



松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组含铀砂岩地球化学特征

李 研, 李明阳, 刘晓辉

核工业 240 研究所, 辽宁 沈阳 110121

摘 要: 对松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组含铀地层沉积环境、构造背景、物源及其与成矿关系开展研究, 对 6 个代表性钻孔中的 30 个样品进行主量元素、微量元素和稀土元素进行分析测试。结果表明, 赋矿碎屑岩以长石岩屑砂岩为主, 具有 SiO_2 含量变化较大(38.94%~83.32%, 平均为 73.07%)、富碱($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 4.47%~6.78%)、铝含量较高(Al_2O_3 8.15%~13.55%, 平均为 11.46%)、镁钙含量相对较高(MgO 0.18%~7.38%, 平均为 0.88%; CaO 0.17%~12.63%, 平均为 1.96%)的特征。稀土总量较低(ΣREE 70.08×10^{-6} ~ 211.33×10^{-6})、轻稀土分馏系数(La/Sm)_N=2.32~3.96, 重稀土分馏系数(Gd/Yb)_N=1.54~3.25, Eu 为中等负异常(δEu =0.60~0.90), 壳源岩浆特征明显。砂岩的 ICV 值(0.54~2.30, 平均值为 0.84)和 CIA 值(41.08~68.96, 平均值为 61.77)反映出源区干旱—半干旱气候条件下的中等化学风化作用。源岩属性判别图解表明源岩以长英质岩石为主, 并且含少量古老沉积物质。主量元素和微量元素的构造背景判别图解综合表明姚家组、四方台组砂岩物源区为主动大陆边缘的构造环境, 物源为大兴安岭地区发育的酸性火成岩—沉积岩系。

关键词: 铀矿; 地球化学; 姚家组; 四方台组; 松辽盆地

Geochemistry of uranium-bearing sandstones of Yaojia Formation and Sifangtai Formation in the western slope of Songliao Basin

LI Yan, LI Ming-yang, LIU Xiao-hui

No. 240 Institute of Nuclear Industry, Shenyang 110121, China

Abstract: The paper comprehensively studies the sedimentary environment, tectonic setting, provenance, and their relationship with uranium mineralization in the uranium-bearing strata of Yaojia Formation and Sifangtai Formation in the western slope of Songliao Basin, and analyzes the major, trace, and rare earth elements (REEs) in 30 samples from six representative boreholes. The results show that the ore-hosting clastic rocks are predominantly feldspar lithic sandstone, characterized by various SiO_2 contents, rich alkali, and high contents of Al, Mg and Ca, with low ΣREE (70.08×10^{-6} – 211.33×10^{-6}), LREE fractionation factor (La/Sm)_N of 2.32–3.96, HREE fractionation factor (Gd/Yb)_N of 1.54–3.25, and moderately negative Eu anomaly. The index of compositional variability (ICV) (0.54–2.30, averagely 0.84) and chemical index of alteration (CIA) values (41.08–68.96, averagely 61.77) of the sandstone reflect moderate chemical weathering in the source area under arid to semi-arid climatic conditions. The discrimination diagrams of

收稿日期:2023-04-17; 修回日期:2025-06-10. 编辑:黄欣.

基金项目:中国核工业地质局项目“松辽盆地北部泰来-拜泉地区铀矿资源调查评价”(202125);国防科工局核能开发项目“松辽盆地砂岩型铀矿综合预测评价技术研究”(20171403).

作者简介:李研(1990—),男,博士,从事铀成矿理论与成矿预测研究,通信地址 辽宁省沈阳市沈北新区孝信街 12 号,E-mail:1483792423@qq.com

引用格式:李研,李明阳,刘晓辉. 松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组含铀砂岩地球化学特征[J]. 地质与资源, 2025, 34(3): 291-301, 360.

Li Y, Li M Y, Liu X H, Geochemistry of uranium-bearing sandstones of Yaojia Formation and Sifangtai Formation in the western slope of Songliao Basin [J]. Geology and Resources, 2025, 34(3): 291-301, 360.

source rock indicate that the provenance is dominated by felsic rocks, with minor contributions from ancient sedimentary materials. The discrimination diagrams of major and trace elements suggest that the sandstones of Yaojia and Sifangtai formations are derived from the active continental margin tectonic setting, with provenance primarily from the acidic igneous-sedimentary rock series developed in Daxinganling Mountains.

Key words: uranium deposit; geochemistry; Yaojia Formation; Sifangtai Formation; western slope; Songliao Basin

0 引言

铀矿作为战略性矿产是我国目前非常重要的能源资源勘查类型,尤其是砂岩型铀矿,因矿石质量好、开采成本低而备受青睐。我国北方中生代盆地内已经发现了多个大型砂岩铀矿床^[1-4],由西向东依次为吐哈盆地(铀矿含矿层为西山窑组^[5])、鄂尔多斯盆地(铀矿含矿层为直罗组^[6-7])、二连盆地(铀矿含矿层为赛汉组^[8])、松辽盆地南部(铀矿含矿层为姚家组^[9-10])。十多年来,辽河油田和核工业 243 大队在松辽盆地南部相继发现了 2 个大型砂岩型铀矿床(钱家店矿床和白兴吐矿床),具有非常巨大的铀矿资源储量,显示出较好的勘探前景。前人对铀矿成矿条件、含矿层位姚家组沉积体系、铀矿成矿年代学、成矿期次和赋存状态、含矿砂体的地球化学特征及沉积成岩作用、姚家组砂岩源区性质、风化程度和构造背景等多方面进行研究^[8-10],取得以下主要成果:1)钱家店矿床的含铀岩系姚家组砂岩可能来源于盆地周边古隆起的酸性火山岩及花岗岩;2)姚家组沉积时期主要发育冲积扇、河流、三角洲、湖泊 4 种沉积相类型,可进一步划分为 12 种亚相和 25 种微相,其中河流相沉积与铀成矿关系较为密切;3)钱家店矿床开鲁拗陷姚家组砂岩物源区形成构造环境为被动大陆边缘环境,物源主要来源于华北克拉通北缘的火山-沉积岩系。

松辽盆地北部地区与南部地质特征较为相似,但工作程度明显偏低。虽然已进入铀矿勘查阶段,并且在姚家组和四方台组陆续发现了多处铀工业孔及矿化孔,但是对含铀岩系物源特征及风化作用的研究仍为空白,缺乏针对松辽盆地北部铀矿含矿层物源属性以及大地构造背景的研究,这严重制约了赋矿地层与区域大规模铀成矿作用关系的认识。鉴于此,对松辽盆地西部斜坡区未蚀变的姚家组和四方台组原生灰色砂岩进行详尽的岩石学和地球化学研究,对铀矿含矿层姚家组和四方台组砂岩源区风化程度、源岩性质及其大

地构造背景与岩石成因进行系统讨论,可以为整体评价松辽盆地北部铀矿资源潜力提供有利的判别依据。

1 区域地质背景

松辽盆地位于我国东北地区中部,是规模较大的陆相含油气盆地^[11-13],盆地四面环山,其东部为张广才岭,西部为大兴安岭,北与小兴安岭相邻,南接康法丘陵地带,面积约 $26 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。基于区域隆起和拗陷发育特征,可将盆地划分为东北隆起区、东南隆起区、北部倾没区、西部斜坡区、中央拗陷区和西南隆起区 6 个一级构造单元(图 1)。

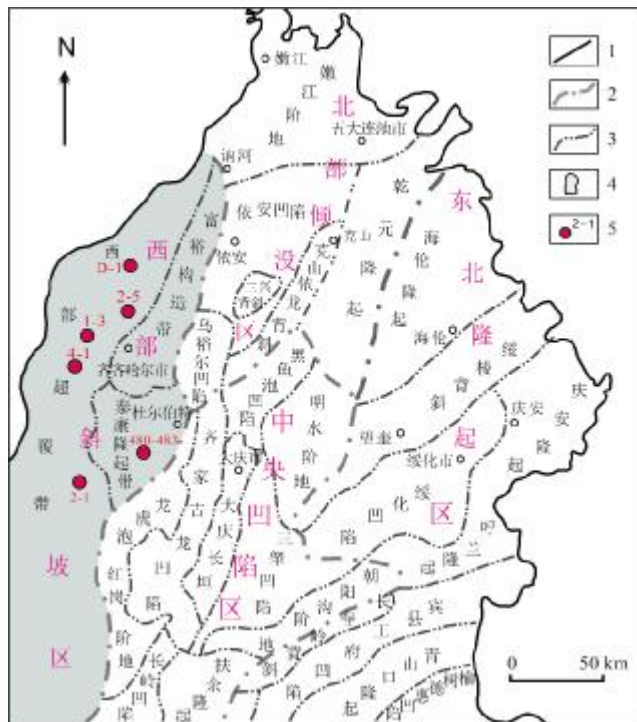


图 1 松辽盆地北部地区构造单元划分图

Fig. 1 Tectonic division of northern Songliao Basin

1—盆地边界 (basin boundary); 2—一级构造单元 (first-order tectonic unit); 3—二级构造单元 (second-order tectonic unit); 4—研究区 (study area); 5—钻井 (borehole)

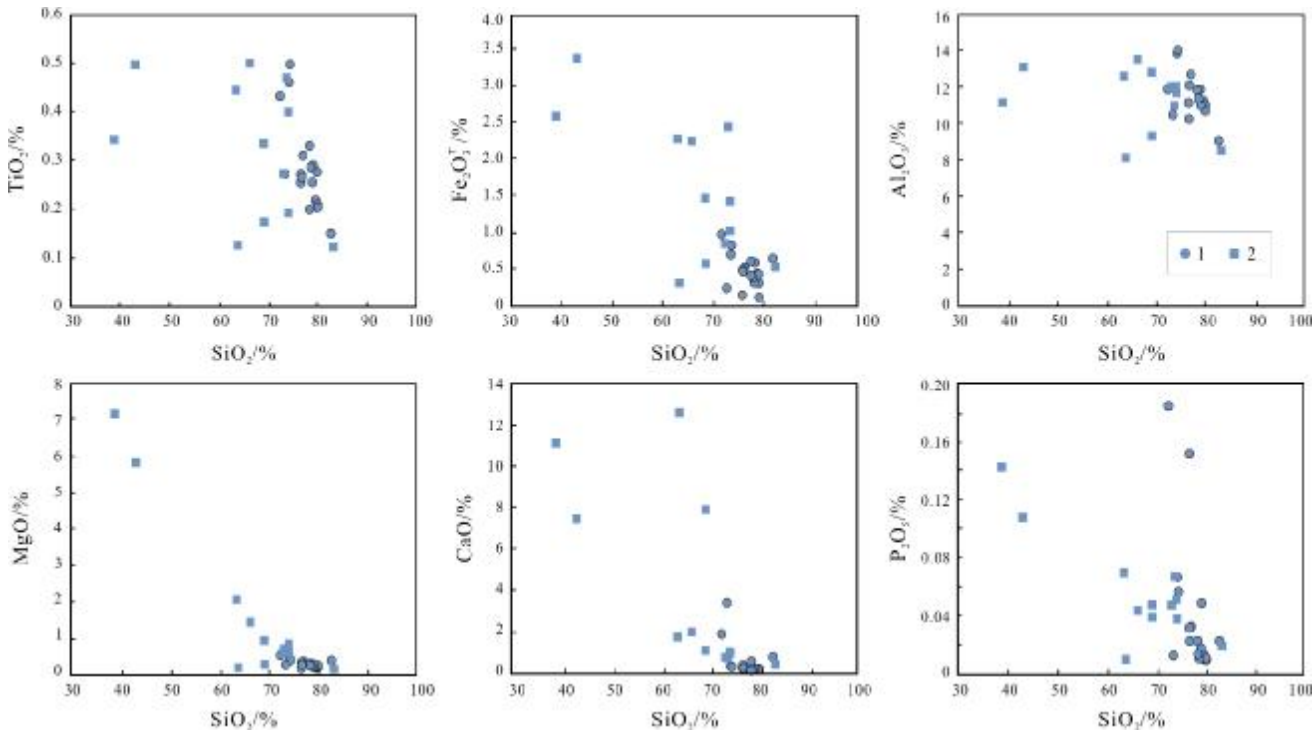


图3 松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组砂岩 Harker 图解
Fig. 3 The Harker diagrams of sandstones from Yaojia and Sifangtai formations in the western slope of Songliao Basin
1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

增加而逐渐减少.

3.2 微量元素

样品稀土及微量元素变化特征较为相似,具有一定的亲缘性,稀土总量均不高,ΣREE=70.08×10⁻⁶~211.33×10⁻⁶,平均值为113.67×10⁻⁶,LREE 相对富集,轻、重稀土比值为7.42~13.28.稀土元素球粒陨石标准化配分图(图4a)显示,所有样品变化具有相同趋势,即轻稀土富集的右倾型特征,指示为壳源成因.轻稀土分馏系数(La/Sm)_N=2.32~3.96,平均为3.42,重稀土分馏系数(Gd/Yb)_N=1.54~3.25,平均为2.27,轻稀土分馏趋势高于重稀土.Eu 为中等负异常(δEu=0.60~0.90,平均为0.76),略高于后太古宙平均澳大利亚页岩 PAAS (0.65),而与平均上地壳 UCC(0.70)较为接近,且所有砂岩样品 REE 的配分曲线总体上与 PAAS 和 UCC 的变化趋势较为相似(图4a).而表征 Eu 异常的变化完全取决于碎屑物源的组成,推测砂岩源岩为花岗岩等酸性岩类且与上地壳相关^[14].

微量元素初始地幔标准化图(图4b)显示,所有砂岩样品演化趋势亦较为相似,均以富集 LREE、Rb、Th、K、Sr、P、Ti、Nb 负异常为特征,与上地壳微量元素含量基

本一致.综合以上研究认为,研究区姚家组和四方台组砂岩物质来源主要是上地壳花岗岩及长英质岩石^[9-10].

3.3 砂岩碎屑骨架成分

物源区的源岩构造背景和源岩属性可以从砂岩的骨架成分很好地表现出来.因此采用 Dickinson-Gazzi 点计法对姚家组和四方台组砂岩进行统计分析.在30件砂岩样品中,石英含量最高(平均为59%),长石次之(平均为25.4%),岩屑含量最少(平均15.33%).石英颗粒以单晶石英为主,占石英总量的82%(表2,扫描首页 OSID 二维码可见).所有砂岩样品全部落入岩屑长石砂岩和长石砂岩区域内(图5a).在 Q-F-L 和 Q-F-Lt 三角判别图解中大多数落入大陆物源区和混合物源区(图5b、c),结合砂岩的元素地球化学特征初步推测砂岩物源区较为复杂,但整体以大陆物源区为主.

4 讨论

4.1 物源区构造位置

总体上姚家组和四方台组砂岩主量元素特征与主动大陆边缘环境最为相似.元素 La、Th、Sc、Hf 等在沉积环境中稳定性好,可用来判断物源区大地构造背景

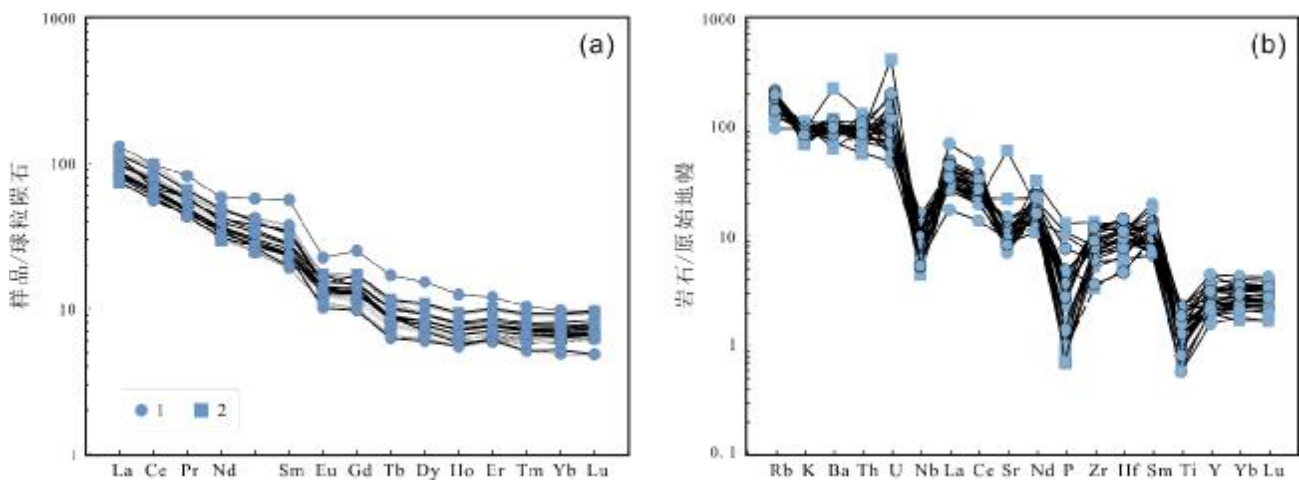


图 4 研究区姚家组、四方台组砂岩稀土元素配分模式图和微量元素蛛网图
(据文献[14])

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergram of sandstones from Yaojia and Sifangtai formations in the study area
(Based on Reference [14])
1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

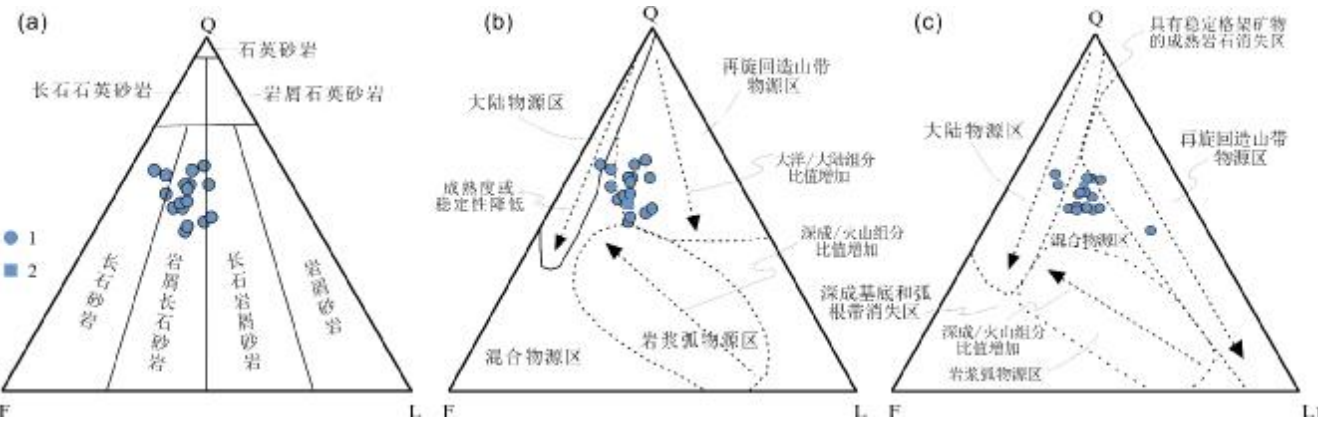


图 5 姚家组和四方台组砂岩三角判别图解
(据文献[9])

Fig. 5 Discrimination diagrams for sandstones from Yaojia and Sifangtai formations
(After Reference [9])

1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.); Q—石英(quartz); F—长石(feldspar); L—岩屑(lithic fragment); Lt—岩屑和多晶石英(lithic fragment and polycrystalline quartz)

及属性. 在 La-Th-Sc 和 Th-Sc-Zr/10 图解中, 大多数样品落在主动大陆边缘和被动大陆边缘范围内, 且落在主动大陆边缘的样品更占优势(图 6).

研究区砂岩样品的 δCe (0.81~1.14, 平均为 0.98) 与大陆边缘区 δCe (0.9~1.30) 接近, 暗示物源区处于大陆边缘环境. 松辽盆地中北部横跨兴蒙造山带, 处于太平洋构造体系和古亚洲洋构造体系的叠加部位. 古生代以来该区经历了陆缘增生、碰撞造山和盆岭分异等

复杂的地质作用. 研究区西侧大兴安岭东坡广泛分布的岩浆岩及古生界残留体, 与古亚洲洋和蒙古-鄂霍次克洋演化密切相关, 它们早于姚家组和四方台组砂岩形成. 因此, 可以认为组成物源区的岩石主要形成于主动大陆边缘环境.

4.2 物源区物质组成

4.2.1 主量元素与物源

前已叙述, 姚家组和四方台组砂岩的元素地球化

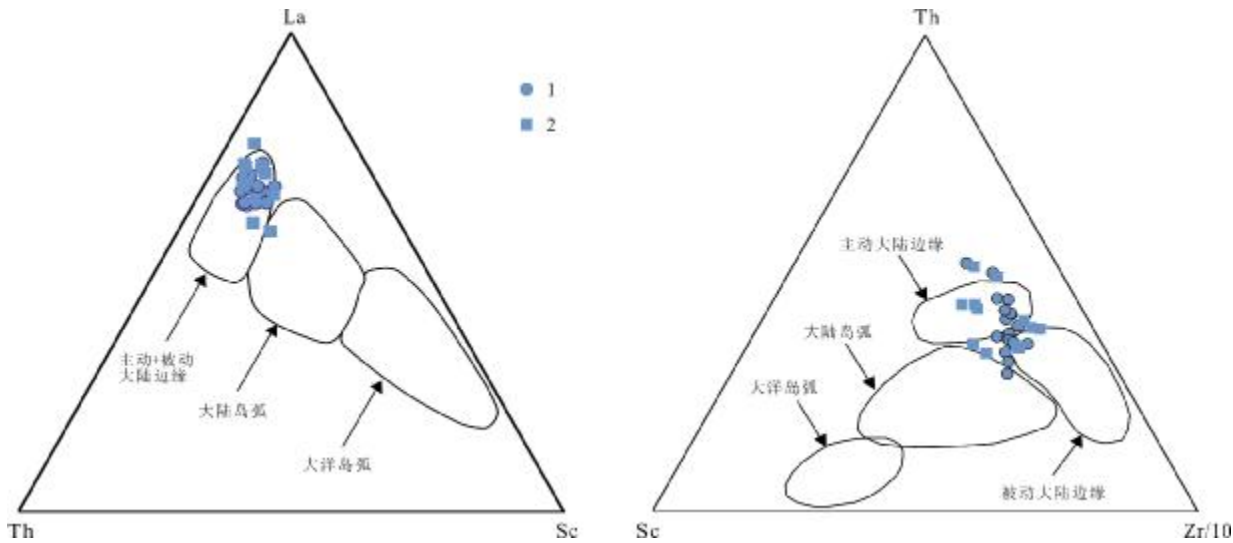


图 6 松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组砂岩微量元素构造环境判别图解
(据文献[9])

Fig. 6 Tectonic setting discrimination diagrams of trace elements in sandstones from Yaojia and Sifangtai formations
(After Reference [9])

1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

学特征表明其主要来源于上地壳,且主要为酸性岩浆岩.主量元素氧化物组成可以有效判别砂岩的物源区.在 F1-F2 物源区判别图解(图 7)上,大多数砂岩样品落入了长英质岩浆岩区内.个别样品落入石英沉积物源区,暗示源区可能有古老地质体或造山带再旋回产物.

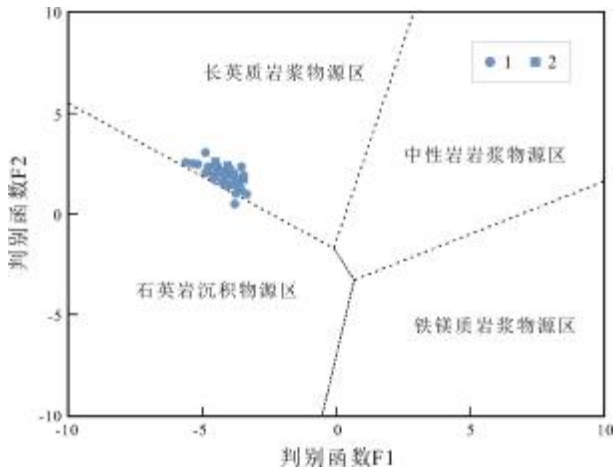


图 7 松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组砂岩
主量元素判别图解
(据文献[15])

Fig. 7 Discrimination diagram of major elements in sandstones
from Yaojia and Sifangtai formations
(After Reference [15])

1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

此外, Al_2O_3/TiO_2 比值变化亦是判别碎屑岩物源区的有效参数:当 $Al_2O_3/TiO_2 > 28$ 时,说明物源区为长英质岩石;当 $Al_2O_3/TiO_2 < 14$ 时,物源区为铁镁质岩石.研究区内砂岩样品 $Al_2O_3/TiO_2 > 28$,进一步说明姚家组和四方台组砂岩母岩主要为长英质岩石.

4.2.2 微量元素与物源

微量元素迁移性质不明显,是碎屑岩物源区良好的指示剂,常用来判别物源区岩石类型^[16-19].在主量-微量元素源岩属性判别图解(图 8)上绝大多数样品落在钙碱性花岗岩、花岗闪长岩和长英质岩浆岩区域内,这与前文推断结果较为一致.

在 $Ti/Zr-La/Sc$ 图解中,所有砂岩样品也主要集中于长英质火山岩和花岗岩之间(图 9a).在 $La/Th-Hf$ 图解上,大多数砂岩样品落入长英质岩石区域内(图 9b).在 $La-Th-Sc$ 和 $V-Ni-Th$ 源区图解中砂岩样品也均落入在长英质火山岩和花岗岩区域内(图 9c、d).

砂岩样品中 Th/Sc 变化于 1.33~4.03 之间,平均为 2.42,大于上地壳 Th/Sc 比值(1.0);而 $Zr/Sc=15.58\sim40.54$,与 Th/Sc 比值正相关性不明显(图 10),暗示姚家组和四方台组砂岩成分变化可能由于锆石富集所导致,且经历过沉积再旋回作用.此外,源区砂岩在没有沉积再旋回情况下, $Th/Sc-La/Sc$ 比值在不同类型物源

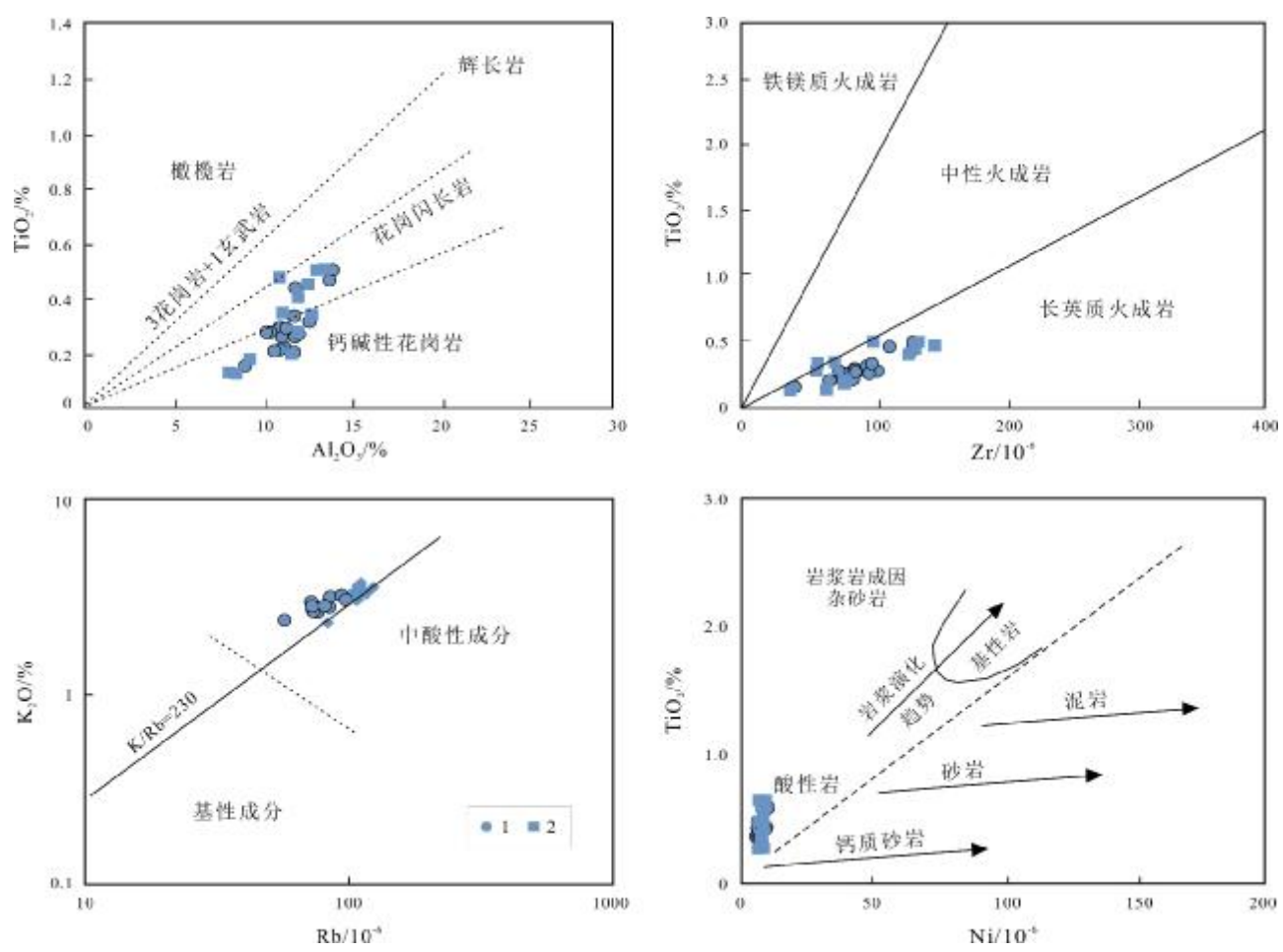


图 8 松辽盆地北部姚家组和四方台组砂岩主量-微量元素源岩属性判别图解
(据文献[16-19])

Fig. 8 Source rock discrimination diagrams of major and trace elements in sandstones from Yaojia and Sifangtai formations
(After Reference [16-19])
1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

区变化明显,且与铁镁质组分源区相比,长英质组分比值更高;反之,在有沉积再旋回情况下, Th/Sc 、 La/Sc 比值变化较小,且均大于大陆地壳平均成分(图 11),显示出沉积再旋回特征,指示物源区母岩成分主要为长英质岩石。

上述结果与大兴安岭东坡所发育岩系的地球化学数据较为吻合。松辽盆地西部与大兴安岭东坡相邻,大兴安岭东坡作为盆地西部的物源补给区,广泛分布有侏罗纪—早白垩世中酸性火山岩和海西期—燕山期中酸性侵入岩^[9],以及少量的基性岩浆岩和古生界沉积地层。因此,大兴安岭东坡以中酸性岩浆岩为主的岩浆-沉积岩系可为松辽盆地西部姚家组和四方台组提供丰富的物源。

4.3 物源区风化作用与气候环境

通常采用蚀变化学指数(CIA)来判断源区风化强度^[23]。当 $\text{CIA} < 50$ 时,认为其物源区岩石未遭受到化学风化作用;当 $50 \leq \text{CIA} < 60$ 时,表明其物源区岩石遭受到弱风化作用; $60 \leq \text{CIA} < 80$ 时,物源区岩石遭受到中等风化作用; $\text{CIA} \geq 80$ 时,岩石则经历了较强风化作用。沉积成分的成熟度则与沉积物的形成气候和构造背景有关,成分变化指数(ICV)可以用来确定沉积物的成分成熟度^[23]。ICV 值越高沉积成分的成熟度越低,代表源区构造强烈;ICV 值越低沉积成分的成熟度越高,反映构造相对稳定。姚家组和四方台组砂岩的 CIA 值为 41.08~68.96,平均值为 61.77,说明物源区岩石遭受中等风化作用。ICV 值为 0.54~2.30,平均值为

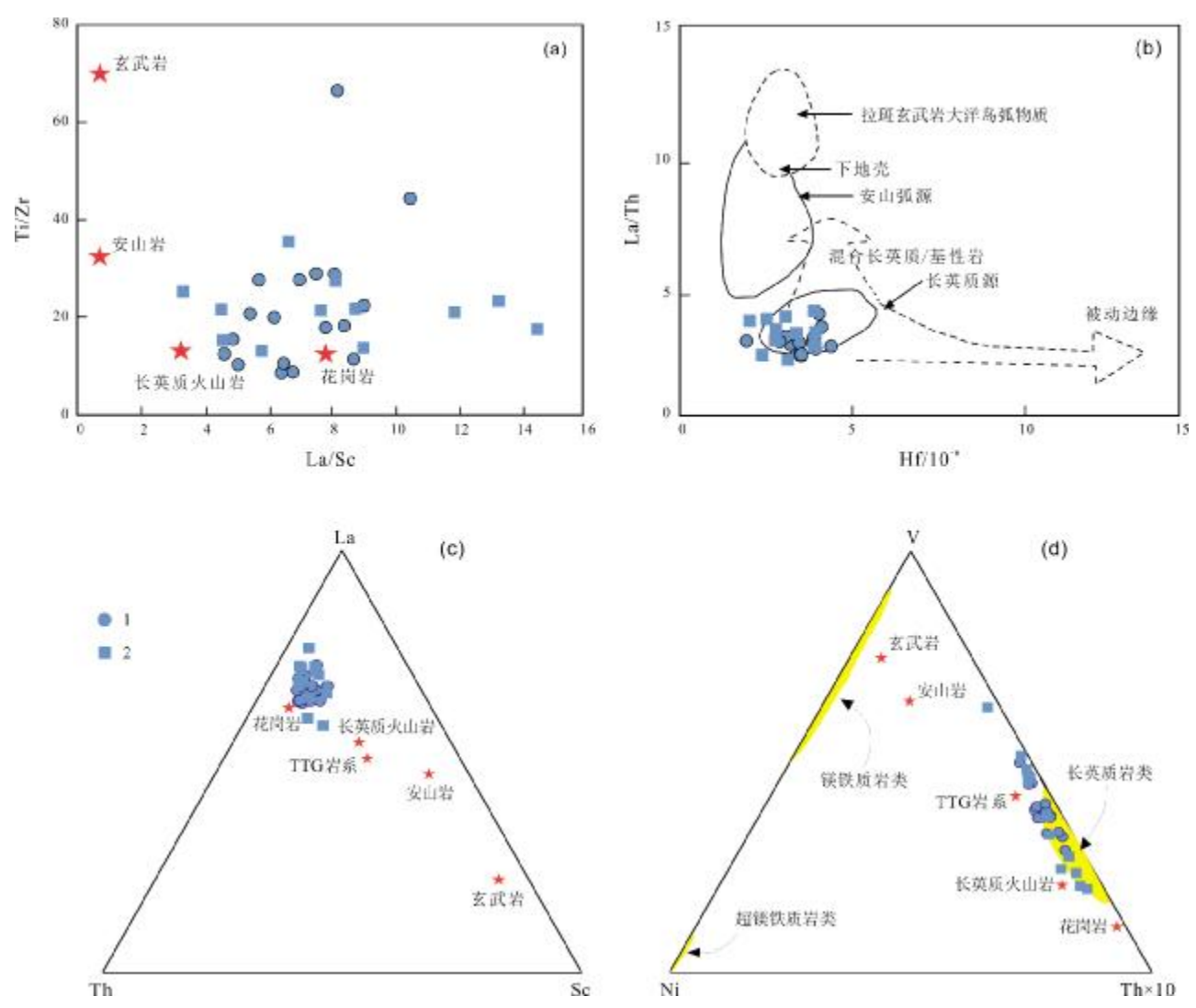


图9 松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组砂岩微量元素源岩属性判别图解
(据文献[19-20])

Fig. 9 Source rock discrimination diagrams of trace elements in sandstones from Yaojia and Sifangtai formations
(After Reference [19-20])

1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

0.84, 相对较高, 暗示源区岩石成熟度较低, 构造相对强烈 (图 12a). 姚家组和四方台组砂岩 ICV-CIA 图解 (图 12b) 显示其母岩大多数样品落在新鲜花岗岩的风化趋势线附近, 暗示其母岩主要为花岗质岩石.

砂岩的母岩及沉积物受气候影响也较为明显, 在原始物质的形成阶段, 气候变化和降水量的多少可以控制风化作用性质、风化速率和植物分布, 进而控制岩石物质的数量和类型. 在寒冷干旱条件下, 化学风化速率较慢, 可以保留一些不稳定成分; 在炎热多雨的条件下, 物理和化学风化作用较为强烈, 母岩解体较快, 不

稳定成分得不到保留^[9]. 可以用硅铝率($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, 简称 SA) 表征沉积岩的硅铝富集特征, SA 亦可以反映母岩遭受化学淋滤溶解程度和碎屑的搬运程度^[9-10]. 当 $\text{SA} < 4$ 时, SiO_2 含量较少, 表明砂岩搬运迁移明显, 反映潮湿气候; 当 $\text{SA} \geq 4$ 时, SiO_2 含量较多, 搬运不明显, 气候条件以干旱—半干旱为主, 岩石化学风化作用较为微弱, 以物理风化作用为主. 砂岩样品的 SA 值为 3.29~9.73, 平均为 6.49 (表 1, 扫描首页 OSID 二维码可见), 表明姚家组和四方台组沉积期气候干燥, 母岩以物理风化为主, 化学风化作用微弱.

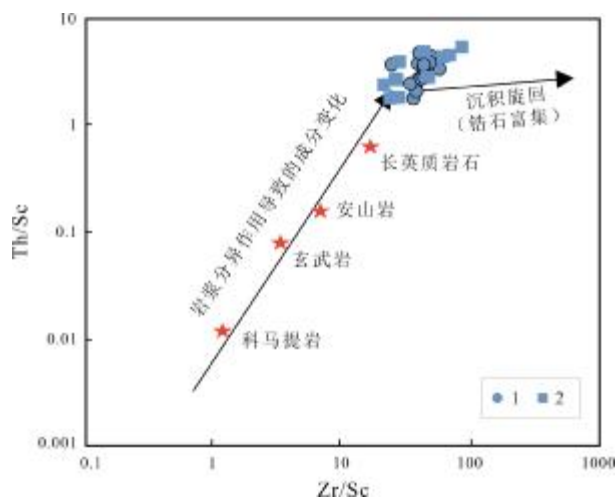


图 10 松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组砂岩
Th/Sc-Zr/Sc 图解

(据文献[21])

Fig. 10 The Th/Sc-Zr/Sc diagram of sandstones from
Yaojia and Sifangtai formations

(After Reference [21])

1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

此外,古气候条件对砂岩成分的成熟度影响较大,从而造成砂岩的地球化学特征和矿物组成成分出现明显的差异性^[23].多晶石英(Qp)、长石(F)、岩屑(L)对古气候极其敏感,可以成功地区分干旱、半干旱、半潮湿和潮湿气候条件.在古气候判别图解中,几乎所有砂岩样品全部落入半干旱气候范围内(图 13).砂岩样品中

随着 SiO_2 含量的逐渐增加,砂岩的化学成熟度也逐渐增高.因此,初步推测姚家组和四方台组砂岩物源区应该形成于半干旱的气候条件下.

4.4 砂岩沉积环境

砂岩的沉积环境可以用微量元素的比值 $V/(V+Ni)$ 、 Sr/Ba 来反映,当 $V/(V+Ni) \geq 0.46$ 时为还原环境, $V/(V+Ni) < 0.46$ 时为氧化环境.研究区含矿砂岩的 $V/(V+Ni)$ 为 0.75~0.97,远大于 0.46,说明其形成环境以还原环境为主.结合岩石学特征,表明水体分层中等,水体环境为富氧一次富氧环境,循环顺畅.

利用 Al_2O_3 亲陆性和 MgO 亲海性特征,采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 的比值来判别沉积水体的盐度.当 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO} < 1$ 时,为咸水环境;当 $1 \leq \text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO} < 10$ 时,为海陆过渡性沉积环境;当 $10 \leq \text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO} < 500$ 时,为淡水环境.大多数含矿砂岩样品 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 为 14.23~62.70,说明砂岩沉积时以淡水环境为主.

此外,亦可用 Sr/Ba 比值判别古盐度, $Sr/Ba < 1$ 为淡水环境, $Sr/Ba \geq 1$ 为咸水(海相、咸湖相)环境.几乎所有样品的 Sr/Ba 介于 0.26~0.91,说明含矿砂岩为淡水环境沉积产物.

5 结论

(1)姚家组和四方台组砂岩以长石岩屑砂岩和岩屑长石砂岩为主,岩屑类型较为复杂,以火山岩岩屑和

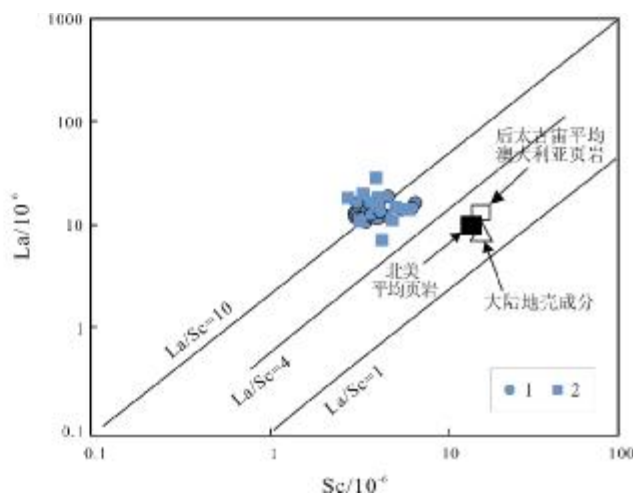
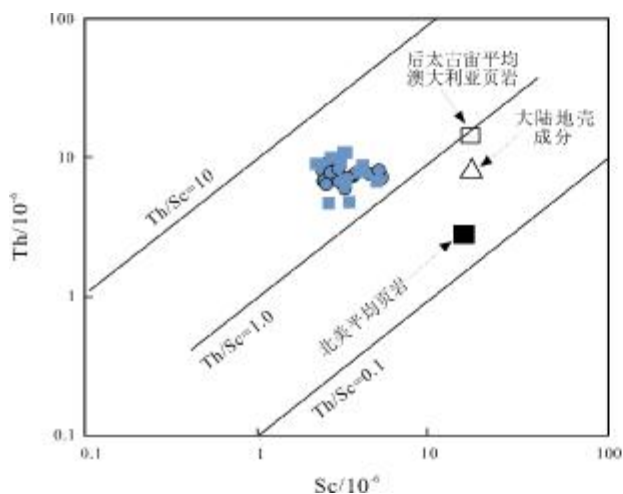


图 11 松辽盆地西部斜坡区姚家组、四方台组砂岩物源区特征判别图

(据文献[22])

Fig. 11 Discrimination diagrams for provenance characteristics of sandstones from Yaojia and Sifangtai formations

(After Reference [22])

1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

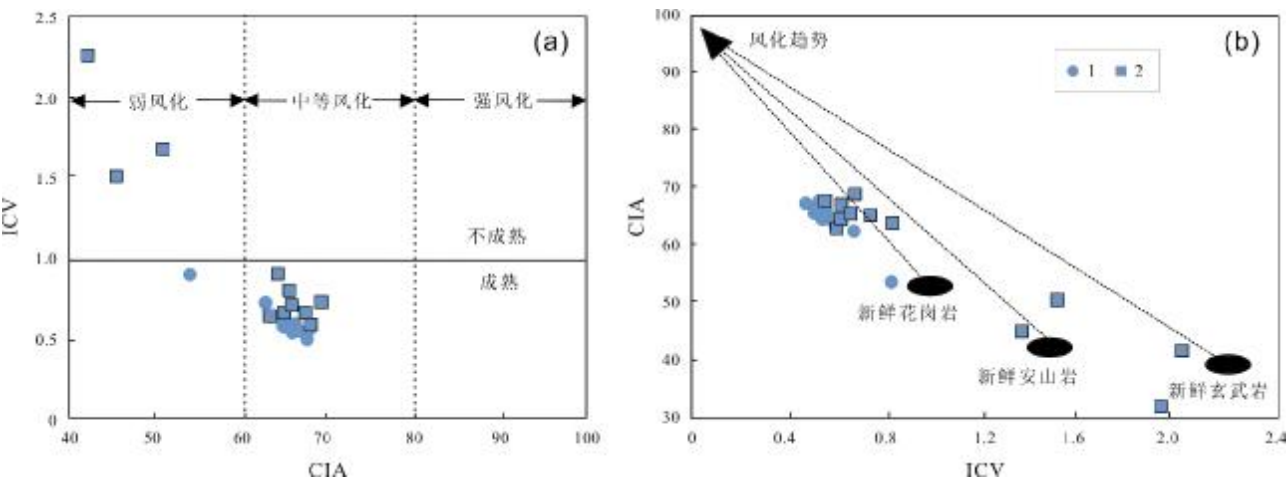


图 12 松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组砂岩 CIA-ICV 图解和 ICV-CIA 图解
(据文献[23])

Fig. 12 The CIA-ICV and ICV-CIA diagrams of sandstones from Yaojia and Sifangtai formations
(After Reference [23])

1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

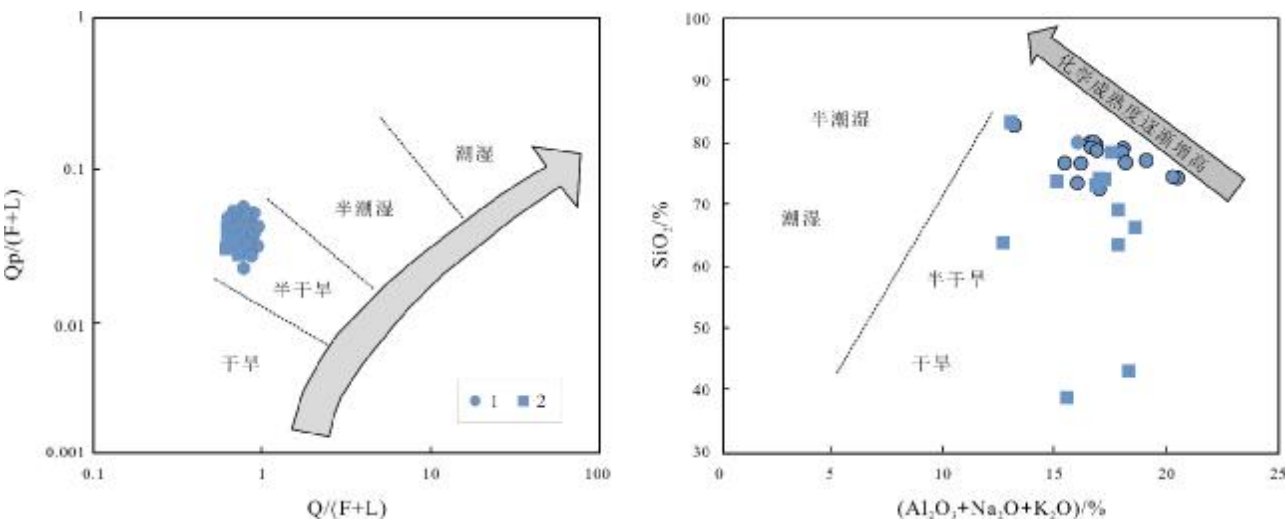


图 13 松辽盆地西部斜坡区姚家组和四方台组砂岩古气候判别图解
(据文献[23])

Fig. 13 The paleoclimate discrimination diagrams of sandstones from Yaojia and Sifangtai formations
(After Reference [23])

1—姚家组(Yaojia fm.); 2—四方台组(Sifangtai fm.)

花岗质岩屑为主,物源主要来自大陆物源区。

(2)姚家组和四方台组的砂岩 ICV 值介于 0.54~2.30 之间,平均值为 0.84, CIA 值介于 41.08~68.96 之间,平均值为 61.77,整体反映了干旱—半干旱气候背景下中等化学风化作用。所有砂岩样品稀土元素配分模式表明其具有一致的物质来源,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以长英质岩石为主,并且含少量古老沉积物质。

(3)主量元素、稀土元素和微量元素的构造背景判别图解综合表明姚家组、四方台组砂岩物源区为主动大陆边缘的构造环境,物源为大兴安岭地区发育的火山-沉积岩系。

参考文献(Reference):

- [1] 张金带. 中国铀资源的潜力与前景[J]. 中国核工业, 2008(2): 18-21.
Zhang J D. Potential and evaluation of uranium resources in China[J]. China Nuclear Industry, 2008(2): 18-21.
- [2] 陈祖伊, 陈戴生, 古抗衡, 等. 中国砂岩型铀矿容矿层位、矿化类型和矿化年龄的区域分布规律[J]. 铀矿地质, 2010, 26(6): 321-330.
Chen Z Y, Chen D S, Gu K H, et al. The regional distribution regularities of ore-hosting horizon, deposit type and mineralization age of China's sandstone-hosted uranium deposits[J]. Uranium Geology, 2010, 26(6): 321-330.
- [3] 聂逢君, 李满根, 严兆彬, 等. 内蒙古二连盆地砂岩型铀矿目的层赛汉组分段与铀矿化[J]. 地质通报, 2015, 34(10): 1952-1963.
Nie F J, Li M G, Yan Z B, et al. Segmentation of the target layer Saihan Formation and sandstone-type uranium mineralization in Erlian Basin[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(10): 1952-1963.
- [4] 汤超, 魏佳林, 肖鹏, 等. 松辽盆地北部砂岩型铀矿的赋存状态研究[J]. 矿产与地质, 2017, 31(6): 1009-1016.
Tang C, Wei J L, Xiao P, et al. Research on uranium occurrence state of sandstone-type uranium deposit in the northern Songliao Basin[J]. Mineral Resources and Geology, 2017, 31(6): 1009-1016.
- [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] 张天福, 孙立新, 张云, 等. 鄂尔多斯盆地北缘侏罗纪延安组、直罗组泥岩微量、稀土元素地球化学特征及其古沉积环境意义[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3454-3472.
Zhang T F, Sun L X, Zhang Y, et al. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan'an and Zhiluo Formations in the northern margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(12): 3454-3472.
- [7] 鲁超, 彭云彪, 刘鑫扬, 等. 二连盆地马尼特坳陷西部砂岩型铀矿成矿的沉积学背景[J]. 铀矿地质, 2013, 29(6): 336-343.
Lu C, Peng Y B, Liu X Y, et al. Sedimentary backgrounds of sandstone-type uranium deposits in western manite depression of Erlian Basin[J]. Uranium Geology, 2013, 29(6): 336-343.
- [8] 徐增连, 张博, 里宏亮, 等. 松辽盆地开鲁坳陷钱家店地区姚家组砂岩地球化学特征及物源和构造背景分析[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2019, 38(3): 572-586.
Xu Z L, Zhang B, Li H L, et al. Geochemistry of the Yaojia Formation sandstone in the Kailu depression, Songliao Basin: Implications for its provenance and tectonic setting[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2019, 38(3): 572-586.
- [9] 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.
- [10] 殷敬红, 张辉, 咎国军, 等. 内蒙古东部开鲁盆地钱家店凹陷铀矿成藏沉积因素分析[J]. 古地理学报, 2000, 2(4): 76-83.
Yin J H, Zhang H, Zan G J, et al. Sedimentation factors analysis of uranium mineralization of Qianjiadian depression, Kailu basin, East Inner Mongolia Autonomous Region[J]. Journal of Palaeogeography, 2000, 2(4): 76-83.
- [11] 侯晓光, 罗敏, 卢胜军, 等. 松辽盆地北部依安凹陷四方台组砂体特征及铀成矿潜力分析[J]. 地质与资源, 2021, 30(6): 675-682.
Hou X G, Luo M, Lu S J, et al. Characteristics of sand body and uranium metallogenetic potential in Sifangtai Formation of Yi'an sag, northern Songliao Basin[J]. Geology and Resources, 2021, 30(6): 675-682.
- [12] 刘晓辉, 罗敏. 松辽盆地泰康地区四方台组铀成矿条件分析[J]. 地质与资源, 2021, 30(1): 14-20.
Liu X H, Luo M. Analysis on the uranium metallogenetic conditions of Sifangtai Formation in Taikang area, Songliao Basin[J]. Geology and Resources, 2021, 30(1): 14-20.
- [13] 代问义, 李研, 赵忠华, 等. 松辽盆地东北缘白垩系砂岩型铀矿成矿条件与找矿方向[J]. 地质与资源, 2019, 28(6): 519-525.
Dai W Y, Li Y, Zhao Z H, et al. Minerogenetic conditions and prospecting direction of the Cretaceous sandstone uranium deposit in Northeast Songliao Basin[J]. Geology and Resources, 2019, 28(6): 519-525.
- [14] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and processes[J]. Geological Society Special Publication, 1989, 42(1): 313-345.
- [15] Roser B P, Korsch R J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data[J]. Chemical Geology, 1988, 67(1/2): 119-139, doi: 10.1016/0009-2541(88)90010-1.
- [16] Schieber J. A combined petrographical-geochemical provenance study of the Newland Formation, Mid-Proterozoic of Montana[J]. Geological Magazine, 1992, 129(2): 223-237.
- [17] Hayashi K I, Fujisawa H, Holland H D, et al. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1997, 61(19): 4115-4137.

- [15]刘志坚, 张琇, 董元华, 等. 宁夏卫宁平原土壤锌地球化学特征与富锌小麦种植区预测[J]. 中国地质, 2024, 51(4): 1319–1330, doi: 10.12029/gc20220705002.
- Liu Z J, Zhang X, Dong Y H, et al. Geochemical characteristics of zinc in soil and prediction of Zn-rich wheat cultivating areas in Weining Plain, Northwest China[J]. Geology in China, 2024, 51(4): 1319–1330, doi: 10.12029/gc20220705002.
- [16]张一鹤, 杨泽, 戴慧敏, 等. 穆棱河-兴凯湖平原土地质量地球化学评价[J]. 地质与资源, 2021, 30(1): 62–70, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.01.008.
- Zhang Y H, Yang Z, Dai H M, et al. Geochemical evaluation of land quality in Muling River-Xingkai Lake Plain[J]. Geology and Resources, 2021, 30(1): 62–70, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2021.01.008.
- [17]高文文, 刘景双, 王洋. 有机质对冻融黑土重金属 Zn 赋存形态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 147–151.
- Gao W W, Liu J S, Wang Y. Effect of organic matter on fractional transformation of Zn in black soils under freeze-thaw cycle [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(1): 147–151.
- [18]陆建衡. 汉源铅锌矿区土壤重金属分布特征及镉、锌迁移行为研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019: 36–69.
- Lu J H. A study on the spatial distribution of heavy metal elements and cadmium, zinc migration behavior in Hanyuan lead-zinc mining area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019: 36–69.
- [19]侯良刚, 袁玲, 李徐瑾. 云南姚安县老街子碱性杂岩体特征及稀土找矿前景[J]. 云南地质, 2020, 39(1), 20–25.
- Hou L G, Yuan L, Li X J. The feature and REE prospecting potentiality of Laojiezi alkaline complex body in Yaoan, Yunnan[J]. Yunnan Geology, 2020, 39(1): 20–25.
- [20]赵建, 师华定, 吴啸, 等. 遵义市土壤锌空间分布特征研究[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3): 298–303.
- Zhao J, Shi H D, Wu X, et al. Study on spatial distribution of zinc in soils in Zunyi City, China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(3): 298–303.
- [21]杨策, 杨文松, 陆瀛龙, 等. 楚雄州不同海拔高度植烟土壤养分特征分析[J]. 湖南农业科学, 2022(6): 34–39, doi: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2022.006.009.
- Yang C, Yang W S, Lu Y L, et al. Analysis of soil nutrient characteristics at different altitudes in Chuxiong [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2022 (6): 34 –39, doi: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2022.006.009.
- [22]左健扬, 方璐, 赵柳青, 等. 宁夏固原地区土壤地球化学特征和养分状况评价[J]. 地质与资源, 2022, 31(4): 523–529, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2022.04.009.
- Zuo J Y, Fang L, Zhao L Q, et al. Soil geochemistry and nutrient evaluation in Guyuan City of Ningxia[J]. Geology and Resources, 2022, 31(4): 523–529, doi: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2022.04.009.

(上接第 301 页/Continued from Page 301)

- [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]Bhatia M R, 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.
- [20]Cullers R L, Podkovyrov V N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda shales in southeastern Yakutia, Russia: Implications for mineralogical and provenance control, and recycling[J]. Precambrian Research, 2000, 104(1/2): 77–93.
- [21]McLennan S M, Hemming S, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[M]//Johnsson M J, Basu A. Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments. Boulder: Geological Society of America, 1993: 21–40.
- [22]McLennan S M, Taylor S R. Sedimentary rocks and crustal evolution: Tectonic setting and secular trends[J]. The Journal of Geology, 1991, 99(1): 1–21.
- [23]Cox R, Lowe D R, Cullers R L. The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(14): 2919–2940.