

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.264>



松辽盆地东南缘卡伦湖地区上白垩统泉头组 地球化学特征、碎屑锆石年龄与物源分析

李彤^{1,2}, 俞初安^{1,3*}, 王铁军², 殷栋法⁴, 司庆红¹, 朱强¹, 文思博¹, 涂家润¹

1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170
2. 中钢集团天津地质研究院有限公司, 天津 300181
3. 中国地质科学院, 北京 100037
4. 中国煤炭地质总局特种技术勘探中心, 北京 100041

摘要: 选取吉林长春卡伦湖地区的上白垩统泉头组砂岩, 通过 X 荧光光谱仪、ICP-MS 等离子体质谱仪以及锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年等方法进行岩石地球化学及碎屑锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨研究区物源以及区域沉积构造背景。结果显示, 研究区泉头组源区岩石的主要类型为具有大陆边缘构造背景的火成岩组合; 根据研究区主、微量元素和稀土元素特征以及样品锆石的 U-Pb 年龄, 松辽盆地张广才岭地区与研究区所采集样品的地化数据表现出相似性, 二者岩石都富集大离子亲石元素以及轻稀土元素, 亏损高场强元素和重稀土元素, 具有火山弧岩浆岩的地球化学特征等, 并且研究区泉头组的碎屑锆石 U-Pb 年龄分布峰值和比例与前人研究的张广才岭地区的花岗岩锆石 U-Pb 年龄分布具有极大相似性。结合研究区泉头组砂体展布、沉积体系以及东部隆起区水系展布特征及前人研究结果, 综合认为研究区物源来自张广才岭地区, 泉头组下段主要沉积作用为填平补齐, 充填粗碎屑岩和红色泥岩不整合于阜新组之上, 上段以超覆式沉积作用为主, 以河流相红色砂泥岩沉积逐渐向盆地中心过渡。对于重塑松辽盆地东南缘构造与物源演化过程、矿产资源分布以及松辽盆地东南缘泉头组砂岩储层评价做出重要贡献, 为盆地东南缘潜在铀矿层的预测以及铀矿区铀源的进一步评价等方面提供了重要借鉴。

关键词: 碎屑锆石 U-Pb 年龄; 泉头组; 吉林长春卡伦湖地区; 松辽盆地; 地质年代学; 地球化学。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2024)05-1759-19

收稿日期: 2021-12-22

Geochemical Characteristics, Detrital Zircon Age and Provenance Analysis of Upper Cretaceous Quantou Formation in Kalun Lake Area, Southeast Margin of Songliao Basin

Li Tong^{1,2}, Yu Reng'an^{1,3*}, Wang Tiejun², Yin Dongfa⁴, Si Qinghong¹, Zhu Qiang¹, Wen Sibol¹, Tu Jiarun¹

1. Tianjin Geological Survey Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China
2. Sinosteel Tianjin Geological Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300181, China
3. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (No. DD20190119); 国家重点研发计划“深地资源勘查开采”重点专项项目 (No. 2018YFC0604200)。

作者简介: 李彤 (1997—), 男, 硕士研究生, 矿物学、岩石学、矿相学专业, 从事铀矿勘查和地球化学研究。ORCID: 0000-0002-5696-9369。
E-mail: 790491299@qq.com

*** 通讯作者:** 俞初安, ORCID: 0000-0001-5377-6089. E-mail: 121181748@qq.com

引用格式: 李彤, 俞初安, 王铁军, 殷栋法, 司庆红, 朱强, 文思博, 涂家润, 2024. 松辽盆地东南缘卡伦湖地区上白垩统泉头组地球化学特征、碎屑锆石年龄与物源分析. 地球科学, 49(5): 1759-1777.

Citation: Li Tong, Yu Reng'an, Wang Tiejun, Yin Dongfa, Si Qinghong, Zhu Qiang, Wen Sibol, Tu Jiarun, 2024. Geochemical Characteristics, Detrital Zircon Age and Provenance Analysis of Upper Cretaceous Quantou Formation in Kalun Lake Area, Southeast Margin of Songliao Basin. *Earth Science*, 49(5): 1759-1777.

4. Special Technology Exploration Center of China General Administration of Coal Geology, Beijing 100041, China

Abstract: In this paper, the sandstone of Upper Cretaceous Quantou Formation in Kalun Lake area, Changchun, Jilin Province is selected to study the rock geochemistry and detrital zircon U-Pb chronology by means of X-fluorescence spectrometer, ICPMS plasma mass spectrometer and zircon La-ICP-MS U-Pb dating, so as to explore the provenance and regional sedimentary tectonic background of the study area. The results show that the main types of rocks in the source area of Quantou Formation in the study area are igneous rock assemblages with continental margin tectonic background; According to the characteristics of major elements, trace elements and rare earth elements in the study area and the U-Pb age of zircon samples, the geochemical data of samples collected in Zhangguangcailing area of Songliao basin and the study area show similarity. Both rocks are rich in large ion lithophile elements and light rare earth elements, and depleted in high field strength elements and heavy rare earth elements, showing the geochemical characteristics of volcanic arc magmatic rocks. The peak value and proportion of detrital zircon U-Pb age distribution of Quantou Formation in the study area are very similar to that of granite zircon U-Pb age distribution in zhangguangcailing area. Combined with the sand body distribution, sedimentary system and water system distribution characteristics of the eastern uplift area in the study area and the previous research results, it is comprehensively considered that the material source in the study area comes from Zhangguangcailing area. The main sedimentation of the lower section of Quantou Formation is leveling and filling, and the filled coarse clastic rock and red mudstone are not integrated on Fuxin Formation, and the upper section is dominated by overlapping sedimentation. The red sandstone and mudstone deposits of fluvial facies show gradual transition to the center of the basin. This paper makes an important contribution to reshaping the structure and provenance evolution process, mineral resource distribution and sandstone reservoir evaluation of Quantou Formation in the southeast edge of Songliao basin, and provides an important reference for the prediction of potential uranium deposits in the southeast edge of Songliao basin and the further evaluation of uranium sources in uranium mining areas.

Key words: detrital zircon U-Pb age; Quantou Formation; Kalun Lake area, Changchun, Jilin Province; Songliao basin; geochronology; geochemistry.

0 引言

松辽盆地是我国北方重要的煤、石油、铀等多矿种叠合赋存的能源盆地。在我国沉积型铀成矿构造域的东部,以松辽盆地南部钱家店铀矿田为代表,其含矿层位为上白垩统姚家组(焦养泉等,2015)。随着近年来北方砂岩型铀矿找矿的热度不断提升,天津地质调查中心利用煤田、油田资料“二次开发”找铀方法在松辽盆地北部大庆长垣南端上白垩统四方台组中发现了多处工业矿体(冯晓曦等,2019;徐增连等,2019);与此同时在盆地东南部卡伦湖地区的上白垩统泉头组也发现了1处工业矿体,取得了显著找矿成果,扩大了松辽盆地砂岩型铀矿找矿前景。

在研究方面,前人主要针对钱家店铀矿床开展了铀源、构造、沉积、成矿模式及控矿因素等多方面的研究(荣辉等,2016;夏菲等,2016;焦养泉等,2018,2021;曹民强等,2021)。而卡伦湖地区的泉头组作为松辽盆地砂岩型铀矿的新区新层系,是松辽盆地继姚家组、四方台组之后新发现的一套富铀地层,具备良好的赋矿条件,前人研究涉及较少。

含铀储层物源的研究能为盆山耦合关系及铀矿物质来源提供一定的制约,因此成为关注点和研究热点。余新民等(2007)、焦养泉等(2015)、徐增连等(2019)主要对松辽盆地西缘和西南缘的物源特征进行详细论述,而盆地东缘砂岩型铀矿赋矿层位的物源变化、区域沉积构造等问题尚缺乏相应研究,这在一定程度上制约了松辽盆地东缘泉头组物源变化的整体评价。物源体系能够较为准确地记录地质构造运动的信息,对物源区特征的研究可以进一步推测区域内整体沉积构造背景,进而指导下一步的铀矿勘探工作。卡伦湖地区有充足的物源供给以及稳定的构造环境,为铀矿能够赋存在地层中提供了良好的条件。在松辽盆地东南部的构造演化背景下,泉头组地层多处于干旱-半干旱的古气候条件,其剥露地层中的砂体普遍发育后生氧化作用,局部形成了氧化带。当松辽盆地处于热沉降拗陷期时,沉积作用为层间氧化带砂岩型铀矿的形成提供良好条件(张振强等,2006)。

因此,本文基于采集样品的数据资料,在综合前人研究成果的基础上,通过地球化学、沉积学特征、碎屑锆石年龄对比等方法,共同探讨研究区的

物源变化,为重塑松辽盆地东南缘构造与物源演化过程提供线索,为盆地东南缘潜在铀储层预测以及铀源评价等方面提供重要借鉴。

1 地质背景及样品采集

松辽盆地位于华北板块和西伯利亚板块之间碰撞拼合的地带,经过古太平洋板块俯冲至陆壳等复杂的构造作用演化而来。西至嫩江断裂带,东至佳木斯-伊兰断裂,南至西拉木伦-吉东断裂,北部为大兴安岭-内蒙海西褶皱带。盆地内部主要充填中、新生代地层,依次为上侏罗统火石岭组,下白垩统沙河子组、营城组、登娄库组,上白垩统泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组、第三系和第四系(朱建伟等,2001)。松辽盆地经历登娄库末期构造反转使断陷层序上升受风化作用剥蚀,后至嫩江期末,强烈的构造反转使得整个断陷层序和拗陷层序发生改变直至明水期末成型等构造运动,由于几个时期的构造反转运动对油气成藏以及砂岩型铀矿的形成起到了重要作用。

吉林长春卡伦湖地区位于松辽盆地东南隆起区羊草沟盆地内部,随盆地一起经历伸展断陷、断

拗转换、反转剥蚀阶段(图1)。泉头组沉积环境相对稳定,沉积相发育完善,河湖沉积体系规模大,一段早期继承登娄库组晚期的特征,形成以粗碎屑为主的冲积扇和辫状河相沉积;二、三段广泛发育河湖相细碎屑沉积;四段以发育曲流河为特征。松辽盆地上白垩统整体泉头组在垂向上于不同阶段,构成了冲积扇、辫状河、曲流河、网状河、三角洲、浅湖湘的多韵律相结构序列(张振强等,2006)。研究区泉头组岩石及岩性特征见图2,其中砂岩类主要以浅白色、灰绿色中粗粒杂砂岩为主,矿物为石英、长石,含岩屑和其他细碎屑;泥岩类主以灰绿色泥页岩为主,主要矿物为高岭土、水云母、石英、长石,含细碎屑。本次主要挑选卡伦湖铀矿区 KLHZK2 和 KLHZK3 两个铀矿钻孔中 8 件新鲜、无污染砂岩样品进行主量、微量和稀土元素分析测试(图3),钻孔二者间距 3 km;4 件碎屑锆石 U-Pb 年龄样品分别取自两个钻孔泉头组三段粗粒砂岩,其中, KLHZK2-G1 和 KLHZK2-G2 样品深度 621 m,岩性为灰色含砾粗砂岩;KLHZK3-G1 和 KLHZK3-G2 样品深度 100 m,岩性为灰色夹棕红色粗砂岩,采集位置具体见图1。

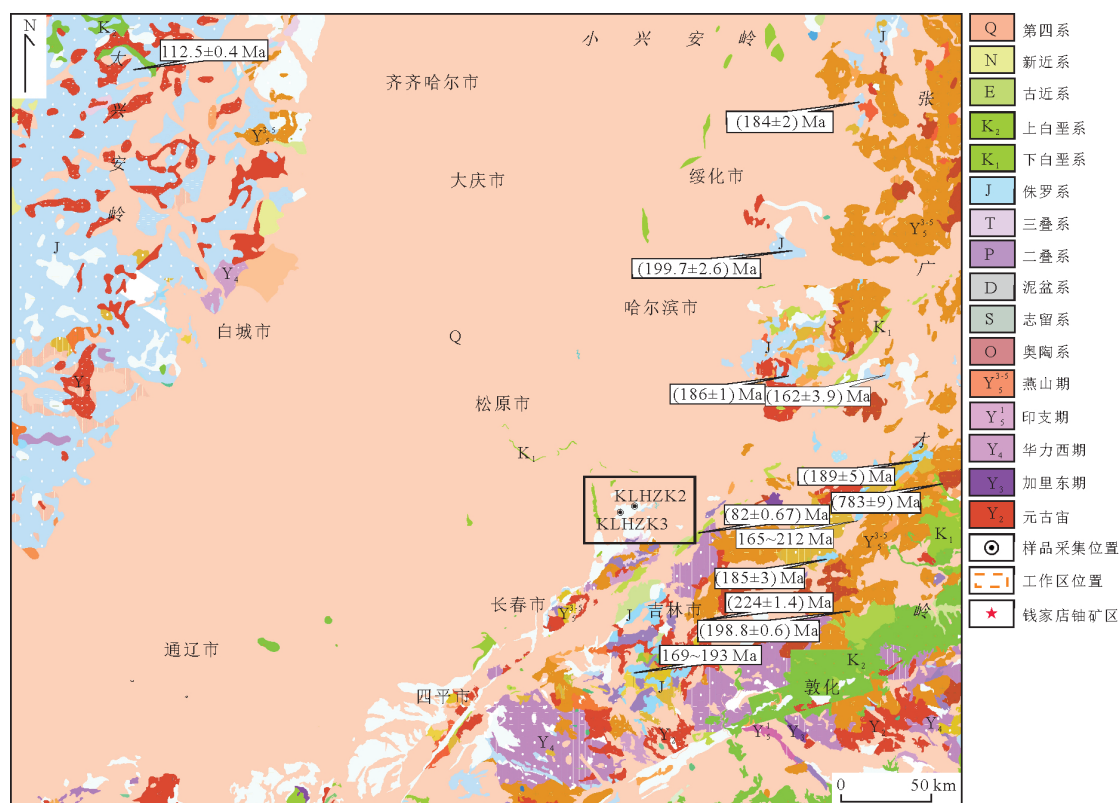


图1 松辽盆地东南部区域地质简图

Fig.1 Regional geological map of Southeast Songliao basin

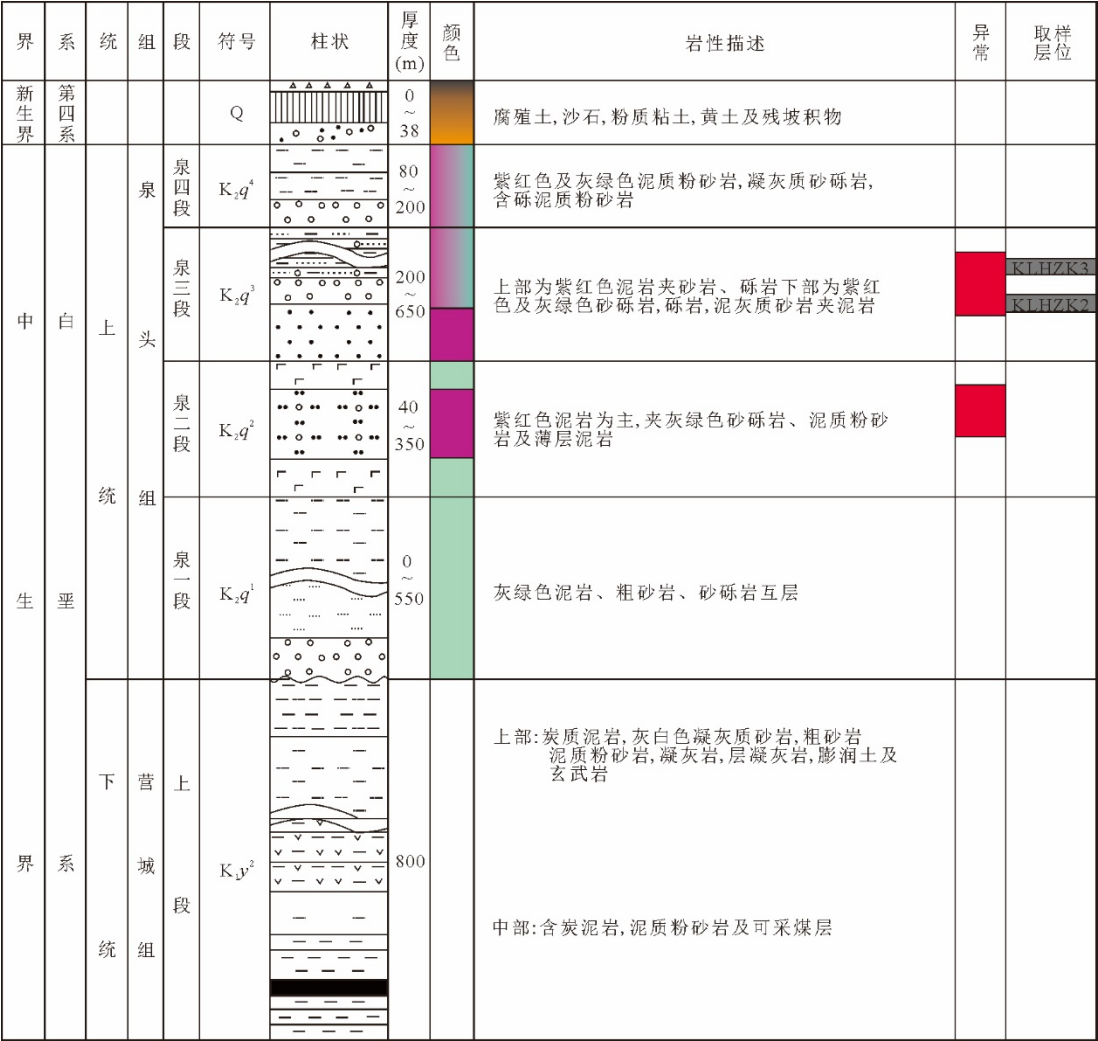


图 2 研究区地层综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic histogram of the study area

2 分析方法

本文样品主量元素分析在中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成,采用 XRF-1800 型 X 荧光光谱仪上进行主量元素分析,其精度优于 2%。微量、稀土元素分析在美国 X series II 型号 ICP-MS 等离子体质谱仪上进行,其分析精度优于 5%。

锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年样品挑选均在廊坊诚信地质服务有限公司实验室完成,用于定年的锆石颗粒均来自新鲜的岩石样品。通过对锆石的阴极发光图像和透反射光图像进行详细的观察,将岩石样品粉碎至 50 μm 后,经磁选和浮选出锆石精样,在双目镜下随机挑选出晶形、颗粒大小、磨蚀程度以及颜色不同的锆石颗粒,进而确保所选锆石具有代表性,保证实验的全面性和客观性。

在中国地质调查局天津地质调查中心实

验测试室进行阴极发光 (CL) 照相和锆石 U-Pb 同位素测试,根据锆石阴极发光 (CL) 图像,尽量选择包裹体较少且吸收程度均匀的区域进行分析测试,从而保证获得可靠的实验数据。锆石年龄谐和图、加权平均年龄和频率图均采用 ISO-PLOT 宏程序完成 (Ludwig, 2009)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

四组样品中挑选的锆石阴极发光 (CL) 图像 (图 4a、4c、4e、4g) 显示,所挑选出的锆石颗粒中等 (50~100 μm),主要为无色自形、半自形晶体,浑圆状少见,反映岩石具有近距离搬运的特征。少数具有核-边结构,边部具有明显的岩浆韵律环带和明暗相间的条带构造,显示岩浆锆石特点。KLHZK2.G1 样品

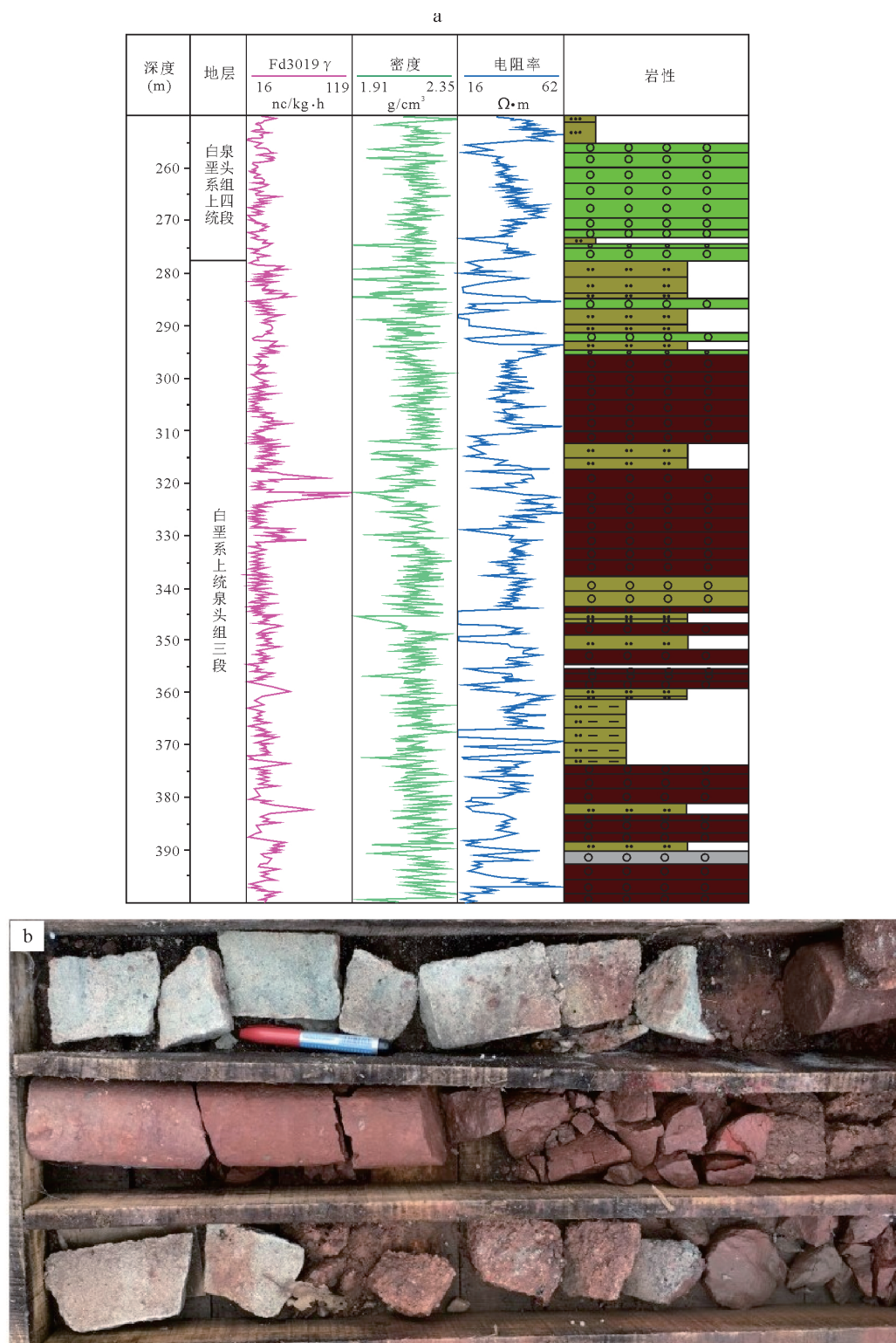


图3 研究区含矿目的层钻孔柱状图(a)及矿段岩心(b)

Fig.3 Borehole histogram (a) and ore section core of ore bearing target layer (b) in study area

Th/U 比值大部分介于 0.32~1.16, KLHZK2.G2 样品 Th/U 比值大部分介于 0.25~1.66, KLHZK3.G1 样品 Th/U 比值大部分介于 0.36~0.98, KLHZK3.G2 样品 Th/U 比值大部分介于 0.46~1.96,

所有样品大部分 Th/U 比值均大于 0.4, 指示四组所挑选的碎屑锆石多为岩浆成因的锆石。

样品 KLHZK2.G1、KLHZK2.G2 根据年龄谐和图(图 4b、4d)、年龄谱(图 5a、5b)所示, 样品测试结

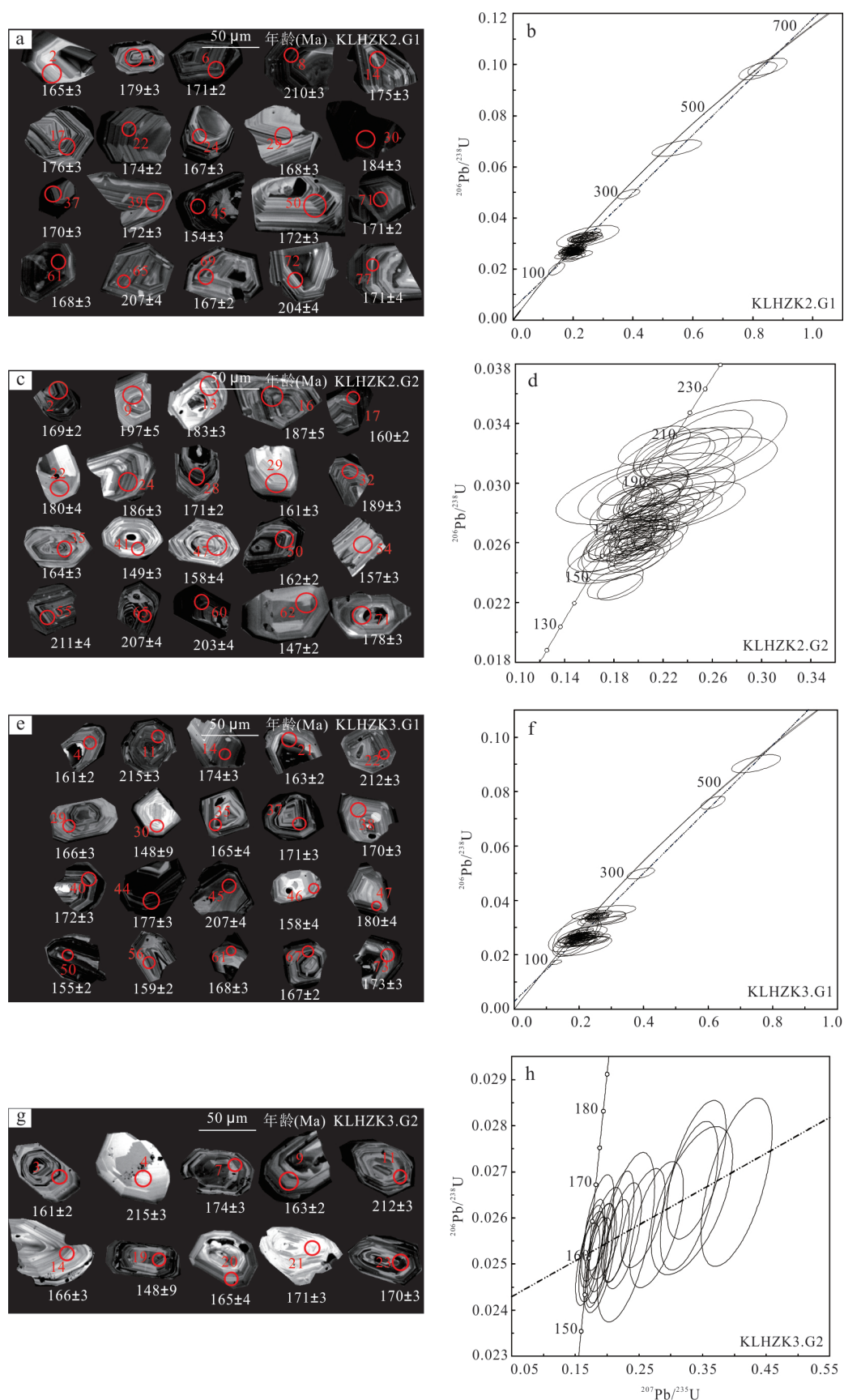


图4 卡伦湖地区泉头组砂岩碎屑锆石 CL 图像(a,c,e,g)和 LA-ICP MS U-Pb 年龄谐和图(b,d,f,h)

Fig.4 CL images of detrital zircon (a,c,e,g) and LA-ICP MS U-Pb age concordia map (b,d,f,h) of detrital zircon from Quantou Formation in Kalun Lake area

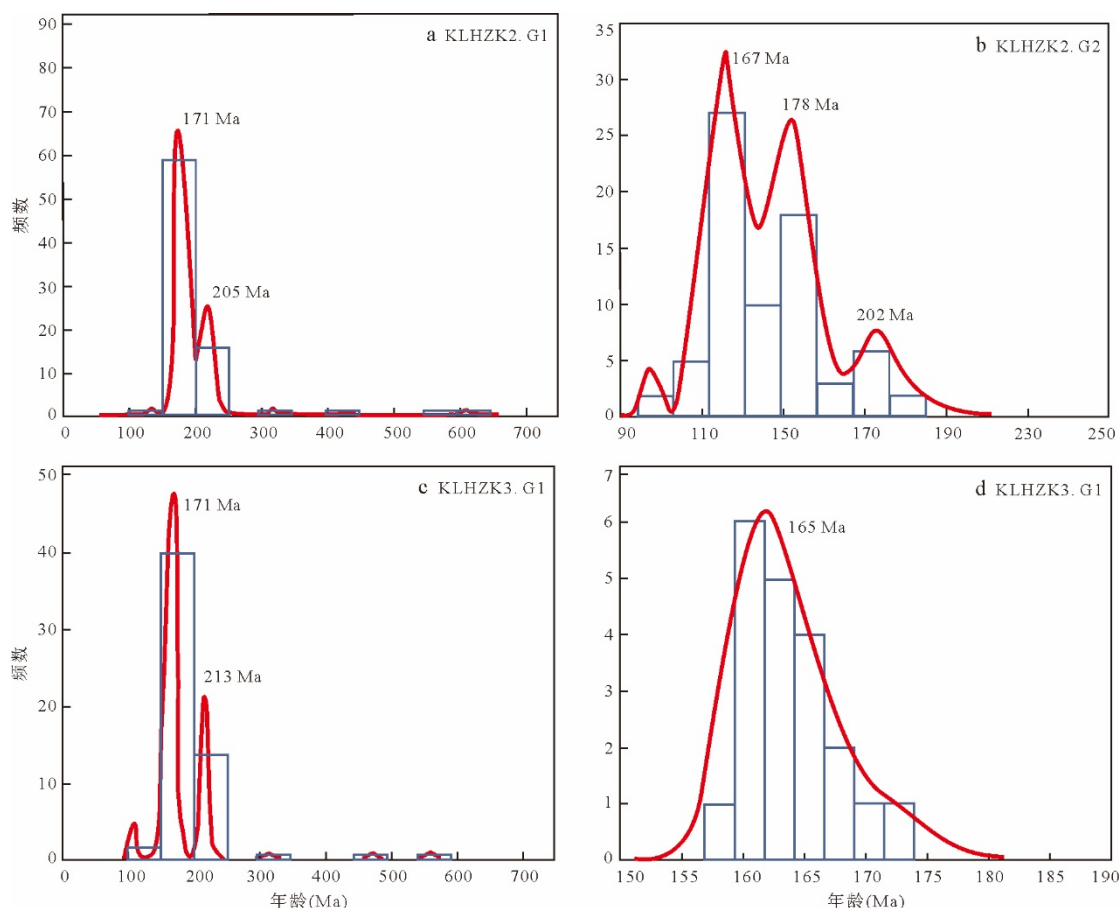


图5 卡伦湖地区泉头组砂岩碎屑锆石年龄谱(a,b,c,d)

Fig.5 Detrital zircon age spectrum of Quantou Formation sandstone in Kalun Lake area (a,b,c,d)

a.KLHZK2.G1 锆石年龄谱图;b. KLHZK2.G2 锆石年龄谱图;c. KLHZK3.G1 锆石年龄谱图;d. KLHZK3.G2 锆石年龄谱图

果良好,几乎所有的测点均位于U-Pb谐和线附近。KLHZK2.G1样品的碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄除了少数点为寒武纪、泥盆纪、石炭纪外,其余主要分布在170~155 Ma、其次在190~175 Ma以及再次在215~195 Ma,其加权平均值为 (180.5 ± 6.8) Ma。KLHZK2.G2样品的碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄主要集中分布在190~160 Ma,其次为215~195 Ma,其加权平均值为 (172.9 ± 2.5) Ma。

样品KLHZK3.G1根据年龄谐和图(图4f)、年龄谱(图5c)所示,样品测试结果良好,几乎所有的测点均位于U-Pb谐和线附近,其碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄除了几颗为寒武纪、泥盆纪、石炭纪外,主要集中分布在180~150 Ma、其次为220~200 Ma,其加权平均值为 (177.5 ± 7.5) Ma。

样品KLHZK3.G2根据年龄谐和图(图4h)以及年龄谱(图5d)所示,样品测试结果有部分锆石测点不在谐和线上,指示样品可能存在Pb丢失的情况,而形成不一致线,该组锆石样品

多为年轻锆石,故取其与谐和线下交点的年龄更接近其真实年龄,样品不一致线与谐和线的下交点年龄为 (160.7 ± 1.5) Ma,而部分处于谐和线上的锆石年龄主要分布在159~172 Ma。

3.2 全岩地球化学

3.2.1 主量元素 泉头组砂岩主量元素含量见表1,含量偏高的化学成分有: SiO_2 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 等, SiO_2 变化范围在71.50%~78.59%,平均值为75.37%, Al_2O_3 变化范围在10.42%~14.90%,平均值为12.40%,表明其主要矿物为石英、长石,含岩屑矿物较为发育; $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 为4.79~7.16,平均值为6.16, K_2O 含量总体比 Na_2O 高,说明钾长石或含钾矿物也较多,反映了该区泉头组岩石碎屑可能主要来源于富铕的花岗质岩石中。

根据主量元素哈克图解(图6)显示,样品中 SiO_2 含量与各主量元素含量之间有一定的相关性,表现出系统性的变化趋势,说明结晶分异作用在源岩演化过程中较为显著,并且元素间这种线性关

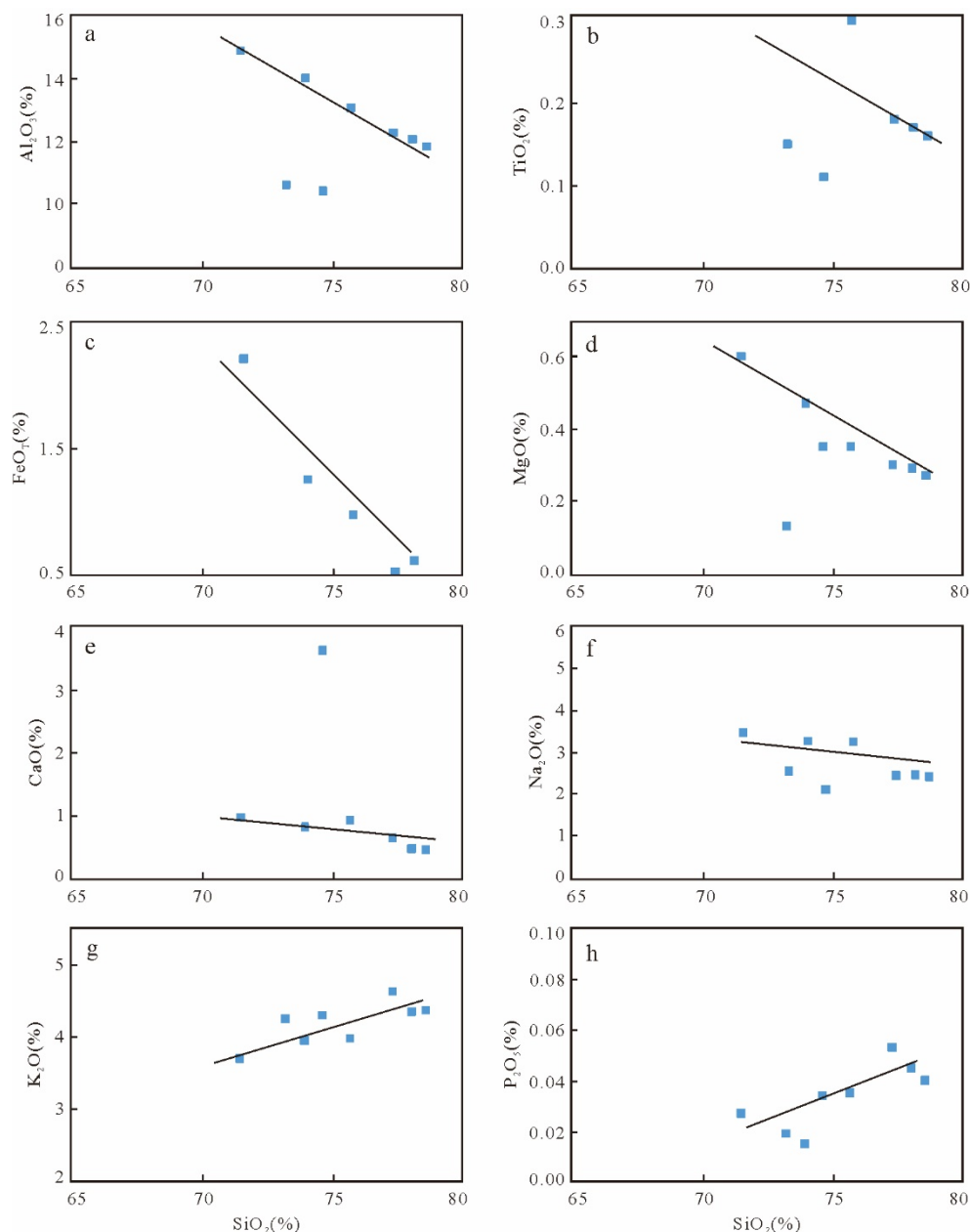
图6 研究区泉头组样品主量元素对 SiO_2 哈克图解

Fig. 6 Huck diagram of major elements of Cretaceous Quantou Formation samples in the study area

系,反映样品来自同一或相似的源区.其中与 FeO_T 、 MgO 、 Al_2O_3 和 TiO_2 呈现负相关性,反映镁铁质矿物、钛铁矿等富Ti矿物的结晶分离, K_2O 和 P_2O_5 呈现正相关性,说明岩浆演化过程中暗色矿物的分离结晶有重要作用,在此过程中岩石逐渐形成高钾钙碱性系列岩石, CaO 和 Na_2O 整体比较稳定.在 SiO_2 - K_2O 图解中(图7a),样品基本在高钾钙碱性系列分布区内. $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 的值为1.81~4.12,平均值为3.18,反映了砂岩中稳定组分和不稳定组分的相对含量,说明研究区稳定组分的相对含量

较高.综上说明样品可能存在火山岩同源演化的关系,同时这种部分熔融作用也可以从微量元素及其相关比值图解上得到进一步证实.

3.2.2 微量元素及稀土元素 在沉积碎屑岩中的微量元素稳定性较好,在沉积环境中能保持稳定,对判定沉积环境、源区性质及构造环境具有重要意义.研究区泉头组样品的 A/CNK 值主要变化于1.15~1.30(图7b),为弱过铝质花岗岩.碎屑岩石富集Rb、U大离子亲石元素,亏损Ba、Sr和高场强元素Nb、Ta等(图8a),岩石的微量元素含量表现出与

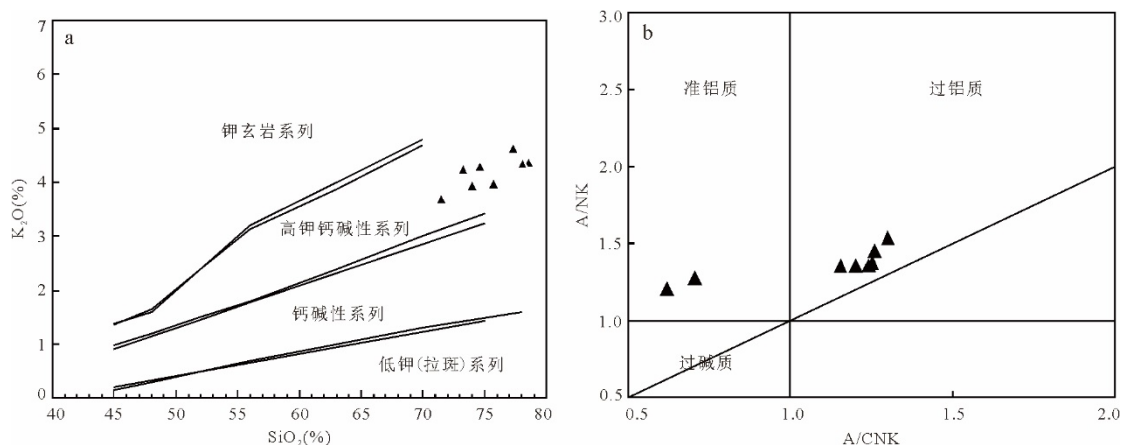
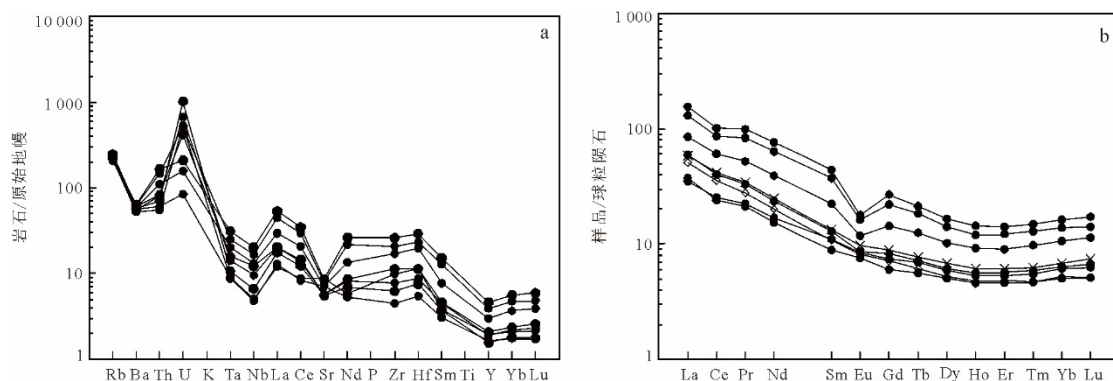
图7 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(a)和 A/CNK-A/NK 图解(b)Fig.7 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram (a) and A/CNK-A/NK diagram (b)

图8 原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和砂岩球粒陨石标准化稀土分配模式(b)

Fig.8 Normalized trace element spider diagram of primitive mantle (a) and normalized REE distribution pattern of sandstone chondrites (b)

上地壳基本相近的特点,具有中酸性岩浆岩的特征。

根据球粒陨石标准化图解(图8b),研究区稀土元素含量(ΣREE)为 $39.4 \times 10^{-6} \sim 168.6 \times 10^{-6}$,平均值为 83.2×10^{-6} ;轻稀土元素含量(ΣLREE)为 $34.5 \times 10^{-6} \sim 151.3 \times 10^{-6}$,平均值为 74.3×10^{-6} ;重稀土元素含量(ΣHREE)为 $4.8 \times 10^{-6} \sim 17.2 \times 10^{-6}$,平均值为 8.8×10^{-6} 。稀土元素分配模式为右倾斜型,LREE/HREE为 $6.19 \sim 9.19$, $(\text{La/Yb})_N$ 为 $5.7 \sim 9.7$,平均值为 8.4 ,说明轻稀土元素(LREE)富集,且轻重稀土分异比较明显。 δEu 为 $0.50 \sim 1.01$,平均值为 0.77 ,Eu具有明显的负异常,源岩主要来自于上地壳。

4 物源区岩石类型及构造背景

4.1 物源区岩石类型

卡伦湖地区泉头组碎屑岩石的CIA值为 $48 \sim 64$,表明研究区经历的风化强度低; Th/U

的比值会随着研究区域风化程度的增加而变大,而该区 Th/U 值为 $0.30 \sim 3.55$,平均值为 1.39 ,远低于上地壳 3.8 ,也反映了研究区受到低强度风化作用。因此,该岩石中的地球化学数据能够有效地反映物源母源类型和进行构造背景判断,碎屑岩中稀土元素的质量分数主要由物源区的岩石成分决定。通过微量元素分析,研究区碎屑岩石亏损Ba、Sr、Nb、Ta,富集Rb、U、La的特征,说明他们的物源主要来自于长英质岩石,源区物质分异程度较高,以花岗质岩类为主。

学者根据已知构造背景的不同碎屑岩组合的地球化学特征,进行了7个元素(Ti、Al、Fe、Mg、Ca、Na、K)氧化物的多变量判别方程分析,总结出四种混合物源模型(Roser and Korsch, 1986),可以有效判别镁铁质、中性或长英质火成岩和石英岩沉积岩等物源区。在F2-F1物源区的判别图上(图9a),泉头组砂岩样品主要落在长英质火成物源区,

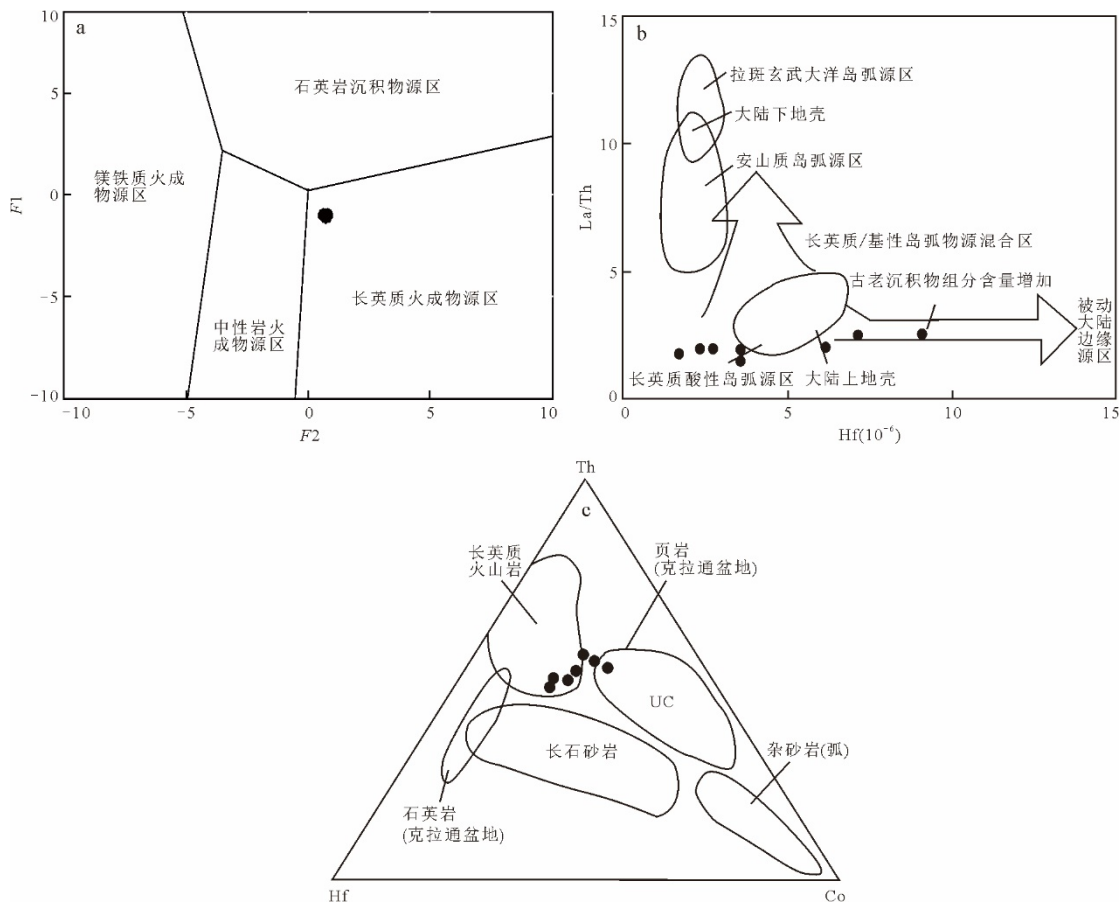


图9 研究区泉头组砂岩 F1-F2 源区环境判别(a)、La/Th-Hf 判别(b)和 Th-Hf-Co 判别(c)
Fig.9 Environmental discrimination map (a), La/Th-Hf discrimination map (b) and Th-Hf-Co discrimination map (c) of F1-F2 source area of Quantou Formation sandstone in the study area
a. 据 Roser and Korsch (1986); b. 据 Floyd *et al.* (1989); c. 据 Condie (1993)

这表明物源区属于成熟的大陆边缘弧或大陆转换边缘区域. 研究区泉头组砂岩的 K_2O 含量较高, K_2O/Na_2O 的平均值为 1.58, 接近被动大陆边缘砂岩, 反映大量成熟组分的加入. La/Th-Hf 判别图显示 (图 9b), 研究区样品处于长英质/基性物源混合源区, La/Th 比值低于 5, Hf 含量也较低, 加之研究区 Eu 存在着明显的负异常, 认为研究区沉积期物源主要为长英质物源, 有混源沉积现象存在. 根据 Th-Hf-Co 判别图显示 (图 9c), 研究区泉头组样品大部分落在长英质火山岩区, 极少量样品落在页岩 (克拉通盆地) 区, 表明物源类型以酸性岩石为主. 综合以上分析认为研究区泉头组沉积物源主要来自于上地壳长英质岩石, 有中酸性火山岩的特征, 具有多元性.

4.2 物源区构造背景

La、Th、Zr、Sc 等微量元素化学性质不活泼, 受到风化等地质作用影响小, 可以用来指示研究源区

的构造背景及其演化规律, 其中 Th/Sc 比值能区分大洋岛弧和大陆岛弧, Th/Zr 比值可以区分主动大陆边缘和被动大陆边缘. 根据研究区 La-Th-Sc、Th-Co-Zr/10、Th-Sc-Zr/10 图解 (图 10), 泉头组样品主要落在活动大陆边缘和被动大陆边缘区域, 个别样品点落入大陆岛弧区域, 表明泉头组砂岩源区具有大陆岛弧或大陆边缘的构造背景特征, 在形成被动大陆边缘环境时, 部分砂岩样品会包含较多的大陆岛弧的地球化学信息, 所以, 反映了晚白垩世泉头组沉积时源区的构造背景主要为大陆边缘构造背景. 稀土元素配分模式也可以客观反映沉积物源区性质, 故可作为物源区的一个重要示踪标志. 主动大陆边缘与被动大陆边缘在稀土元素地球化学数据上的区别在于, 主动大陆边缘沉积物的稀土元素表现为轻稀土元素相对亏损, 重稀土元素富集, 没有 Eu 异常; 被动大陆边缘沉积物稀土元素表现为轻稀土元素相对富集, 重

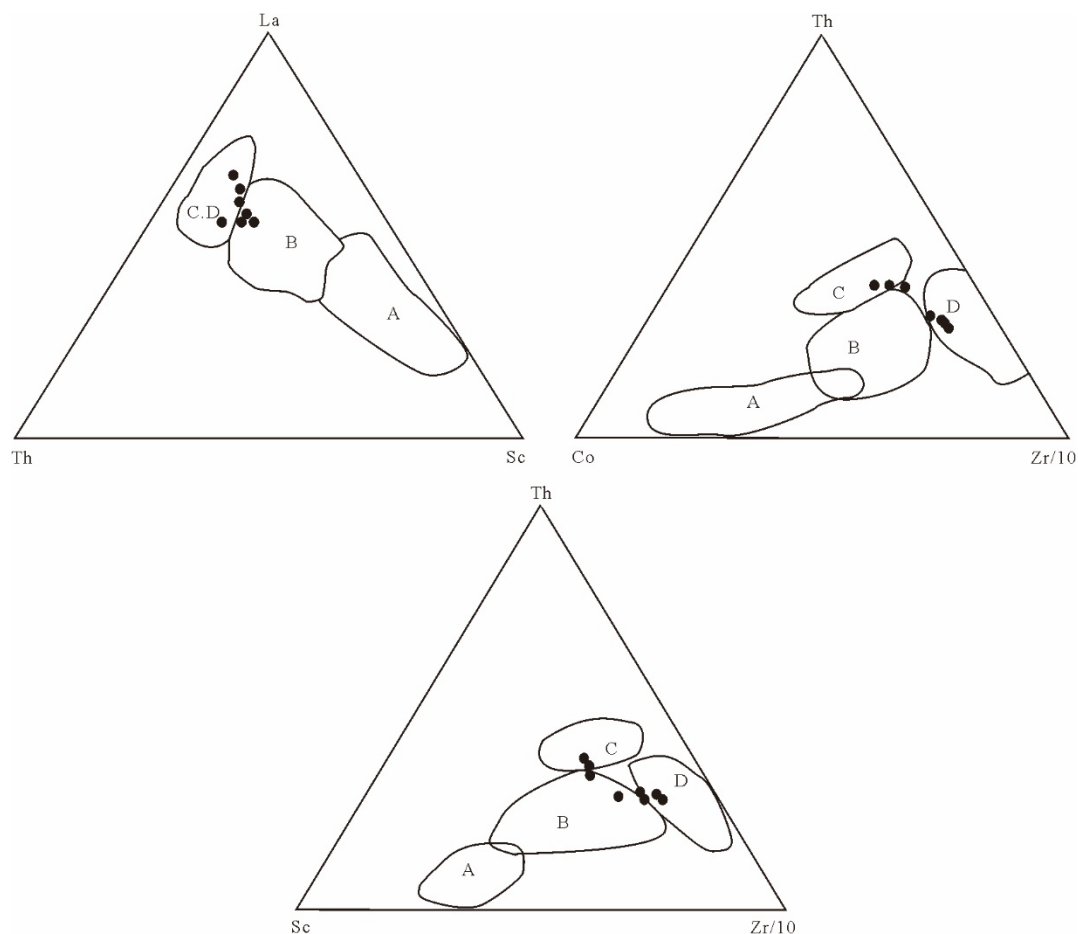


图10 研究区泉头组砂岩构造环境 La-Th-Sc, Th-Co-Zr/10, Th-Sc-Zr/10 判别图解

Fig.10 Discrimination diagrams of structural environment La-Th-Sc, Th-Co-Zr/10, Th-Sc-Zr/10 of Quantou Formation sandstone in the study area

A. 大洋岛弧; B. 大陆岛弧; C. 活动大陆边缘; D. 被动大陆边缘

稀土元素相对亏损,具有明显的Eu负异常.研究区泉头组碎屑岩石稀土元素总量分布在 $39.4 \times 10^{-6} \sim 168.6 \times 10^{-6}$ 、LREE/HREE 值较高,轻重稀土分异明显, δEu 值为 $0.50 \sim 1.01$,具有明显的负异常, δCe 值为 $0.79 \sim 0.90$,具有很弱的负异常.

综合以上岩石地球化学指标,表明研究区泉头组砂岩物源区主要为被动大陆边缘构造背景.

5 讨论

5.1 区域沉积学对物源的制约

通过研究目的层的沉积相和砂体空间展布,能从侧面反映沉积物的物源方向和沉积体系的展布特征,以此准确地指示物源的方向(俞初安等, 2020a, 2020b, 2020c).

松辽盆地经历反转构造运动而形成剥蚀天窗,其分布的范围广泛,主要分布于盆地东部,且

以盆地东南部最为强烈,东南隆起区剥蚀厚度最大者可达 $900 \sim 1\,200\text{ m}$,遭受剥蚀的层位主要是泉头组、青山口组和姚家组以上地层.卡伦湖地区泉头组沿盆地短轴发育的通榆水系和怀德、长春水系,在平面上形成了一个以调查区北部浅水湖泊为中心、环绕以冲积平原沉积的环带状相带,垂向上呈现出冲积扇、辫状河、曲流河和网状河的多韵律结构相序列,沉积特征可归纳为沉降速度快、粗粒物质迅速充填的特点.泉一段主要发育辫状河沉积和冲积扇沉积,冲积扇具有近物源沉积的特点.泉二、三段为从辫状河沉积过渡为曲流河沉积的过程,主要发育了冲积扇、辫状河和曲流河沉积体系,泉四段完成了河流过渡沉积过程,为完全的曲流河沉积相(图11).冲积扇-辫状河-曲流河这一演化过程反映了松辽盆地东南缘泉头组沉积时期较大的地势高差-陡坡-准平原化的古地理背景.

卡伦湖地区泉头组地层埋藏深度较浅,地层厚

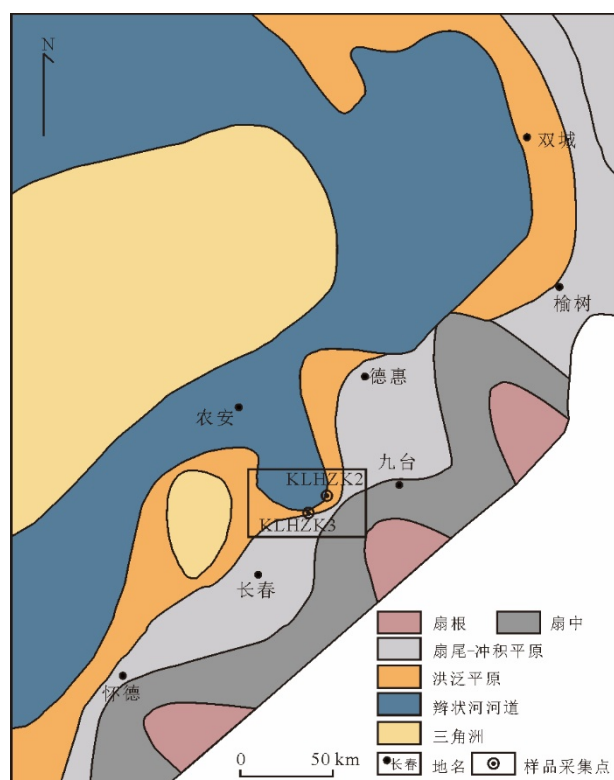


图 11 松辽盆地东南缘研究区上白垩统泉头组沉积相图 (修改自白晓晗, 2020)

Fig. 11 sedimentary facies diagram of Upper Cretaceous Quantou Formation in the study area on the south-east edge of Songliao basin (modified by Bai, 2020)

度较大,一般在 600 m 以上.单层砂体厚度为 20~50 m,砂体累计厚度大部分为 100~600 m (图 12).泉头组沉积期内,辫状河道砂体主要沿松辽盆地边缘分布于范家屯-长春及九台一带,岩性下部主要以灰绿色砾岩及中粗砂岩为主,上部主要以紫红色及灰绿色泥岩、粉砂岩为主.整体来看松辽盆地东南隆起区中南部砂岩厚度及砂地比大,且分布范围广,而西南部整体为次高值区,分布范围小.因此可以推测东南隆起区泉头组沉积时期物源较为充足,经过构造变动之后通过水系沉积作用进入研究区域内沉积,为研究区物源供给指明了大致的方向.

5.2 锆石 U-Pb 年龄对物源的限定

5.2.1 物源分析 前人研究指出,松辽盆地及周边主要发育海西期、燕山期花岗岩及晚侏罗世-白垩世中-酸性火山岩.通过对两期花岗岩构造环境研究对比,海西期花岗岩主要与板块俯冲构造有关,形成岛弧火山岩,而燕山期花岗岩主要与大陆边缘的断陷活动有关(张德全, 1993).海西期构造发育时期,起初主要受到南北向构造制约,晚印支期多形

成北东-北北东向、北西向构造.各断陷区内断陷走向也存在明显差异,研究区所处的东部断陷区内,断陷主要以北东向为主.说明研究区内物源岩石在构造时期随着松辽盆地构造运动形成,并且受到断裂方向的制约.据岩相古地理研究表明,东南隆起区的物源可能来自松辽盆地东侧的张广才岭造山带,元古代晚期松辽盆地东侧张广才岭运动开始,并伴有同构造期的中酸性花岗岩侵入,反映了研究区碎屑锆石外形特征及年龄分布、物源方向指示与张广才岭山地同期构造相符合的特点.

本文通过综合对比研究区地层的碎屑锆石年龄与盆地周缘及毗邻山体出露岩石的年龄,能够准确地为该区域物源提供证据.源区相同,碎屑锆石年龄的分布呈单峰式说明具有相似性,若源区不同且源区的岩体年龄有明显差别,在年龄谱上呈现两个或两个以上的峰值区间说明两区之间相似性差(闫义等, 2003).为了确定研究区泉头组砂岩沉积物源,本文搜集了研究区周边张广才岭、小兴安岭、大兴安岭等周边地质体测年数据(表 1),大致反映卡伦湖地区及邻区的物源时空分布特征(图 13).

数据显示,研究区碎屑锆石年龄主要集中在早-中侏罗世.大兴安岭地区主要发育四期花岗岩岩浆活动,最重要的一期岩浆活动在早白垩世,此期花岗岩在该地区分布最为广泛,并且该时期的锆石年龄分布拥有最高的峰值区间,主要的年龄分布在 145~110 Ma,峰值年龄为 115 Ma.早-中侏罗世花岗岩以大石寨和景阳岩体为代表.景阳岩体黑云母花岗闪长岩的锆石 U-Pb 年龄为 (174 ± 4) Ma,大石寨黑云母花岗岩的岩浆结晶锆石年龄为 (182 ± 3) Ma (葛文春等, 2005).反映了大兴安岭在晚侏罗世开始逐渐进入强烈的火山喷发阶段,从而形成大面积的火山岩,早白垩世时期主要处于隆升时期的特点.

小兴安岭主要有两期花岗岩发育,其中较老的一期在 290~260 Ma.较新的一期花岗岩年龄范围在 171~160 Ma (李仰春等, 2013).早-中侏罗世的花岗岩类型主要为黑云母二长花岗岩、正长花岗岩以及片麻状的黑云母正长花岗岩.在新开岭一带花岗岩中获得锆石年龄为 (164 ± 4) Ma 和 (167 ± 4) Ma 也具有一定代表性(苗来成等, 2003).同时,在小兴安岭-张广才岭地区还存在着早侏罗世 (182~186 Ma) 的基性侵入岩,它们与该区同时代的花岗岩构成典型的双峰式火成岩组合,反映了早-中侏罗世小兴安岭中部地区处于一种伸展的构造环境.

表 1 研究区周围地区锆石年龄数据统计

Table 1 Statistical table of zircon age data in the area around the study area

序号	样品号	年龄	分布地区	测试方法	参考文献
1	NZS-4	96~135 Ma	齐齐哈尔碾子山	LA-ICP-MS	秦锦华(2017)
2	NZS-7	102~131 Ma	齐齐哈尔碾子山	LA-ICP-MS	秦锦华(2017)
3	NZS-3	(112.54±0.44) Ma	齐齐哈尔碾子山	LA-ICP-MS	秦锦华(2017)
4	15YL38-1	(163±1) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> (2017)
5	3082TW	(166±2.2) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	任永健(2019)
6	DB07TW	(168.15±0.4) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	任永健(2019)
7	1074TW	(171±2)~(181±3) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	任永健(2019)
8	14GW327	(172±5) Ma	依兰团山子	LA-ICP-MS	董玉(2018)
9	014-1-TW02	(172.7±1.6) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	任永健(2019)
10	BCGE-01	(173±1.5) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	冯光英等(2019)
11	BCG-01	(173±2.0) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	冯光英等(2019)
12	14GW302	(177±11) Ma	依兰龙兰港	LA-ICP-MS	董玉(2018)
13	DA-N2-1-14	177~198 Ma	东安金矿区	LA-ICP-MS	李碧乐等(2016)
14	97SW009	(179±7) Ma	虎峰	TIMS	邵济安等(2013)
15	DP13TW17	(182.9±0.67) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	敖光(2016)
16	15YL14-1	(183±1) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> (2017)
17	15YL18-4	(183±1) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> (2017)
18	15YL12-4	(184±1) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> (2017)
19	15YL10-1	(186±1) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> (2017)
20	15YL28-1	(187±1) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> (2017)
21		188 Ma	大稗子沟	LA-ICP-MS	冯光英等(2019)
22	11HSZ3-4	(189±1) Ma	太安屯组	LA-ICP-MS	郝文丽等(2014)
23	15YL36-5	(191±1) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> (2017)
24	15YL40-1	(192±1) Ma	张广才岭	LA-ICP-MS	Zhu <i>et al.</i> (2017)
25	P16LT69B8	(197±1) Ma	小兴安岭东南段	LA-ICP-MS	韩振哲(2011)
26	P6LT3	(197±1) Ma	小兴安岭东南段	LA-ICP-MS	韩振哲(2011)
27	DP12TW9	(198.8±0.56) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	敖光(2016)
28	TW6252	(199.7±0.73) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	敖光(2016)
29	TW7265	(199.7±2.6) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	敖光(2016)
30	TW6098	(200.3±1.7) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	敖光(2016)
31	D2382	(200±1) Ma	小兴安岭东南段	LA-ICP-MS	韩振哲(2011)
32	LS	(201±3) Ma	亚布力冷山	LA-ICP-MS	邵济安等(2013)
33	TW3049	(201.6±1.7) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	敖光(2016)
34	STH	(202.2±3.4) Ma	亚布力石头河	LA-ICP-MS	邵济安等(2013)
35	H15-09	210~185 Ma	铁力市桃山镇	LA-ICP-MS	葛茂卉等(2020)
36	M23	(212.9±1.5) Ma	小九寨沟西	LA-ICP-MS	邵济安等(2013)
37	M13	(214.5±1.4) Ma	新兴林场西北	LA-ICP-MS	邵济安等(2013)
38	H22-6	214 Ma	张广才岭	Rb-Sr	邵济安等(2013)
39	16GW026	217~180 Ma	依兰依愚公路	LA-ICP-MS	董玉(2018)
40	M24	(220.4±1) Ma	小九寨沟西	LA-ICP-MS	邵济安等(2013)
41	16GW189	220~212 Ma	依兰演武基	LA-ICP-MS	董玉(2018)
42	H26-1	220 Ma	张广才岭	Rb-Sr	邵济安等(2013)
43	H42-1	220 Ma	张广才岭	Rb-Sr	邵济安等(2013)
44	16GW022	222~189 Ma	依兰龙兰港	LA-ICP-MS	董玉(2018)
45	014-1-TW01	223~252 Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	任永健(2019)
46	DP17TW11	(224.3±1.4) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	敖光(2016)
47	11HSZ2-1	(226±3) Ma	杨木岗组	LA-ICP-MS	郝文丽等(2014)

续表 1

序号	样品号	年龄	分布地区	测试方法	参考文献
48	DP16TW7	(229.8±0.75) Ma	张广才岭南部	LA-ICP-MS	敖光(2016)
49	11HSZ5-1	234~329 Ma	唐家电组上部	LA-ICP-MS	郝文丽等(2014)
50	M38	(244.7±1.2) Ma	红星林场南	LA-ICP-MS	邵济安等(2013)
51	15GW265	(266±2) Ma	桦南青背岩	LA-ICP-MS	董玉(2018)
52	18HL-07	271~248 Ma	依兰县德裕镇	LA-ICP-MS	葛茂卉等(2020)
53	14GW667	(274±2) Ma	依兰大理石厂	LA-ICP-MS	董玉(2018)
54	16GW032	277~218 Ma	依兰三道岗	LA-ICP-MS	董玉(2018)
55	15GW075	278~266 Ma	桦南孟家岗	LA-ICP-MS	董玉(2018)
56	16GW033	283~196 Ma	依兰团山子	LA-ICP-MS	董玉(2018)
57	16GW180	283~216 Ma	依兰高速路	LA-ICP-MS	董玉(2018)
58	16GW102	284~208 Ma	桦南宏泰村	LA-ICP-MS	董玉(2018)
59	11HSZ4-1	289~302 Ma	一面坡群	LA-ICP-MS	郝文丽等(2014)
60	16GW024	297~189 Ma	依兰龙兰港	LA-ICP-MS	董玉(2018)
61	15GW248	(300±3) Ma	桦南横头山	LA-ICP-MS	董玉(2018)
62	15GW261	(300±5) Ma	桦南青背岩	LA-ICP-MS	董玉(2018)
63	15GW235	(303±3) Ma	桦南驼腰子	LA-ICP-MS	董玉(2018)
64	18HYS-1	(392±3) Ma	张广才岭福兴电组	LA-ICP-MS	何雨思等(2019)
65	14HYS-1	(392±3) Ma	张广才岭福兴电组	LA-ICP-MS	何雨思等(2019)
66	11HNA13-1	(426±6) Ma	塔东地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
67	16PH20-1	(449±3) Ma	曙光和小金沟地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
68	16PH21-5	(453±2) Ma	塔东地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
69	16PH15-6	453~418 Ma	曙光和小金沟地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
70	15XH9-1	(461±5) Ma	曙光和小金沟地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
71	15XH32-1	(475±7) Ma	塔东地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
72	HDL2-2	(482±8) Ma	曙光和小金沟地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
73	11HSZ2-1	(485±12) Ma	杨木岗组	LA-ICP-MS	郝文丽等(2014)
74	15XH10-1	(495±7) Ma	曙光和小金沟地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
75	15XH30-1	(496±11) Ma	塔东地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
76	16PH21-1	(502±4) Ma	塔东地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
77	11HNA7-1	(516±4) Ma	塔东地区	LA-ICP-MS	王志伟(2017)
78	11HSZ2-1	(783±9) Ma	杨木岗组	LA-ICP-MS	郝文丽等(2014)

张广才岭区域内岩浆活动十分强烈,分布了大面积的花岗岩,其中早-中侏罗世 160~180 Ma 锆石年龄分布最为广泛,次要分布 190~222 Ma 花岗岩(敖光,2016),典型的花岗岩有黑云母石英闪长岩年龄为(176.2±1.8) Ma、黑云母花岗闪长岩年龄为(182.4±1.1) Ma、黑云母二长花岗岩年龄为(172.7±1.6) Ma、黑云英闪长岩年龄为(168.15±0.4) Ma、正长花岗岩年龄为(166±2.2) Ma等.主要记录了早侏罗世古太平洋板块俯冲,导致地幔上隆及岩浆上倾造成古老地壳和新生地壳部分熔融,晚期东侧佳木斯板块与张广才岭地块碰撞;中侏罗世早期东侧大洋板块的俯冲作用持续,晚期构造环境逐渐由挤压造山向造山后伸展环境转变的事件.

综合表明早-中侏罗世的花岗岩在大兴安

岭、小兴安岭、张广才岭均有分布,以小兴安岭和张广才岭分布最为广泛,且研究区的碎屑锆石多为破碎状,反映了近源搬运的特点.从区域上看,张广才岭地区更广泛分布了这一时期的花岗岩,主要岩石类型为花岗闪长岩.反映了佳木斯地块与小兴安岭-张广才岭地区在侏罗纪时期处于大陆边缘构造背景下,由于板块的俯冲作用,形成了大量花岗岩的事件.综合研究区锆石的年龄峰值特征以及前人研究盆地周缘的锆石数据特征,张广才岭与研究区的碎屑锆石年龄所显示的峰值区间更具相似性,研究区早-中侏罗世的碎屑锆石物源主要来自张广才岭地区.

5.2.2 锆石年龄所反映的地质事件 总体看来,松辽盆地东缘卡伦湖地区泉头组砂岩中的碎屑锆石

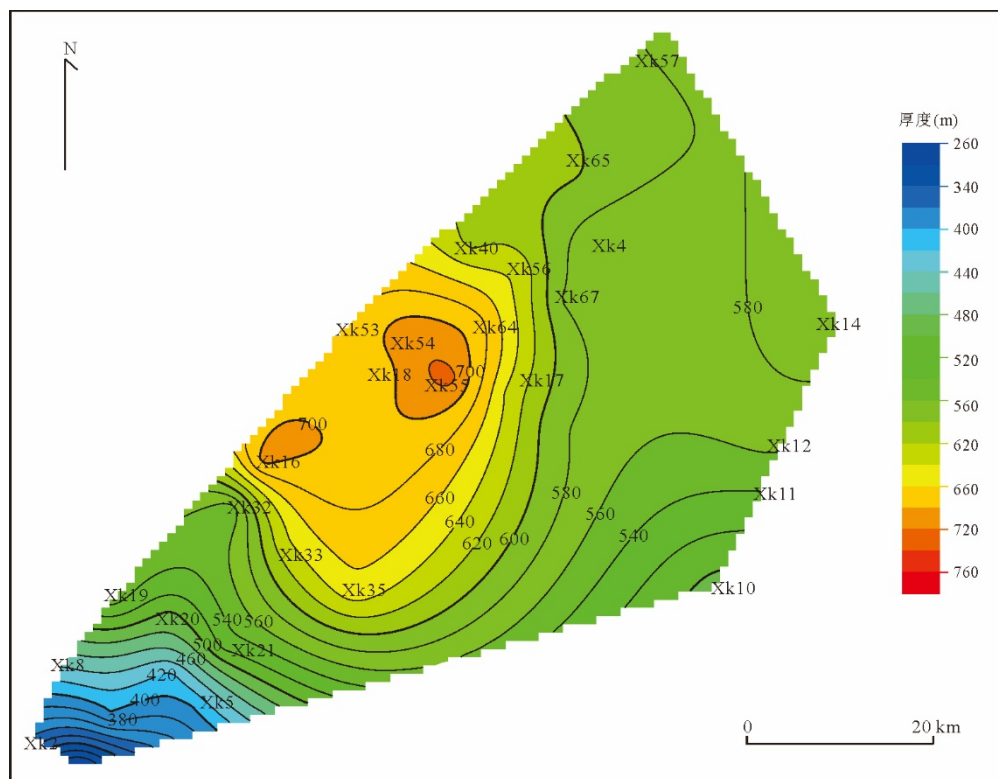


图 12 松辽盆地东南缘上白垩统泉头组泉四段砂体等厚图

Fig. 12 Isopach map of sand body in the fourth member of Quantou Formation of Upper Cretaceous in the southeast edge of Songliao basin

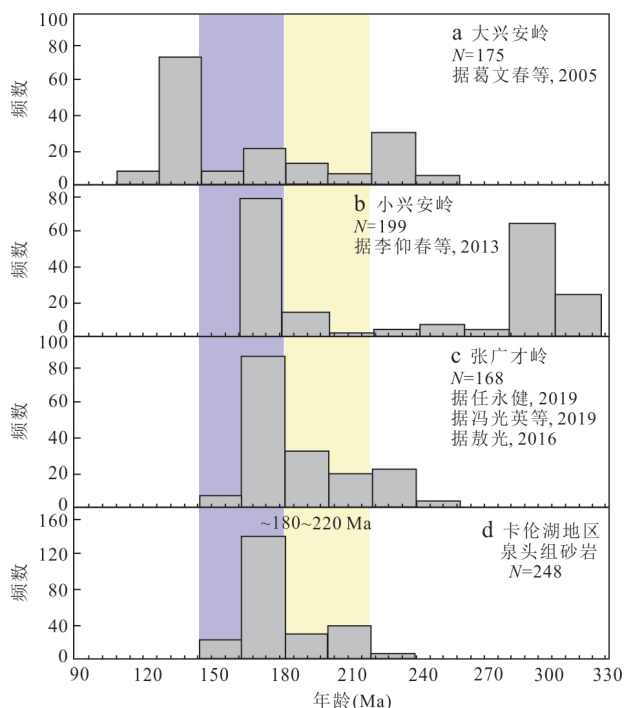


图 13 卡伦湖地区泉头组砂岩锆石 U-Pb 年龄谱与邻区锆石年龄谱对比

Fig. 13 Zircon U-Pb age spectrum of sandstone of Quantou Formation in Kalun Lake area and its adjacent area

年龄谱清晰且一致.通过对比研究区泉头组砂岩中锆石年龄与周缘地体锆石年龄区间特征的相似度,结合佳木斯板块、松嫩地块、张广才岭地块岩浆活动、板块碰撞和造山等构造运动地质事件时间,认为松辽盆地东南缘卡伦湖地区上白垩统泉头组的沉积物,主要来源于张广才岭板块早-中侏罗世(150~220 Ma)岩浆活动,后经晚白垩世张广才岭地质隆升作用发生剥蚀后近源搬运而形成.

研究区泉头组源岩主要以中钾、高钾钙碱性的中酸性岩为主,其A/CNK值总体小于1.3,为准铝质或弱过铝质花岗岩,并且具有火山岩同源演化的特征.这些花岗岩都明显富集大离子亲石元素和轻稀土元素,亏损高场强元素和重稀土元素,具有火山弧岩浆岩的地球化学特征,与物源区微量元素与稀土元素亏损、富集的元素类型相似,母岩类型主要为花岗岩及少量变质岩.稀土元素配分模式与张广才岭花岗岩基本相似,有同样的亲缘关系.如前所述,花岗岩岩石地球化学特征反映的是岩浆源区性质和岩浆演化的综合结果,同时也应结合大地构造演化事件共同制约.

东北地区广泛发育着晚古生代-早中生代岩浆

构造,这一时代的岩浆作用是该区域内重要的地质事件之一.佳木斯地块西侧的松嫩-张广才岭地块发育的岩浆岩主要就是这一时期的产物,仅有少量岩浆岩形成于新元古代和早古生代.在此背景下,张广才岭地块在早侏罗世早期,古太平洋板块俯冲形成了弧后盆地,使岩石圈变厚,软流圈物质上涌,岩石圈地幔发生了部分熔融形成花岗质岩浆.这一构造展布特征也反映了早侏罗世,古太平洋板块向欧亚大陆的俯冲运动,同时伴随构造运动形成了大陆边缘环境和弧后伸展环境.早侏罗世晚期,佳木斯地块与张广才岭地块相互碰撞形成黑云母二长花岗岩等.中侏罗世早期,俯冲运动逐渐减弱,此时幔源岩浆活动依然存在,该区域处于弧后伸展拉张的阶段,同期也形成了大量的花岗质岩石.中侏罗世晚期,为变质以及变形阶段,张广才岭由挤压造山环境向造山后伸展环境转变.

进入晚白垩世早期,古太平洋板块的俯冲运动以及上地幔热对流运动的逐渐减弱,上地幔岩石圈逐渐冷却,相应的断裂活动也减弱,产生了热收缩现象,受到重力作用以及冷却所导致的沉降作用,岩石圈地壳不均一下沉,松辽盆地整体演化转入坳陷期.张广才岭在晚白垩世遭受了强烈的构造挤压导致山地不断抬升并遭受剥蚀,使研究区泉头组获取到物源区物源.晚白垩世,研究区泉一段、泉二段开始沉积,主要以填平补齐为主,充填粗碎屑岩和红色泥岩等的沉积,并广泛分布,直接不整合于阜新组之上.泉三段、泉四段以规模更为广泛的超覆式沉积作用为主,主要是河流相红色砂泥岩沉积,随后不断向盆地中心逐渐过渡.这与本文通过沉积体系变化、地球化学特征分析和碎屑锆石年龄限定所体现的构造特征是相吻合的,即物源区张广才岭板块经历板块俯冲、陆陆碰撞以及造山运动等,为研究区泉头组提供了充足的物源补给.根据区域地质调查显示,松辽盆地在大兴安岭发育英台、白城水系,古铁法丘陵发育通榆、保康水系,张广才岭发育怀德、长春水系,由此形成南部主要的三大物源区(徐增连等, 2019).由此,研究区泉头组物源被剥蚀后通过水系将沉积物搬运至泉头组地层内.这一认识为在松辽盆地东南缘寻找砂岩型铀矿开辟了新的层系,对进一步铀矿找矿勘查具有重要意义.

值得注意的是,样品 KLHZK3-G1 的两个峰值年龄为 165 Ma 和 215 Ma,而样品 KLHZK2-G1 的两个峰值年龄为 171 Ma 和 196 Ma,即研究区泉头

组三段下部比上部的年轻碎屑锆石数量相对偏多,说明钻孔中泉头组三段的物源组分随着松辽盆地东南部张广才岭的持续隆升和剥蚀发生一定的变化,中生代侵入岩体提供物源的占比逐渐增大.

6 结论

(1) 松辽盆地东南缘卡伦湖地区上白垩统泉头组所采四组样品碎屑锆石的 LA-ICP-MS 锆石同位素定年结果显示,碎屑锆石年龄范围主要集中在 158~180 Ma,指示研究区的锆石年龄主要分布于早-中侏罗世之间,与研究区周边地质体测年数据对比后,张广才岭地区在锆石年龄特征上与研究区锆石数据更吻合.

(2) 研究区泉头组砂岩主、微量元素分配模式差异明显,轻重稀土分异明显, Eu 具有明显的负异常, Ce 具有弱异常的特征.受后期风化作用影响较小,岩石遭受低程度化学风化,具有上地壳大陆边缘中酸性岩浆岩的特征,为准铝质或弱过铝质花岗岩,并且具有火山岩同源演化的特征,主要以长英质岩石源区为主,具有近源搬运的特点.稀土元素配分模式与张广才岭花岗岩基本相似,有同样的亲缘关系.

(3) 张广才岭地块在早侏罗世早期,古太平洋板块俯冲形成了弧后盆地,使岩石圈变厚,软流圈物质上涌,岩石圈地幔发生了部分熔融形成花岗质岩浆.早侏罗世晚期,佳木斯地块与张广才岭地块相互碰撞.中侏罗世早期,俯冲运动逐渐减弱,区域内处于弧后伸展拉张的阶段,同期形成花岗质岩石.中侏罗世晚期,为变质以及变形阶段,由挤压造山环境向造山后伸展环境转变.

(4) 卡伦湖地区泉头组的沉积物,主要来源于张广才岭板块.早-中侏罗世(150~220 Ma)张广才岭经历板块俯冲、陆陆碰撞以及造山运动,后经晚白垩世张广才岭地质隆升作用发生剥蚀,为研究区泉头组提供了充足的物源补给,又经水系将沉积物搬运至泉头组地层内.晚白垩世,泉头组下段主要沉积作用为填平补齐,充填粗碎屑岩和红色泥岩不整合于阜新组之上,上段以超覆式沉积作用为主,以河流相红色砂泥岩沉积逐渐向盆地中心过渡,最终形成完整的泉头组地层.

References

Ao, G., 2016. Zircon U-Pb La-ICP-Ma Age of the Intru-

- sive Rock in Southern Zhangguangcailing Area. *Geology and Resources*, 25(6): 533—538 (in Chinese with English abstract).
- Bai, X.H., 2020. Study on Sedimentary System of Quantou Formation Yaojia Formation in Southeast Uplift of Songliao Basin (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Cao, M.Q., Rong, H., Chen, Z.Y., et al., 2021. Quantitative Characterization and Controlling Factors of the Inter-layer Oxidation Zone of Qianjiadian Uranium Deposit, Songliao Basin. *Earth Science*, 46(10): 3453—3466 (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)
- Dong, Y., 2018. Combination History of Jiamusi Block and Songnenzhangguangcailing Block: Chronological and Geochemical Evidence (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Feng, G.Y., Niu, X.L., Liu, F., et al., 2019. Petrogenesis of Late Early Jurassic Granodiorites and Associated Dioritic Enclaves in the Zhangguangcai Range and Its Tectonic Implications. *Acta Geologica Sinica*, 93(10): 2598—2616 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X.X., Teng, X.M., He, Y.Y., 2019. Preliminary Discussions on the Metallogenesis of the Dongsheng Uranium Orefields in the Ordos Basin. *Geological Survey and Research*, 42(2): 96—103, 108 (in Chinese with English abstract).
- 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)
- Ge, M.H., Zhang, J.J., Liu, K., et al., 2020. Petrogenesis of the Late Paleozoic to Mesozoic Granite from the Xiao Hinggan Mountains-Zhangguangcai Mountains and Its Geological Implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(4): 385—405 (in Chinese with English abstract).
- Ge, W.C., Wu, F.Y., Zhou, C.Y., et al., 2005. Age of Tahe Granite in Northern Daxing'anling and Its Constraints on the Structural Ownership of Ergun Block. *Chinese Science Bulletin*, 50(12): 1239—1247 (in Chinese with English abstract).
- Han, Z.Z., 2011. Characteristics of Temporal and Spatial Evolution and Polymetallic Mineralization of Early Mesozoic Granites in Southeastern Xiaoxing'an Mountains. China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Hao, W.L., Xu, W.L., Wang, F., et al., 2014. Geochronology of the "Neoproterozoic" Yimianpo Group in the Zhangguangcai Range, NE China: Constraints from U-Pb Ages of Detrital and Magmatic Zircons. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1867—1878 (in Chinese with English abstract).
- He, Y.S., Gao, F.H., Xiu, M., et al., 2019. Age, Provenance and Tectonic Setting of Fuxingtun Formation in Zhangguangcai Range. *Earth Science*, 44(10): 3223—3236 (in Chinese with English abstract).
- 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).
- Jiao, Y.Q., Wu, L.Q., Rong, H., 2018. Model of Inner and Outer Reductive Media within Uranium Reservoir Sandstone of Sandstone-Type Uranium Deposits and Its Ore-controlling Mechanism: Case Studies in Daying and Qianjiadian Uranium Deposits. *Earth Science*, 43(2): 459—474 (in Chinese with English abstract).
- Jiao, Y.Q., Wu, L.Q., Rong, H., et al., 2021. Review of Basin Uranium Resources in China. *Earth Science*, 46(8): 2675—2696 (in Chinese with English abstract).
- Li, B.L., Sun, Y.G., Chen, G.J., et al., 2016. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Hf Isotopic Composition and Its Geological Implication of the Fine-Grained Syenogranite in Dong'an Goldfield from the Lesser Xing'an Mountains. *Earth Science*, 41(1): 1—16 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y.C., Wang, Y., Wu, G.G., et al., 2013. The Provenance Characteristics of Tongshan Formation in North Zhalantun Area of the Da Hinggan Mountains: The Constraint of Geochemistry and LA-MC-ICPMS U-Pb Dating of Detrital Zircons. *Geology in China*, 40(2): 391—402 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig, K. R., 2009. Isoplot 3.71: A Geochronological Tool-Kit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Miao, L. C., Fan, W. M., Zhang, F.Q., et al., 2003. Zircon SHRIMP Chronology of Xinkailing-Keluo Complex in Northwest Xiaoxing'anling and Its Significance. *Chinese Science Bulletin*, 48(22): 2315—2323 (in Chinese with English abstract).

- Qin, J.H., 2017. Characteristics and Geological Significance of Nianzishan Cave Alkaline Granite in Qiqihar, Heilongjiang (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Ren, Y.J., 2019. Early-Middle Jurassic Granitic Magmatism and Tectonic Evolution in the Southern Part of Zhangguangcailing. *Acta Geologica Sinica*, 93(11): 2813–2831 (in Chinese with English abstract).
- 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 SiO_2 Content and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ Ratio. *The Journal of Geology*, 94(5): 635–650. <https://doi.org/10.1086/629071>
- Shao, J.A., Li, Y.F., Tang, K.D., 2013. Restoration of the Orogenic Processes of Zhangguangcai Range. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 2959–2970 (in Chinese with English abstract).
- She, X.M., Zhao, J.L., Cui, J.H., et al., 2007. Analysis on Geology Condition of Uranium Mineralization and the Exploration Orientation for Baixingtu District Southwestern Songliao Basin. *Uranium Geology*, 23(4): 201–206, 200 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z.W., 2017. Petrology and Geochemistry of Early Paleozoic Igneous Rocks in the Lesser Xing'an - Zhangguangcai Ranges: Constrains on the Amalgamation History and Crustal Nature of the Massifs. Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Xia, F., Meng, H., Nie, F.J., et al., 2016. Characteristics of Chlorite from the Nalinggou Uranium Deposit in the Ordos Basin and Its Geological Significance. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3473–3482 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.L., Zhang, B., Li, H.L., et al., 2019. Geochemistry of the Yaojia Formation Sandstone in the Kailu Depression, Songliao Basin: Implications for Its Provenance and Tectonic Setting. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 38(3): 572–586 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y., Lin, G., Li, Z.A., 2003. Provenance Tracing of Sediments by Means of Synthetic Study of Shape, Composition and Chronology of Zircon. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(2): 184–190 (in Chinese with English abstract).
- Yu, R.A., Si, Q.H., Wang, S.B., et al., 2020a. Geochemical Characteristics and U-Pb Chronological Characteristics of Detrital Zircon in Zhiluo Formation Sandstone in Shicaocun Area on the Western Edge of Ordos Basin: Enlightenment to Tectonic Background and Provenance. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(4): 754–771 (in Chinese with English abstract).
- Yu, R.A., Wu, Z.J., Sima, X.Z., et al., 2020b. Geochronology and Geological Significance of Sandstone Detrital Zircons from Saihantala Formation in Southern Manite Depression, Erlian Basin. *Earth Science*, 45(5): 1609–1621 (in Chinese with English abstract).
- Yu, R.A., Zhu, Q., Wen, S.B., et al., 2020c. Tectonic Setting and Provenance Analysis of Zhiluo Formation Sandstone of Tarangaole Area in the Ordos Basin. *Earth Science*, 45(3): 829–843 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D.Q., 1993. Two Granitoid Series in Different Tectonic Environments of Southern Da Hinggan Mountains, China. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 12(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z.Q., Jin, C.Z., Zhao, Z.H., et al., 2006. Exploring Degree and Prospecting Guide to in-Situ Leaching Sandstone Uranium Deposit in Songliao Basin. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 21(2): 109–114 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, C. Y., Zhao, G. C., Sun, M., et al., 2017. Subduction between the Jiamusi and Songliao Blocks: Geochronological and Geochemical Constraints from Granitoids within the Zhangguangcailing Orogen, Northern China. *Lithosphere*, 9: 515–533.
- Zhu, J.W., Liu, Z.J., Dong, Q.S., et al., 2001. Sequence-Stratigraphic Framework and Oil - Gas Accumulation Rule in Songliao Basin. *Oil Geophysical Prospecting*, 36(3): 339–344, 382 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 敖光, 2016. 张广才岭南部侵入岩锆石 U-Pb LA-ICP-MS 年代. *地质与资源*, 25(6): 533–538.
- 白晓晗, 2020. 松辽盆地东南隆起区泉头组-姚家组的沉积体系研究(硕士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 曹民强, 荣辉, 陈振岩, 等, 2021. 松辽盆地钱家店铀矿床层间氧化带结构定量表征及制约因素. *地球科学*, 46(10): 3453–3466.
- 董玉, 2018. 佳木斯地块与松嫩-张广才岭地块拼合历史: 年代学与地球化学证据(博士学位论文). 长春: 吉林大学.
- 冯光英, 牛晓露, 刘飞, 等, 2019. 张广才岭地块早侏罗世晚期花岗闪长岩及其闪长质包体的岩石成因及构造意义. *地质学报*, 93(10): 2598–2616.
- 冯晓曦, 滕雪明, 何友宇, 2019. 初步探讨鄂尔多斯盆地东

- 胜铀矿田成矿作用研究若干问题. 地质调查与研究, 42(2): 96—103, 108.
- 葛茂卉, 张进江, 刘恺, 等, 2020. 小兴安岭—张广才岭地区晚古生代至中生代花岗岩的成因及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 39(4): 385—405.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等, 2005. 大兴安岭北部塔河花岗岩体的时代及对额尔古纳地块构造归属的制约. 科学通报, 50(12): 1239—1247.
- 韩振哲, 2011. 小兴安岭东南段早中生代花岗岩类时空演化特征与多金属成矿. 北京: 中国地质大学.
- 郝文丽, 许文良, 王枫, 等, 2014. 张广才岭“新元古代”一面坡群的形成时代: 来自岩浆锆石和碎屑锆石 U-Pb 年龄的制约. 岩石学报, 30(7): 1867—1878.
- 何雨思, 高福红, 修铭, 等, 2019. 张广才岭福兴屯组的形成时代、物源及构造背景. 地球科学, 44(10): 3223—3236.
- 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.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 2018. 砂岩型铀矿的双重还原介质模型及其联合控矿机理: 兼论大营和钱家店铀矿床. 地球科学, 43(2): 459—474.
- 焦养泉, 吴立群, 荣辉, 等, 2021. 中国盆地铀资源概述. 地球科学, 46(8): 2675—2696.
- 李碧乐, 孙永刚, 陈广俊, 等, 2016. 小兴安岭东安金矿区细粒正长花岗岩 U-Pb 年龄、岩石地球化学、Hf 同位素组成及地质意义. 地球科学, 41(1): 1—16.
- 李仰春, 汪岩, 吴淦国, 等, 2013. 大兴安岭北段扎兰屯地区铜山组源区特征: 地球化学及碎屑锆石 U-Pb 年代学制约. 中国地质, 40(2): 391—402.
- 苗来成, 范蔚茗, 张福勤, 等, 2003. 小兴安岭西北部新开岭—科洛杂岩锆石 SHRIMP 年代学研究及其意义. 科学通报, 48(22): 2315—2323.
- 秦锦华, 2017. 黑龙江齐齐哈尔碾子山晶洞碱性花岗岩体特征及其地质意义(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 任永健, 2019. 张广才岭南部早—中侏罗世花岗岩质岩浆作用及构造演化. 地质学报, 93(11): 2813—2831.
- 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.
- 邵济安, 李永飞, 唐克东, 2013. 张广才岭造山过程的重构及其大地构造意义. 岩石学报, 29(9): 2959—2970.
- 余新民, 赵军龙, 崔建华, 等, 2007. 松辽盆地西南部白兴吐地段铀成矿地质条件及找矿方向分析. 铀矿地质, 23(4): 201—206, 200.
- 王志伟, 2017. 小兴安岭—张广才岭早古生代火成岩的岩石学与地球化学: 对块体拼合历史和地壳属性的制约. 长春: 吉林大学.
- 夏菲, 孟华, 聂逢君, 等, 2016. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床绿泥石特征及地质意义. 地质学报, 90(12): 3473—3482.
- 徐增连, 张博, 里宏亮, 等, 2019. 松辽盆地开鲁拗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. 矿物岩石地球化学通报, 38(3): 572—586.
- 闫义, 林舸, 李自安, 2003. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究. 大地构造与成矿学, 27(2): 184—190.
- 俞初安, 司庆红, 王善博, 等, 2020a. 鄂尔多斯盆地西缘石槽村地区直罗组砂岩地球化学特征和碎屑锆石 U-Pb 年代学特征: 对构造背景及物源的启示. 大地构造与成矿学, 44(4): 754—771.
- 俞初安, 吴兆剑, 司马献章, 等, 2020b. 二连盆地马尼特坳陷南缘赛汉塔拉组砂岩碎屑锆石年龄及其地质意义. 地球科学, 45(5): 1609—1621.
- 俞初安, 朱强, 文思博, 等, 2020c. 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区直罗组砂岩源区构造背景与物源分析. 地球科学, 45(3): 829—843.
- 张德全, 1993. 大兴安岭南段不同构造环境中的两类花岗岩. 岩石矿物学杂志, 12(1): 1—11.
- 张振强, 金成洙, 赵忠华, 等, 2006. 松辽盆地地浸砂岩型铀矿勘查及其找矿方向. 地质找矿论丛, 21(2): 109—114.
- 朱建伟, 刘招君, 董清水, 等, 2001. 松辽盆地层序地层格架及油气聚集规律. 石油地球物理勘探, 36(3): 339—344, 382.