J]. Geological Review, 2015, 61 (2): 356-366.

[24] 宋继叶，秦明宽，蔡煜琦，等. 准东构造隆升对砂岩型铀成矿作用的制约：磷灰石裂变径迹证据[J]. 地球科学，2019,44(11):3910-3925.
Song Jiye, Qin Mingkuan, Cai Yuqi, et al. Uplift-Denudation of Orogenic Belts Control on the Formation of Sandstone Type Uranium (U) Deposits in Eastern Junggar, Northwest China: Implications from Apatite Fission Track (AFT) [J]. Earth Science, 2019,44(11):3910-3925.

[25] 文磊，孙相灿，李程.准噶尔盆地乌伦古坳陷中-新生代构造演化及成因机制[J].岩石学报，2019，35(4):1107-1120.
Wen Lei, Sun Xiangcan, Li Cheng. Meso-and Cenozoic Tectonic Evolution and Formation Mechanism of the Wulungu Depression, Junggar Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(4):1107-1120.

[26] 冀华丽，郭强，秦明宽，等.准东喀木斯特地区中侏罗统头屯河组沉积相与铀矿化[J].地质学报，2021,95(11):3455-3471.
Ji Huali, Guo Qiang, Qin Mingkuan, et al. Relationship of Sedimentary Facies and Uranium Mineralization of the Middle Jurassic Toutunhe Formation in the Kamuster Area, Eastern Part of the Junggar Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(11):3455-3471.

[27] 邓远，陈世悦，杨景林.准噶尔盆地北部晚白垩世-古近纪沉积特征研究[J]. 岩性油气藏，2015，27(5):53-59.
Deng Yuan, Chen Shiyue, Yang Jinglin. Sedimentary Characteristics of Late Cretaceous and Paleogene in Northern Junggar Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5):53-59.

[28] 王熠哲，吴朝东，马健，等. 准噶尔盆地白垩纪—新近纪地层颜色韵律与古环境和古气候演化[J]. 古地理学报，2019，21(3):451-468.
Wang Yizhe, Wu Chaodong, Ma Jian, et al. Strata Color Rhythm of the Cretaceous-Neogene and Evolution of Palaeoenvironment and Palaeoclimate in Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(3):451-468.

[29] 何中波，秦明宽，宋继叶，等. 准噶尔盆地东北部侏罗系砂岩型铀成矿环境与找矿方向探讨[J]. 矿床地质，2018,37(1): 175-190.
He Zhongbo, Qin Mingkuan, Song Jiye, et al. A Study of Metallogenic Environments and Prospecting Direction of Jurassic Sandstone-Type Uranium Deposit in Northeastern Junggar Basin[J]. Mineral

Deposits,2018,37(1):175-190.

[30] 唐湘飞，王果，张占峰.准噶尔盆地卡姆斯特地区侏罗系铀成矿模式研究[J]. 地质论评，2018，64(3)：647-655.
Tang Xiangfei, Wang Guo, Zhang Zhanfeng.A Study on Uranium Metallogenic Model of Jurassic in Kamust Region,Junggar Basin[J]. Geological Reviw, 2018,64(3):647-655.

[31] Huang Shaohua, Qin Mingkuan, Liu Zhangyue,et al. Litho-Mineralogy, Geochemistry, and Chronology for the Genesis of the Kamust Sandstone-Hosteduranium Deposit, Junggar Basin, NW China[J]. Geological Journal, 2022, 57(4):1530-1551.

[32] 秦明宽，何中波，刘章月，等. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究[J]. 地质论评，2017，63(5):1256-1267.
Qin Mingkuan, He Zhongbo, Liu Zhangyue, et al. Study on Metallogenic Environments and Prospective Direction of Sandstone Type Uranium Deposits in Junggar Basin[J]. Geological Reviw, 2017, 63(5): 1256-1267.

[33] 谭鸿赞. 顶山地区铀成矿水文地球化学条件研究[J]. 新疆地质，2002，20 (2):126-129.
Tan Hongzhan. Hydrogeo Chemical Conditions of Uranium Mineralization in Dingshan Area [J]. Xinjiang Geology, 2002,20(2):126-129.

[34] 唐湘飞. 顶山地区古近系白色砂岩成因及成铀能力[J]. 新疆地质，2002，20(2):122-125.
Tang Xiangfei. Origin of White Sandstone of the Early Paleogene and Its Potential of Uranium Mineralization in Dingshan Area [J]. Xinjiang Geology, 2002, 20(2):122-125.

[35] 冯世荣，周剑，王果，等. 顶山地区乌伦古河组铀成矿水文地质条件分析[J].铀矿地质，2003，19 (3)：161-166.
Feng Shirong, Zhou Jian, Wang Guo,et al. Analysis on Uranium Metallogenic Hydrogeologic Conditions of Wulunguhe Formation, Dingshan Area [J]. Uranium Geology, 2003,19(3):161-166.

[36] 林双幸，王果.新疆准噶尔盆地顶山地区下第三系层间氧化带砂岩型铀矿化的发现及其意义[J].铀矿地质，2003,19 (5):264-270.
Lin Shuangxing, Wang Guo. Discovery of Interlayer Oxidation Zone Sandstone Otype Uranium Mineralization in Lower Tertiary and Its Significance, Dingshan Area, Junggar Basin[J]. Uranium Geology, 2003, 19(5):264-270.

[37] 王果. 准噶尔盆地北部顶山地区乌伦古河组 W-1 旋回岩石-地球化学特征[J]. 新疆地质，2003，21 (4)：415-418.
Wang Guo. Characteristic of Rock Geochemistry for W-1 Cycle of Wulunguhe Forjmation at Dingshan Area in North Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(4):415-418.

[38] 孙潇.新疆顶山矿点铀镭平衡系数特征研究[J]. 世界核地质科学，2015，32(1):35-38.
Sun Xiao. Study on Characteristics of Uranium-Radium Equilibrium in Dingshan Ore Occurrence, Xinjiang[J]. World Nuclear Geoscience, 2015, 32 (1):35-38.

[39] 辛秀，许强，何中波.准噶尔盆地顶山地区乌伦古河组氧化带元素地球化学特征及其与铀矿化的关系[J]. 世界核地质科学，2014，31(1):16-22.
Xin Xiu, Xu Qiang, He Zhongbo. Geochemical Characteristics of Wulunguhe Formation Oxidation Zone and Its Relation to Uranium Mineralization in Dingshan Area, Junggar Basin [J]. World Nuclear Geoscience, 2014,31(1):16-22.

[40] 陈虹，杨彦波，胡志伟，等. 新疆准噶尔盆地黄花沟地区铀成矿条件及找矿方向[J].铀矿地质，2022，38(6):1012-1021.
Chen Hong, Yang Yanbo, Hu Zhiwei,et al. Uranium Metallogenic Conditions and Prospecting Direction in Huanghuagou Area, Junggar Basin, Xinjiang [J]. Uranium Geology,2022,38(6):1012-1021.

[41] 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]. 北京：标准出版社，2010.
Methods for Chemical Analysis of Silicate Rocks - Part 30: Determination of 44 Elements:GB/T 14506.30—2010[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.

[42] 刘英俊，曹励明.元素地球化学导论[M].北京：地质出版社，1987:57-97.
Liu Yingjun, Cao Liming. Introduction to Rlemental Geochemistry [M]. Beijing: Geological Publishing House,1987:57-97.

[43] Hatch J R, Leventhal J S. Relationship Between Inferred Redox Potential of the Depositional Environment and Geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA[J]. Chemical Geology, 1992,99(1):65-82.