

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.045>



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

夏飞勇¹, 焦养泉^{1*}, 荣辉¹, 吴立群¹, 朱强², 万璐璐³

1. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

3. 核工业 203 研究所, 陕西咸阳 712000

摘要: 沉积物的地球化学成分在沉积岩物源分析及构造背景的研究中具有重要的作用. 对研究区 4 口钻孔中的姚家组砂岩进行了详细的岩石学和地球化学研究, 结果显示, 砂岩碎屑颗粒石英含量最高, 长石次之, 岩屑含量最低, 平均值分别为 42%、37% 和 21%, 具有锆石+钛磁铁矿+石榴子石的重矿物组合, 反映源岩以酸性岩浆岩或变质岩为主, Dickinson 判别图解表明物源主要来自于大陆物源区; 姚家组砂岩的稀土元素以轻稀土富集、重稀土平坦、中度铕负异常为特征. 砂岩 CIA 值为 52.02~60.16, 平均值为 56.69, 反映了干燥气候背景下弱的化学风化作用. 源岩属性判别图解表明源岩为再旋回的古老沉积物及长英质火山岩. 主量、微量和稀土元素的构造背景判别图解综合表明姚家组砂岩物源区为被动大陆边缘构造环境, 结合区域构造演化, 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.

关键词: 钱家店铀矿床; 姚家组砂岩; 地球化学特征; 源区风化; 物源; 构造背景.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2019)12-4235-17

收稿日期: 2019-03-13

Geochemical Characteristics and Geological Implications of Sandstones from the Yaojia Formation in Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin

Xia Feiyong¹, Jiao Yangquan^{1*}, Rong Hui¹, Wu Liqun¹, Zhu Qiang², Wan Lulu³

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

3. No.203 Research Institute, CNNC, Xianyang 712000, China

Abstract: The geochemical composition of sandstones in sedimentary basin plays an important role in the study of sedimentary provenance and tectonic settings. In this paper, detailed petrography and geochemical analyses were carried out on the sandstones of the Yaojia Formation from 4 drilling cores in the study area. All sandstone samples have the highest content of quartz (Q), followed by feldspar (F), and the lowest amount of lithic fragments (L), with an average of 42%, 37% and 21% respectively, featuring with heavy mineral assemblage of zircon-titanium magnetite-garnet, which suggests an acidic or metamorphic source. Dickinson discrimination diagrams show provenance mainly from continental block provenance. The REE distribution patterns are uniform, with LREE enrichment, flat HREE, and moderate negative Eu anomalies (average 0.63). Chemical index of alteration

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2018YFC0604202); 国家青年科学基金项目(No.41502105); 中国石油辽河油田分公司重大项目(No. LHYT-KTXMGLB-2010-JS-13848); 中央高校基本科研业务费专项资金(No.G1323511660).

作者简介: 夏飞勇(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事储层沉积学研究. ORCID:0000-0002-3787-329X. E-mail:xfeyong2005@126.com

* **通讯作者:** 焦养泉(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事沉积盆地分析与能源矿产研究的科研与教学工作. E-mail:yqjiao@cug.edu.cn

引用格式: 夏飞勇, 焦养泉, 荣辉, 等. 2019. 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. 地球科学, 44(12):4235-4251.

CIA (52.02—60.16, average 56.69) of the sandstones displays that they have experienced low grade of chemical weathering and alteration under arid paleoclimate condition. The discrimination diagrams for provenance attribute indicate a mixed source material composition of old sedimentary rocks and felsic igneous rocks. Based on major elements, trace and rare earth elements tectonic setting discrimination diagrams, suggested that source materials of the Yaojia Formation sandstones were from passive margin environment, and its provenances were from Yanshan intracontinental orogenic belts of the northern margin of Huabei Craton.

Key words: Qianjiadian uranium deposit; Yaojia Formation sandstones; geochemistry characteristics; source area weathering; provenance; tectonic setting.

0 引言

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,盛产石油、煤、天然气.近十年来,辽河油田在松辽盆地外围开鲁拗陷钱家店凹陷勘探发现了大型砂岩型铀矿—钱家店铀矿床,其主要赋矿层位为上白垩统姚家组,勘探表明该铀矿床具有巨大储量的铀矿资源,并显示出了良好的铀矿开发前景.前人对该铀矿进行了成藏沉积因素分析(殷敬红等,2000)、含铀岩系姚家组沉积体系及其与铀成矿分析(陈方鸿等,2005;陈晓林等,2008)、铀矿床铀的赋存状态及其成矿期次与成矿年代学(张明瑜等,2005)、姚家组砂岩的成岩作用及地球化学特征以及铀成矿条件与铀成矿作用(陈晓林等,2008;马汉峰等,2009;罗毅等,2012;焦养泉等,2015;荣辉等,2016)等多方面的研究,取得了一批重要研究成果和认识.对钱家店凹陷含铀岩系姚家组砂岩可能的物源方向、母岩性质的研究,陈方鸿等(2005)认为其来自盆地周边古隆起或更远山地的酸性火山岩,古老结晶岩系和变质岩;罗毅等(2012)认为钱家店凹陷南部(华北陆块北缘)的酸性火山岩及花岗岩为含铀岩系姚家组砂岩的主要物源.但上述成果基本上属于定性研究结果,截止目前为止,对研究区姚家组砂岩的物源研究尚缺乏精确的地球化学结果予以支持.本文在综合前人研究的基础上,对取自松辽盆地南部钱家店铀矿床钻孔中未蚀变的姚家组原生灰色砂岩进行岩石学和地球化学研究,对研究区姚家组砂岩源区风化程度、源岩性质及其构造背景进行了系统讨论,为钱家店铀矿床含铀岩系姚家组潜在铀储层预测及铀矿床铀源评价等提供有利的判别依据.

1 地质背景

开鲁盆地位于松辽盆地西南部,其大地构造

位置处在吉黑褶皱带,西侧是兴蒙海西褶皱带,南侧是内蒙古地轴,东北以北正镇—双辽深断裂为界.钱家店凹陷位于开鲁盆地的东北部,呈NNE向狭长带状展布(图1a).钱家店凹陷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.该凹陷早期为独立的断陷盆地,发育下白垩统义县组、九佛堂组、沙海组和阜新组,至晚白垩世,该凹陷与其他凹陷相连,形成了一个统一的松辽盆地,发育上白垩统泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组和第三系依安组、大安组及泰康组.钱家店铀矿床位于该凹陷的北部(图1b),上白垩统姚家组是主要的含铀岩系,其岩性主要为灰色、浅灰色、黄褐色细砂岩夹棕红色、灰色泥岩及粉砂质泥岩.

2 样品采集及分析

本次研究样品均采集于钱家店铀矿床4口钻井中的姚家组砂岩,从中筛选14件砂岩样品进行岩相学及碎屑组分研究,12件姚家组新鲜浅灰色砂岩样品进行岩石地球化学分析(图1c).采集过程中使用 γ 探测器测量岩石放射性,选取放射性低的砂岩样品,以减少成岩期后成矿流体对砂岩的地球化学成分的改变.将选取的12件新鲜无污染的样品粉碎至200目,样品全岩主量元素分析测试在地质矿产部武汉综合岩矿测试中心完成,采用日本岛津公司生产的XRF-1800型荧光光谱仪测定,精度优于5%.微量元素和稀土元素分析测试在中国科学院青岛海洋研究所分析与检测中心完成,采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS ELAN DRC II型)进行测试,精度优于5%, $RSD\% < 5\%$,详细分析方法见参考文献(Wang *et al.*, 2013).分析结果见附表1所示.

图1 松辽盆地南部钱家店凹陷区域大地构造简图(a)、钱家店地区交通位置及取样井位置图(b)和取样井连井剖面图(c)

Fig.1 Sketch regional geotectonic map of the Qianjiadian depression in southern Songliao basin (a), traffic location map of the Qianjiadian area showing the sampling wells (b), and geological cross-section showing the sample locations (c)

3 分析结果

3.1 砂岩碎屑颗粒特征

利用偏光显微镜对钱家店铀矿床姚家组砂岩

薄片行了镜下鉴定,砂岩样品总体特征为石英颗粒含量最高,长石次之,岩屑含量较低.砂岩总体为中细粒碎屑结构,碎屑颗粒分选中等,磨圆度较差,多以棱角一次棱角状为主.颗粒粒径变化范围较小,

多集中于 0.1~0.3 mm. 碎屑颗粒之间以点—线接触为主, 孔隙—接触式胶结.

碎屑成分主要由石英、长石、岩屑及少量云母和重矿物组成. 石英颗粒主要为单晶石英, 多晶石英含量较少, 单晶石英颗粒多呈椭圆状, 磨圆中等, 表面干净透明(图 2a), 部分石英颗粒被熔蚀成港湾状(图 2b). 多晶石英包括具有放射状结构的玉髓碎屑(图 2c)和具有隐晶结构的燧石(图 2d)组成, 多晶石英可见典型波状消光, 其母岩可能为变质岩; 长石颗粒多呈板状、短柱状, 主要为斜长石和钾长石,

斜长石含量总体高于钾长石. 斜长石表面浑浊, 可见聚片双晶, 部分斜长石中可见包含结构(图 2e), 推测其可能来自于变质岩母岩; 钾长石主要为微斜长石, 具有格子双晶(图 2f), 其次为条纹长石(图 2g), 部分斜长石高岭土化及绢云母化明显(图 2h); 岩屑类型多样, 由火成岩岩屑、变质岩岩屑和沉积岩岩屑组成, 镜下观察中主要以火成岩岩屑为主, 又可以细分为花岗质岩屑、中酸性喷出岩岩屑(图 2i)以及隐晶岩岩屑(图 2j); 镜下观察到的变质岩岩屑主要由高级变质岩岩屑(图 2k)和石英片岩岩屑

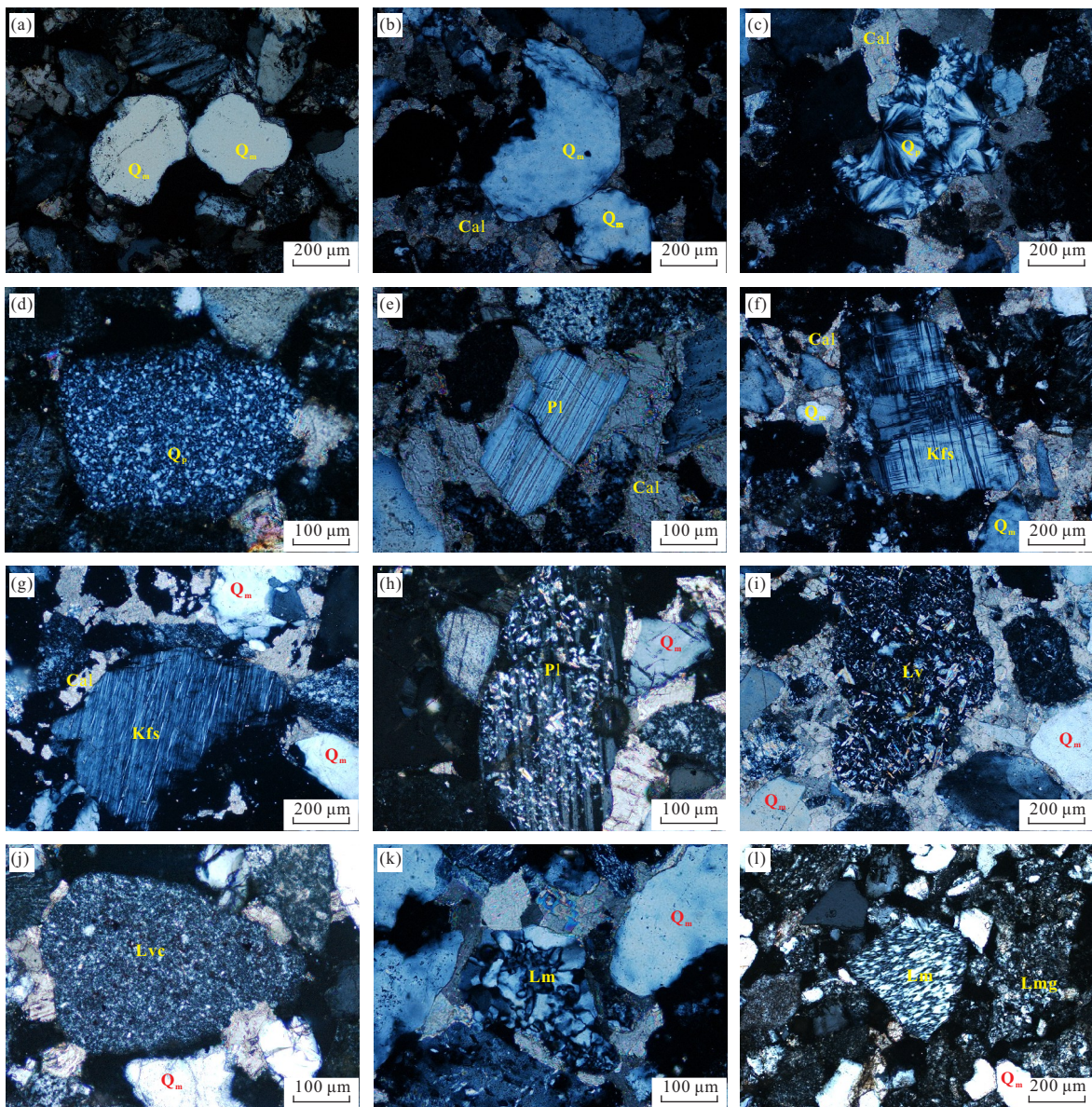


图 2 姚家组砂岩镜下碎屑组分

Fig.2 Micro-photos for sandstones from the Yaojia Formation

Qm. 单晶石英; Qp. 多晶石英; Kfs. 钾长石; Pl. 斜长石; Cal. 方解石; Lv. 火山岩岩屑; Ls. 沉积岩岩屑; Lm. 变质岩岩屑; Lvs. 隐晶质火山岩岩屑; Lmg. 花岗质片麻岩岩屑

(图 21)组成;沉积岩岩屑含量相对较少,以泥质岩岩屑为主.此外,镜下观察中还偶尔可见少量的白云母和黑云母,以及一些重矿物颗粒.重矿物主要以锆石、电气石、石榴子石、钛磁铁矿、白钛矿为主,并含有少量绿帘石和黑云母等.姚家组砂岩普遍具有锆石+钛磁铁矿+石榴子石的重矿物组合,由于不同类型的母岩具有不同的重矿物组合,因此重矿物组合常用于判断母岩性质.依照王东坡等(1994)对松辽盆地白垩系碎屑岩重矿物组合与母岩类型对应关系的研究成果,该重矿物组合指示母岩主要为酸性岩浆岩或变质岩.

3.2 地球化学特征

3.2.1 主量元素特征 12件砂岩样品的主微量元素测试数据见附表1,研究区砂岩的主量元素主要包括 SiO_2 (72.38%~81.44%)、 Al_2O_3 (9.58%~12.49%)、 CaO (0.19%~1.40%)、 K_2O (3.09%~3.78%)、 Na_2O (1.96%~2.46%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ (1.01%~2.91%), TiO_2 、 MgO 、 MnO 和 P_2O_5 等主量元素含量均较低.其中 SiO_2 含量较高,平均值为 77.05%; Al_2O_3 含量次之,平均值为 10.96%.由此可知,研究区姚家组砂岩 SiO_2 和 Al_2O_3 含量均较高,表明其碎屑组成中石英、长石矿物占主要部分,从 $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ + MgO 含量可以看出,碎屑组成中应含有少量镁铁矿物,如黑云母和磁铁矿等,这与薄片观察到的重矿物一致.

主量元素中, SiO_2 与其他氧化物多呈现出不同程度的负相关性: TiO_2 ($R^2 = -0.681$), Al_2O_3 ($R^2 = -0.693$), $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$ ($R^2 = -0.781$), MnO ($R^2 = -0.208$), MgO ($R^2 = -0.748$), CaO ($R^2 = -0.244$), Na_2O ($R^2 = -0.123$)和 K_2O ($R^2 = -0.368$),这表明随

着矿物成熟度的增加,长石和岩屑等不稳定成分含量逐渐减少.

3.2.2 微量元素和稀土元素特征 大离子亲石元素(如 Rb、Ga、Cs等)和高场强元素(如 Nb、Ti、Hf、Zr等)在母岩的风化过程中表现出较强的稳定性且难于溶解,随沉积物一起搬运、沉积过程中,它们的含量变化很小,因此其随沉积物沉积成岩后仍能反映源区母岩地球化学特征,能很好地指示物源性质.如样品的微量元素上地壳标准化模式图(图 3a)所示,姚家组砂岩具有与上地壳相似的高场强元素(如 Th、Zr、Hf)、大离子亲石元素(如 Ba、Pb).砂岩中 Rb、Sr 元素相对于上地壳富集,Sc、V、Cr、Cu、Co、Ni 和 Zn 元素相对于上地壳亏损.

研究区姚家组 12件砂岩稀土元素配分曲线非常一致(图 3b),稀土元素配分曲线均表现为右倾,重稀土曲线较为平缓,显示了相似的物源区和构造背景.稀土元素总量 $\sum\text{REE} = 124.14 \times 10^{-6} \sim 179.49 \times 10^{-6}$,平均值 153.66×10^{-6} ,略高于上地壳(UCC)稀土元素总量(146.37×10^{-6}). $\text{LREE}/\text{HREE} = 8.94 \sim 12.18$,平均值 10.13, $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 9.12 \sim 13.59$,平均值 11.37, $\text{Gd}_N/\text{Yb}_N = 1.38 \sim 2.05$,平均值 1.67,表明轻稀土元素富集,重稀土元素相对亏损. $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.59 \sim 0.69$,平均值 0.63,低于 PAAS(0.65)和 UCC(0.70),且砂岩样品 REE 的配分曲线总体上与 PASS 和 UCC 的分布趋势大体相似,而表征 Eu 异常的 Eu/Eu^* 值的变化完全取决于碎屑物源的组成,姚家组砂岩 Eu/Eu^* 平均值 0.63,表现出中等负异常,表明其源岩为花岗岩类等酸性岩且与上地壳相关(裴先治等,2015).

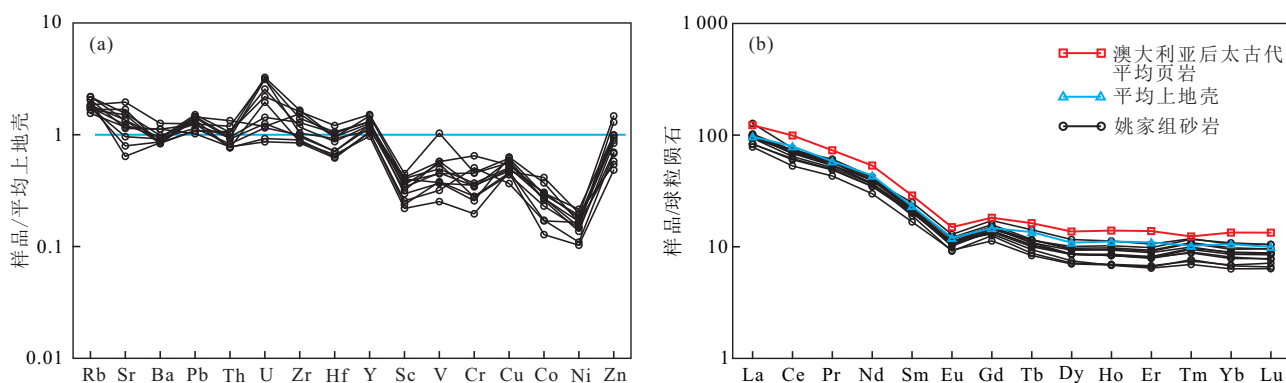


图 3 姚家组砂岩微量元素和稀土元素标准化配分曲线

Fig. 3 Trace element and REE patterns for sandstones from the Yaojia Formation

a. 微量元素上地壳标准化配分曲线(上地壳标准值据 Rudnick and Gao, 2003); b. 稀土元素球粒陨石标准化配分曲线(球粒陨石标准化值据 Taylor and McLennan, 1985)

4 讨论

4.1 砂岩碎屑骨架成分与大地构造背景

砂岩的骨架成分对物源区的源岩性质和构造背景有着最直接的反映,因此本文利用碎屑组分骨架组分统计分析姚家组砂岩的源区特征.碎屑骨架成分分析统计采用 Dickinson-Gazzi 点计法对砂岩样品进行统计分析,每个薄片样品统计的颗粒数不低于 350 个,并且将杂基体积百分数大于 25% 的样品剔除,最后在研究区姚家组砂岩中获得 14 件符合条

件的砂岩样品,其统计结果见表 1.在 14 件砂岩样品中,石英、长石、岩屑含量的平均值分别为 42%、37%、21%,石英含量最高,长石次之,岩屑含量最低.石英颗粒主要为单晶石英,占石英总量的 94%;长石颗粒以斜长石为主,其次为钾长石,P/K 比值为 1.25;火山岩岩屑、变质岩岩屑、沉积岩岩屑各自占岩屑总量的 83%、8%、9%.姚家组砂岩薄片的镜下统计结果见表 1 所示,根据砂岩端元分类法对研究区姚家组砂岩投点作图(图 4a),砂岩样品投影落入长石砂岩和岩屑长石砂岩区域.

表 1 姚家组砂岩薄片碎屑组分的原始统计

Table 1 Raw point-counting data of sandstone compositions in thin sections from the Yaojia Formation

样品号	深度 (m)	粒度	Qm	Qp	P	K	Lv	Lm	Ls	Ms	MC	O	Total	Qt	F	L	Lt
QC17-34	272.3	f	152	8	61	49	64	5	6	7	82	4	416	160	110	75	83
QC19-9	323.2	f	154	10	68	53	48	4	8	7	103	7	428	164	120	60	70
QC19-11	346.2	f	129	9	71	60	52	4	3	5	72	2	364	138	131	59	68
QC19-15	374.6	f	128	11	67	57	56	5	6	6	81	2	387	139	124	67	78
QC19-19	385.5	m	121	10	63	54	54	6	6	8	94	4	403	131	117	66	76
QC19-21	390.0	f	130	11	67	46	54	4	8	5	76	3	375	141	113	66	77
QC19-24	392.0	f	137	9	62	59	42	3	13	11	98	9	416	146	121	58	67
QC19-26	394.0	f	140	8	59	55	59	5	3	9	83	4	394	148	114	67	75
QC19-28	397.7	f	142	7	77	49	47	3	6	12	106	7	418	149	126	56	63
QC19-34	423.0	f	151	6	68	52	58	7	2	8	88	5	405	157	120	67	73
QC19-36	437.8	f	147	7	66	48	51	4	6	6	81	3	392	154	114	61	68
QC90-6	398.5	f	137	6	62	51	54	6	5	8	96	3	397	143	113	65	71
QC90-10	445.0	f	145	8	72	61	67	9	9	11	86	6	416	153	133	85	93
QC90-15	507.0	f	134	9	68	58	58	7	6	5	82	2	382	143	126	71	80

注:Qm:单晶石英;Qp:多晶石英;P:斜长石;K:钾长石;Lv:火山岩岩屑;Lm:变质岩岩屑;Ls:沉积岩岩屑(不包括碳酸盐岩);Ms:白云母和黑云母;MC:杂基和胶结物(包括碳酸盐岩);O:其他矿物(重矿物和透明矿物);表中数值为碎屑颗粒个数;Total:总颗粒数;Qt=Qm+Qp;F=K+P;L=Lv+Lm+Ls;Lt=L+Qp;f:细砂岩;m:中砂岩.

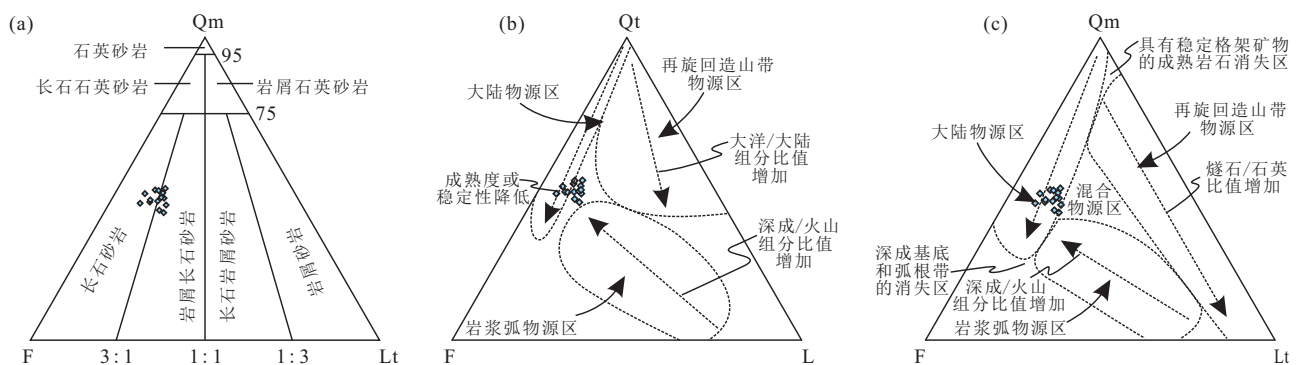


图 4 姚家组砂岩三角判别图解

Fig.4 Ternary diagrams for sandstones from the Yaojia Formation

a.QmFLt 分类判别图解,单位%;b.QtFL 图解(据 Dickinson *et al.*, 1983);c.QmFLt 图解(据 Dickinson *et al.*, 1983)

Dickinson and Suczek (1979) 和 Dickinson *et al.* (1983) 依据大量的碎屑骨架统计数据, 建立了分别以 QtFL, QmFLt 为端元的砂岩构造背景判别三角图解, 该图解自提出以来, 被广泛地应用于恢复沉积盆地的物源区大地构造背景. QtFL 图解 (图 4b) 表明, 砂岩的成熟度均较低, 7 件样品投图落入大陆物源区, 其余 7 件样品落于邻近的混合物源区; QmFLt 图解 (图 4c) 表明, 全部砂岩样品投图均落入大陆物源区. 综合分析, 研究区姚家组砂岩的物源主要来自大陆物源区, 其可能为基底隆起侵蚀源区.

4.2 砂岩的地球化学分类

主量元素的氧化物含量经常用于砂岩的地球化学分类, SiO₂ 含量和 SiO₂/Al₂O₃ 比值是确定沉积物成熟度的常用地球化学标准, 它们反映了沉积岩中石英和粘土及长石的含量, 此外碱质 (Na₂O + K₂O) 的含量是长石含量的度量, 也常被用于确定沉积物化学成熟度 (Rollison, 1993). Blatt *et al.* (1980) 提出按照 (Fe₂O₃^T + MgO) - Na₂O - K₂O 三角图解用于砂岩的地球化学分类, 图解中根据 (Fe₂O₃^T + MgO) - Na₂O - K₂O 三个端元氧化物含量将砂岩的定名分为三类: 杂砂岩、岩屑砂岩和长石砂岩, 在该三角图解中, 姚家组砂岩样品投影均落于长石砂岩区域 (图 5a). Herron (1988) 在 Pettijohn *et al.* (1987) 的图解上进行了修改, 用 log (Fe₂O₃^T/K₂O) 作为 y 轴代替 log (Na₂O/K₂O), 因为镁铁矿物在风化过程中是较不稳定的矿物, Fe₂O₃^T/K₂O 的比值可以更准确地对长石砂岩进行分类, 也是矿物稳定性的一个度量, 因此, Herron (1988) 通过 Fe₂O₃^T/K₂O 比值的划分方法更能准确的反映沉积物的化学分类. 姚家组砂岩样

品中含有偏低的 Fe₂O₃^T/K₂O 比值和相对较高的 SiO₂/Al₂O₃ 比值, 全部砂岩样品投影也落于长石砂岩区域 (图 5b). 利用地球化学组分对砂岩类型的判别与镜下碎屑组分的判别结果一致, 都反映姚家组砂岩类型为长石砂岩, 且其成熟度较低.

4.3 风化作用与沉积分选

沉积岩的物源主要是母岩的风化产物, 而不同造岩矿物在风化条件下的稳定性存在巨大差异. 化学蚀变指数 (CIA) 是衡量物源区化学风化作用强度的重要指标 (Nesbitt and Young, 1984), CIA 记录了斜长石和钾长石到粘土矿物的进级蚀变. 其计算公式为:

$$CIA = [Al_2O_3 / (CaO^* + Al_2O_3 + K_2O + Na_2O)] \times 100, \quad (1)$$

式中各氧化物均采用摩尔百分含量, CaO* 仅指岩石中与硅酸盐相结合的 CaO 含量. McLennan *et al.* (1993) 提出 CaO* 的校正方法, 先利用 P₂O₅ 含量除去磷灰石中的 CaO, 本文计算方法采用: CaO** = CaO - 10/3 × P₂O₅ (摩尔量), 再计算 CaO**/Na₂O 的摩尔比值, 若 CaO**/Na₂O ≥ 1, 则以 Na₂O 的摩尔含量来代替 CaO*; 若 CaO**/Na₂O < 1, 则以 CaO** 摩尔含量来代替 CaO*.

Fedo *et al.* (1995) 研究表明, 物源区岩石所遭受的化学风化作用愈强烈, 则其 CIA 值愈高. 因此通过计算 CIA 值的大小, 可以指示物源区所遭受的化学风化作用的程度, 当 CIA = 50~60 指示物源区初始化学风化, CIA = 60~80 指示中等化学风化, 而 CIA > 80 指示强烈的化学风化 (Fedo *et al.*, 1995).

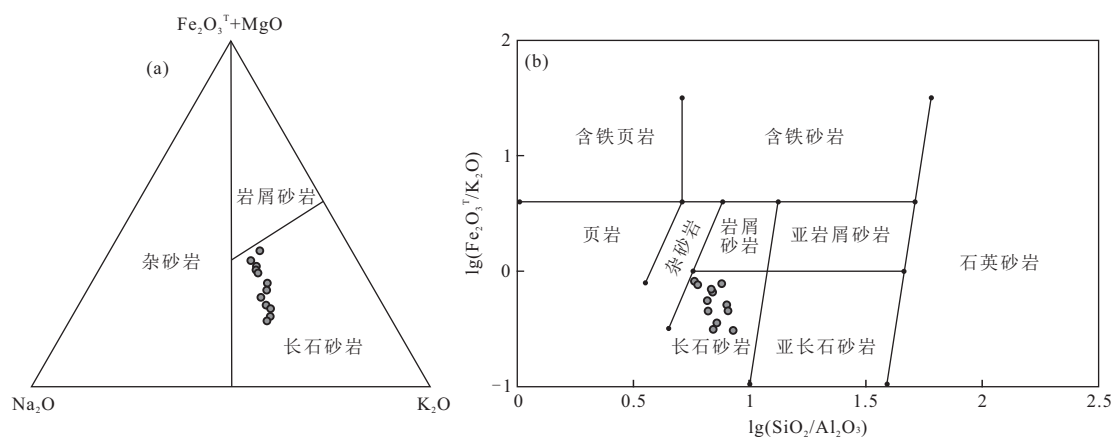


图 5 姚家组砂岩类型的地球化学判别图解

Fig. 5 Geochemical classification diagrams for sandstones from the Yaojia Formation

a. (Fe₂O₃^T + MgO) - Na₂O - K₂O 判别图解 (据 Blatt *et al.*, 1980); b. lg(Fe₂O₃^T/K₂O) - lg(SiO₂/Al₂O₃) 判别图解 (据 Herron, 1988)

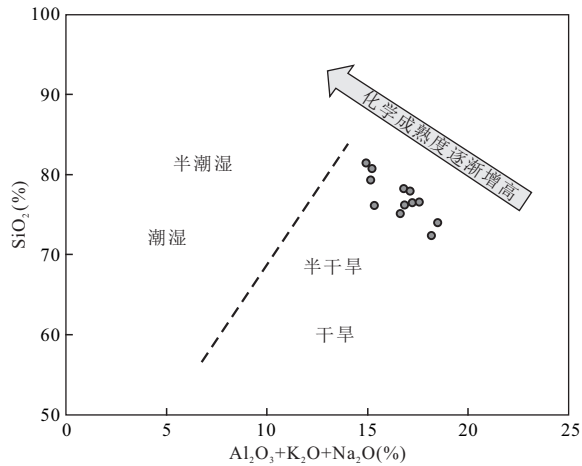


图6 姚家组砂岩的 SiO_2 - $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 古气候判别图解

Fig.6 Bivariate SiO_2 versus $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ palaeoclimate discrimination diagram of sandstones from the Yaojia Formation
据 Suttner and Dutta(1986)

气候条件对于物源区母岩及其碎屑沉积物也有一定的影响, Suttner and Dutta(1986)提出的 SiO_2 与 $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 的双变量图被用来确定砂岩的成熟度与气候的关系. 因此, 可以利用砂岩的地球化学特征反演当时的古气候条件. 在 SiO_2 - $(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 古气候判别图解中(图6), 姚家组砂岩样品全部落入半干旱气候区域, 随着 SiO_2 含量增大, 砂岩的化学成熟度也逐渐增高.

姚家组砂岩样品 CIA 值为 52.02~60.16, 平均 56.69, 化学风化强度较弱, 反映了干燥气候背景下弱的化学风化作用. 通常认为, 随着沉积物搬运距离的增加, 其所遭受的化学风化程度越强, 因此, 推测沉积物可能具有短途搬运的近源沉积特征 (McLennan *et al.*, 1993).

A-CN-K 三角图解(图7a)不仅能直观地反映出沉积物的风化趋势和风化程度, 而且还可指示源岩成分特征. 斜长石-钾长石风化形成粘土矿物过程应该沿着平行 A-CN 一侧(图7a中最右侧的箭头实线). 根据砂岩化学组分变化趋势, 可以推断发生风化作用以前的斜长石/钾长石比值. 砂岩风化作用过程中, 高岭石的伊利石化以及斜长石的钾交代作用会造成风化趋势线向右倾斜, 但仍可通过沉积物的变化趋势线(图7a中的虚线)与斜长石-钾长石连线的交点估计化学风化作用发生之前的斜长石/钾长石比值 (Fedó *et al.*, 1995). 由图7a可以看出, 姚家组砂岩的变化趋势线(图7a中的虚线)与理想

风化线(图7a中最右侧的箭头实线)有一个向右倾斜的夹角, 沿着 A-K 一侧方向变化, 说明砂岩样品受到了钾交代作用的影响. 将姚家组砂岩的变化趋势线反方向延长至与斜长石-钾长石连线相交, 交点反映了砂岩的碎屑源岩中斜长石含量高于钾长石, 推测碎屑源岩可能在花岗闪长岩和花岗岩两个端元之间变化, 而上述两类岩石亦属于长英质岩石范畴.

沉积分选与再旋回通常会造造成重矿物富集, 从而导致元素选择性富集. 锆石具有强稳定性, Zr 会随着沉积再旋回作用而富集于沉积物中; Th 和 Sc 都难溶于自然水, Th/Sc 比值在沉积再旋回过程中不发生改变, 随着锆石的富集, Zr/Sc 比值将不断升高而 Th/Sc 比值保持不变 (McLennan *et al.*, 1993). 未经历沉积再旋回的沉积物, Th/Sc 与 Zr/Sc 呈良好的正相关关系, 揭示其物源区具有类似于岩浆分异的成分变化趋势. 在 Th/Sc-Zr/Sc 图解中(图7b), 全部砂岩样品的 Th/Sc 与 Zr/Sc 不具正相关性, 表明碎屑组分中 Zr 高含量是锆石富集的结果, 碎屑岩组分经历过一定程度的沉积再旋回.

4.4 物源区的成分特征

姚家组砂岩地球化学研究表明其源于上地壳, 且源岩中存在酸性岩浆岩. 下面通过物源区特征和源区物质组成判别图解进一步完善和确定姚家组砂岩的物源性质.

4.4.1 主量元素与物源 Roser and Korsch(1988)根据 248 组砂泥岩中 TiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}}$, MgO , CaO , Na_2O 和 K_2O 而建立了 $DF1$ - $DF2$ 判别函数, 根据判别函数所作的投影图可以最为有效地区分四个物源区: 镁铁质火成物源区、中性岩火成物源区、长英质火成物源区和石英岩沉积物源区. 如图8所见, 12 件砂岩样品绝大多数落入石英岩沉积物源区, 仅有 1 件样品落入长英质火成物源区, 表明姚家组砂岩来自石英岩沉积物源区, 该物源区可能为古老的地质体、克拉通或再旋回造山带.

据 Roser and Korsch(1988); $DF1 = -1.773\text{TiO}_2 + 0.607\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.76\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} - 1.5\text{MgO} + 0.616\text{CaO} + 0.509\text{Na}_2\text{O} - 1.224\text{K}_2\text{O} - 9.09$; $DF2 = 0.445\text{TiO}_2 + 0.07\text{Al}_2\text{O}_3 - 0.25\text{Fe}_2\text{O}_3^{\text{T}} - 1.142\text{MgO} + 0.438\text{CaO} + 1.475\text{Na}_2\text{O} + 1.426\text{K}_2\text{O} - 6.681$.

$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值被许多学者用于判别沉积物源区成分 (Girty *et al.*, 1996). 当物源区为长英质岩石时, 其 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 比值在 19~28 之间; 而当物源区

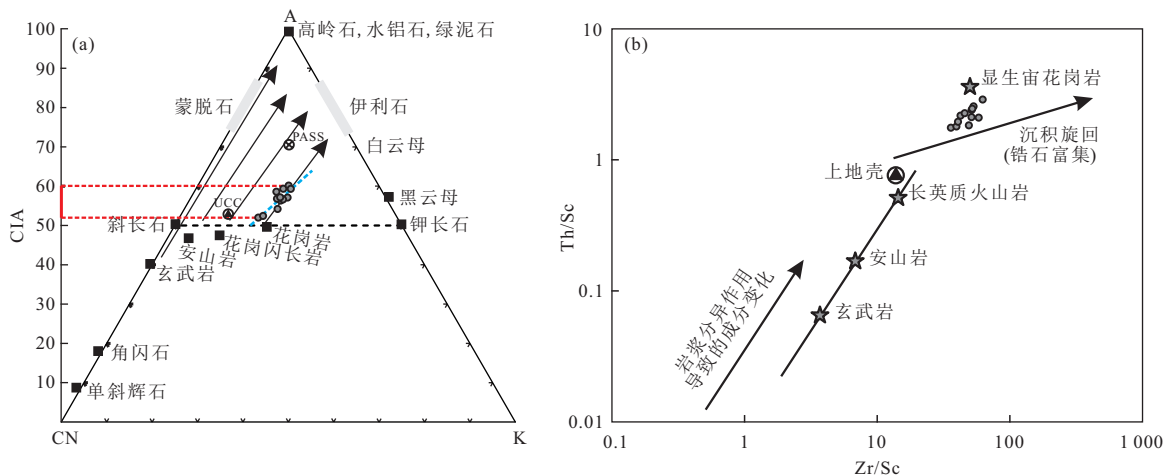


图 7 姚家组砂岩判别图解

Fig.7 Discrimination diagrams of sandstones from the Yaojia Formation

a.A-CN-K图解(据 Fedo *et al.*, 1995);花岗闪长岩和花岗岩数据引自 Condie(1993);PAAS. 澳大利亚后太古代平均页岩;UCC. 平均上地壳,数据引自 Taylor and McLennan(1985);b.Zr/Sc-Th/Sc图解(据 McLennan *et al.*, 1993),不同岩石类型的平均值引自 Condie(1983)

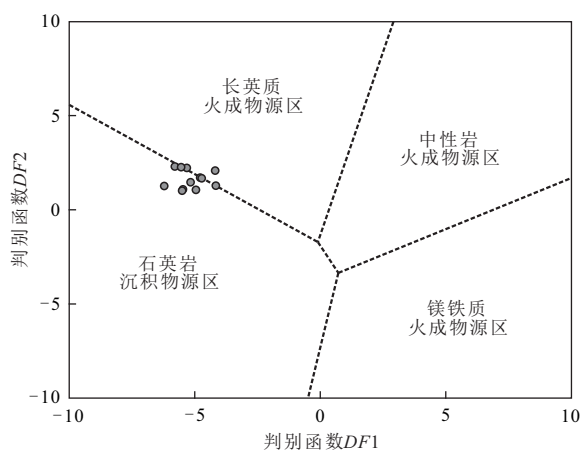


图 8 姚家组砂岩主量元素 DF1-DF2 判别函数限定物源区特征的图解

Fig.8 Discriminant function diagram for provenance signatures for sandstones from the Yaojia Formation using major elements

为镁铁质岩石时,其 Al_2O_3/TiO_2 比值 < 14 . 研究区姚家组砂岩 Al_2O_3/TiO_2 比值为 $17.57 \sim 40.07$, 平均值为 26.54 , 绝大多数砂岩样品的比值位于长英质岩石范围内,反映了姚家组砂岩源岩主要为长英质岩石.

4.4.2 微量、稀土元素与物源 部分非迁移性微量元素(如 Zr、Y、Th、Sc、Hf、Ti 等),对碎屑沉积物源区具有良好的指示意义,常常被用于判别物源区岩石类型(Bhatia and Crook, 1986).

Rb-K₂O 图解可用于区分中酸性源岩和基性源

岩(Floyd and Leveridge, 1987). 图 9a 中,研究区姚家组砂岩全部投影于中酸性区域,表明其源岩主要为中酸性成分的岩浆岩.Floyd *et al.*(1989)研究表明, TiO_2-Ni 图解也可以反映沉积物源区母岩的性质.姚家组砂岩 TiO_2 含量为 $9.58\% \sim 12.49\%$, 平均值为 10.96% ; Ni 的含量为 $(4.82 \sim 10.12) \times 10^{-6}$, 平均值为 7.54×10^{-6} . 在 TiO_2-Ni 图解中(图 9b),姚家组砂岩投影点主要集中落于酸性岩源区附近,明显远离基性岩源区.

稀土元素(REE)通常被认为活动性低、在沉积作用过程中仅有微小变化,在源区岩石中的丰度和风化条件是控制沉积物中稀土元素的主要因素,而搬运、沉积和成岩期间的交换反应等同生和后生过程,对沉积物中稀土元素含量变化的影响较小.源区岩石的稀土元素特征能够很好地被保存在沉积物中.因此,砂岩的稀土元素特征是判别物源区岩石类型的主要标志(Bhatia, 1985).

利用 La/Th-Hf 和 Co/Th-La/Sc 源岩判别图解,进一步分析姚家组砂岩的物质来源.在 La/Th-Hf 图解中(图 10a),绝大多数样品投影于长英质源区,仅个别样品点落入长英质和基性混合源区.在 Co/Th-La/Sc 图解(图 10b)中,Co/Th 比值变化较小($Co/Th=0.24 \sim 0.89$, 平均值 0.46),La/Sc 比值变化较大($La/Sc=5.78 \sim 11.18$, 平均值 7.56),样品主要位于花岗闪长岩和花岗岩之间,表明姚家组砂岩源岩主要为花岗闪长岩和花岗岩.

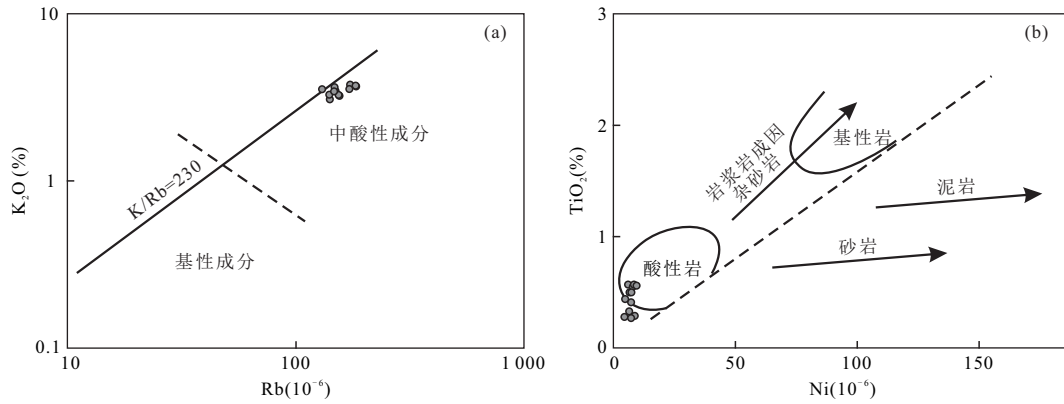


图9 姚家组砂岩主量-微量元素源区物质组成判别

Fig.9 Source material composition discrimination diagrams for sandstones from the Yaojia Formation
a.K₂O-Rb图解(据 Floyd and Leveridge, 1987); b.TiO₂-Ni图解(据 Floyd *et al.*, 1989)

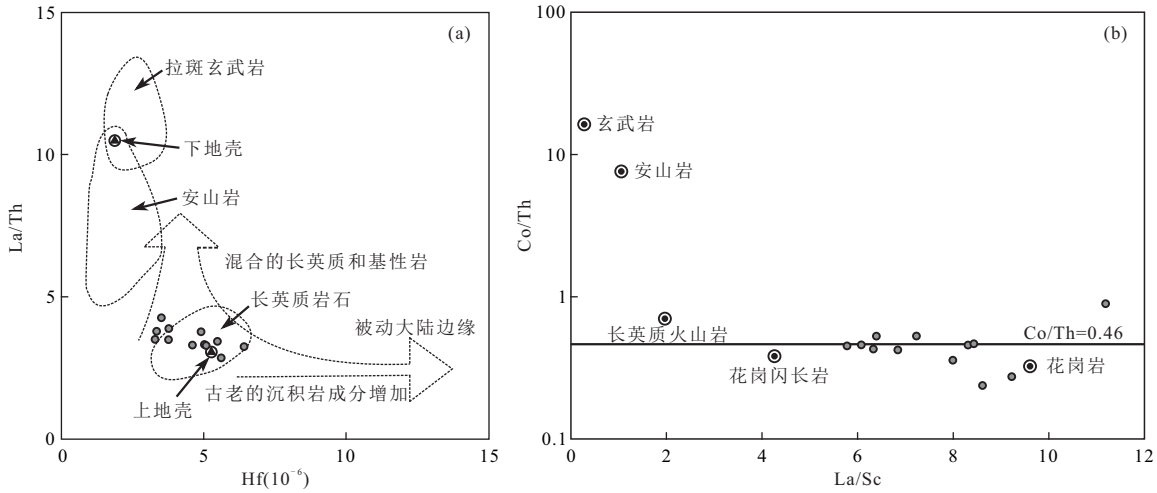


图10 姚家组砂岩La/Th-Hf和Co/Th-La/Sc源岩判别图解

Fig.10 Discrimination diagrams for provenance attribute for sandstones from the Yaojia Formation
a.La/Th-Hf图解(据 Floyd and Leveridge, 1987); b.Co/Th-La/Sc图解(据 Gu *et al.*, 2002)

4.5 构造背景

4.5.1 主量元素与构造背景 碎屑沉积岩的地球化学特征与其物源性质和大地构造背景存在非常密切的关系,因此源自不同大地构造背景的碎屑沉积岩在主量元素的构成上存在明显差异(Bhatia, 1983; McLennan and Taylor, 1991).

Roser and Korsch (1986) 和 Maynard *et al.* (1982) 分别建立了 K_2O/Na_2O-SiO_2 图解(图 11a) 和 $SiO_2/Al_2O_3-K_2O/Na_2O$ 图解(图 11b), 对不同板块构造背景下形成的砂岩进行判别, 研究区姚家组 12 件砂岩显示出了高度的一致性, 均投影落入被动大陆边缘区域. Bhatia (1983) 研究发现, 在碎屑岩物源区构造背景的判别中, SiO_2 、 SiO_2/Al_2O_3 、 $Fe_2O_3^T + MgO$ 、 K_2O/Na_2O 、 $Al_2O_3/(CaO + Na_2O)$ 等地球化学参数最具判别性, 随着 SiO_2 含量的增加, TiO_2 、

Al_2O_3 、 $Fe_2O_3^T$ 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 含量均逐渐减少, 并且呈现出较好的负相关性. 通过与大陆岛弧、大洋岛弧、主动大陆边缘和被动大陆边缘等构造环境中各项主量元素特征参数对比, 姚家组砂岩主量元素特征与被动大陆边缘环境最为契合(表 2). 在 $(Fe_2O_3^T + MgO)-K_2O/Na_2O$ 图解中(图 11c), 样品几乎全部落入被动大陆边缘区域, 仅有 1 件样品落于其附近; 在 $(Fe_2O_3^T + MgO)-Al_2O_3/(Na_2O + CaO)$ 图解中(图 11d), 仅有 1 件样品投影于主动大陆边缘区域, 其余 11 件砂岩样品全部落入被动大陆边缘区域.

4.5.2 微量、稀土元素与构造背景 与主量元素的较大活动性和可迁移性相比, 部分微量元素(如 Zr, Th, Sc, Co, Ti, La, Y 等) 相对不活动, 从物源区搬运至沉积盆地的过程中, 这些元素不易受风化搬运

表 2 姚家组砂岩与不同构造背景杂砂岩主量元素特征参数比较

Table 2 Comparison of major elements for sandstones from the Yaojia Formation and graywackes from different tectonic settings

构造背景	主量元素特征参数				
	Fe ₂ O ₃ ^T + MgO	TiO ₂	Al ₂ O ₃ / SiO ₂	K ₂ O/ Na ₂ O	Al ₂ O ₃ / (CaO+ Na ₂ O)
大洋岛弧	11.73	1.06	0.29	0.39	1.72
大陆岛弧	6.79	0.64	0.20	0.61	2.42
主动大陆边缘	4.63	0.46	0.18	0.99	2.56
被动大陆边缘	2.89	0.49	0.10	1.60	4.15
姚家组砂岩(N=12)	2.39	0.44	0.14	1.58	3.85

注: 主量元素含量的单位为%, 不同构造背景杂砂岩主量元素特征参数引自 Bhatia(1983).

和沉积作用影响, 能够很好地反映源岩的地球化学性质(Rollinson, 1993), 因此常用于沉积物源的构造背景判别(Bhatia and Crook, 1986; McLennan and Taylor, 1991; 王启宇等, 2018).

Bhatia and Crook(1986)通过对澳大利亚东部古生代杂砂岩进行微量和稀土元素的研究, 归纳总结了四类物源区构造背景, 它们分别是主动大陆边缘、被动大陆边缘、大洋岛弧、大陆岛弧. 利用 La、Y、Sc、Cr、Th、Co、Zr 等具强稳定性元素为端元建立了 La/Y-Sc/Cr 直角坐标图, La-Th-Sc, Th-Co-Zr/10 和 Th-Sc-Zr/10 等三角图解, 用于判别沉积岩物源区的构造背景, 这些图解在物源区构造背景分析中得到了广泛应用. 在 La/Y-Sc/Cr 图解中, 9 件砂岩样品落入被动大陆边缘区域, 3 件样品落入被动大陆边缘邻近区域(图 12a); La-Th-Sc 图解中能很

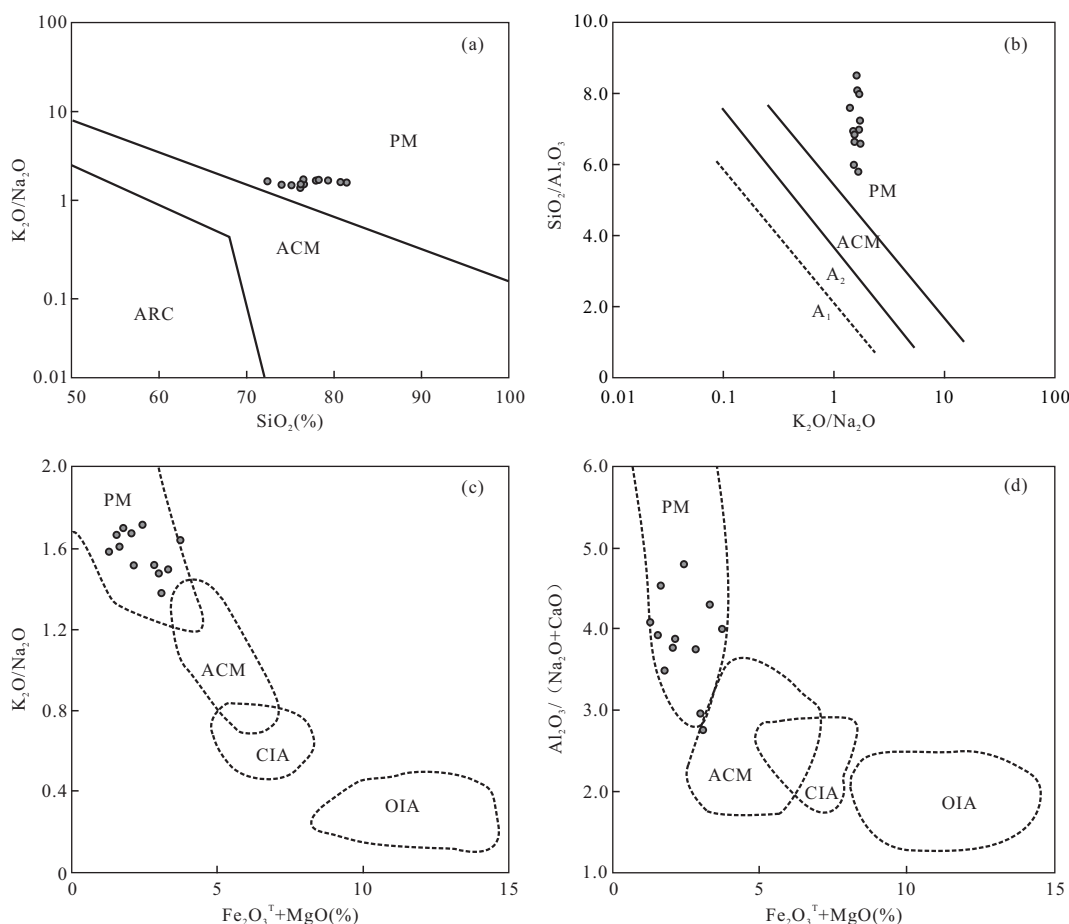


图 11 姚家组砂岩构造背景主量元素判别图解

Fig.11 Tectonic setting discrimination diagrams using major elements for sandstones from the Yaojia Formation a.K₂O/Na₂O-SiO₂图解(据 Roser and Korsch, 1986); b.SiO₂/Al₂O₃-K₂O/Na₂O图解(据 Maynard *et al.*, 1982); c.K₂O/Na₂O-(Fe₂O₃^T+MgO)图解; d.Al₂O₃/(Na₂O+CaO)-(Fe₂O₃^T+MgO)图解(据 Bhatia, 1983); ARC. 岛弧; A1. 弧; A2. 演化弧; ACM. 主动大陆边缘; PM. 被动大陆边缘; OIA. 大洋岛弧; CIA. 大陆岛弧

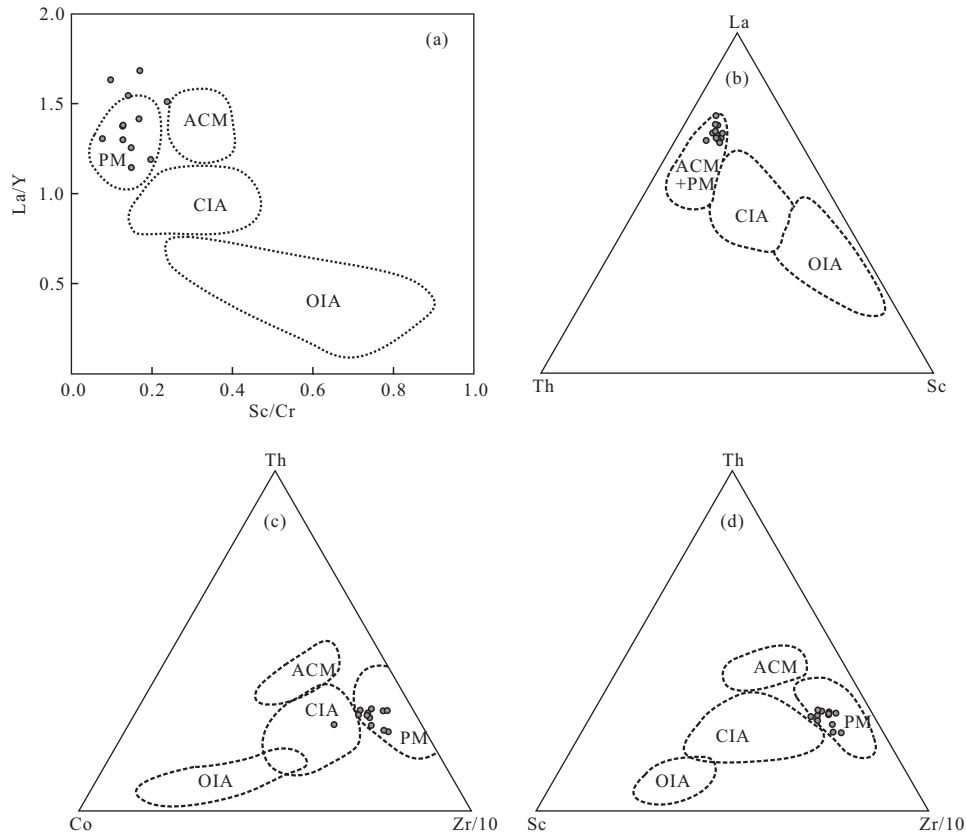


图 12 姚家组砂岩构造背景微量元素判别图解

Fig.12 Tectonic setting discrimination diagrams using trace elements for sandstones from the Yaojia Formation
 a.La/Y-Sc/Cr图解;b.La-Th-Sc图解;c.Th-Co-Zr/10图解;d.Th-Sc-Zr/10图解(据 Bhatia and Crook, 1986);ACM. 主动大陆边缘;PM. 被动大陆边缘;OIA. 大洋岛弧;CIA. 大陆岛弧

好地区分大洋岛弧和大陆岛弧,但无法将主动大陆边缘与被动大陆边缘区分,主动大陆边缘与被动大陆边缘区域重叠,全部砂岩样品均落入该重叠区域(图 12b);在 Th-Co-Zr/10 图解中,几乎全部砂岩样品落入被动大陆边缘区域,仅有 1 件样品落入大陆岛弧区域(图 12c);在 Th-Sc-Zr/10 图解中,全部砂岩样品显示出了高度的一致性,投影均落入被动大陆边缘区域(图 12d).因此,认为姚家组砂岩源区的构造背景为被动大陆边缘.

Bhatia(1985)对已知构造背景的杂砂岩和泥岩的稀土元素地球化学特征参数进行总结,确定了不同构造背景下稀土元素及特征参数值(表 3).研究区姚家组砂岩样品的稀土元素平均值与之对比表明,La/Yb,La_N/Yb_N的平均值最接近被动大陆边缘,La, Eu/Eu*, \sum LREE/ \sum HREE的平均值与主动大陆边缘最接近,而 Ce 和 \sum REE的平均值与大陆岛弧最接近.姚家组砂岩稀土元素特征参数值与大洋岛弧背景下的特征值差别较大,表明姚家组砂岩源

区具有大陆岛弧或大陆边缘构造背景属性.考虑到被动大陆边缘形成的砂岩可以包含较多大陆岛弧的地球化学信息(柏道远等,2007),因此,该特征反映姚家组砂岩源区的构造背景为大陆边缘.Bhatia(1985)指出来自安第斯型主动大陆边缘、被动大陆边缘、地台和克拉通内构造高地的沉积物,具有与 PASS 相似的稀土配分型式,即高的稀土总量、轻稀土富集和明显的负铈异常,因此根据稀土元素特征可以将大陆边缘与大洋岛弧、大陆岛弧进行区分,但无法将主动大陆边缘和被动大陆边缘构造环境区分开来.

值得指出的是,在 Bhatia(1985)提出的稀土元素-主量元素源区判别图解(图 13)中,大部分样品投影于或更靠近花岗片麻岩及沉积岩型区域,这与上述通过主量、微量和稀土元素判断得出的结论一致,也与大陆边缘背景下的主要岩石组成相吻合.

20 世纪 80 年代,许多学者针对陆源碎屑岩,提出了一系列的地球化学图解(Bhatia, 1983; Bhatia

表 3 姚家组砂岩与不同构造背景杂砂岩稀土元素特征参数比较

Table 3 Comparison of REE characteristics for sandstones from the Yaojia Formation and graywackes from different tectonic settings

构造背景	源区类型	REE 参数						
		La ($\times 10^{-6}$)	Ce ($\times 10^{-6}$)	Σ REE ($\times 10^{-6}$)	La/Yb	La _N /Yb _N	Σ LREE/ Σ HREE	Eu/Eu*
大洋岛弧	未切割的岩浆弧	8 \pm 1.7	19 \pm 3.7	58 \pm 10	4.2 \pm 1.3	2.8 \pm 0.9	3.8 \pm 0.9	1.04 \pm 0.11
大陆岛弧	切割的岩浆弧	27 \pm 4.5	59 \pm 8.2	146 \pm 20	11.0 \pm 3.6	7.5 \pm 2.5	7.7 \pm 1.7	0.79 \pm 0.13
主动大陆边缘	隆升的基底	37	78	186	12.5	8.5	9.1	0.6
被动大陆边缘	克拉通内部 构造高地	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56
姚家组砂岩(N=12)		35.3	64.6	153.7	16.9	11.4	10.1	0.63

注:La_N/Yb_N和 Eu/Eu*采用 Taylor and McLennan(1985)推荐的球粒陨石平均值标准化;不同构造背景杂砂岩稀土元素特征参数引自 Bhatia(1985).

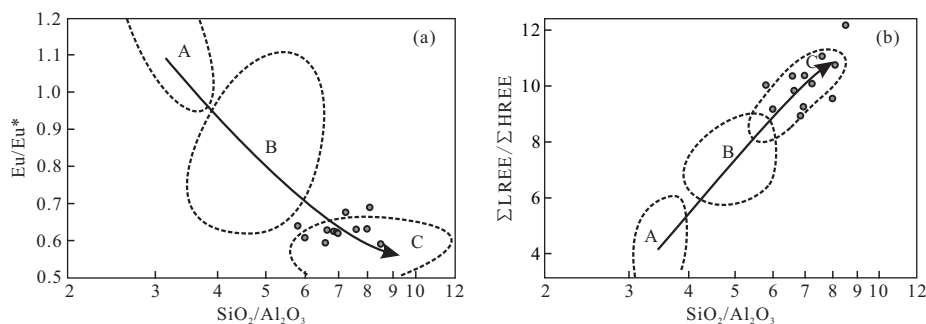


图 13 姚家组砂岩的稀土元素—主量元素源区判别图

Fig.13 Provenance discrimination diagrams of REE vs. major elements for sandstones from the Yaojia Formation 封闭虚线表示不同的物源区;A.安山岩型;B.英安岩型;C.花岗片麻岩及沉积岩型,箭头指示从A到B到C,成熟度逐渐增加,分别相当于OIA(大洋岛弧),CIA(大陆岛弧),ACM(主动大陆边缘)与PM(被动大陆边缘)的构造环境;据 Bhatia(1985)

and Crook, 1986; Roser and Korsch, 1986, 1988). 基于主量和微量元素所作的这些判别图解自提出以来,被广泛用于判别未知盆地的板块构造背景,在这些图解中,研究区姚家组的砂岩样品投影点均落在被动大陆边缘区域(图 11,图 12).一些学者(Armstrong-Altrin and Verma, 2005; Verma and Armstrong-Altrin, 2013)对 Bhatia(1983)和 Roser and Korsch(1986)提出判别沉积盆地的板块构造背景的图解进行了重新验证,发现这些图解的成功率不高. Verma and Armstrong-Altrin(2016)指出传统的地球化学图解并不总能成功地对正确的构造背景进行判别,然而,近三十年过去了,没有新的元素判别图解提出,于是,他们提出了对来自主动大陆边缘和被动大陆边缘构造背景的新近纪—第四纪硅质碎屑沉积物的广泛地球化学数据库的新构造背景判别图解.基于主量元素的等距对数比变换(ilr)所作的判别图解(图 14a),姚家组砂岩样品均落于被

动大陆边缘区域,基于主量和微量元素的等距对数比变换(ilr)所作的联合判别图解(图 14b),8个样品也落在被动大陆边缘区域,其余4个样品落在主动/被动大陆边缘界限附近的区域中.这与利用传统的地球化学图解得出的结论是一致的.

钱家店凹陷地处松辽盆地南部开鲁盆地,从区域大地构造位置上,松辽盆地南部及燕山地区跨越了华北克拉通和兴蒙造山带两个一级构造单元.燕山地区位于华北克拉通北部,古亚洲洋构造域和太平洋构造域的交叠部位.中生代以来,华北地块与相邻地块的碰撞和相互作用,使得华北克拉通北部发生了强烈的构造变形和陆内造山作用(崔盛芹等,2000).

马寅生(2001)对燕山地区及邻区中新生代的构造演化研究认为该区中生代经历了早中三叠世、晚三叠世至早侏罗世、中晚侏罗世、白垩纪、古近纪、新近纪—第四纪6个盆地演化阶段,它们是在

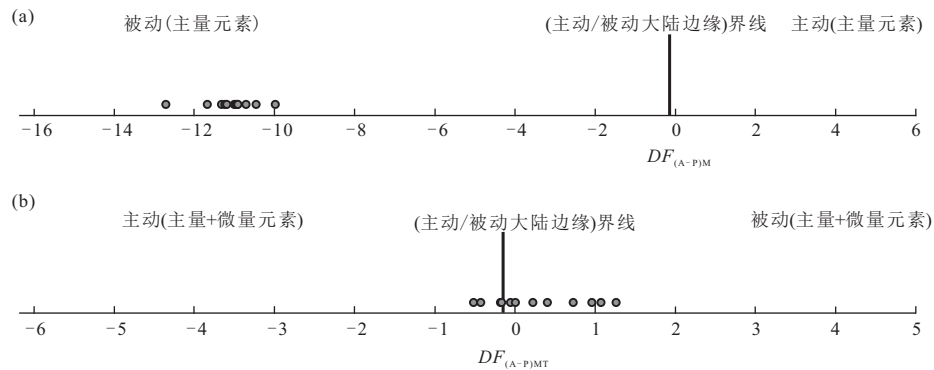


图 14 姚家组砂岩用于区分主动大陆边缘和被动大陆边缘的新的判别函数图

Fig.14 Evaluation of the new multidimensional discriminant function diagrams for the discrimination of active and passive margin settings for sandstones from the Yaojia Formation

a. 基于主量元素的图解; 判别函数 $DF_{(A-P)M}$ 由下列式子计算得出: $DF_{(A-P)M} = (3.000\ 5 \times \text{ilr}1_{\text{TiM}}) + (2.824\ 3 \times \text{ilr}2_{\text{AlM}}) + (-1.596 \times \text{ilr}3_{\text{FeM}}) + (-0.705\ 6 \times \text{ilr}4_{\text{MnM}}) + (-0.304\ 4 \times \text{ilr}5_{\text{MgM}}) + (0.627\ 7 \times \text{ilr}6_{\text{CaM}}) + (-1.183\ 8 \times \text{ilr}7_{\text{NaM}}) + (1.591\ 5 \times \text{ilr}8_{\text{KM}}) + (0.152\ 6 \times \text{ilr}9_{\text{PM}}) - 5.994\ 8$; b. 联合主量元素和微量元素的图解, 判别函数 ($DF_{(A-P)MT}$) 由下列式子计算得出: $DF_{(A-P)MT} = (3.268\ 3 \times \text{ilr}1_{\text{TiMT}}) + (5.387\ 3 \times \text{ilr}2_{\text{AlMT}}) + (1.554\ 6 \times \text{ilr}3_{\text{FeMT}}) + (3.216\ 6 \times \text{ilr}4_{\text{MnMT}}) + (4.754\ 2 \times \text{ilr}5_{\text{MgMT}}) + (2.039\ 0 \times \text{ilr}6_{\text{CaMT}}) + (4.049\ 0 \times \text{ilr}7_{\text{NaMT}}) + (3.150\ 5 \times \text{ilr}8_{\text{KMT}}) + (2.368\ 8 \times \text{ilr}9_{\text{PMT}}) + (2.835\ 4 \times \text{ilr}10_{\text{CMT}}) + (0.901\ 1 \times \text{ilr}11_{\text{NbMT}}) + (1.912\ 8 \times \text{ilr}12_{\text{NiMT}}) + (2.909\ 4 \times \text{ilr}13_{\text{VMT}}) + (4.150\ 7 \times \text{ilr}14_{\text{YMT}}) + (3.487\ 1 \times \text{ilr}15_{\text{ZrMT}}) - 3.208\ 8$; 据 Verma and Armstrong-Altrin (2016)

前中生代华北克拉通岩石圈基础上发育起来的克拉通内(陆内或板内)成盆沉积与挤压变形的交替演化过程,在演化过程中,挤压作用和伸展作用交替出现,分别在不同的演化阶段占有重要位置,早中三叠世盆地是晚二叠世克拉通盆地的延续,标志着该区克拉通演化阶段即将结束,孕育着陆内造山作用阶段的开始.中三叠世末盆地遭受强烈挤压作用,盆地整体处于隆起的背景,晚三叠世—早侏罗世盆地进入均衡调整阶段的稳定沉积时期,沿褶皱带或断陷带凹陷部位发育一系列具有明显的继承性特点的小型盆地.中晚侏罗世盆地为一组断陷盆地,该时期的构造活动中,伸展作用的影响愈发明显,断陷盆地之间的东北向断块隆起与断陷盆地组成了该区中生代第一个盆岭构造系统.白垩纪,燕山地区及邻区进入一个新的构造演化阶段,发育一系列断陷盆地,这些白垩纪断陷盆地之间的隆起和断陷盆地组成该区第二个伸展状态下的盆岭构造系统.

开鲁盆地位于内蒙古东部,为一个形成于白垩纪的断陷盆地,许欢等(2011)对燕山地区侏罗系—白垩系地层分布研究指出内蒙古东部白垩系主要发育一套火山—沉积岩系,岩性由酸性火山熔岩及相应的火山碎屑岩等组成.研究表明姚家组砂岩源岩主要为长英质火山岩和古老的沉积物,这与内蒙古东部白垩系所发育的岩系相吻合.主量、微量和稀土元素地球化学研究所揭示的姚家组砂岩源区

构造背景为被动大陆边缘, Roser and Korsch (1986) 所定义的被动大陆边缘环境包括克拉通内部环境,白垩纪时期燕山及其邻区进入克拉通内(陆内或板内)成盆沉积及构造演化阶段,因此基于地球化学研究得出的姚家组砂岩源区构造背景与前人的研究成果吻合.综合研究表明,内蒙古东部白垩系发育的火山—沉积岩系为钱家店铀矿床姚家组砂岩提供了物源,物源区白垩纪构造位置上隶属于华北克拉通北缘燕山陆内造山带.

5 结论

通过对松辽盆地南部钱家店铀矿床姚家组砂岩的岩相学和地球化学特征以及物源分析研究,可以得出以下结论:

(1) 钱家店铀矿床姚家组砂岩碎屑组分中石英含量最多,长石次之,岩屑含量最低,砂岩碎屑组分三角图和地球化学判别图解表明,姚家组砂岩的岩石类型主要为长石砂岩和岩屑长石砂岩.岩屑类型多样,主要为火成岩岩屑,其中花岗质岩屑、中酸性喷出岩岩屑和隐晶岩岩屑是常见的火成岩岩屑;其次为变质岩岩屑和沉积岩岩屑.姚家组砂岩普遍具有锆石+钛磁铁矿+石榴子石的重矿物组合,指示源岩以酸性岩浆岩或变质岩为主. Dickinson 判别图解表明物源主要来自大陆物源区.

(2) 姚家组砂岩化学蚀变指数 CIA 值为 52.02~

60.16, 平均值为 56.69, 反映了干燥气候背景下弱的化学风化作用。砂岩样品具有相似的稀土元素配分模式表明其具有一致的物质来源, A-CN-K 三角图解、主量元素判别函数、微量元素比值及源岩性质判别图解均显示了源岩性质属于古老的沉积物及长英质火山岩(花岗片麻岩和花岗岩)。

(3) 主量、微量和稀土元素地球化学图解表明物源区构造背景为被动大陆边缘。结合区域构造演化, 认为其物源为内蒙古东部白垩系发育的火山—沉积岩系, 物源区白垩纪构造位置上隶属于华北克拉通北缘燕山陆内造山带。

致谢: 中国地质大学(武汉)赵军红教授为文章的修改和完善提供了宝贵意见; 匿名评审专家提出了很多需要深入研究的问题及修改意见, 在此一并致以衷心感谢!

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Armstrong-Altrin, J.S., Verma, S.P., 2005. Critical Evaluation of Six Tectonic Setting Discrimination Diagrams Using Geochemical Data of Neogene Sediments from Known Tectonic Settings. *Sedimentary Geology*, 177(1-2): 115-129. <https://doi.org/10.1016/j.sed-geo.2005.02.004>
- Bai, D. Y., Zhou, L., Wang, X.H., et al., 2007. Geochemistry of Nanhuan-Cambrian Sandstones in Southeastern Hunan, and Its Constraints on Neoproterozoic-Early Paleozoic Tectonic Setting of South China. *Acta Geologica Sinica*, 81(6):755-771(in Chinese with English abstract).
- Bhatia, M.R., 1983. Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones. *The Journal of Geology*, 91(6): 611-627. <https://doi.org/10.1086/628815>
- Bhatia, M.R., 1985. Rare Earth Element Geochemistry of Australian Paleozoic Graywackes and Mudrocks: Provenance and Tectonic Control. *Sedimentary Geology*, 45(1-2): 97-113. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(85\)90025-9](https://doi.org/10.1016/0037-0738(85)90025-9)
- Bhatia, M.R., Crook, K.A.W., 1986. Trace Element Characteristics of Graywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2):181-193.
- Blatt, H., Middleton, G., Murray, R., 1980. Origin of Sedimentary Rocks. Prentice-Hall, New Jersey.
- Chen, F.H., Zhang, M.Y., Lin, C.S., 2005. Sedimentary Environments and Uranium Enrichment in the Yaojia Formation, Qianjiadian Depression, Kailu Basin, Nei Mongol. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 25(3):74-79(in Chinese with English abstract).
- Chen, X.L., Fang, X.H., Guo, Q.Y., et al., 2008. Re-Discussion on Uranium Metallogenesis in Qianjiadian Sag, Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 82(4): 553-561 (in Chinese with English abstract).
- Condie, K.C., 1993. Chemical Composition and Evolution of the Upper Continental Crust: Contrasting Results from Surface Samples and Shales. *Chemical Geology*, 104(1-4): 1-37. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(93\)90140-e](https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-e)
- Cui, S.Q., Li, J.R., Sun, J.S., et al., 2000. Sequences of Tectonic Movement and Regional Tectonic Framework of North Margin of the North China Plate. Geological Publishing House, Beijing, 100-151(in Chinese).
- Dickinson, W.R., Beard, L.S., Brakenridge, G.R., et al., 1983. Provenance of North American Phanerozoic Sandstones in Relation to Tectonic Setting. *Geological Society of America Bulletin*, 94(2):222-235.
- Dickinson, W.R., Suczek, C.A., 1979. Plate Tectonics and Sandstone Compositions. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63: 2164-2182. <https://doi.org/10.1306/2f9188fb-16ce-11d7-8645000102c1865d>
- Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., Young, G.M., 1995. Unraveling the Effects of Potassium Metasomatism in Sedimentary Rocks and Paleosols, with Implications for Paleoweathering Conditions and Provenance. *Geology*, 23(10): 921-924.
- Floyd, P.A., Leveridge, B.E., 1987. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones. *Journal of the Geological Society*, 144(4): 531-542. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
- Floyd, P.A., Winchester, J.A., Park, R.G., 1989. Geochemistry and Tectonic Setting of Lewisian Clastic Metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, NW Scotland. *Precambrian Research*, 45(1-3): 203-214. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(89\)90040-5](https://doi.org/10.1016/0301-9268(89)90040-5)
- Girty, G.H., Ridge, D.L., Knaack, C., et al., 1996. Provenance and Depositional Setting of Paleozoic Chert and Argillite, Sierra Nevada, California. *Journal of Sedimentary Research*, 66(1): 107-118. <https://doi.org/10.1306/d42682ca-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Gu, X.X., Liu, J.M., Zheng, M.H., et al., 2002. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Turbidites in Hunan, South China: Geochemical Evidence. *Journal of Sedimentary Research*, 72(3): 393-407. <https://doi.org/>

- 10.1306/081601720393
- Herron, M. M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. *Journal of Sedimentary Petrology*, 58(5): 820–829. <http://10.1306/212f8e77-2b24-11d7.8648000102c1865d>
- Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., Peng, Y. B., et al., 2015. Sedimentary-Tectonic Setting of the Deposition-Type Uranium Deposits Forming in the Paleo-Asian Tectonic Domain, North China. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 189–205 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Y., He, Z. B., Ma, H. F., et al., 2012. Metallogenic Characteristics of Qianjiadian Sandstone Uranium Deposit in Songliao Basin. *Mineral Deposits*, 31(2): 391–400 (in Chinese with English abstract).
- Ma, H. F., Luo, Y., Li, Z. Y., et al., 2009. Sedimentary Features and Uranium Metallogenic Conditions of Yaojia Formation in Southern Songliao Basin. *Uranium Geology*, 25(3): 144–149 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. S., 2001. The Evolution of Mesozoic-Cenozoic Basin-Mountain Structure in the East Yanshan Area and Xialiaohe Basin. *Journal of Geomechanics*, 7(1): 79–91 (in Chinese with English abstract).
- Maynard, J. B., Valloni, R., Yu, H. S., 1982. Composition of Modern Deep-Sea Sands from Arc-Related Basins. In: Leggett, J. K., ed., Trench and Fore-Arc Sedimentation. *The Geological Society, London, Special Publications*, (10): 551–561.
- McLennan, S. M., Hemming, S. R., McDaniell, D. K., et al., 1993. Geochemical Approaches to Sedimentation, Provenance and Tectonics. In: Johnson, M. J., Basu, A., eds., Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. *The Geological Society of America, Special Paper*, (284): 21–40.
- McLennan, S. M., Taylor, S. R., 1991. Sedimentary Rocks and Crustal Evolution: Tectonic Setting and Secular Trends. *The Journal of Geology*, 99(1): 1–21. <https://doi.org/10.1086/629470>
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1984. Prediction of Some Weathering Trends of Plutonic and Volcanic Rocks Based on Thermodynamic and Kinetic Considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48(7): 1523–1534.
- Pei, X. Z., Hu, N., Liu, C. J., et al., 2015. Detrital Composition, Geochemical Characteristics and Provenance Analysis for the Maerzheng Formation Sandstone in Gerizhuotuo Area, Southern Margin of East Kunlun Region. *Geological Review*, 61(2): 307–323 (in Chinese with English abstract).
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., Siever, R., 1987. Sand and Sandstone. Springer, New York, 24–63.
- Rollinson, H. R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman Scientific Technical Press, London.
- Rong, H., Jiao, Y. Q., Wu, L. Q., et al., 2016. Epigenetic Alteration and Its Constraints on Uranium Mineralization from the Qianjiadian Uranium Deposit, Southern Songliao Basin. *Earth Science*, 41(1): 153–166 (in Chinese with English abstract).
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO₂ Content and K₂O/Na₂O Ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635–650.
- Roser, B. P., Korsch, R. J., 1988. Provenance Signatures of Sandstone-Mudstone Suites Determined Using Discriminant Function Analysis of Major-Element Data. *Chemical Geology*, 67(1–2): 119–139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Rudnick, R. L., Gao, S., 2003. Composition of the Continental Crust. In: Holland, H. D., Turekian, K. K., eds., The Crust: Treatise on Geochemistry. Pergamon, Oxford.
- Suttner, L. J., Dutta, P. K., 1986. Alluvial Sandstone Composition and Paleoclimate, I. Framework Mineralogy. *Journal of Sedimentary Research*, 56(3): 329–345.
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. *The Journal of Geology*, 94(4): 57–72.
- Verma, S. P., Armstrong-Altrin, J. S., 2013. New Multi-Dimensional Diagrams for Tectonic Discrimination of Siliciclastic Sediments and Their Application to Precambrian Basins. *Chemical Geology*, 355: 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.014>
- Verma, S. P., Armstrong-Altrin, J. S., 2016. Geochemical Discrimination of Siliciclastic Sediments from Active and Passive Margin Settings. *Sedimentary Geology*, 332: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.11.011>
- Wang, D. P., Liu, Z. J., Liu, L., 1994. Basin Evolution and Sea Level Fluctuation of Songliao Basin. Geological Publishing House, Beijing, 114–127 (in Chinese).
- Wang, Q. Y., Mou, C. L., He, J., et al., 2018. Provenance Analysis and Tectonic Setting Judgment in Shanglan Formation of Middle Triassic in Weixi Area. *Earth Science*, 43(8): 2811–2832 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. M., Jiao, Y. Q., Du, Y. S., et al., 2013. REE Mobility and Ce Anomaly in Bauxite Deposit of WZD Area, Northern Guizhou, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 133(5): 103–117. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.08.009>

- Xu, H., Liu, Y. Q., Liu, Y. X., et al., 2011. Stratigraphy, Sedimentology and Tectonic Background of Basin Evolution of the Late Jurassic-Early Cretaceous Tuchengzi Formation in Yinshan - Yanshan, North China. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 88-106(in Chinese with English abstract).
- Yin, J. H., Zhang, H., Zan, G. J., et al., 2000. Sedimentation Factors Analysis of Uranium Mineralization of Qianjiadian Depression, Kailu Basin, East Inner Mongolia Autonomous Region. *Journal of Palaeogeography*, 2(4):76-83 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. Y., Zheng, J. W., Tian, S. F., et al., 2005. Research on Existing State of Uranium and Uranium Ore-Formation Age at Qianjiadian Uranium Deposit in Kailu Depression. *Uranium Geology*, 21(4): 213-218 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 柏道远, 周亮, 王先辉, 等, 2007. 湘东南南华系—寒武系砂岩地球化学特征及对华南新元古代—早古生代构造背景的制约. *地质学报*, 81(6):755-771.
- 陈方鸿, 张明瑜, 林畅松, 2005. 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. *沉积与特提斯地质*, 25(3):74-79.
- 陈晓林, 方锡珩, 郭庆银, 等, 2008. 对松辽盆地钱家店凹陷铀成矿作用的重新认识. *地质学报*, 82(4):553-561.
- 崔盛芹, 李锦蓉, 孙家树, 等, 2000. 华北陆块北缘构造运动序列及区域构造格局. 北京:地质出版社, 100-151.
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 等, 2015. 中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积—构造背景综合分析. *地学前缘*, 22(1):189-205.
- 罗毅, 何中波, 马汉峰, 等, 2012. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征. *矿床地质*, 31(2):391-400.
- 马汉峰, 罗毅, 李子颖, 等, 2009. 松辽盆地南部姚家组沉积特征及铀成矿条件. *铀矿地质*, 25(3):144-149.
- 马寅生, 2001. 燕山东段下辽河地区中生代盆地构造演化. *地质力学学报*, 7(1):79-91.
- 裴先治, 胡楠, 刘成军, 等, 2015. 东昆仑南缘哥日卓托地区马尔组砂岩碎屑组成、地球化学特征与物源构造环境分析. *地质论评*, 61(2):307-323.
- 荣辉, 焦养泉, 吴立群, 等, 2016. 松辽盆地南部钱家店铀矿床后生蚀变作用及其对铀成矿的约束. *地球科学*, 41(1):153-166.
- 王东坡, 刘招君, 刘立, 1994. 松辽盆地演化与海平面升降. 北京:地质出版社, 114-127.
- 王启宇, 牟传龙, 贺娟, 等, 2018. 维西地区中三叠统上兰组物源分析及构造背景判断. *地球科学*, 43(8):2811-2832.
- 许欢, 柳永清, 刘燕学, 等, 2011. 阴山—燕山地区晚侏罗世—早白垩世土城子组地层、沉积特征及盆地构造属性分析. *地学前缘*, 18(4):88-106.
- 殷敬红, 张辉, 咎国军, 等, 2000. 内蒙古东部开鲁盆地钱家店凹陷铀矿成藏沉积因素分析. *古地理学报*, 2(4):76-83.
- 张明瑜, 郑纪伟, 田时丰, 等, 2005. 开鲁拗陷钱家店铀矿床铀的赋存状态及铀矿形成时代研究. *铀矿地质*, 21(4):213-218.