



松辽盆地南部中央凹陷区姚家组砂岩地球化学特征及沉积物源

张 森¹, 刘 超², 胡慧婷³, 李军辉⁴, 石 蕾¹, 布和巴特尔²

1. 中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034; 2. 黑龙江工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150050;
3. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318;
4. 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712

摘 要: 沉积物源对研究含铀砂体展布和含铀流体运移通道均具有指示意义。以松辽盆地南部中央凹陷区姚家组为研究对象, 在砂岩样品系统地球化学测试和收集邻区钱家店铀矿研究成果的基础上, 讨论研究区姚家组砂岩的地球化学、形成环境和沉积物源并与钱家店地区对比。研究表明, 姚家组砂岩碎屑相对富含硅和铝元素, 岩石类型主要为岩屑砂岩和长石砂岩; 稀土元素含量 $160.12 \times 10^{-6} \sim 253.74 \times 10^{-6}$, 表现为轻稀土(La、Ce、Pr等)富集、重稀土(Ho、Er、Tm、Yb、Lu)平坦、中度铕(Eu)负异常; 主量、微量和稀土元素揭示砂岩形成于干旱—半干旱气候, 化学蚀变程度不高, 物源构造背景为主动大陆边缘。结合区域构造背景, 认为研究区与钱家店地区物源成分相似而物源的方向不同, 研究区姚家组砂岩碎屑母质源自东北或西南物源, 源岩类型主要为花岗岩长岩和花岗岩。

关键词: 岩石地球化学; 沉积物源; 姚家组; 铀矿; 松辽盆地

GEOCHEMISTRY AND SEDIMENT PROVENANCE OF SANDSTONE FROM YAOJIA FORMATION IN CENTRAL DEPRESSION, SOUTHERN SONGLIAO BASIN

ZHANG Sen¹, LIU Chao², HU Hui-ting³, LI Jun-hui⁴, SHI Lei¹, BUHE Bateer²

1. Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China; 2. Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150050, China;
3. School of Geosciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang Province, China;
4. Exploration and Development Research Institute of Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing 163712, Heilongjiang Province, China

Abstract: The sediment provenance is of indicative significance to study the distribution of uranium sand body and migration channel of uranium fluid. Taking the Yaojia Formation in Central Depression of southern Songliao Basin as object, based on the systematic geochemical testing of sandstone samples and collected data of neighboring Qianjiadian uranium deposit, the paper discusses the geochemistry, formation environment and sediment provenance of sandstone of Yaojia Formation and compares with those in Qianjiadian area. The results show that the sandstone detrital of Yaojia Formation is relatively rich in Si and Al, with the main rock types of lithic sandstone and arkose. The REE content is $160.12 \times 10^{-6} \sim 253.74 \times 10^{-6}$, characterized by enriched LREEs (La, Ce, Pr, etc.), flat HREEs (Ho, Er, Tm, Yb and Lu) and moderate negative Eu anomaly. The analysis of major, trace and rare earth elements reveal that the sandstone was formed in arid-semiarid climate, without high degree of chemical alteration, and the tectonic setting of provenance is active continental margin. Combined with the regional tectonic background, it is considered that the provenance

收稿日期:2021-08-12;修回日期:2021-09-02. 编辑:张哲.

基金项目:国家重点研发计划“北方砂岩型铀能源矿产基地深部探测技术示范”(2018YFC0604200).

作者简介:张森(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事成矿规律、成矿预测及铀矿调查研究工作,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail://zhangsen556@163.com

component of the study area is similar to that of Qianjiadian area, but the source directions are different. The parent material for sandstone detrital of Yaojia Formation in the study area is derived from the northeast or southwest provenance, with the main source rocks of granodiorite and granite.

Key words: petrogeochemistry; sediment provenance; Yaojia Formation; uranium deposit; Songliao Basin

0 前言

松辽盆地为一个中新世代的陆相盆地,不仅富含丰富的油气资源,随着“主攻北方地浸砂岩型铀矿”勘查战略的实施,铀矿找矿工作也取得重大突破,松辽盆地南部钱家店地区发现了超大型铀矿床并实现高效开采^[1-3]。松辽盆地南部中央凹陷区钻井也揭示了放射性异常^[4],但对铀矿的勘探尚处于普查阶段。

砂岩型铀矿的勘探涉及构造、沉积、储层、铀源、成矿作用等诸多研究环节,其中以制约沉积相带、砂岩分布、储层砂体本身的“再生铀源”的沉积物源的研究最为基础^[5-7]。松辽盆地南部姚家组铀源的研究比较薄弱,仅有少数学者采集了钱家店铀矿姚家组砂岩样品并对其可能的物源方向、母岩性质开展了研究。如,有研究认为姚家组物源主要来自盆缘的酸性火山岩以及基底结晶岩系和变质岩^[8];另有研究指出姚家组的主要物源是华北陆块北缘的酸性火山岩及花岗岩^[9];此外,还有研究认为姚家组砂岩的物源为华北克拉通北缘燕山陆内造山带发育的火山-沉积岩系^[10]。可见,关于松辽盆地南部姚家组物源的认识还存在一定争议,究其原因,一方面是由于以往缺少对钱家店以外区域姚家组物源的针对研究,另一个方面是由于精确的地球化学研究还比较薄弱。

本文以松辽盆地南部中央凹陷区为研究对象,采集姚家组未蚀变的灰色砂岩样品 37 块并开展系统的地球化学测试,结合风化程度、源岩性质和构造背景的分析及其钱家店地区的研究成果^[10],探讨研究区的物源特征,旨在为铀储层预测及铀矿床铀源评价奠定基础。

1 地质背景

松辽盆地是中国东北地区一个大型中-新生代陆相断拗复合盆地,经历了早白垩世断陷、早白垩世末抬升剥蚀、晚白垩世拗陷及末期的构造反转、抬升剥蚀四个阶段^[2]。研究区在大地构造上位于松辽盆地南部中

央凹陷区,西邻松辽盆地西斜坡,向南距钱家店地区约 150 km(图 1)。早白垩世时期,研究区与钱家店地区分属松辽盆地和开鲁盆地,至白垩纪晚期,两者形成统一的拗陷盆地。研究区自下而上发育上侏罗统火石岭组,下白垩统沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组,上白垩统泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组,古近系依安组,新近系大安组及泰康组。研究层系姚家组主要发育河流-泛滥平原-浅湖沉积,以细粒沉积为主,岩性包括灰(白)色、黄褐色、棕色细砂岩,灰色泥岩及粉砂质泥岩。

2 砂岩地球化学特征

2.1 主量元素特征

姚家组砂岩主量元素含量见表 1。姚家组砂岩中 SiO₂ 含量最高(53.96%~74.57%,平均 65.96%),其次是 Al₂O₃(10.17%~19.91%,平均 14.59%)、CaO(1.17%~14.59%,平均 5.89%)、Fe₂O₃^T(0.98%~9.09%,平均 4.43%)、K₂O(2.66%~4.37%,平均 3.67%)、Na₂O(1.40%~3.88%,平均 2.84%)、MgO(0.36%~4.30%,平均 1.97%)、TiO₂(0.22%~0.72%,平均 0.52%)、P₂O₅(0.06%~0.26%,平均 0.13%)、MnO(0.03%~1.02%,平均 0.12%)含量均较低(图 2)。较高 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量反映姚家组物源母质相对富含石英、长石矿物,但 SiO₂ 数值比钱家店地区(SiO₂ 平均 77.01%)略低^[10],反映碎屑成岩的成熟度偏低,这一结果也与后文对岩石类型和形成背景的认识相吻合。

2.2 微量元素和稀土元素特征

图 3a 展示了典型样品微量元素相对含量分布曲线(分析数据见表 2)。姚家组砂岩具有与上地壳相似的高场强元素(如 Th、U)和大离子亲石元素(Ba)、Rb、Zn 元素相对于上地壳富集,Sr、Zr、Hf、Sc 元素相对于上地壳亏损。稀土元素(分析数据见表 3)总量介于 160.12×10⁻⁶~253.74×10⁻⁶之间,平均值为 221.61×10⁻⁶,高于上地壳稀土元素总量(146.37×10⁻⁶)。稀土元素配

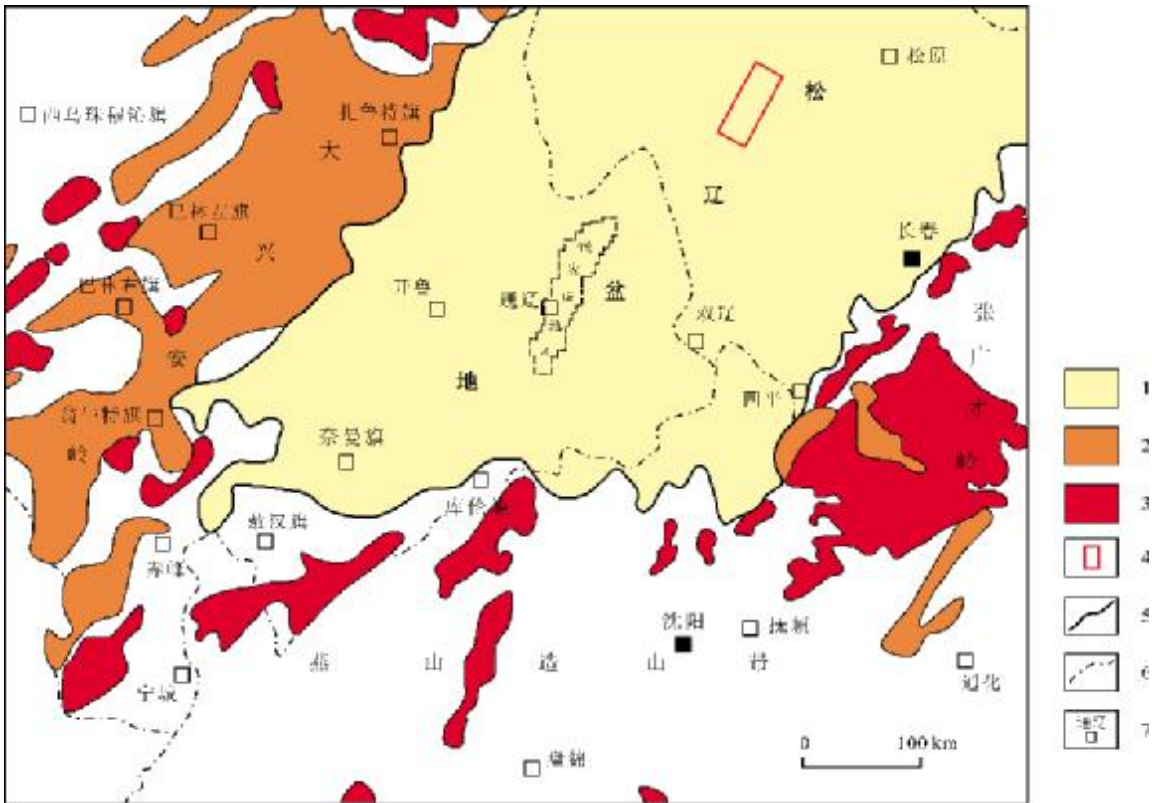


图 1 松辽盆地构造位置图

Fig. 1 Tectonic location map of Songliao Basin

1—新生界(Cenozoic); 2—火山熔岩类(volcanic lava); 3—花岗岩类(granitoid); 4—研究区(study area); 5—盆地边界线(basin boundary); 6—省界线(provincial boundary); 7—地名(place name)

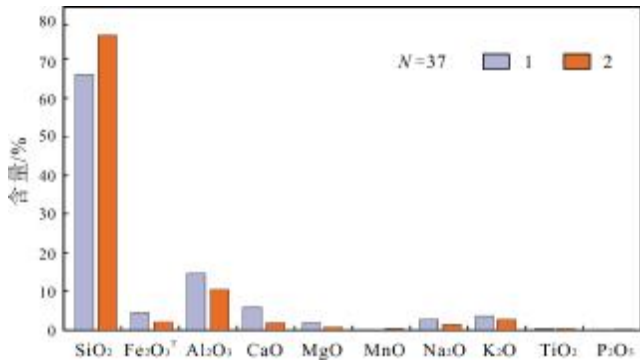


图 2 研究区姚家组砂岩样品与钱家店地区主量元素含量对比
Fig. 2 Comparison of major element content in sandstone between Yaojia Formation in the study area and Qianjiadian area
1—研究区(study area); 2—钱家店地区(Qianjiadian area)

分曲线形态相似(图 3b),呈轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损的特征,LREE/HREE 数值为 8.94~12.18,平均值 10.13; La_N/Yb_N 数值为 10.36~15.52,平均值 12.59; Gd_N/Yb_N 数值为 1.89~2.29, 平均值 2.11. 稀

土元素配分曲线形态与后太古宙澳大利亚页岩(PASS) 和上地壳(UCC) 相似, δEu (0.62~0.69,平均值 0.66)介于 PAAS(0.65)和 UCC(0.70)之间,指示物源可能为花岗岩类等酸性岩且与上地壳相关.

2.3 地球化学分类

主量元素的氧化物常用于砂岩的地球化学分类.依据 $(Fe_2O_3^T+MgO)-Na_2O-K_2O$ 图版^[11],研究区姚家组砂岩主要为岩屑砂岩,其次是长石砂岩和杂砂岩(图 4a). $lg(SiO_2/Al_2O_3)-lg(Fe_2O_3/K_2O)$ 图版^[12]揭示研究区多数样品为岩屑砂岩,部分样品为长石砂岩(图 4b).可能是受到泥质含量的影响,有 10 件样品落在页岩区域,但这一图版判别结果与 $(Fe_2O_3^T+MgO)-Na_2O-K_2O$ 图版并不矛盾. 综上分析,认为研究区姚家组砂岩以岩屑砂岩为主,其次是长石砂岩.

3 砂岩形成环境

3.1 气候环境

气候影响古沉积物的风化程度^[7]. 依据古气候判别

表 1 研究区姚家组砂岩常量元素含量

Table 1 Major element contents in sandstone of Yaojia Formation in the study area

样品号	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃ ^T	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅
Y96-1	73.30	1.42	0.95	2.47	12.99	2.82	1.38	0.04	2.81	3.77	0.41	0.12
Y96-2	72.51	0.24	0.66	0.98	10.17	9.84	0.36	0.09	2.68	3.17	0.22	0.06
Y96-3	58.47	4.63	1.19	5.96	13.68	12.30	3.56	0.15	1.63	3.55	0.58	0.26
Y96-4	56.65	6.78	1.18	8.09	17.72	7.39	4.30	0.07	1.40	3.65	0.71	0.16
Y96-5	73.11	1.22	1.10	2.44	13.48	2.68	1.12	0.03	2.93	3.85	0.40	0.08
Y96-6	69.99	2.14	1.25	3.53	14.68	3.10	1.50	0.04	2.96	3.74	0.50	0.10
Y96-7	68.26	0.77	1.00	1.89	11.67	10.24	0.62	0.11	2.97	3.99	0.29	0.07
Y96-8	69.43	0.90	1.11	2.14	11.75	9.00	0.91	0.11	2.99	3.33	0.39	0.08
Y96-9	67.67	3.55	1.00	4.66	14.23	4.25	1.87	0.06	2.77	3.98	0.50	0.12
Y96-10	67.19	2.49	0.98	3.57	12.96	7.89	1.34	0.12	2.79	3.78	0.36	0.11
Y96-11	74.32	0.89	0.94	1.93	13.14	2.28	1.00	0.03	3.22	3.69	0.42	0.08
Y96-12	69.33	1.29	1.12	2.53	15.25	3.36	1.48	0.04	3.59	3.94	0.51	0.10
Y96-13	70.66	1.08	1.12	2.33	14.89	2.99	1.37	0.03	3.48	3.78	0.50	0.10
Y36-1	74.54	1.95	0.56	2.57	13.91	1.17	1.30	0.04	3.11	2.82	0.53	0.07
Y36-2	62.85	3.45	0.62	4.14	13.62	9.80	1.52	1.02	3.07	3.15	0.70	0.21
Y36-3	64.34	5.50	0.72	6.30	16.23	3.89	2.51	0.14	2.35	3.45	0.72	0.14
Y36-4	61.31	6.77	0.79	7.65	17.26	4.18	2.86	0.14	2.10	3.72	0.71	0.15
Y36-5	64.37	6.89	0.73	7.70	17.63	1.31	2.65	0.09	1.96	3.60	0.65	0.12
Y36-6	57.38	8.23	0.78	9.09	19.91	3.49	2.84	0.11	2.17	4.23	0.72	0.16
Y36-7	58.52	7.69	0.71	8.48	18.13	4.81	2.44	0.08	2.57	4.25	0.62	0.19
Y36-8	64.23	3.82	0.55	4.44	14.53	7.30	1.70	0.59	3.03	3.48	0.59	0.18
Y201-1	63.18	1.24	0.70	2.02	11.97	14.19	1.04	0.26	3.58	3.17	0.57	0.10
Y201-2	64.30	3.10	1.73	5.03	15.34	5.39	2.57	0.05	3.06	3.72	0.61	0.12
Y201-3	69.36	2.86	1.06	4.03	13.93	3.77	1.70	0.04	3.09	3.64	0.44	0.12
Y201-4	56.86	7.03	1.12	8.27	16.78	7.05	3.68	0.11	2.35	4.17	0.66	0.19
Y201-5	71.37	1.96	0.86	2.92	13.92	2.99	1.51	0.03	3.19	3.71	0.37	0.09
Y201-6	70.27	1.44	0.98	2.53	13.34	5.35	1.24	0.06	3.26	3.59	0.38	0.09
Y201-7	69.94	1.92	0.81	2.82	13.51	4.69	1.41	0.06	3.55	3.64	0.36	0.10
Y201-8	61.29	5.64	0.99	6.74	15.32	6.45	2.95	0.09	2.80	3.72	0.60	0.13
Y201-9	53.96	6.40	1.16	7.69	17.42	9.29	4.26	0.09	2.47	4.08	0.67	0.19
Y201-10	70.15	1.40	0.88	2.37	14.38	3.80	1.06	0.04	3.87	3.84	0.47	0.10
Y201-11	73.23	1.06	0.83	1.99	13.58	2.44	0.81	0.03	3.88	3.62	0.41	0.09
Y201-12	66.67	0.52	0.69	1.28	10.35	14.59	0.97	0.20	2.87	2.66	0.40	0.08
Y201-13	70.43	2.24	0.91	3.25	12.86	5.16	1.84	0.05	2.86	3.00	0.54	0.10
Y201-14	61.69	5.20	1.00	6.32	15.68	6.22	2.92	0.06	2.63	3.81	0.63	0.16
Y201-15	56.80	7.08	1.07	8.28	17.34	6.71	3.56	0.07	2.14	4.37	0.66	0.20
Y201-16	62.60	4.45	0.98	5.54	16.19	5.56	2.69	0.05	2.79	3.95	0.59	0.14

含量单位:%.

表 2 研究区姚家组砂岩微量元素含量

Table 2 Trace element contents in sandstone of Yaojia Formation in the study area

样品号	Rb	Sr	Ba	Th	U	Zr	Hf	Sc	V	Cr	Co	Zn	Ni
Y96-1	115.40	286.10	899.50	11.87	49.51	68.17	2.69	6.29	85.27	26.54	7.04	106.70	16.88
Y96-2	60.12	313.10	910.90	8.44	3.37	42.11	1.80	2.21	20.59	29.48	1.30	66.17	4.72
Y96-3	112.20	516.20	575.40	9.86	2.18	95.10	3.61	11.18	70.74	40.07	8.41	76.14	30.28
Y96-4	148.40	478.10	483.90	14.39	2.09	113.00	3.96	14.23	106.20	67.77	14.14	90.38	43.30
Y96-5	112.20	323.50	986.70	11.99	18.38	61.06	2.15	4.51	333.60	19.89	7.72	33.04	15.74
Y96-6	114.80	313.10	902.50	12.46	48.19	78.09	2.74	7.10	197.80	54.43	10.66	61.57	27.39
Y96-7	98.63	364.70	997.90	13.68	18.24	44.81	1.24	2.96	143.60	18.24	5.01	55.12	12.85
Y96-8	84.95	322.40	839.80	9.74	47.39	70.02	1.99	4.07	68.36	20.60	7.19	68.45	16.19
Y96-9	121.50	307.00	862.10	11.40	3.86	79.62	2.75	7.26	43.45	26.17	5.01	82.24	17.20
Y96-10	98.01	310.70	838.80	8.95	2.87	55.54	2.10	5.20	29.99	17.82	3.49	52.21	11.76
Y96-11	102.50	333.00	1016.00	13.67	7.56	61.54	2.31	4.35	53.74	17.98	3.30	41.22	8.29
Y96-12	114.80	368.20	1037.00	13.60	21.95	79.85	2.73	5.94	116.30	46.53	8.10	171.00	16.79
Y96-13	107.40	359.20	1008.00	18.69	20.02	80.75	2.95	5.88	94.19	26.61	5.59	88.03	13.66
Y36-1	94.95	275.90	536.80	10.84	2.26	89.48	3.13	6.63	82.46	20.27	8.08	87.29	14.79
Y36-2	101.40	315.60	1207.00	14.70	3.15	124.70	4.43	7.89	56.93	19.96	8.56	93.84	17.88
Y36-3	154.60	280.40	433.50	14.42	2.15	112.80	3.81	11.79	80.18	35.31	11.55	128.00	29.83
Y36-4	158.20	280.00	489.30	15.41	2.25	121.40	4.14	13.67	87.83	36.88	12.53	158.10	35.66
Y36-5	159.50	241.40	331.30	15.00	2.29	123.00	4.17	14.34	85.27	63.45	11.96	105.00	33.30
Y36-6	168.70	288.40	760.10	14.58	2.23	120.80	4.10	14.14	89.47	39.89	12.68	134.80	34.91
Y36-7	138.50	336.70	428.60	13.08	1.72	103.10	3.50	11.11	65.15	35.44	10.44	97.43	30.26
Y36-8	115.80	354.30	507.40	10.49	1.72	95.58	3.37	7.62	50.01	14.96	8.01	69.26	18.10
Y201-1	80.42	505.80	718.80	13.06	2.08	94.12	3.20	3.95	34.90	12.18	4.85	31.03	8.33
Y201-2	119.30	409.20	734.30	16.45	5.65	94.68	3.29	8.89	84.67	28.75	10.34	68.85	26.36
Y201-3	106.40	378.40	898.80	10.78	2.75	78.30	2.95	6.30	36.39	33.74	6.39	129.70	17.68
Y201-4	155.60	449.80	504.90	15.21	5.26	109.50	3.73	11.90	72.22	51.20	11.87	107.50	33.52
Y201-5	110.70	376.70	909.50	5.56	17.52	66.34	2.29	5.20	46.79	19.38	4.57	75.90	15.73
Y201-6	91.20	413.60	879.50	10.44	11.37	66.53	2.58	5.17	41.14	20.56	4.84	109.90	13.63
Y201-7	92.89	393.70	907.00	10.87	130.57	71.68	2.78	5.30	45.91	24.46	6.04	63.77	14.68
Y201-8	137.90	440.40	710.40	16.90	385.19	107.80	3.67	9.61	216.80	57.15	14.21	96.15	30.42
Y201-9	131.50	627.10	559.70	11.90	13.01	121.40	4.24	12.72	93.71	47.18	13.50	94.12	40.72
Y201-10	89.52	425.10	1029.00	13.78	3.15	76.74	2.63	4.20	34.76	25.81	3.95	41.61	11.55
Y201-11	93.86	407.30	1147.00	11.08	6.45	79.60	2.91	3.46	25.64	16.18	3.47	29.83	7.61
Y201-12	70.49	480.90	672.80	7.87	128.43	77.97	2.71	3.67	33.99	12.26	3.73	44.33	9.43
Y201-13	91.54	390.50	621.90	9.98	8.12	87.66	3.14	6.70	44.18	28.46	7.10	82.79	18.71
Y201-14	134.90	453.90	551.10	13.18	6.09	101.00	3.59	9.97	60.81	42.67	10.45	104.80	36.49
Y201-15	150.10	479.80	481.40	13.30	10.66	106.70	3.95	12.57	70.47	58.38	13.13	112.60	37.78
Y201-16	129.20	454.50	624.00	12.42	13.73	92.26	3.60	10.11	65.40	55.74	10.56	81.63	27.19

含量单位:10⁻⁶.

表 3 研究区姚家组砂岩稀土元素含量

Table 3 REE contents in sandstone of Yaojia Formation in the study area

样品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
Y96-1	34.65	62.71	7.41	28.17	4.84	1.12	4.37	0.55	2.73	0.50	1.49	0.20	1.29	0.19
Y96-2	26.20	38.43	5.71	20.00	3.51	0.89	3.25	0.39	1.82	0.34	1.01	0.13	0.87	0.13
Y96-3	37.11	63.08	8.34	31.57	5.73	1.24	5.45	0.71	3.69	0.71	2.12	0.29	1.89	0.28
Y96-4	45.76	84.39	9.98	37.91	6.71	1.43	5.97	0.79	4.00	0.76	2.27	0.31	2.01	0.30
Y96-5	42.06	72.11	8.13	31.01	4.84	1.07	4.19	0.48	2.16	0.39	1.17	0.15	1.02	0.15
Y96-6	40.60	74.67	7.65	31.95	4.91	1.10	4.34	0.55	2.65	0.49	1.44	0.20	1.30	0.19
Y96-7	38.84	62.66	5.86	29.45	3.65	0.78	3.27	0.38	1.77	0.31	0.88	0.11	0.72	0.10
Y96-8	34.79	56.77	5.06	24.66	3.13	0.76	2.86	0.36	1.71	0.32	0.96	0.13	0.88	0.13
Y96-9	36.60	67.67	7.63	29.25	4.99	1.14	4.46	0.57	2.84	0.54	1.58	0.21	1.40	0.21
Y96-10	32.82	56.18	7.21	25.76	4.51	1.06	4.09	0.51	2.46	0.45	1.35	0.18	1.16	0.17
Y96-11	43.64	75.15	8.54	32.49	5.07	1.14	4.48	0.54	2.52	0.46	1.35	0.18	1.18	0.17
Y96-12	43.21	76.05	7.81	32.84	4.98	1.14	4.52	0.57	2.80	0.52	1.55	0.21	1.37	0.20
Y96-13	57.67	101.40	11.20	43.66	6.90	1.21	6.03	0.69	3.14	0.57	1.68	0.22	1.45	0.21
Y36-1	31.29	62.88	6.22	25.28	4.16	0.96	3.75	0.49	2.50	0.48	1.45	0.20	1.36	0.20
Y36-2	47.27	88.34	9.89	42.11	7.10	1.60	7.09	0.95	5.01	0.97	2.89	0.38	2.50	0.38
Y36-3	44.68	84.24	9.10	39.63	6.33	1.30	5.89	0.80	4.18	0.81	2.43	0.34	2.21	0.33
Y36-4	46.59	87.74	9.84	41.54	7.06	1.47	6.63	0.93	4.88	0.95	2.85	0.39	2.55	0.38
Y36-5	42.13	85.27	9.54	37.51	6.64	1.31	6.05	0.83	4.37	0.85	2.58	0.36	2.35	0.35
Y36-6	42.99	86.31	9.54	37.56	6.91	1.45	6.54	0.89	4.77	0.92	2.76	0.38	2.47	0.37
Y36-7	36.41	68.70	8.11	30.90	5.84	1.21	5.55	0.78	4.24	0.84	2.56	0.36	2.37	0.35
Y36-8	34.79	66.08	7.19	30.03	5.05	1.11	4.76	0.65	3.44	0.68	2.06	0.29	1.90	0.29
Y201-1	38.13	63.75	7.06	29.92	4.50	0.95	4.18	0.52	2.51	0.48	1.43	0.19	1.29	0.19
Y201-2	49.89	87.32	10.63	40.50	6.69	1.27	5.96	0.72	3.43	0.63	1.89	0.25	1.67	0.24
Y201-3	39.57	73.08	8.68	33.07	5.51	1.17	4.93	0.62	3.02	0.57	1.70	0.23	1.48	0.22
Y201-4	46.77	85.35	9.52	39.05	6.45	1.29	5.92	0.78	4.01	0.76	2.26	0.31	2.02	0.29
Y201-5	26.72	52.50	5.33	21.69	3.39	0.97	3.05	0.40	2.02	0.39	1.17	0.16	1.06	0.16
Y201-6	32.99	58.54	7.22	24.50	4.42	1.07	4.07	0.50	2.48	0.46	1.39	0.19	1.26	0.18
Y201-7	33.10	59.43	7.19	26.80	4.75	1.12	4.35	0.57	2.85	0.55	1.65	0.23	1.44	0.21
Y201-8	48.57	91.34	10.22	42.60	7.78	1.75	7.60	1.06	5.58	1.07	3.07	0.39	2.44	0.35
Y201-9	42.21	80.86	9.34	35.44	6.32	1.28	5.81	0.76	3.88	0.74	2.22	0.30	1.97	0.29
Y201-10	43.29	78.36	8.37	35.20	5.20	1.08	4.58	0.55	2.54	0.47	1.37	0.18	1.23	0.18
Y201-11	33.38	64.18	6.74	26.03	4.23	1.03	3.80	0.48	2.36	0.44	1.34	0.19	1.24	0.19
Y201-12	25.22	41.11	5.56	20.75	3.58	0.84	3.38	0.43	2.20	0.43	1.31	0.18	1.18	0.18
Y201-13	36.39	62.78	7.65	31.12	5.02	1.12	4.55	0.59	2.97	0.56	1.71	0.23	1.56	0.23
Y201-14	40.42	75.42	8.84	35.11	5.94	1.23	5.44	0.71	3.66	0.69	2.06	0.28	1.84	0.27
Y201-15	40.80	79.66	9.28	35.22	6.35	1.26	5.83	0.77	3.92	0.75	2.25	0.30	1.99	0.29
Y201-16	37.97	69.69	8.42	33.82	5.69	1.24	5.24	0.70	3.56	0.68	2.04	0.27	1.80	0.27

含量单位: 10^{-6} .

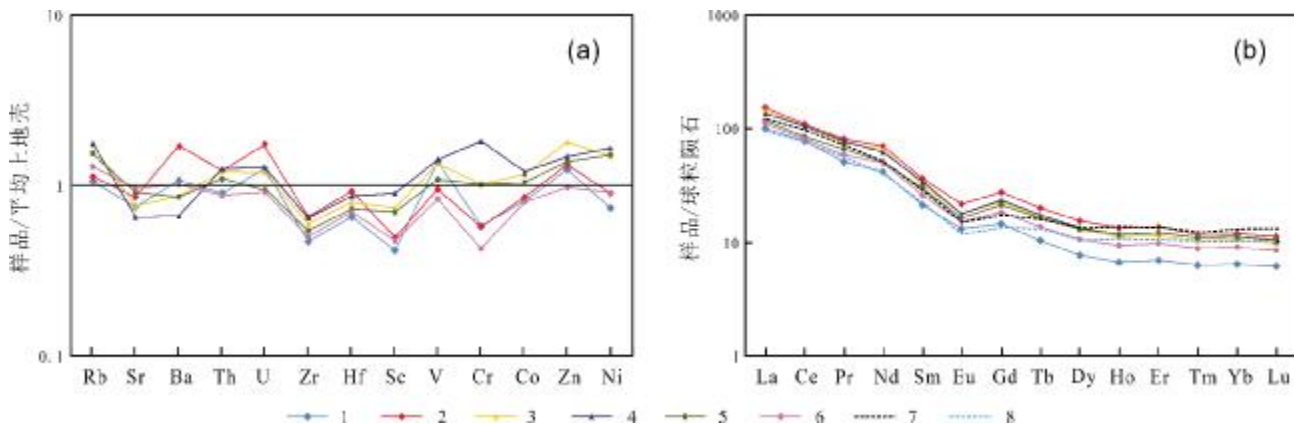


图 3 姚家组砂岩微量元素和稀土元素标准化配分曲线

Fig. 3 UCC-normalized trace element diagram and chondrite-normalized REE patterns for sandstone of Yaojia Formation
1—样品 Y36-1; 2—样品 Y36-2; 3—样品 Y36-3; 4—样品 Y36-4; 5—样品 Y36-5; 6—样品 Y36-6; 7—后太古宙澳大利亚页岩(PASS); 8—上地壳(UCC)

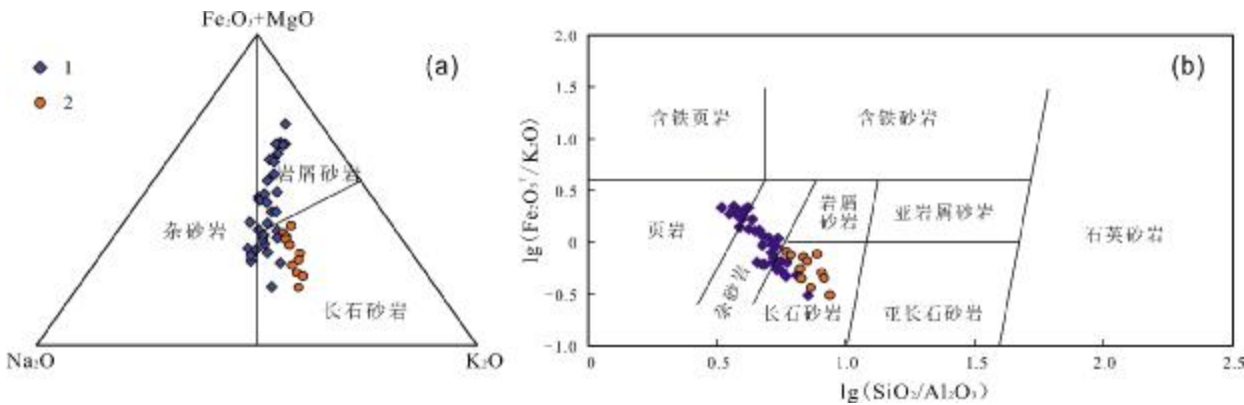


图 4 姚家组砂岩类型的地球化学判别

Fig. 4 Geochemical discrimination diagrams for sandstone types of Yaojia Formation
1—研究区(study area); 2—钱家店地区(Qianjiadian area)

图版 $\text{SiO}_2-(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ [13], 姚家组砂岩碎屑形成于干旱—半干旱气候, 且成分成熟度低于钱家店地区(图 5a). 在古气候判别图版 CIA-C 中, C 反映气候的干燥或潮湿程度 [14], CIA 反映物源区化学风化作用强度 [15], 姚家组砂岩样品多数落到半潮湿—干旱气候和初始化学风化叠合区域, 还有少数样品落到干旱气候区域, 同样反映姚家组砂岩形成于干旱—半干旱气候, 具有较低的化学风化程度(图 5b).

3.2 构造背景

碎屑物质从物源区向盆地搬运的过程中, 具有协同变化特征的常量元素(如 K、Na、Si)和抗风化能力强的微量元素(如 Zr、Th、Sc、Co、Ti、La、Y)常被用于构建示踪沉积母质来源的指标. 前人 [10] 利用 K、Si、Na、La、Sc、Th、Co、Zr 等元素建立的判别图解分析了松辽盆地

南部钱家店地区姚家组的物源构造背景, 为了便于比较, 本研究也采用相应图版开展物源构造背景研究. 在 $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})$ 图版 [16] 中, 研究区所有样品显示出高度一致性, 投影均落到主动大陆边缘区域(图 6a); 在 $(\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O})-(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ 图版 [17] 中, 研究区绝大多数样品(30 件)投影到主动大陆边缘区域, 少数样品(7 件)投影到被动大陆区域(图 6b); 在 La-Th-Sc 图版中, 研究区大多数(28 件)样品落在主动大陆被动大陆叠合区域, 少数(8 件)样品投影到大陆岛弧区域(图 6c); 在 Th-Co-Zr/10 图版中, 研究区多数(23 件)样品投影至主动大陆区域, 其余(14 件)样品投影在紧邻主动大陆边缘的区域(图 6d). 为此, 不难得知研究区姚家组砂岩源区的构造背景为主动大陆边缘.

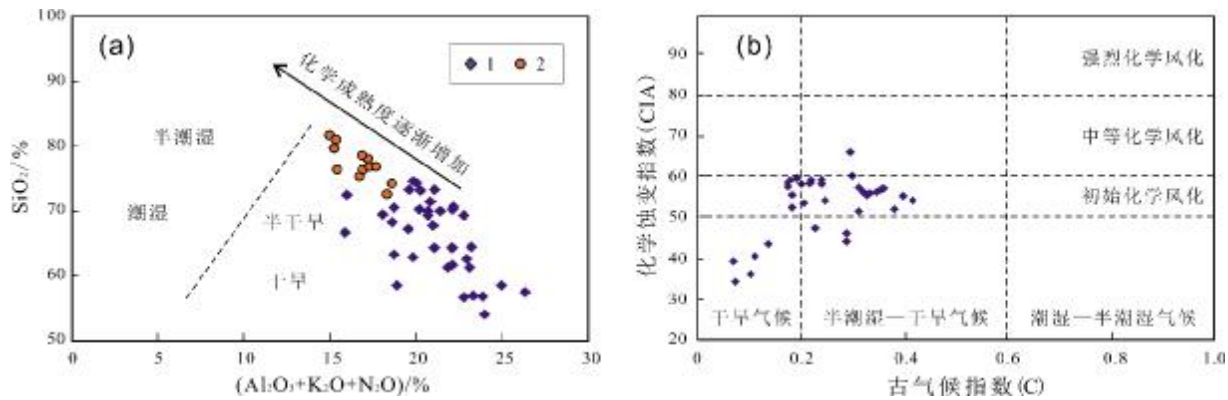


图 5 姚家组砂岩形成的气候背景

Fig. 5 Climate condition discrimination diagrams for sandstone deposition in Yaojia Formation
1—研究区(study area); 2—钱家店地区(Qianjiadian area)

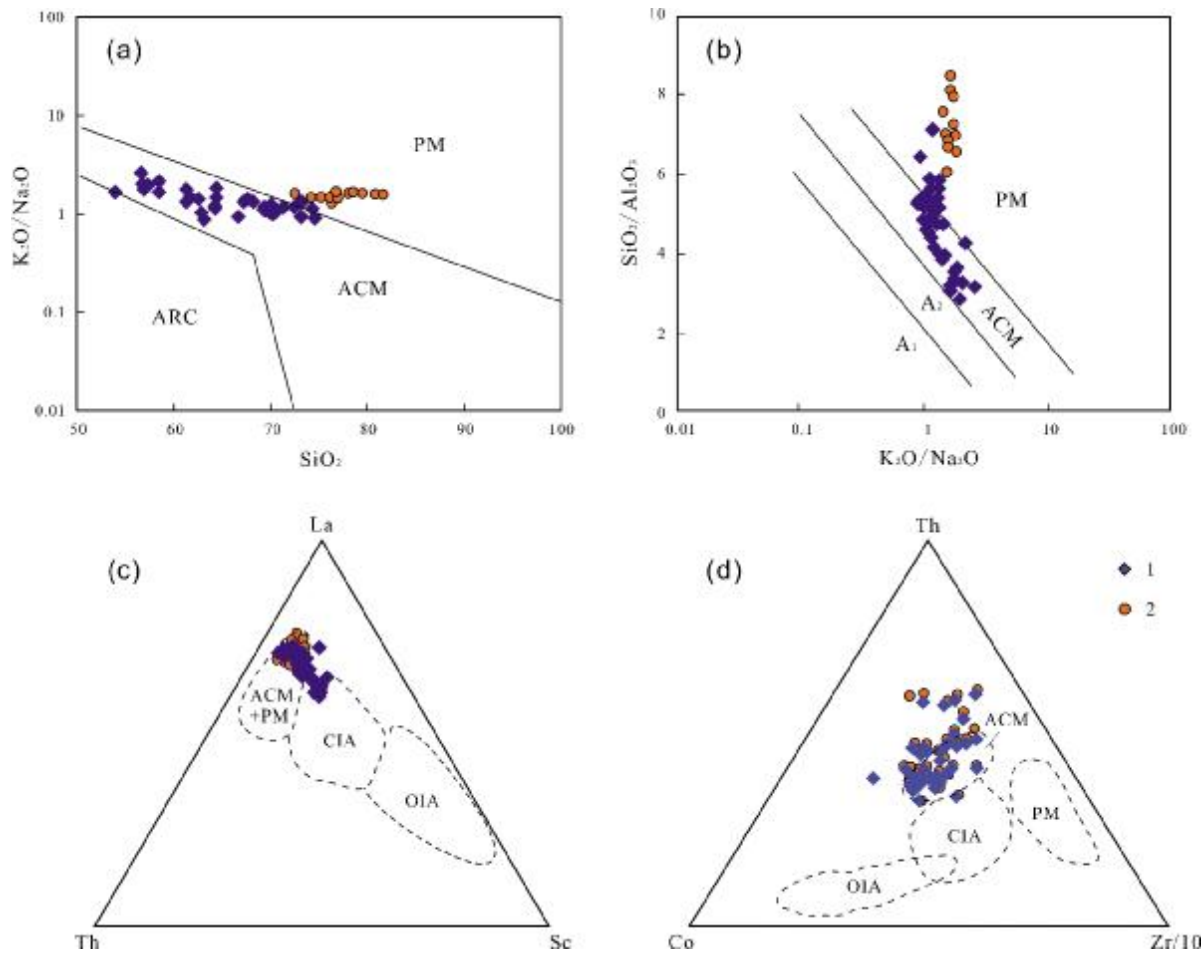


图 6 姚家组砂岩沉积物源构造背景

Fig. 6 Tectonic setting discrimination diagrams for sediment provenance of sandstone of Yaojia Formation
ARC—岛弧(island arc); ACM—主动大陆边缘(active continental margin); PM—被动大陆边缘(passive margin); A1—弧(arc); A2—演化弧(evolution arc); OIA—大洋岛弧(oceanic island arc); CIA—大陆岛弧(continental island arc); 1—研究区(study area); 2—钱家店地区(Qianjiadian area)

3.3 物源

在基于主量和微量元素判别沉积物源的图版中, $\text{Rb}-\text{K}_2\text{O}$ 和 TiO_2-Ni 图版应用相对广泛, 在松辽盆地南部钱家店地区姚家组物源的分析中已得到成功应用^[10]. $\text{Rb}-\text{K}_2\text{O}$ 图版^[18]表明姚家组砂岩富含酸性成分(图 7a), 这一结果与 TiO_2-Ni 图解^[19]的判别结果一致(图 7b), 揭示物源区的母岩为偏酸性成分的岩浆岩. 与主量元素相比, 稀土元素的活性一般更低, 稳定性更高, 在搬运、沉积和成岩过程中仅有微小变化, 因此常被用于判别物源区岩石类型^[20]. 依据稀土元素(La/Th)- Hf 图版^[18], 研究区样品主要落在长英质源区、混合的长英质和基性岩区域及相邻区域, 揭示其母岩类型可能并不单一(图 7c); 由(Co/Th)-(La/Sc)图解^[21]可知, 研究区样品分布在长英质火山岩、花岗闪长岩、花岗岩区域, 表明母岩为酸性火山岩, 母岩可能为深层岩(花岗闪长岩和花岗岩), 也可能是喷发岩(图 7d); (Eu/Eu^*)-($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$)图解^[20]表明, 物源区母岩主要为英安岩(图 7e). 可见, 研究区姚家组砂岩物源区源岩性质为酸性火山岩, 岩石类型可能为花岗闪长岩、花岗岩和英安岩.

前人对钱家店地区研究表明, 姚家组物源主要为盆地南侧燕山陆内构造带, 物源区构造背景为被动大陆边缘, 源岩主要为古老的沉积物及长英质火山岩(花岗片麻岩和花岗岩)^[10]. 研究区位于钱家店地区北侧 150 km, 岩石地球化学分析表明其物源区构造背景为主动大陆边缘, 虽然源岩也为酸性的火山岩, 但碎屑的成熟度更低、类型更复杂, 具有近物源、多物源特征. 松辽盆地南部西邻兴蒙海西褶皱带, 南邻内蒙古地轴, 东邻张广才岭, 盆地周缘出露大量的元古宙一二叠纪花岗岩和闪长岩, 在姚家组时期均具有向盆地内提供酸性火山岩的可能^[22-25]. 基于研究区与钱家店地区物源构造背景和源岩性质的差异, 即研究区在构造位置上更靠近西北和东南物源且砂岩的成熟度较钱家店地区低, 推测研究区姚家组为西北物源或东南物源, 且不排除混源的可能, 这与前人^[22]对松辽盆地南部沉积物源和沉积体系研究的认识基本一致.

4 结论

(1) 松辽盆地南部中央凹陷区姚家组砂岩相对富含硅和铝元素, 岩石类型为岩屑砂岩和长石砂岩, 砂岩

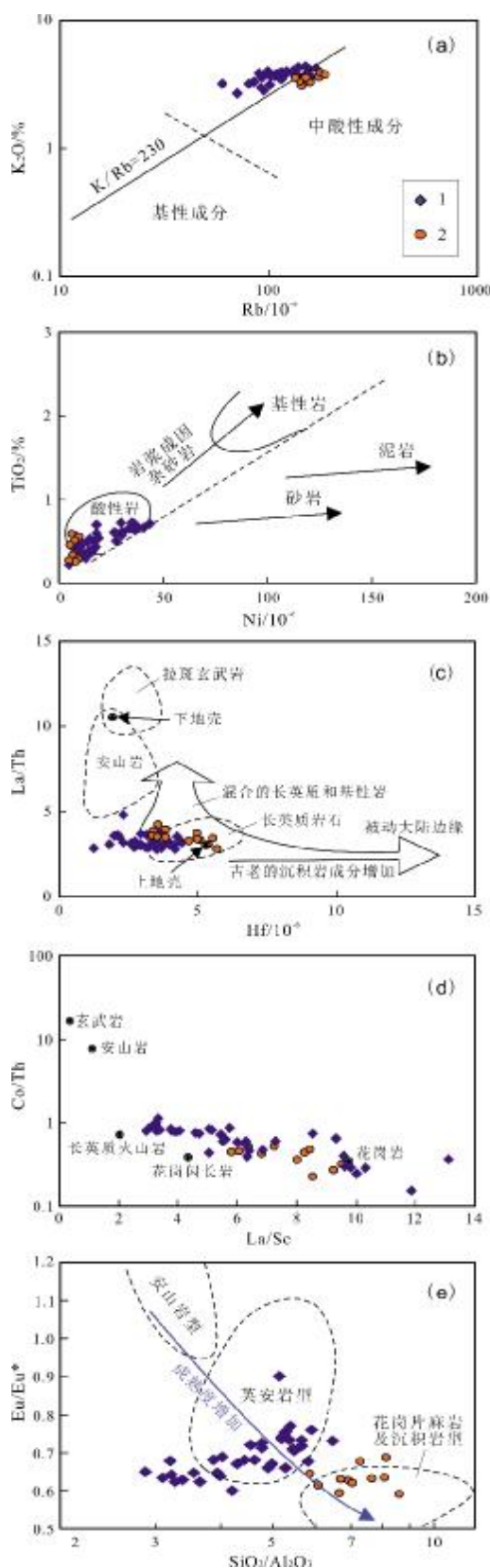


图 7 姚家组砂岩沉积物源判别图

Fig. 7 Sediment provenance discrimination diagrams for sandstone of Yaojia Formation

1—研究区(study area); 2—钱家店地区(Qianjiadian area)

样品稀土配分曲线形态一致,呈轻稀土元素富集、重稀土元素贫乏、钕中度负异常特征,指示物源母质为花岗岩类等酸性岩且与上地壳相关。

(2)常量、微量和稀土元素综合分析表明,松辽盆地南部中央凹陷区姚家组砂岩形成于干旱—半干旱气候,物源区的构造背景为主动大陆边缘,源岩性质属于酸性火山岩。

(3)松辽盆地南部中央凹陷区与钱家店地区姚家组砂岩物源母质成分相近,但研究区姚家组砂岩成熟度更低,物源区构造背景与钱家店地区不同。姚家组砂岩的母源来自凹陷的西北或东南方向,母岩类型主要为花岗闪长岩和花岗岩。

参考文献(References):

- [1]张森,石蕾,鞠楠,等. “油铀兼探”的找矿思路在松辽盆地的应用——以中央拗陷区南部为例[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 257–262.
- Zhang S, Shi L, Ju N, et al. The “oil-uranium co-exploration” idea in Songliao Basin: A practice in southern Central Depression[J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(3): 257–262.
- [2]万军,陈振岩,李清春,等. 钱家店地区油铀成矿(藏)条件对比及综合勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 13–25.
- Wan J, Chen Z Y, Li Q C, et al. Comparative study on metallogenic conditions of uranium deposits and hydrocarbon accumulation conditions of oil reservoirs in the Qianjiadian area and its significance on comprehensive exploration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(6): 13–25.
- [3]苗培森,陈印,程银行,等. 中国北方砂岩型铀矿深部探测新发现及其意义[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(4): 561–575.
- Miao P S, Chen Y, Cheng Y H, et al. New deep exploration discoveries of sandstone-type uranium deposits in North China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44(4): 561–575.
- [4]马汉峰,罗毅,李子颖,等. 松辽盆地南部姚家组沉积特征及铀成矿条件[J]. 铀矿地质, 2009, 25(3): 144–149.
- Ma H F, Luo Y, Li Z Y, et al. Sedimentary features and uranium metallogenic conditions of Yaojia Formation in southern Songliao Basin [J]. *Uranium Geology*, 2009, 25(3): 144–149.
- [5]吴柏林,张婉莹,宋子升,等. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿铀矿物地质地球化学特征及其成因意义[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3393–3407.
- Wu B L, Zhang W Y, Song Z S, et al. Geological and geochemical characteristics of uranium minerals in the sandstone-type uranium deposits in the north of Ordos Basin and their genetic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(12): 3393–3407.
- [6]刘华健,金若时,李建国,等. 松辽盆地北部含铀岩系沉积物源及铀源分析研究进展[J]. 地质调查与研究, 2017, 40(4): 281–289.
- Liu H J, Jin R S, Li J G, et al. Advance in research for sedimentary and uranium source analysis of the uranium-bearing series in northern Songliao Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 2017, 40(4): 281–289.
- [7]张天福,张云,金若时,等. 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系层序界面特征对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 2020, 47(2): 278–299.
- Zhang T F, Zhang Y, Jin R S, et al. Characteristics of Jurassic sequence boundary surfaces on the northeastern margin of Ordos Basin and their constraints on the spatial-temporal properties of sandstone uranium mineralization[J]. *Geology in China*, 2020, 47(2): 278–299.
- [8]陈方鸿,张明瑜,林畅松. 开鲁盆地钱家店凹陷含铀岩系姚家组沉积环境及其富铀意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2005, 25(3): 74–79.
- Chen F H, Zhang M Y, Lin C S. Sedimentary environments and uranium enrichment in the Yaojia Formation, Qianjiadian Depression, Kailu Basin, Nei Mongol [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2005, 25(3): 74–79.
- [9]罗毅,何中波,马汉峰,等. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征[J]. 矿床地质, 2012, 31(2): 391–400.
- Luo Y, He Z B, Ma H F, et al. Metallogenic characteristics of Qianjiadian sandstone uranium deposit in Songliao Basin [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(2): 391–400.
- [10]夏飞勇,焦养泉,荣辉,等. 松辽盆地南部钱家店铀矿床姚家组砂岩地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 2019, 44(12): 4235–4251.
- Xia F Y, Jiao Y Q, Rong H, et al. Geochemical characteristics and geological implications of sandstones from the Yaojia Formation in Qianjiadian uranium deposit, southern Songliao Basin [J]. *Earth Science*, 2019, 44(12): 4235–4251.
- [11]Blatt H, Middleton G, Murray R. Origin of sedimentary rocks[M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1980.
- [12]Herron M M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(5): 820–829.
- [13]Suttner L J, Dutta P K. Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I: Framework mineralogy[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1986, 56(3): 329–345.
- [14]李浩,陆建林,左宗鑫,等. 长岭断陷南部断陷层湖相优质烃源岩发育控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(2): 209–218, 229.
- Li H, Lu J L, Zuo Z X, et al. Controlling factors of high-quality lacustrine hydrocarbon source rocks in southern Changling Depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 209–218, 229.
- [15]Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic

- considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523–1534.
- [16] Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(5): 635–650.
- [17] Maynard J B, Valloni R, Yu H S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins[C]//Leggett J K. Trench and Fore-arc Sedimentation. Geological Society, London, Special Publications, 1982, 10(1): 551–561.
- [18] Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531–542.
- [19] Floyd P A, Winchester J A, Park R G. Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland[J]. *Precambrian Research*, 1989, 45(1/3): 203–214.
- [20] Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control[J]. *Sedimentary Geology*, 1985, 45(1/2): 97–113.
- [21] Gu X X, Liu J M, Zheng M H, et al. Provenance and tectonic setting of the Proterozoic turbidites in Hunan, South China: Geochemical evidence[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2002, 72(3): 393–407.
- [22] 郭莹莹. 松辽盆地南部姚家组沉积体系分析[D]. 长春: 吉林大学, 2008: 36–46.
- Guo Y Y. The analysis of the sedimentary system of Yaojia group in the south of Songliao Basin[D]. Changchun: Jilin University, 2008: 36–46.
- [23] 王黎明, 刘长明, 席海银, 等. 松辽盆地南部协尔苏凹陷构造沉积演化与铀成矿关系[J]. *地质与资源*, 2009, 18(4): 274–278.
- Wang L M, Liu C M, Xi H Y, et al. The relationship between structural-sedimentary evolution and uranium mineralization in Xiersu Depression, southern Songliao Basin[J]. *Geology and Resources*, 2009, 18(4): 274–278.
- [24] 白静, 徐兴友, 陈珊, 等. 松辽盆地长岭凹陷乾安地区青山口组一段沉积相特征与古环境恢复——以吉页油1井为例[J]. *中国地质*, 2020, 47(1): 220–235.
- Bai J, Xu X Y, Chen S, et al. Sedimentary characteristics and paleo-environment restoration of the first member of Qingshankou Formation in Qian'an area, Changling Sag, Songliao Basin: A case study of Jiyeou 1 Well[J]. *Geology in China*, 2020, 47(1): 220–235.
- [25] 王天琪, 韩江涛, 侯贺晟, 等. 综合物探剖面揭示松辽盆地基底地质与地球物理特征——以过松科二井剖面为例[J]. *中国地质*, 2019, 46(5): 1126–1136.
- Wang T Q, Han J T, Hou H S, et al. The utilization of integrated geophysical profiles to reveal the basement geology and geophysical characteristics of the Songliao Basin: A case study of the profile of Well SK-2[J]. *Geology in China*, 2019, 46(5): 1126–1136.

(上接第 525 页/Continued from Page 525)

- [15] 杨明春, 郑常青, 张梅生, 等. 辽宁兴城地区中元古界长城系大红峪组石英砂岩质砾岩古沉积环境研究[J]. *矿物岩石*, 2012, 32(3): 103–109.
- Yang M C, Zheng C Q, Zhang M S, et al. Study on paleo-sedimentary environment of Dahongyu Formation sandstone conglomerate of Changcheng System of Mesoproterozoic in Xingcheng area, Liaoning Province[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2012, 32(3): 103–109.
- [16] 曲洪祥, 刘杰, 郝明, 等. 辽北震旦系殷屯组层位归属及其区域对比问题探讨[J]. *地质与资源*, 2013, 22(4): 296–298.
- Qu H X, Liu J, Hao M, et al. Stratigraphic assignment and regional correlation of the Sinian Yintun Formation in northern Liaoning[J]. *Geology and Resources*, 2013, 22(4): 296–298.
- [17] 王长青, 范玉柏, 王厚兴. 辽北上前寒武系殷屯组冰碛砾岩地质特征[J]. *辽宁地质*, 1986(2): 136–145.
- Wang C Q, Fan Y B, Wang H X. The geological characteristics of the till conglomerate of the Yintun Formation in the upper Precambrian of the Northern Liaoning[J]. *Liaoning Geology*, 1986(2): 136–145.
- [18] 牛绍武, 辛后田, 王树庆. 中-朝地台南华系的内涵、厘定及其地质意义[J]. *地质调查与研究*, 2017, 40(4): 241–252, 262.
- Niu S W, Xin H T, Wang S Q. Collation on the Nanhua System in China-Korea platform and geological significance[J]. *Geological Survey and Research*, 2017, 40(4): 241–252, 262.
- [19] 杨忠杰. 辽北凡河群时代探讨兼论殷屯组的时代[J]. *辽宁地质*, 1991(4): 356–362.
- Yang Z J. A discussion on the time of Fanhe Group and Yintun Formation of north Liaoning[J]. *Liaoning Geology*, 1991(4): 356–362.
- [20] 杨森, 王东方. 辽北殷屯组的时代归属及其大地构造意义[J]. *吉林地质*, 1990(1): 31–41.
- Yang S, Wang D F. Timing of the Yintun Formation in northern Liaoning province and its significance in tectonics[J]. *Jilin Geology*, 1990(1): 31–41.
- [21] 孙敬书, 王敏成, 任福顺. 辽宁建昌八家子地区中元古界[J]. *中国区域地质*, 1990(3): 206–214.
- Sun J S, Wang M C, Ren F S. The Middle Proterozoic in the Bajiazi area, Jianchang, Liaoning Province[J]. *Regional Geology of China*, 1990(3): 206–214.