

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.01.013

黑龙江漠河盆地漠河组砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其对构造背景的制约

王久懿¹, 孙彦峰¹, 周传芳^{1*}, 乔牡冬², 徐立明¹, 王远超³, 韩风⁴, 姜平¹, 冯嘉¹, 张起鹏¹
WANG Jiuyi¹, SUN Yanfeng¹, ZHOU Chuanfang^{1*}, QIAO Mudong², XU Liming¹, WANG Yuanchao³,
HAN Feng⁴, JIANG Ping¹, FENG Jia¹, ZHANG Qipeng¹

1. 中国地质调查局哈尔滨自然资源综合调查中心, 黑龙江 哈尔滨 150086;

2. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古 呼和浩特 010013;

3. 中国地质调查局应用地质研究中心, 四川 成都 610036;

4. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830057

1. Harbin Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Harbin 150086, Heilongjiang, China;

2. Hohhot Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Hohhot 010013, Inner Mongolia, China;

3. Applied Geological Research Center, China Geological Survey, Chengdu 610036, Sichuan, China;

4. Urumqi Center for Integrated Natural Resources Survey, China Geological Survey, Urumqi 830057, Xinjiang, China

摘要:漠河盆地位于兴蒙造山带北东端、额尔古纳地块北部。通过对漠河组开展碎屑锆石测年、岩石地球化学、现代地层学、古生物和重矿物研究,探讨其沉积时代、物质来源和大地构造背景,为研究漠河盆地演化提供科学依据。根据岩石地球化学、重矿物组合 ATi(89.51~100.00,平均 98.69)和 GZi(39.76~100.00,平均 64.50)指数分析:漠河组主要产于活动大陆边缘和大陆岛弧背景下,物源为上地壳长英质岩石、变质岩和沉积岩,并混有深部即下地壳或地幔的基性岩;岩石 CIA(50.35~60.37,平均 53.50)和 ICI 指数(0.91~1.79,平均 1.40)及 Rb/Sr(0.08~0.67)和 Th/U(5.05~5.81,平均 5.55)值指示漠河组源区母岩经历了较弱程度的风化过程;重矿物 ZTR 指数反映物源碎屑具有近源搬运特征;漠河组中发现早侏罗世—早白垩世古植物化石,结合碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄(最小年龄为 156±3 Ma),厘定漠河组沉积时代为晚侏罗世;碎屑锆石年龄集中在 3 个时期:1841~2462 Ma($n=4$,古元古代)指示额尔古纳地块存在古元古代结晶基底;311~480 Ma($n=56$)是额尔古纳地块与西伯利亚板块拼合造山后的伸展背景下花岗质岩浆形成的记录;156~242 Ma($n=48$)是蒙古—鄂霍茨克洋俯冲于额尔古纳地块背景下岩浆侵入的证据。

关键词:漠河盆地;漠河组;地层时代;物源;构造背景;地质调查工程

中图分类号:P597⁺.3;P534.52 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)01-0146-22

Wang J Y, Sun Y F, Zhou C F, Qiao M D, Xu L M, Wang Y C, Han F, Jiang P, Feng J, Zhang Q P. Detrital zircon U-Pb age and geochemistry of sandstone from the Mohe Formation in the Mohe Basin, Heilongjiang and their constraints on tectonic setting. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(1):146-167

Abstract: Mohe Basin is located in the north of Greater Khingan Range and Erguna Massif at the eastern end of the Xing'an-Mongolian orogenic belt. Through the study of detrital zircon chronology, petrogeochemistry, modern stratigraphy, paleontology and heavy minerals in the strata of the Mohe Formation, the sedimentary age, material source and geotectonic background are discussed,

收稿日期:2021-10-21;修订日期:2022-03-12

资助项目:中国地质调查局项目《黑龙江省大兴安岭十五里桥、腰站林场、依西肯、开库康、下鱼亮子、绥安站、瓦干、闰王店岛、双合站幅 1:5万综合地质调查》(编号:12120115041801)和《大兴安岭山区生态地质调查》(编号:DD20191014)

作者简介:王久懿(1993-),男,硕士,工程师,从事矿物学、岩石学、矿床学研究。E-mail:jywangcugb@163.com

*通信作者:周传芳(1985-),男,硕士,高级工程师,从事地球化学和生态地质学研究。E-mail:546011015@qq.com

providing scientific basis for the study of the evolution of the Mohe Basin. Petrogeochemistry, heavy minerals assemblage and ATi (89.51~100.00, average 98.69) and GZi (39.76~100.00, average 64.50) index show that Mohe Formation is mainly under the background of active continental margin and continental island arc, and the provenance are feldspathic rocks of the upper crust, metamorphic rocks and sedimentary rocks, mixed with basic magmatic rocks in the lower crust or mantle. The CIA (50.35~60.37, average 53.22), and ICI index (0.91~1.79, average 1.40), Rb/Sr (0.08~0.67) and Th/U (5.05~5.81, average 5.55) ratios of the rocks indicate that the provenance of Mohe Formation have undergone relatively weak weathering. The ZTR index of heavy minerals reflects that the detrital has the characteristics of proximal transport. Fossils of paleoplants from the Early Jurassic - Early Cretaceous were found in the Mohe Formation, combined with the detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb chronology (the minimum age was 156 ± 3 Ma), it was determined that the Mohe Formation was depositional in the Late Jurassic. The ages of detrital zircons are concentrated in three periods: 1841~2462 Ma ($n=4$, Paleoproterozoic), indicating the existence of Paleoproterozoic crystalline basement in the Erguna Massif. 311~480 Ma ($n=56$) is a record of granitic magma formation under the extensional setting after the Erguna block and Siberian block were combined. 156~242 Ma ($n=48$) is evidence of magma intrusion under the setting of Mongolia-Okhotsk Ocean subducted into the Erguna Massif.

Key words: Mohe Basin; Mohe Formation; age; provenance; tectonic setting; geological survey engineering

漠河盆地位于兴蒙造山带北东端额尔古纳地块北部,北部紧邻蒙古-鄂霍茨克造山带的俄罗斯上阿穆尔盆地,二者在中生代为同一盆地(和政军等, 2003;张顺等,2003)。前人对漠河组沉积时代、盆地构造背景和类型、碎屑物质来源、古生物特征、地层层序等取得了一定认识,但也存在一定争议,包括:①漠河组形成时代有中白垩世(下伏二十二站组碎屑锆石最小年龄 134 ± 1 Ma,王远超等,2020),晚侏罗世(下伏二十二站组碎屑锆石最小年龄 152 ± 3 Ma,李良等,2017),中侏罗世(漠河组碎屑锆石最小年龄 170 ± 1 Ma,王少秩等,2015);漠河组发育中侏罗世的 *Quadraculina-Cyathidites*(四字粉-杪稞孢)孢粉组合(肖云鹏等,2018)和 *Coniopteris-Phoenicopsis* 植物群晚期的 *Coniopterisburejensis-Cladophlebis cf. asiatica* 亚组合(肖传桃等,2015),早侏罗世晚期-中侏罗世(漠河组糜棱岩化砂岩内顺层侵入的糜棱岩化微晶黑云母石英闪长岩锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 182.8 ± 1.8 Ma,赵书跃等,2016)和晚侏罗世(组内发育晚侏罗世腹足类、双壳类、介形类和孢粉化石组合,吴河勇等,2003);②碎屑物质来源有盆地南部额尔古纳地块中变质岩、中酸性火成岩和沉积岩(和钟铎等,2008a,b;侯伟等,2010a,b;王少秩等,2015)和主要来自北侧造山带酸性火山岩、部分南侧大陆内部沉积岩(和政军等,2003)2种观点。

基于上述争议,本文在前人研究成果的基础上,依托黑龙江省大兴安岭十五里桥等9幅1:5万区域地质矿产调查项目成果,通过对漠河组砂岩岩相学、碎屑锆石年龄、岩石地球化学、重矿物和古生物分析,对漠河组沉积时代、物质来源和大地构造

背景进行了初步探讨,为区域地质调查和地质找矿工作提供参考。

1 地质背景

研究区位于漠河前陆盆地东部,盆地基底由古元古界兴华渡口群、寒武系兴隆群、泥盆系泥鳅河组和霍龙门组,以及古生代花岗岩组成,盖层为侏罗纪陆相碎屑岩和白垩纪火山岩(和钟铎等,2008a,b)。研究区出露的地层主要为中生界和新生界(图1)。中生界侏罗系的沉积岩地层在全区分布广泛,自下而上为上侏罗统开库康组(J_3k)砾岩、含砾砂岩、砂岩,局部夹泥岩、粉砂岩,二十二站组(J_3er)细砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩,局部夹含砾砂岩及砂砾岩,漠河组(J_3m)粗-中粒岩屑长石砂岩、细砂岩、粉砂岩,局部含砾岩;火山岩主要分布在南侧和东南侧,由老到新为下白垩统龙江组(K_1l)气孔杏仁状安山岩、角闪安山岩、安山质角砾熔岩,部分安山质凝灰岩、玄武岩,含沉积夹层砂岩和沉凝灰岩,光华组(K_1gn)流纹岩、流纹质凝灰岩为主,含沉积夹层,九峰山组(K_1j)砂岩、含砾砂岩、(含集块)沉火山角砾岩,夹粉砂岩、泥岩,夹多层煤线,甘河组(K_1g)安山岩、玄武岩、安山质角砾岩,少量安山质玄武岩;新生界主要分布在黑龙江沿岸、西尔根气河及其支流河谷中,发育新近系中新统一上新统孙吴组($N_{1-2}s$)弱胶结(或半胶结)的砂砾、砂夹砂质粘土,第四系冲洪积层松散的卵石、砂、粘土和富含植物根系的泥炭、泥炭层,含砂砾的淤泥沉积物的沼泽;侵入岩以早白垩世中深成花岗岩为主,岩性以中粒二长花岗岩($m\pi\gamma K_1$)、似斑状二长花岗岩

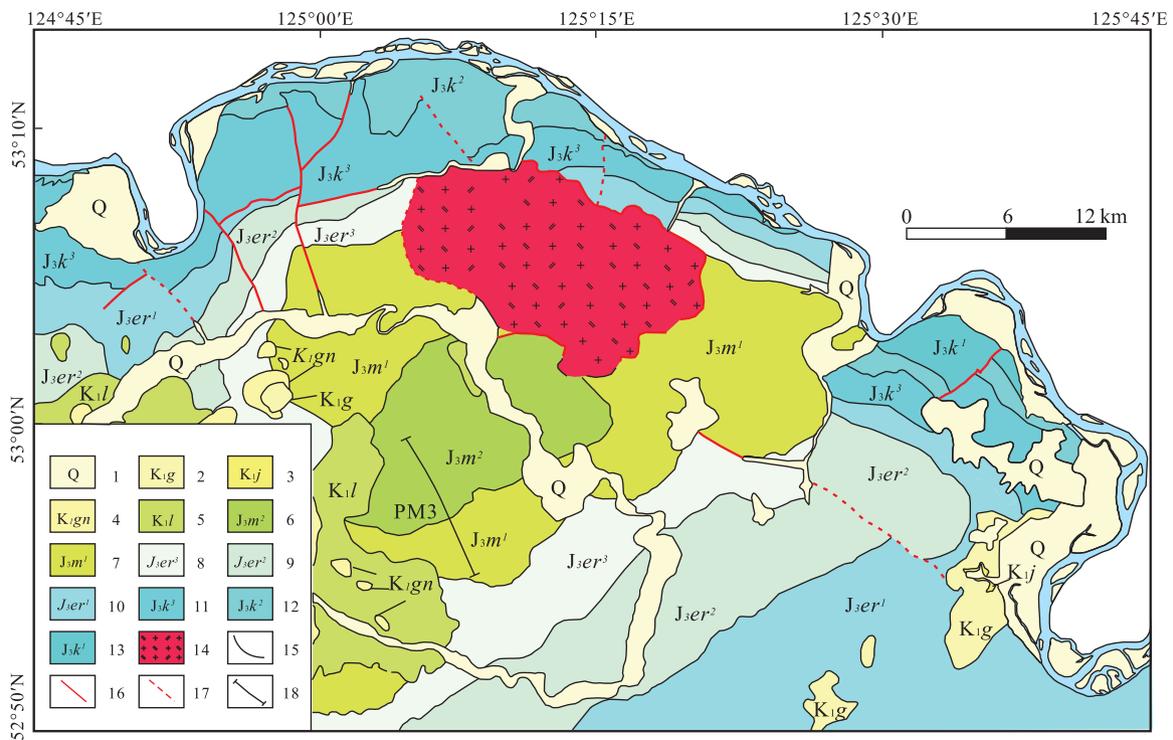


图1 研究区地质图

Fig. 1 Geological map of the study area

1—第四系;2—早白垩世甘河组;3—早白垩世九峰山组;4—早白垩世光华组;5—早白垩世龙江组;6—晚侏罗世漠河组二段;7—晚侏罗世漠河组一段;8—晚侏罗世二十二站组三段;9—晚侏罗世二十二站组二段;10—晚侏罗世二十二站组一段;11—晚侏罗世开库康组三段;12—晚侏罗世开库康组二段;13—晚侏罗世开库康组一段;14—早白垩世二花花岗岩体;15—地质界线;16—断层;17—推测断层;18—典型剖面

($\rho\eta\gamma K_1$)、花岗闪长岩 ($\gamma\delta K_1$) 和花岗闪长斑岩 ($\gamma\delta\pi K_1$) 为主,岩体受滨太平洋构造域控制,呈北北东向展布于秀水山—西尔根气河两侧;研究区北侧由于秀水山岩体的侵入展现隆起特征,南侧受构造控制发育大型向斜,表现为拗陷区。

漠河组主要分布在研究区中部,沿十五里桥—双河林场—绥安站一带分布,岩层产状倾向以北西向为主,次为北西西向,倾角主要为 $35^\circ \sim 55^\circ$,局部受脉岩侵入、构造影响,产状发生变化。主要控制剖面为 PM3(图 2-a)。该组下部岩性主要为粗中粒岩屑长石砂岩、中粗粒岩屑长石砂岩,局部含砾,夹粉砂岩、粉砂质泥岩;基本层序主要为二元、多元向上变细型,局部为向上变细再变粗型;上部岩性为粗中—中细粒岩屑长石砂岩、粉砂岩、粉砂质泥岩,局部含砾石,偶夹砾岩;基本层序以向上变细型为主,次为互层韵律型,局部发育向上变粗型(图 2-b)。

2 样品特征

样品采自塔河县十五里桥、双河林场和腰站林

场漠河组典型剖面 PM3(图 2)。岩性主要为长石砂岩和杂砂岩。

长石砂岩:风化面呈黄褐色、黄褐色—黑褐色、灰褐色、土黄色等,新鲜面多呈灰黄色、灰色、浅灰绿色、土灰色,砂状结构,韵律层理构造、层理构造、块状构造。矿物成分:碎屑为石英、钾长石、斜长石,部分岩屑、黑云母,少量白云母、角闪石、方解石等,多数呈次棱角状—次圆状,少数呈棱角状。其中,石英呈无色透明,含量 $25\% \sim 40\%$;钾长石为正长石、条纹长石、微斜长石,颗粒晶面泥化而稍微—较混浊,含量 $20\% \sim 30\%$;斜长石为更—中长石,颗粒晶面因泥化、绢云母化而稍微—较混浊,细而密的聚片双晶清晰—模糊显示,部分具环带,含量为 $5\% \sim 40\%$;岩屑为硅质岩、泥岩、花岗岩、安山岩、玄武岩,少量千枚岩、变质粉砂岩、石英岩等,含量为 $2\% \sim 10\%$;黑云母呈不规则片状,黄褐色—浅褐黄色多色性显著,均压弯变形,多数定向分布,含量多为 $1\% \sim 5\%$,少数为 $5\% \sim 10\%$;方解石呈无色透明,闪突起显著,角闪石少量;角闪石为普通角闪石,绿

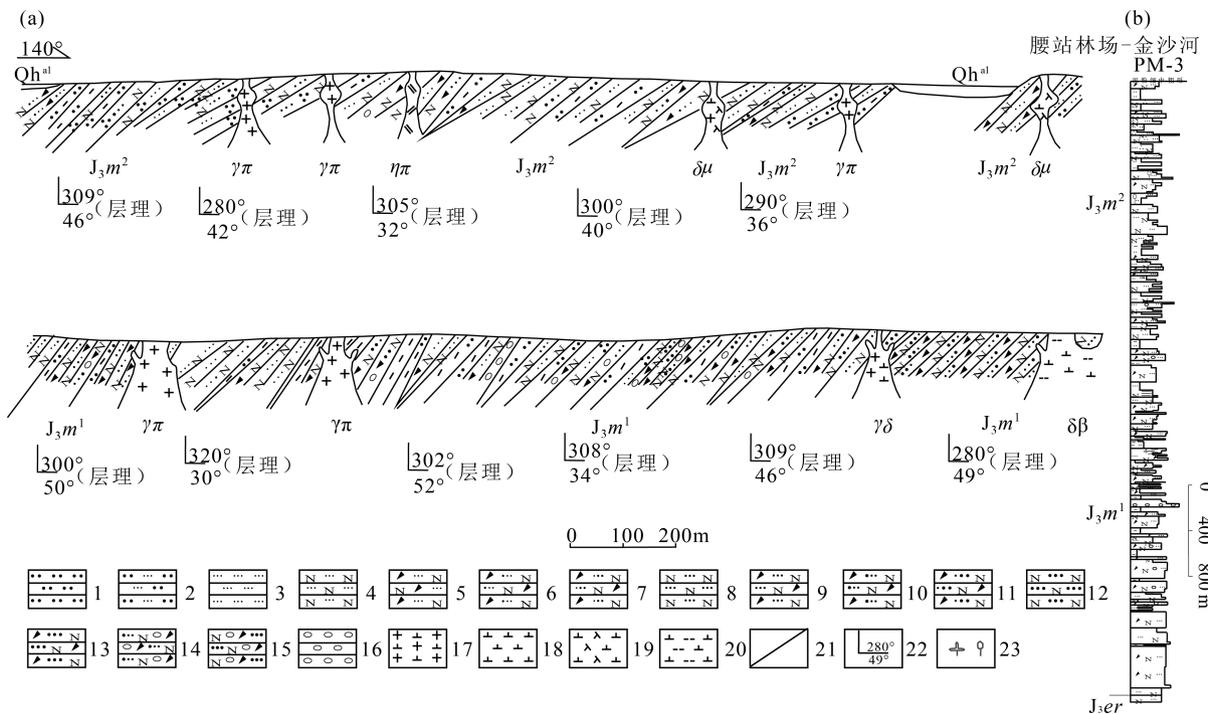


图 2 塔河县腰站林场—金沙河上侏罗统漠河组地层剖面图(a)和地层柱状图(b)

Fig. 2 Stratigraphic profile of the Upper Jurassic Mohe Formation (a) and stratigraphic column in Yaozhanlinchang—Jinsha river, Tahe (b)

- 1—粉砂岩;2—细砂质粉砂岩;3—细砂岩;4—细粒长石砂岩;5—细粒岩屑长石砂岩;6—中细粒岩屑长石砂岩;7—细中粒岩屑长石砂岩;
 8—中粒长石砂岩;9—中粒岩屑长石砂岩;10—粗中粒岩屑长石砂岩;11—中粗粒岩屑长石砂岩;12—粗粒长石砂岩;13—粗粒岩屑
 长石砂岩;14—粗中粒含砾岩屑长石砂岩;15—粗粒含砾岩屑长石砂岩;16—砾岩;17—中细粒花岗岩闪长岩;18—细粒黑云母闪长岩;
 19—闪长玢岩;20—黑云母闪长岩;21—地质界线;22—产状;23—植物化石及碎片;J₃m¹—上侏罗统漠河组一段;
 J₃m²—上侏罗统漠河组二段;γδ—花岗闪长岩脉;γπ—花岗斑岩;δβ—黑云母闪长岩;δμ—闪长玢岩

色—浅黄绿色多色性显著,角闪石少量;白云母少量,呈不规则片状,无色透明,闪突起显著,碎屑磨圆度中等—较好,分选性中等—较好。填隙物主要由粘土矿物及少量重结晶生成的显微鳞片状绢云母、黑云母等组成,以混晶集合体充填于碎屑物之间,含量为 10%。胶结类型属接触式—孔隙式胶结(图 3-a,b)。

杂砂岩:风化较严重,多呈细小破碎残块状,新鲜面呈灰色、灰黄色、灰绿色,质地较软,手触摸有粗糙感。岩石具粉砂—细粒砂状结构、不等粒结构,块状构造,粒度多为中粒—细粒。粉砂成分肉眼难以辨别。碎屑成分为石英、长石、岩屑及少量黑云母,多呈次棱角状—次圆状,少数棱角状。石英含量 15%~30%;长石含量 40%~50%,为斜长石(多为中—更长石)和钾长石(多为正长石,部分条纹长石、微斜长石)。岩屑多为硅质岩、泥质岩、粉砂岩、花岗岩、流纹岩,含量 15%~20%。黑云母呈

不规则片状少量分布。填隙物成分多为粘土矿物(部分重结晶成显微鳞片状黑云母和少量绢云母、绿泥石),少量钙质、泥质、砂质,含量 15%~25%。胶结类型多为基底式胶结和孔隙式胶结(图 3-c,d)。

3 分析方法

锆石挑选和制靶在河北省区域地质矿产调查研究所进行。对经过机械破碎后的样品进行浮选和重磁法分选后,在双目镜下依据锆石形态、自形程度等特征挑选出晶形较好、有代表性的锆石。将待测锆石贴在环氧树脂表面制成样品靶,待其固结干燥后,打磨抛光至露出锆石表面,然后对锆石样靶进行透射光、反射光和阴极发光(CL)照相。锆石 CL 照相和微区原位 U-Pb 定年在天津地质矿产研究所同位素实验室完成。锆石 U-Pb 定年实验采用激光烧蚀多接收器等离子体质谱法(LA-MC-ICP-MS),多接收器电感耦合等离子体质谱仪为

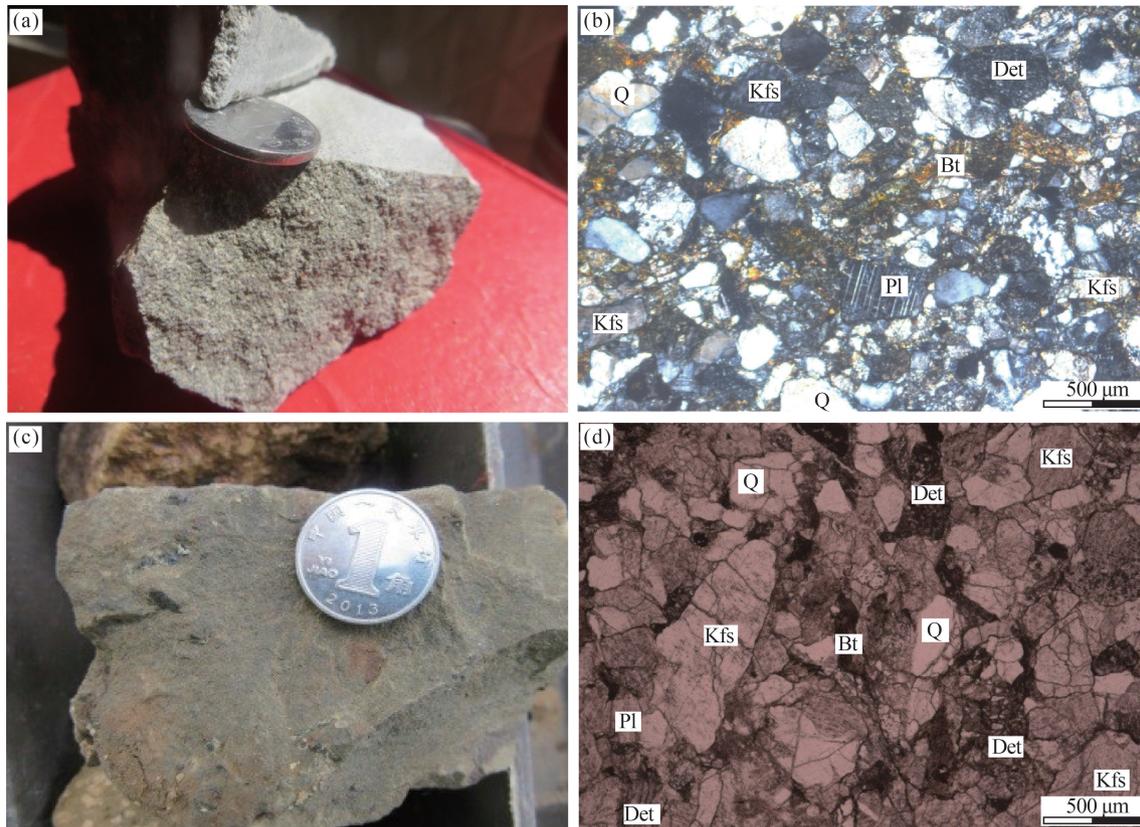


图3 漠河组砂岩典型手标本及镜下照片

Fig. 3 Typical hand specimens and microscopic photos of sandstone of Mohe Formation

a—漠河组长石砂岩手标本;b—漠河组长石砂岩镜下照片(正交偏光);c—漠河组杂砂岩手标本;d—漠河组杂砂岩显微照片(单偏光);Q—石英;Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Bt—黑云母;Det—岩屑

Neptune, 激光器为 UP193-FX ArF 准分子接收器, 激光波长 193 nm, 脉冲 5 ns, 束斑直径 32 μm , 激光能量密度 13~14 J/cm^2 , 频率 8~10 Hz, 氦为载气, 以 TEMORA 为外部锆石年龄标准, NIST612 玻璃标样为外标计算 Pb、U 和 Th 含量(李怀坤等, 2009)。数据处理采用 ICPMSDataCal 和 Isoplot 程序(Ludwig, 2003; Liu et al., 2008)。碎屑锆石年龄的计算有 2 种系统: $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 。太古宙和古中元古代锆石中含大量放射性成因铅, 因此 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄更可靠。随着年龄减小, 到新元古代—古生代, 可供测量的放射性成因铅量也随之减少, 一般无 Pb 丢失, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄误差较大, 故采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄。本次研究根据锆石年龄分布情况, 对大于 1000 Ma 的样品, 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄, 对小于 1000 Ma 的样品采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄(Compston et al., 1992; Sircombe, 1999; Cawood et al., 2000)。

本次砂岩样品主量和微量元素分析在河北省区域地质矿产调查研究所完成。11 件样品采用 XRF 法(Liang et al., 2000)测试主量元素, 分析仪器为 Axios X 射线荧光光谱仪, 分析偏差优于 2%; 3 件样品采用 Thermo Fisher Scientific 公司的 X Series II 型等离子体质谱仪(ICP-MS)测试微量和稀土元素, 分析误差优于 5%。

本次 9 件砂岩样品重矿物分析在河北省区域地质矿产调查研究所完成。实验流程(王国茹等, 2011): ①将样品放入去离子水和双氧水中浸泡 2 h, 然后通过筛子(0.125~0.063 mm)筛选, 再用去离子水冲洗 2~3 遍, 最后将筛选好的样品放入恒温箱内烘干、称重; ②将烘干好的样品放入装有溴甲烷的分离器中, 经充分搅拌、静置后, 取出上部轻矿物和下部重矿物, 经酒精清洗后, 烘干、称重; ③用薄纸包好的磁铁在重矿物表面移动, 分离出磁性矿物, 将磁性矿物和非磁性矿物分别称重; ④对每个

样品中所筛选出的轻矿物和重矿物(包括磁性和非磁性矿物)分别进行镜下观察,计算每种矿物的质量百分含量。

4 分析结果

4.1 碎屑锆石 U-Pb 定年

本次选取 2 件漠河组砂岩样品进行碎屑锆石

U-Pb定年分析,年龄结果见表 1。样品中碎屑锆石多呈棱角状、次棱角状,少部分呈次圆状、柱状和长柱状,长度为 80~200 μm ,宽度为 50~150 μm 。2 组锆石大部分具有振荡环带特征,少量显示弱分带、无分带和“暗核亮边”(图 4)。本次测试的 108 颗锆石中,85 颗锆石的 Th/U>0.4,4 颗小于 0.1。

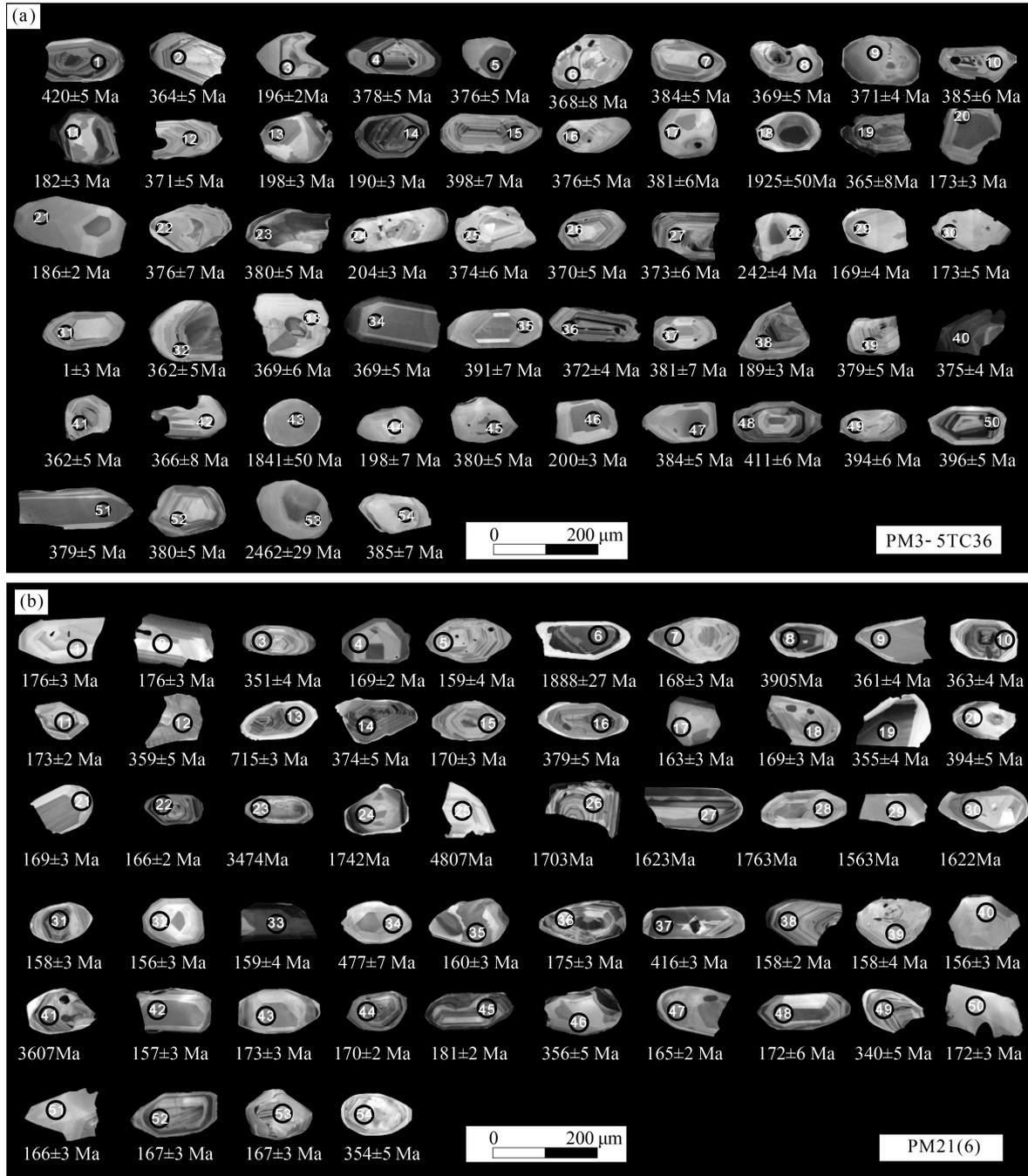


图 4 漠河组碎屑锆石阴极发光图像及年龄

Fig. 4 Cathodoluminescence images and ages of detrital zircons from Mohe Formation

表1 漠河盆地漠河组砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 分析结果

Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb dating of detrital zircons from Mohe Formation sandstones in Mohe Basin

测点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/ Ma					
	Pb	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
PM3-5TC36																
1	124	310	1925	0.16	0.0673	0.0009	0.0535	0.0009	0.4964	0.0105	420	5	349	36	409	9
2	23	189	384	0.49	0.0581	0.0007	0.0545	0.0016	0.4360	0.0130	364	5	390	66	367	11
3	11	171	329	0.52	0.0308	0.0004	0.0491	0.0022	0.2088	0.0093	196	2	153	105	193	9
4	27	277	407	0.68	0.0605	0.0008	0.0520	0.0017	0.4334	0.0142	378	5	285	74	366	12
5	31	464	430	1.08	0.0601	0.0007	0.0518	0.0014	0.4297	0.0124	376	5	278	60	363	10
6	7	53	115	0.46	0.0587	0.0013	0.0560	0.0039	0.4534	0.0336	368	8	452	156	380	28
7	19	153	286	0.53	0.0614	0.0007	0.0543	0.0017	0.4594	0.0148	384	5	383	69	384	12
8	13	135	207	0.65	0.0589	0.0007	0.0589	0.0026	0.4782	0.0208	369	5	564	95	397	17
9	26	292	387	0.76	0.0593	0.0007	0.0526	0.0014	0.4303	0.0118	371	4	314	60	363	10
10	22	217	332	0.65	0.0616	0.0009	0.0558	0.0017	0.4737	0.0155	385	6	443	67	394	13
11	28	62	1065	0.06	0.0286	0.0004	0.0487	0.0019	0.1920	0.0071	182	3	134	90	178	7
12	30	272	463	0.59	0.0593	0.0008	0.0549	0.0015	0.4492	0.0127	371	5	410	61	377	11
13	8	160	224	0.72	0.0313	0.0005	0.0482	0.0025	0.2076	0.0105	198	3	108	123	192	10
14	41	682	1278	0.53	0.0300	0.0004	0.0514	0.0013	0.2124	0.0059	190	3	258	56	196	5
15	26	188	395	0.48	0.0637	0.0011	0.0524	0.0016	0.4604	0.0151	398	7	303	71	385	13
16	18	152	272	0.56	0.0601	0.0009	0.0540	0.0019	0.4479	0.0161	376	5	373	77	376	14
17	12	80	193	0.41	0.0609	0.0009	0.0557	0.0025	0.4681	0.0206	381	6	440	100	390	17
18	51	108	121	0.89	0.3445	0.0050	0.1179	0.0033	5.6012	0.1458	1908	28	1925	50	1916	50
19	44	317	683	0.46	0.0583	0.0012	0.0764	0.0035	0.6140	0.0265	365	8	1106	91	486	21
20	15	233	523	0.45	0.0272	0.0004	0.0516	0.0021	0.1937	0.0081	173	3	267	94	180	8
21	13	222	410	0.54	0.0293	0.0004	0.0559	0.0025	0.2259	0.0097	186	2	448	98	207	9
22	16	70	263	0.27	0.0600	0.0012	0.0563	0.0025	0.4659	0.0205	376	7	464	99	388	17
23	55	684	794	0.86	0.0607	0.0008	0.0541	0.0012	0.4524	0.0110	380	5	373	48	379	9
24	9	138	277	0.50	0.0322	0.0005	0.0524	0.0026	0.2321	0.0122	204	3	301	114	212	11
25	13	88	205	0.43	0.0597	0.0009	0.0536	0.0021	0.4416	0.0178	374	6	355	87	371	15
26	11	98	173	0.57	0.0590	0.0008	0.0560	0.0022	0.4556	0.0180	370	5	451	87	381	15
27	8	89	116	0.77	0.0596	0.0009	0.0566	0.0029	0.4651	0.0241	373	6	476	113	388	20
28	12	248	281	0.88	0.0383	0.0006	0.0549	0.0029	0.2896	0.0151	242	4	408	117	258	13
29	3	63	93	0.68	0.0266	0.0006	0.0818	0.0058	0.2995	0.0199	169	4	1240	138	266	18
30	3	65	116	0.56	0.0272	0.0008	0.0580	0.0057	0.2172	0.0195	173	5	529	215	200	18
31	96	166	1980	0.08	0.0494	0.0005	0.0716	0.0014	0.4876	0.0101	311	3	976	41	403	8
32	16	143	259	0.55	0.0578	0.0007	0.0551	0.0019	0.4396	0.0150	362	5	418	78	370	13
33	11	117	162	0.73	0.0590	0.0010	0.0591	0.0026	0.4802	0.0217	369	6	570	96	398	18
34	19	199	293	0.68	0.0590	0.0008	0.0553	0.0019	0.4496	0.0156	369	5	424	76	377	13
35	10	77	143	0.54	0.0625	0.0011	0.0499	0.0032	0.4304	0.0288	391	7	191	150	363	24
36	77	619	1240	0.50	0.0594	0.0006	0.0520	0.0010	0.4262	0.0094	372	4	285	45	361	8

续表 1-1

测点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
37	8	49	135	0.36	0.0609	0.0011	0.0563	0.0032	0.4733	0.0270	381	7	465	124	393	22
38	16	127	544	0.23	0.0298	0.0004	0.0456	0.0018	0.1874	0.0070	189	3	-23	94	174	7
39	17	160	263	0.61	0.0606	0.0007	0.0524	0.0019	0.4377	0.0159	379	5	302	83	369	13
40	83	70	1499	0.05	0.0599	0.0007	0.0526	0.0008	0.4348	0.0086	375	4	312	36	367	7
41	20	210	309	0.68	0.0578	0.0009	0.0654	0.0027	0.5213	0.0220	362	5	787	86	426	18
42	11	58	182	0.32	0.0584	0.0012	0.0521	0.0028	0.4194	0.0219	366	8	288	124	356	19
43	89	292	211	1.39	0.3200	0.0052	0.1125	0.0031	4.9641	0.1547	1790	29	1841	50	1813	57
44	2	38	68	0.56	0.0312	0.0012	0.0960	0.0109	0.4131	0.0471	198	7	1549	214	351	40
45	18	137	287	0.48	0.0607	0.0008	0.0575	0.0021	0.4812	0.0173	380	5	511	80	399	14
46	10	213	271	0.79	0.0315	0.0005	0.0480	0.0025	0.2086	0.0109	200	3	99	123	192	10
47	37	542	508	1.07	0.0614	0.0007	0.0556	0.0015	0.4704	0.0129	384	5	436	60	391	11
48	69	282	1072	0.26	0.0659	0.0009	0.0531	0.0011	0.4819	0.0133	411	6	332	47	399	11
49	16	108	241	0.45	0.0630	0.0009	0.0508	0.0020	0.4412	0.0182	394	6	232	91	371	15
50	63	538	941	0.57	0.0634	0.0009	0.0523	0.0011	0.4575	0.0106	396	5	299	47	383	9
51	22	341	309	1.11	0.0606	0.0008	0.0546	0.0019	0.4566	0.0163	379	5	397	77	382	14
52	15	136	226	0.60	0.0608	0.0008	0.0525	0.0020	0.4402	0.0171	380	5	308	85	370	14
53	98	76	193	0.40	0.4615	0.0058	0.1606	0.0028	10.2190	0.2098	2446	31	2462	29	2455	50
54	5	103	60	1.71	0.0616	0.0012	0.0664	0.0049	0.5643	0.0334	385	7	820	154	454	27
PM21(6)																
1	4	96	130	0.74	0.0276	0.0005	0.0803	0.0048	0.3058	0.0181	176	3	1205	119	271	16
2	15	361	502	0.72	0.0276	0.0005	0.0486	0.0028	0.1852	0.0106	176	3	129	134	173	10
3	24	183	409	0.45	0.0560	0.0007	0.0550	0.0017	0.4247	0.0139	351	4	412	71	359	12
4	16	284	577	0.49	0.0265	0.0003	0.0534	0.0020	0.1956	0.0075	169	2	348	85	181	7
5	7	134	261	0.51	0.0249	0.0006	0.0804	0.0083	0.2766	0.0299	159	4	1207	202	248	27
6	180	557	385	1.45	0.3494	0.0041	0.1155	0.0018	5.5644	0.1090	1932	23	1888	27	1911	37
7	10	193	361	0.54	0.0265	0.0004	0.0502	0.0031	0.1832	0.0107	168	3	205	144	171	10
8	72	998	965	1.03	0.0624	0.0008	0.0566	0.0013	0.4866	0.0124	390	5	475	52	403	10
9	15	169	240	0.71	0.0577	0.0007	0.0530	0.0021	0.4216	0.0178	361	4	330	92	357	15
10	52	388	861	0.45	0.0580	0.0007	0.0546	0.0013	0.4361	0.0105	363	4	394	53	368	9
11	17	365	583	0.63	0.0272	0.0004	0.0559	0.0043	0.2094	0.0173	173	2	447	172	193	16
12	21	125	365	0.34	0.0572	0.0008	0.0547	0.0017	0.4319	0.0133	359	5	401	69	365	11
13	37	256	616	0.42	0.0592	0.0008	0.0528	0.0017	0.4309	0.0144	371	5	320	73	364	12
14	75	548	1214	0.45	0.0598	0.0008	0.0528	0.0012	0.4357	0.0109	374	5	322	51	367	9
15	9	168	321	0.52	0.0267	0.0004	0.0529	0.0027	0.1947	0.0093	170	3	324	114	181	9
16	76	740	1172	0.63	0.0605	0.0008	0.0520	0.0012	0.4332	0.0097	379	5	284	51	365	8
17	7	140	263	0.53	0.0256	0.0004	0.0520	0.0026	0.1838	0.0093	163	3	286	113	171	9
18	10	219	331	0.66	0.0265	0.0004	0.0585	0.0031	0.2142	0.0109	169	3	550	117	197	10
19	47	310	825	0.38	0.0567	0.0006	0.0515	0.0012	0.4025	0.0105	355	4	264	54	343	9

续表 1-2

测点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
	Pb	Th	U		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ
20	15	40	242	0.17	0.0630	0.0008	0.0541	0.0022	0.4699	0.0192	394	5	373	92	391	16
21	5	93	191	0.49	0.0266	0.0004	0.0542	0.0034	0.1990	0.0119	169	3	381	141	184	11
22	25	613	856	0.72	0.0261	0.0003	0.0505	0.0019	0.1815	0.0066	166	2	219	86	169	6
23	39	351	676	0.52	0.0553	0.0006	0.0525	0.0014	0.4001	0.0111	347	4	307	59	342	9
24	42	356	1596	0.22	0.0273	0.0004	0.0502	0.0012	0.1892	0.0050	174	2	203	55	176	5
25	11	49	135	0.37	0.0773	0.0011	0.0566	0.0022	0.6039	0.0235	480	7	478	85	480	19
26	11	376	340	1.11	0.0268	0.0005	0.0565	0.0026	0.2083	0.0096	170	3	470	104	192	9
27	9	76	353	0.21	0.0255	0.0004	0.0546	0.0032	0.1918	0.0102	162	3	398	131	178	9
28	12	298	394	0.76	0.0277	0.0005	0.0506	0.0021	0.1930	0.0081	176	3	221	94	179	8
29	5	181	186	0.97	0.0245	0.0004	0.0593	0.0034	0.1999	0.0119	156	3	576	127	185	11
30	16	144	629	0.23	0.0255	0.0004	0.0480	0.0018	0.1689	0.0062	162	2	101	87	158	6
31	22	554	801	0.69	0.0249	0.0004	0.0486	0.0017	0.1668	0.0062	158	3	131	84	157	6
32	7	92	288	0.32	0.0244	0.0004	0.0505	0.0027	0.1702	0.0094	156	3	219	125	160	9
33	18	138	731	0.19	0.0250	0.0006	0.0486	0.0028	0.1672	0.0108	159	4	128	136	157	10
34	22	108	273	0.40	0.0768	0.0011	0.0573	0.0018	0.6072	0.0200	477	7	504	69	482	16
35	5	162	167	0.97	0.0251	0.0005	0.0613	0.0044	0.2121	0.0150	160	3	651	153	195	14
36	10	151	336	0.45	0.0276	0.0004	0.0522	0.0026	0.1985	0.0099	175	3	295	114	184	9
37	18	290	272	1.07	0.0543	0.0009	0.0555	0.0032	0.4153	0.0239	341	6	433	129	353	20
38	18	279	690	0.40	0.0248	0.0004	0.0473	0.0022	0.1618	0.0074	158	2	62	113	152	7
39	3	76	109	0.70	0.0247	0.0006	0.0782	0.0061	0.2666	0.0201	158	4	1151	155	240	18
40	7	180	247	0.73	0.0244	0.0005	0.0552	0.0038	0.1859	0.0104	156	3	419	154	173	10
41	36	225	626	0.36	0.0575	0.0012	0.0513	0.0012	0.4064	0.0109	360	7	254	53	346	9
42	8	247	280	0.88	0.0247	0.0005	0.0512	0.0029	0.1742	0.0091	157	3	251	128	163	9
43	6	137	194	0.71	0.0273	0.0005	0.0546	0.0036	0.2051	0.0132	173	3	395	149	189	12
44	11	223	378	0.59	0.0267	0.0004	0.0522	0.0021	0.1924	0.0080	170	2	295	93	179	7
45	12	219	408	0.54	0.0285	0.0004	0.0531	0.0021	0.2088	0.0082	181	2	333	89	193	8
46	11	114	179	0.64	0.0567	0.0007	0.0530	0.0027	0.4150	0.0205	356	5	331	114	352	17
47	8	156	283	0.55	0.0260	0.0004	0.0541	0.0026	0.1939	0.0090	165	2	376	108	180	8
48	4	100	138	0.73	0.0270	0.0010	0.0526	0.0072	0.1959	0.0265	172	6	314	313	182	25
49	12	68	211	0.32	0.0542	0.0008	0.0653	0.0034	0.4979	0.0247	340	5	784	108	403	20
50	5	70	181	0.39	0.0271	0.0005	0.0556	0.0036	0.2076	0.0117	172	3	436	144	192	11
51	4	62	138	0.45	0.0262	0.0005	0.0875	0.0076	0.3158	0.0243	166	3	1373	168	279	21
52	8	116	289	0.40	0.0263	0.0004	0.0785	0.0046	0.2841	0.0150	167	3	1160	115	254	13
53	8	114	272	0.42	0.0263	0.0004	0.0594	0.0029	0.2153	0.0097	167	3	580	105	198	9
54	8	69	139	0.50	0.0564	0.0008	0.0583	0.0034	0.4532	0.0251	354	5	540	127	380	21

108 颗锆石的谐和度均大于 90%, 因此本次获得的年龄均为有效年龄。2 件样品所获年龄范围为

156~2462 Ma(图 4、图 5;表 1), 其中侏罗纪($n=56$)分布最多, 其次为三叠纪($n=2$)、石炭纪($n=$

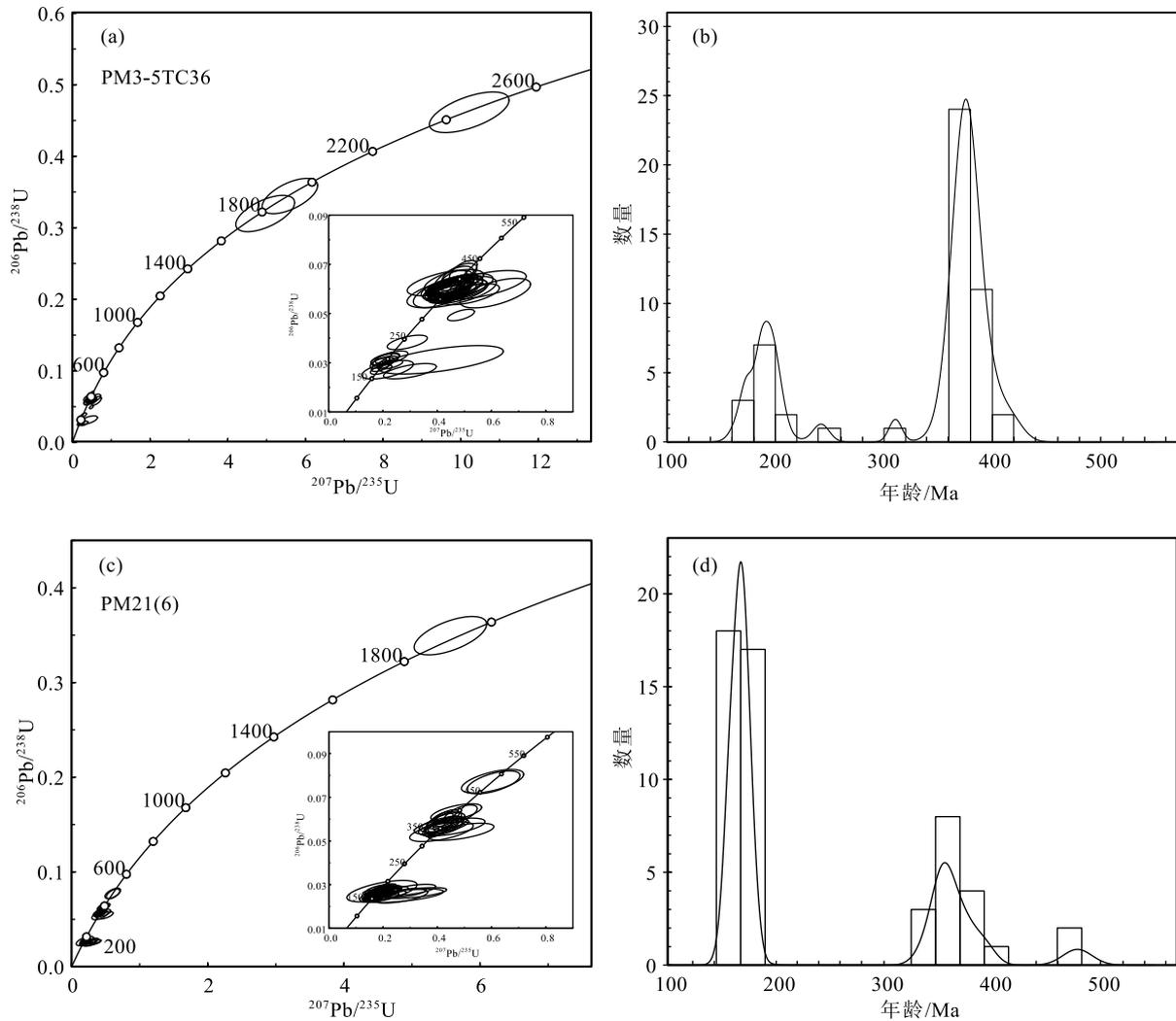


图 5 漠河组砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 谐和年龄及频谱图

Fig. 5 U-Pb concordia diagrams and histograms of detrital zircons in Mohe Formation sandstones

8)、泥盆纪($n=45$)、志留纪($n=1$)、奥陶纪($n=2$)、古元古代($n=4$)。峰期为 156~242 Ma、311~480 Ma, 峰期年龄为 180 Ma 和 380 Ma。156±3 Ma 为本次捕获的最新年龄, 为晚侏罗世。捕获的最老锆石年龄为 2462±29 Ma, 是古元古代和新太古代的界线。

4.2 岩石地球化学特征

4.2.1 主量元素

漠河组砂岩主量元素测定结果见表 2。砂岩 SiO₂ 含量为 61.76%~75.44%, 平均 66.89%; Al₂O₃ 含量为 13.06%~15.71%, 平均 14.63%; Fe₂O₃ 含量为 1.27%~3.71%, 平均 2.19%; K₂O 含量为 1.90%~3.17%, 平均 2.50%; CaO、MgO 和 Na₂O 含量分别

为 0.30%~3.72% (平均 2.32%)、0.62%~4.03% (平均 2.16%)、3.04%~4.22% (平均 3.58%)。Fe₂O₃/K₂O 值为 1.72~0.49 (平均 0.91), 较高。样品点在岩石分类图中落到长石砂岩和杂砂岩区域(图 6-a)。

4.2.2 微量与稀土元素

本次研究所测微量和稀土元素结果见表 3。稀土元素总量 Σ REE 变化范围为 91.37×10⁻⁶~148.03×10⁻⁶, 平均 122.57×10⁻⁶, 整体变化较小。LREE/HREE 值为 9.88~18.96, 平均 12.56。在稀土元素球粒陨石标准化图解(图 6-b)上, 轻、重稀土元素显示出一定的同位素分馏。δEu=0.71~0.87, 平均 0.81, 具有明显负 Eu 异常特征。δCe=0.87~1.13, 平均 1.00, 未显示出 Ce 异常;(La/Yb)_N=9.70~14.10, 平

表2 漠河组砂岩主量元素含量
Table 2 Content of major elements in Mohe Formation sandstones

样品号	Ayq15033	Ayq15034	Ayq15035	Ayq15038	Ayq15067	Ayq15068	Ayq16017	Ayq16019	Ayq16047	Ayq16051	Ayq16061
SiO ₂	65.88	75.44	68.77	73.30	63.00	61.76	66.82	62.79	64.42	64.33	69.30
Al ₂ O ₃	14.23	13.06	15.47	14.34	15.71	14.74	14.37	14.81	15.00	14.95	14.31
TiO ₂	0.68	0.36	0.43	0.34	0.77	0.82	0.45	0.57	0.75	0.76	0.45
Fe ₂ O ₃	1.57	1.41	1.27	1.87	3.42	2.46	1.93	1.69	3.71	3.19	1.62
FeO	2.73	0.57	1.90	0.55	2.12	2.95	1.82	3.08	1.67	2.11	1.78
CaO	3.08	0.30	2.60	0.34	2.63	3.72	2.44	3.64	2.70	3.06	1.01
MgO	2.24	0.62	1.36	0.79	2.86	2.93	2.85	4.03	2.15	2.17	1.75
K ₂ O	2.06	2.91	2.20	2.98	3.17	2.35	2.36	2.45	2.15	1.90	3.01
Na ₂ O	3.47	3.69	4.11	3.38	3.04	3.17	4.22	3.04	3.79	3.84	3.64
MnO	0.09	0.03	0.06	0.03	0.09	0.11	0.07	0.08	0.08	0.09	0.05
P ₂ O ₅	0.20	0.07	0.10	0.08	0.20	0.26	0.12	0.15	0.17	0.19	0.12
F ₁	-0.54	-1.23	-3.16	-2.47	-2.68	-3.21	-3.32	-3.09	-0.76	-0.68	-3.80
F ₂	-1.61	-0.10	-1.13	-1.37	-3.18	-3.35	-3.11	-3.67	-3.48	-3.55	-2.00
烧失量	3.59	1.42	1.55	1.89	2.75	4.55	2.40	3.37	3.23	3.22	2.79
总计	99.83	99.89	99.83	99.89	99.74	99.80	99.84	99.71	99.82	99.80	99.83

表3 漠河组砂岩微量和稀土元素含量
Table 3 Content of trace and rare elements in Mohe Formation sandstones

样品号	Y	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
Ayq15034	15.3	21.5	50.4	5.29	18.3	3.15	0.79	2.76	0.45	2.66	0.52	1.56	0.25	1.59
Ayq15035	14.3	28.1	56.4	7.15	26	4.26	1.14	3.56	0.52	2.77	0.5	1.46	0.22	1.43
Ayq15038	14.9	23.6	43.9	6.16	22.6	3.88	0.84	3.17	0.49	2.7	0.51	1.48	0.23	1.41
样品号	Lu	ΣREE	LREE/ HREE	δEu	δCe	(La/Yb) _N	(Eu/Eu*) _{ucc}	(La/Yb) _{ucc}	Sc	Co	Rb	Sr	Zr	Nb
Ayq15034	0.26	124.87	9.89	0.80	1.13	9.70	1.16	0.87	4.28	3.33	62.8	161	167	8.64
Ayq15035	0.24	148.03	11.50	0.87	0.95	14.10	1.27	1.27	7.92	7.80	41.7	541	124	7.29
Ayq15038	0.23	126.01	9.88	0.71	0.87	12.01	1.04	1.08	3.32	2.61	85.8	128	117	7.23
样品号	Ba	Hf	Ta	Th	U	Rb/Sr	Th/U							
Ayq15034	646	5.05	0.62	10.6	1.82	0.39	5.81							
Ayq15035	718	3.90	0.47	7.55	1.50	0.08	5.05							
Ayq15038	595	3.59	0.53	7.96	1.38	0.67	5.79							

均 11.93; $(La/Yb)_{ucc} = 0.87 \sim 1.27$, 平均 1.07, $(Eu/Eu^*)_{ucc} = 1.04 \sim 1.27$, 平均 1.16。样品全球平均上地壳(UCC)标准化稀土元素配分曲线整体趋势较平缓,显示弱重稀土元素富集,大部分具负Eu异常,个别显示正Eu异常(图6-c)。这与全球平均上地

壳稀土元素含量相似(Rudnick et al., 2014)。样品微量元素原始地幔标准化蛛网图显示(图6-d):漠河组砂岩富集大离子亲石元素Rb和K,高场强元素Th、Zr、Hf、Y、Yb、Lu和轻稀土元素La、Ce、Sm、Nd;亏损大离子亲石元素Ba和Sr,以及高场强元素

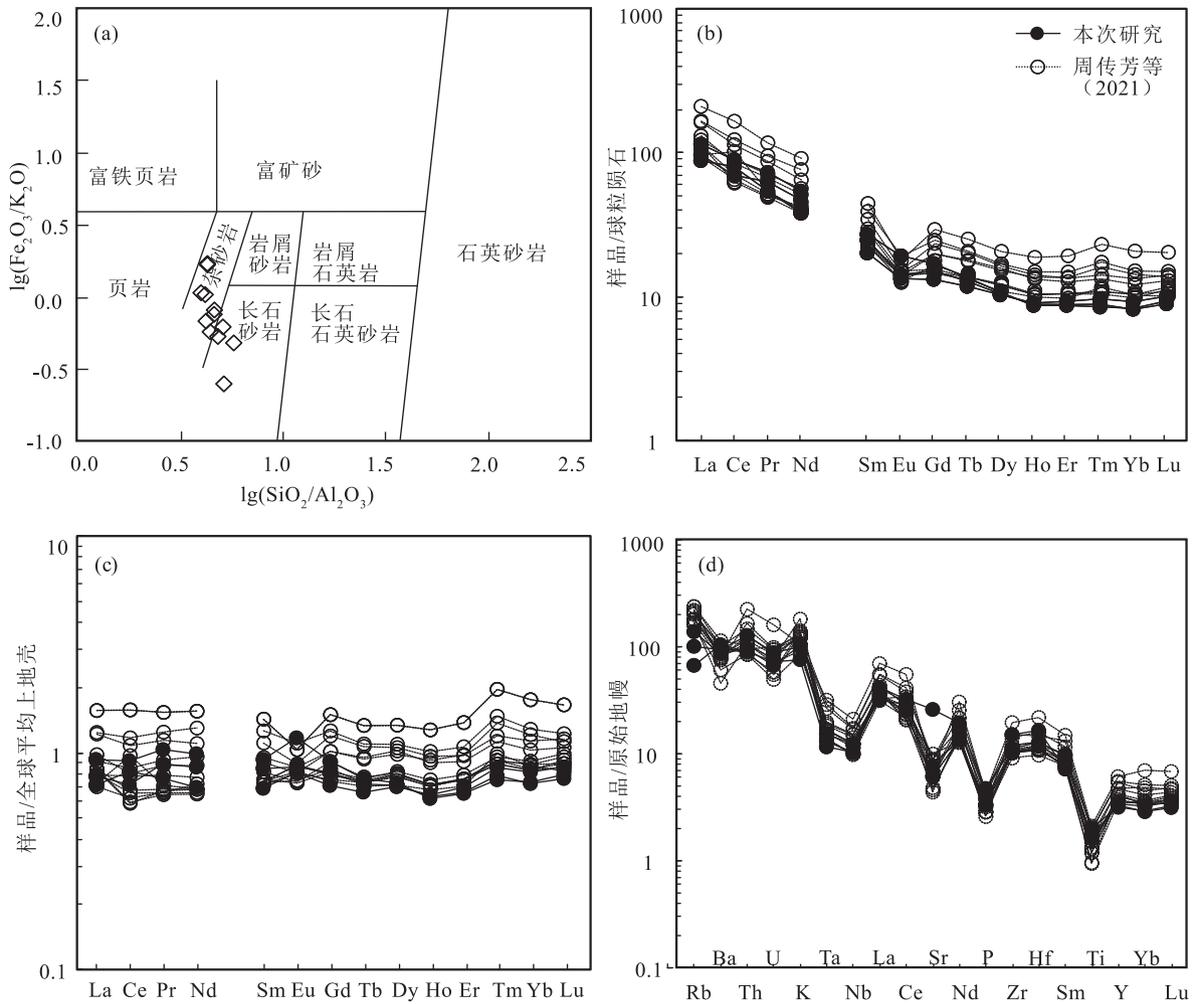


图 6 漠河组砂岩岩石地球化学分类图(a)、稀土元素球粒陨石标准化图解(b)、稀土元素全球平均上地壳标准化图解(c)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(d)
(球粒陨石和原始地幔标准化值及全球平均上地壳标准化值据 Sun et al., 1989)

Fig. 6 Geochemical classification diagrams (a), chondrite-normalized REE diagram(b), UCC-normalized REE diagram (c), and primitive mantle-normalized trace elements diagram (d) of Mohe Formation sandstones

U、Ta、Nb、Ti 和 P。

4.3 碎屑岩特征与母岩类型

9 件样品共鉴定出 16 种矿物(表 4),其中锆石、绿帘石、石榴子石、赤褐铁矿和磁铁矿含量较高,几乎在每个样品中均有出现,其他矿物如金红石、锐钛矿、角闪石等在部分样品中含量较低或不出现。依据对重矿物的初步分析,将本次漠河组砂岩重矿物划分为以下组合(划分方案据王国茹等, 2011;曾方侣等,2020)。稳定矿物组合为二氧化钛矿物(金红石、锐钛矿和白钛矿)、锆石、榍石、电气石、石榴子石和磷灰石,其中,锆石含量为 5.22% ~

41.35%, 平均 14.90%; 电气石含量为 0.00% ~ 0.15%, 平均 0.02%; 金红石含量为 0.00% ~ 6.10%, 平均 0.77%; 锐钛矿含量为 0.00% ~ 0.29%, 平均 0.03%; 白钛矿含量为 0.00% ~ 5.34%, 平均 0.60%; 石榴子石含量为 0.00% ~ 41.11%, 平均 10.80%; 磷灰石含量为 0.00% ~ 5.34%, 平均 1.43%。稳定矿物总量为 8.89% ~ 84.87%, 平均 32.36%; 不稳定矿物组合:绿帘石含量为 0.00% ~ 60.52%, 平均 38.10%; 辉石含量为 0.00% ~ 0.48%, 平均 0.09%, 角闪石含量为 0.00% ~ 6.94%, 平均 0.85%; 指相矿物组合:黄铁矿含量为 0.00% ~ 0.91%, 平均 0.13%, 仅见于 ARZ15010

表4 漠河组砂岩重矿物组成及含量

Table 4 Heavy minerals compositions and proportions in Mohe Formation sandstones

%

样品号	锆石	电气石	金红石	锐钛矿	白钛石	榍石	石榴子石	磷灰石	绿帘石	角闪石	辉石	黄铁矿	赤褐铁矿	方铅矿	钛铁矿	磁铁矿
ARZ15001	7.49	0.00	0.02	0.00	0.02	6.47	11.35	0.56	53.50	0.00	0.48	0.00	9.05	0.00	0.95	0.26
ARZ15002	6.42	0.00	0.02	0.00	0.01	0.76	3.87	0.47	18.22	6.94	0.22	0.00	0.51	0.00	0.01	55.56
ARZ16035	5.22	0.00	0.00	0.00	0.00	1.39	2.28	0.00	58.95	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	11.14	13.32
ARZ16036	6.10	0.00	6.10	0.00	5.34	12.12	3.66	5.34	50.30	0.06	0.00	0.00	0.24	0.00	3.41	3.41
ARZ15009	21.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	1.49	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	64.30	0.00	0.26	0.32
ARZ15010	41.35	0.15	0.47	0.29	0.07	0.15	41.11	1.28	5.25	0.63	0.15	0.25	1.90	0.00	1.27	0.86
ARZ15011	17.57	0.00	0.14	0.00	0.00	0.01	16.74	1.47	48.10	0.00	0.00	0.91	0.23	0.18	0.00	1.99
ARZ16037	10.37	0.00	0.00	0.00	0.00	13.32	0.00	2.10	60.52	0.00	0.00	0.00	0.96	0.00	6.52	0.04
ARZ16001	17.57	0.00	0.14	0.00	0.00	0.00	16.74	1.47	48.10	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	1.99

和 ARZ15011 两个样品中;赤褐铁矿含量为 0.00%~64.30%,平均 8.60%,指示水体富氧的沉积环境;金属热液重矿物组合:方铅矿、钛铁矿、磁铁矿含量为 0.04%~55.56%,平均 8.64%。其中,方铅矿仅在 ARZ15011 中出现。钛铁矿在除 ARZ15011 外其他样品中均有出现,含量为 0.00%~11.14%,平均 2.62%;磁铁矿在每个样品中均有出现,含量为 0.04%~55.56%,平均 8.64%。

5 讨论

5.1 源区风化沉积特征

沉积物的粒度往往可以反映源区岩石的风化程度,碎屑沉积物粒度较小且较多的粘土含量通常反映源区母岩遭受强烈风化,反之亦然(Cullers et al., 1988;Cox et al., 1995)。根据砂岩地球化学分类图解(Herron, 1988)(图 6-a),本文样品点落在杂砂岩和长石砂岩范围,与野外和镜下观察结果一致。研究区岩石类型反映,源区岩石未经过充分搬运,磨圆度和分选性较低,显示近源搬运特征。岩石的 Fe_2O_3/K_2O 值能够反映风化作用过程中镁铁矿物的稳定度(Herron, 1988)。漠河组砂岩的 Fe_2O_3/K_2O 值(1.72~0.49,平均 0.91)较高,反映镁铁矿物在搬运沉积成岩过程中经历了较弱的风化和淋滤,暗示漠河组碎屑物质具有近源沉积特征。在 A-CN-K 图解(图 7-a)上,理想情况下风化作用会向箭头方向进行,但实际上漠河组沉积物风化趋势为沿虚线变化。因此,漠河组碎屑沉积岩可能来自英

云闪长岩和花岗闪长岩。

化学蚀变指数(CIA, chemical index of alteration)可以有效指示源区母岩的风化程度(Nesbitt et al., 1982),成分变化指数(ICV, index of compositional variability)可以有效指示沉积再循环作用对沉积物的改造程度。粘土矿物中 Al_2O_3 含量较高,具有较低的 ICV 值和高成熟度,较低的 ICV 值反映较强风化作(Goldich, 1938;Cox et al., 1995)。本次样品的 CIA 值为 50.35~60.37(平均 53.50),ICV 值为 0.91~1.79(平均 1.40),反映岩石具有较低的粘土含量,指示母岩经历了较弱的化学风化作用(图 7-b)。全岩微量元素 Th/U 值会随风化作用增强而增加,可有效反映岩石遭受的风化作用特征(McLennan et al., 1980),样品 Th/U 值为 5.05~5.81,平均 5.55,高于上地壳 3.8(图 7-c),指示源区母岩经历了较弱—中等程度风化;Rb/Sr 值可以有效反映母岩经历风化和后期成岩作用,Rb⁺相比 Sr²⁺具有较大的离子半径,在风化作用过程中更容易保留在矿物中(McLennan et al., 1993),样品的 Rb/Sr 值变化较小(0.08~0.67),反映母岩经历了较弱的风化作用。综上所述,漠河组源区母岩遭受了较弱的风化作用。

5.2 形成时代

漠河组形成时代一直存在争议。漠河组下伏二十二站组碎屑锆石最小年龄(134±1 Ma),以及绣峰组岩浆锆石蒸发年龄(354~164 Ma)、全岩 Rb-Sr 等时线年龄(177~191 Ma)和黑云母 Ar-Ar 年龄

(171~175 Ma) 表明,漠河组沉积时代应为早白垩世(李锦轶等,2004;王远超等,2020);而根据下伏

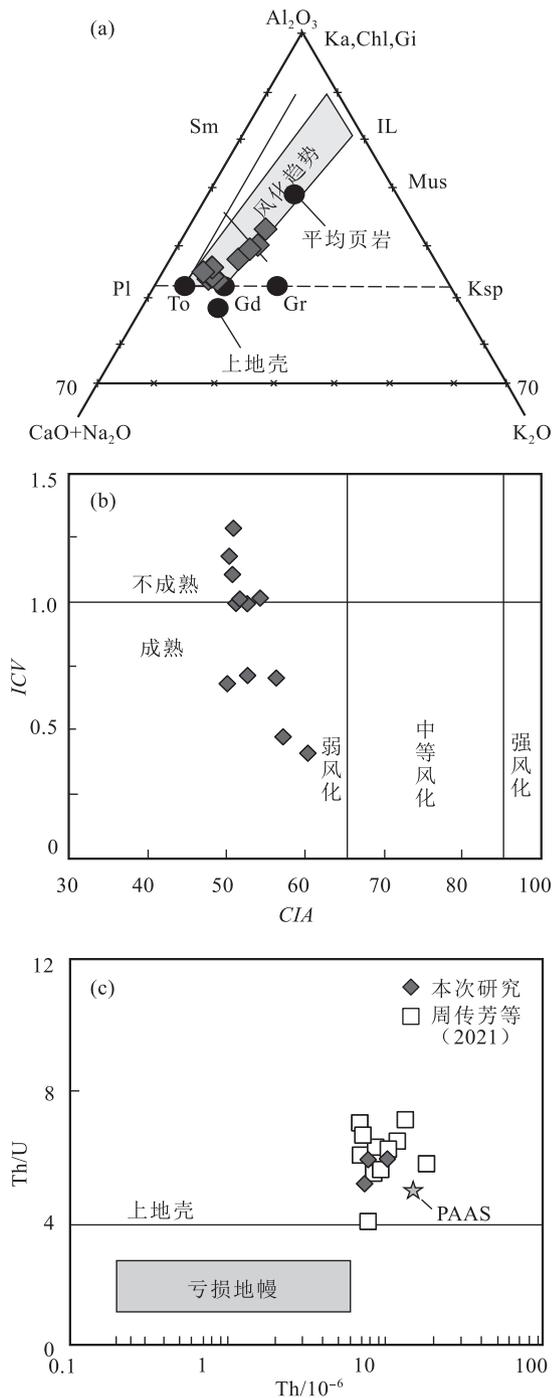


图 7 漠河组砂岩风化特征图解

Fig. 7 Weathering characteristics diagrams of Mohe Formation sandstones

a—A-CN-K 图解(Nesbitt et al., 1982); b—CIA-ICV 图解(Nesbitt et al., 1982); c—Th-Th/U (McLennan et al., 1993); Gr—花岗岩; To—英云闪长岩; Gd—花岗闪长岩; PAAS—澳大利亚后太古宙平均页岩; 上地壳和平均页岩数据据 Condie(1993)

二十二站组流纹质凝灰岩岩浆锆石年龄加权平均值和碎屑锆石最小年龄推断,漠河组沉积时代应为晚侏罗世(赵立国等,2014;李良等,2017);漠河组内顺层侵入的糜棱岩化微晶黑云母石英闪长岩锆石和组内古植物 *Phoenicopsis* 属反映,漠河组碎屑物在早侏罗世晚期—中侏罗世期间沉积(赵书跃等,2016);漠河盆地碎屑锆石最小年龄和孢粉证据指示,漠河组沉积时代为中侏罗世(王少轶等,2015;肖传桃等,2015;肖云鹏等,2018)。

中国科学院南京地质古生物研究所对本次漠河组中采集的古植物化石印痕标本鉴定结果为,该植物组合是由 3 种真蕨类的 *Coniopteris cf. arctica* (*Prynata*) *Samyliina*, *Onychiopsis elongate* 和 *Sphenopteris boliensis*, 1 种苏铁类的 *Nilssonia cf. sinensis*, 1 个化石果 *Carpolithus sp.* 共 5 个属组成(图 8)。在该组合中,部分属种在整个中生代都可见,如 *Carpolithus sp.*。苏铁类的中国尼尔桑(*Nilssonia cf. sinensis*) 常见于东北地区早白垩世沉积岩中(沈阳地质矿产研究所,1980)。3 种真蕨类主要见于东北地区的早—中侏罗世沉积岩中(斯行健等,1962)。本次漠河组 2 件砂岩样品 108 颗碎屑锆石,大部分具有岩浆锆石典型的振荡环带(图 4;表 1)且 $Th/U > 0.4$ (Belousova et al., 1998; Rubatto et al., 2000; Hermann et al., 2001; Corfu et al., 2003; Tomaschek et al., 2003; 吴元保等,2004;李亚萍等,2007)。捕获最小年龄为 156 ± 3 Ma(表 1),与前人获得的漠河组最小碎屑年龄一致(157 ± 2 Ma,周传芳等,2021)。综合分析认为,漠河组沉积时代上限为晚侏罗世。

5.3 物源分析

碎屑物源有来自盆地南部额尔古纳地块中的变质岩、中酸性火成岩、沉积岩(和钟铎等,2008a,b;侯伟等,2010a,b;王少轶等,2015),以及主要来自北侧造山带的酸性火山岩和部分南侧大陆内部的沉积岩(和政军等,2003) 2 种观点。鉴于漠河组沉积岩经历了较弱的风化过程,其化学组分和性质取决于源区母岩的组分,故对沉积物的化学分析能够有效地反映源区母岩的信息。

岩石稀土元素特征可以有效指示母岩特征(刘俊海等,2003)。岩石母岩为基性岩,其稀土元素具有低的 LREE/HREE 值,且无 Eu 异常。而源于长英质的岩石,其稀土元素具有较高的 LREE/HREE 值和明显的负 Eu 异常(王远超等,2020)。漠河组

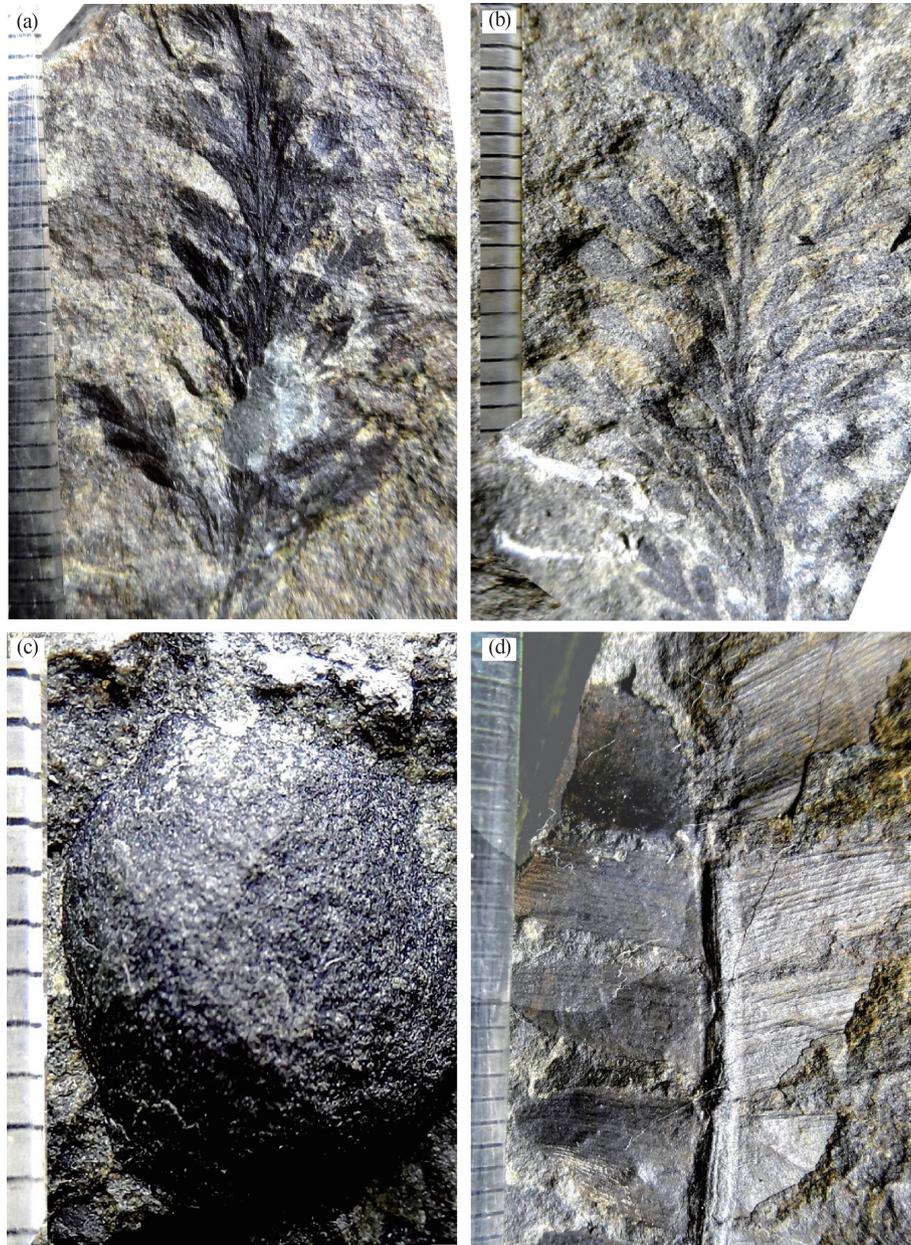


图8 漠河组典型古植物化石

Fig. 8 Typical paleoplant fossils of Mohe Formation

a—*Onychiopsis elongate* (Geyler) Yokayama; b—*Sphenopteris boliensis* Zheng et Zhang;
c—*Carpolithus* sp.; d—*Nilssonia* cf. *sinensis* Yabe et Oishi

砂岩具有较高的 LREE/HREE 值(9.88~11.50, 平均 10.42), 以及明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu} = 0.71 \sim 0.87$, 平均 0.79, 图 6-b), 指示其源岩主要来自上地壳; 在全球平均上地壳标准化图解(图 6-c)中, 漠河组砂岩标准化稀土元素配分曲线较平缓, 部分显示出正 Eu 异常, 反映漠河组碎屑物物源不仅有上地

壳成分, 还可能有下地壳或地幔成分的加入; 在 F_1-F_2 物源分析图解(图 9-a)上, 漠河组岩石样品点主要落入 P4 区(古老沉积体系或克拉通/再旋回造山带的长英质沉积岩物源区), 表明长英质沉积岩物源区为漠河组沉积物的重要供给; 岛弧火山岩 Th/U 值为 2.5~3, 沉积岩为 4.5, 再旋回沉积岩为

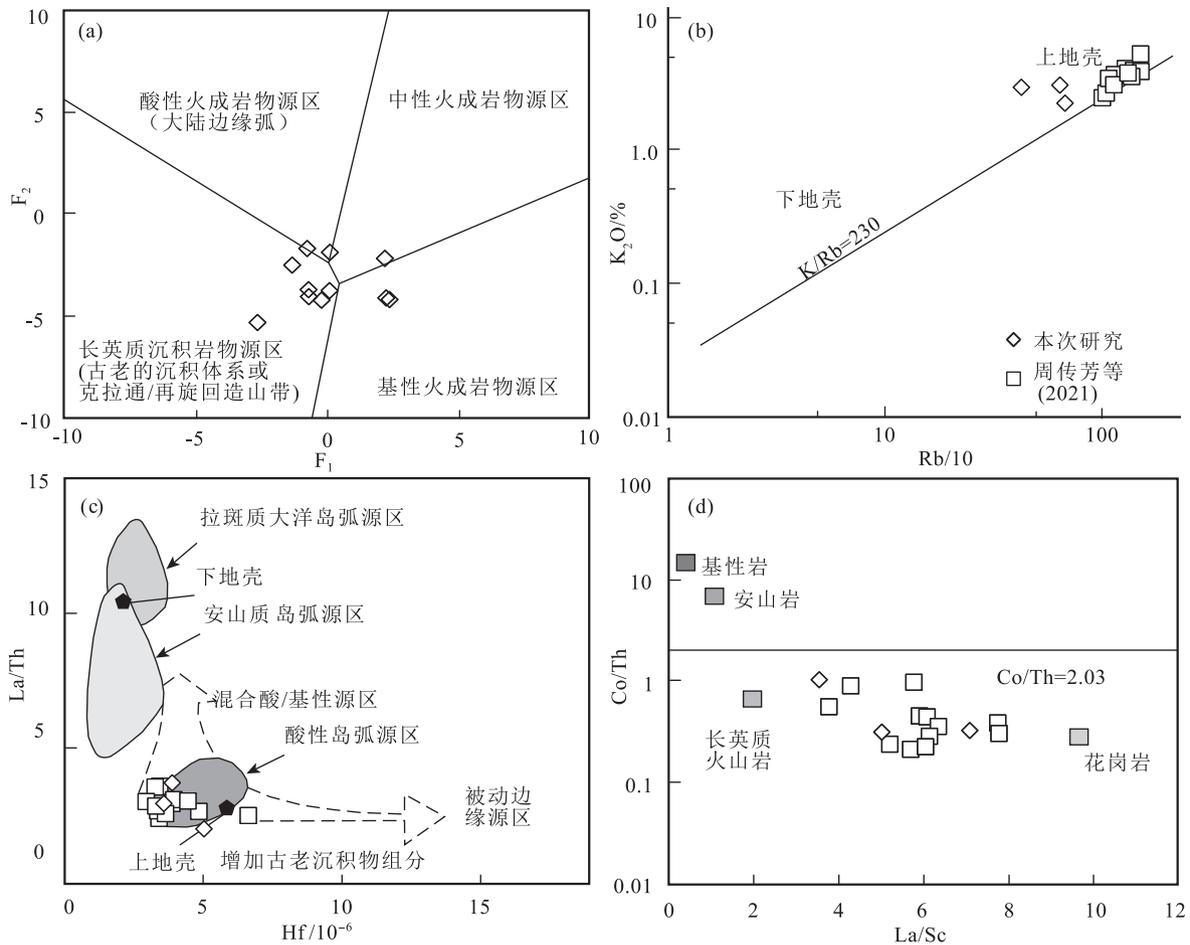


图 9 漠河组砂岩源区物质组成图解

Fig. 9 Diagrams of provenance material compositions for Mohe Formation sandstones

a— F_1 - F_2 判别图解 (Rosser et al., 1988); b— K_2O -Rb 判别图解 (Floyd et al., 1987); c—Hf-La/Th 判别图解 (Floyd et al., 1987);

d—La/Sc-Co/Th 判别图解 (杨雪等, 2020; 火山岩平均组分据 Condie, 1993)

6 (Bhatia et al., 1981)。漠河组砂岩 Th/U 值为 5.05~5.81, 平均 5.55, 表明漠河组沉积岩源岩介于沉积岩和火山碎屑岩之间; 在 Rb- K_2O 图解 (图 9-b) 上, 样品点落入上地壳区域, 与稀土元素指示结果一致; La、Th 和 Hf 不活泼, 在风化和成岩作用过程中不易分馏, 能有效指示源区特征 (Floyd et al., 1987), 样品点主要落入酸性岛弧区 (图 9-c), 反映物源为岛弧地区的酸性岩浆岩; Cr/Zr 值可以有效指示基性岩和酸性岩对沉积物源的贡献, 重矿物中铬铁矿和锆石的相对含量也可以反映 Cr/Zr 值的相对大小 (Wronkiewicz et al., 1989), 样品中 Cr/Zr 值为 0.12~0.34, 平均 0.19, 远低于 1, 反映漠河组沉积岩的物源组分很大程度上来自酸性岩; La/Sc-Co/Th 值可以指示物源成分, 漠河组沉积岩 Co/Th

值为 0.31~1.03, 平均 0.55, 介于长英质火成岩和花岗岩之间 (图 9-d)。

近年, 利用碎屑锆石年代学 (碎屑锆石年龄谱线揭示岩石源区特征) 进行物源分析在全球范围内得到了广泛应用 (Moecher et al., 2006)。漠河组碎屑锆石年龄反映, 沉积物主要形成于 3 个时期: ① 156~242 Ma ($n=48$), 主要发育漠河富源沟林场二长花岗岩 (202±1 Ma) (胡军海等, 2018), 壮志林场糜棱岩化花岗岩绢云母 Ar-Ar 韧性变形 (151.5±1.2 Ma) (杜兵盈等, 2019), 大兴安岭北部塔木兰沟组中的中基性火山岩 (于跃江等, 2019), 北大关地区流纹岩 (185~190 Ma) (李研等, 2017), 这些火成岩可能形成于蒙古-鄂霍茨克洋向额尔古纳地块俯冲的背景环境 (Wu et al., 2011); ② 311~480 Ma ($n=$

56),主要发育塔河岩体正长花岗岩(480 ± 4 Ma)(葛文春等,2005),查拉班河岩体斑状黑云母二长花岗岩(481 ± 3 Ma)(结晶年龄),片麻岩中粒黑云母花岗闪长岩(475 ± 2 Ma)(结晶年龄),细粒角闪黑云母花岗闪长岩(465 ± 1 Ma)(结晶年龄),斑状黑云母花岗闪长岩(460 ± 1 Ma)(结晶年龄)(葛文春等,2007),大兴安岭北段漠河地区黑云母二长花岗岩(481 ± 5 Ma)(早奥陶世)(吴琼等,2019),这些岩石均处于早加里东期后造山阶段,额尔古纳地块与西伯利亚板块拼合造山后的伸展背景(吴琼等,2019);③1841~2462 Ma($n=4$,古元古代),额尔古纳地块内发育大量古生代花岗岩和中生代火山岩,绿片岩相-低角山岩相兴华渡口群变质岩和少量新元古代花岗岩构成该地块的结晶基底(表尚虎等,2012)。目前,兴华渡口群的形成年龄为新元古代,2500 Ma、2200 Ma和1800 Ma碎屑锆石年龄峰值反映其母岩区存在新太古代-古元古代古老结晶基底(武广,2006;苗来成等,2007;表尚虎等,2012)。本次研究的漠河组碎屑锆石1841 \pm 50 Ma、1888 \pm 27 Ma、1925 \pm 50 Ma和2462 \pm 29 Ma,以及下伏二十二站组发现的最古老碎屑锆石年龄2711 \pm 10 Ma(王远超等,2020)也都支持额尔古纳地块存在新太古代-古元古代结晶基底。将漠河组显生宙碎屑锆石年龄数据分布与额尔古纳地块侵入岩年龄统计对比,在260 Ma以前二者具有相似的年龄峰值,但260 Ma之后存在偏差,指示漠河组物源部分来自盆地南部额尔古纳地块中酸性侵入岩(图10)。

砂岩重矿物组成特征能够很好地指示母岩信息,但其含量和种类受母岩类型、风化搬运、沉积成岩等作用影响,单一重矿物不能准确反映源区信息,因此重矿物组合分析近年得到了广泛应用(Morton et al., 1994; Garzanti et al., 2012; 2013; 蔡芑睿等,2019)。不同母岩类型具有不同的重矿物组合(曾方倡等,2020)。各样品中因含有大量不稳定矿物(绿帘石)、指相矿物(赤/褐铁矿)和金属热液矿物(磁铁矿和钛铁矿),使稳定矿物含量较低。该区较低的稳定重矿物含量说明离物源区较近(表5)。根据重矿物分析结果(表4),可以认识到:①漠河组砂岩重矿物中少量的辉石、磁铁矿和钛铁矿反映母岩具有基性岩特征,且少量基性岩碎屑补充到沉积物中;②反映变质母岩特征的绿帘石、石榴子石等矿物在漠河组砂岩重矿物中占有较高的比例,

指示源区变质岩碎屑参与到漠河组沉积物的比重较大;③榍石、磷灰石、金红石等是中酸性岩浆岩的特征重矿物,它们在漠河组砂岩重矿物中占有一定比例,指示中酸性岩浆岩碎屑对漠河组沉积物有一定参与;④白钛石、金红石、锆石和赤褐铁是沉积岩的特征重矿物,较高的含量反映沉积岩碎屑对漠河组沉积物贡献较大。

重矿物组合 ATi 指数用于判断风化程度和指示中酸性岩浆岩物源参与程度, GZi 指数指示源区为角山岩或麻粒岩等变质岩的存在, ZTR 指数反映重矿物的成熟度及搬运距离(刘易斯,1989)。漠河组砂岩重矿物组合 ATi 指数较高,为 89.51~100.00(平均 98.69),反映源区中酸性岩浆岩加入程度较大; GZi 指数为 39.76~100.00(平均 64.50),反映源区存在变质岩组分; ZTR 指数为 7.69~81.76(平均 25.26),反映漠河组重矿物成熟度较低,具有近源沉积特征(表5)。

综上所述,漠河组碎屑沉积岩母岩主要为以绿帘石+石榴子石为代表的变质岩和以白钛石+金红石+锆石(次圆状)+赤褐铁矿为代表的沉积岩,部分以榍石+磷灰石+金红石为代表的中酸性岩浆岩夹少量以辉石+钛铁矿+磁铁矿为代表的基性岩浆岩

表5 漠河组砂岩重矿物特征指数

Table 5 Heavy minerals characteristic index in Mohe Formation sandstones

样品号	ATi	GZi	ZTR	稳定矿物	不稳定矿物	指相矿物	热液金属矿物
ARZ15001	100.00	39.76	9.01	25.95	53.98	9.05	1.21
ARZ15002	100.00	62.39	17.12	11.58	25.38	0.51	55.57
ARZ16035	-	69.60	7.69	8.89	58.98	0.00	24.46
ARZ16036	100.00	62.50	13.70	50.10	50.36	0.24	6.82
ARZ15009	100.00	93.65	81.76	23.71	0.00	64.30	0.58
ARZ15010	89.51	50.15	45.85	85.70	6.03	2.15	2.13
ARZ15011	100.00	51.21	20.09	36.07	48.10	1.14	2.17
ARZ16037	100.00	100.00	12.01	25.79	60.52	0.96	6.56
ARZ16001	100.00	51.21	20.09	36.06	48.10	0.23	1.99
最大值	100.00	100.00	81.76	85.70	60.52	64.30	55.57
最小值	89.51	39.76	7.69	8.89	0.00	0.00	0.58
平均值	98.69	64.50	25.26	33.76	39.05	8.73	11.28

注:“-”指 ATi 指数=(100 * 磷灰石/(磷灰石+电气石)),分母中电气石和磷灰石均为“0”无法计算

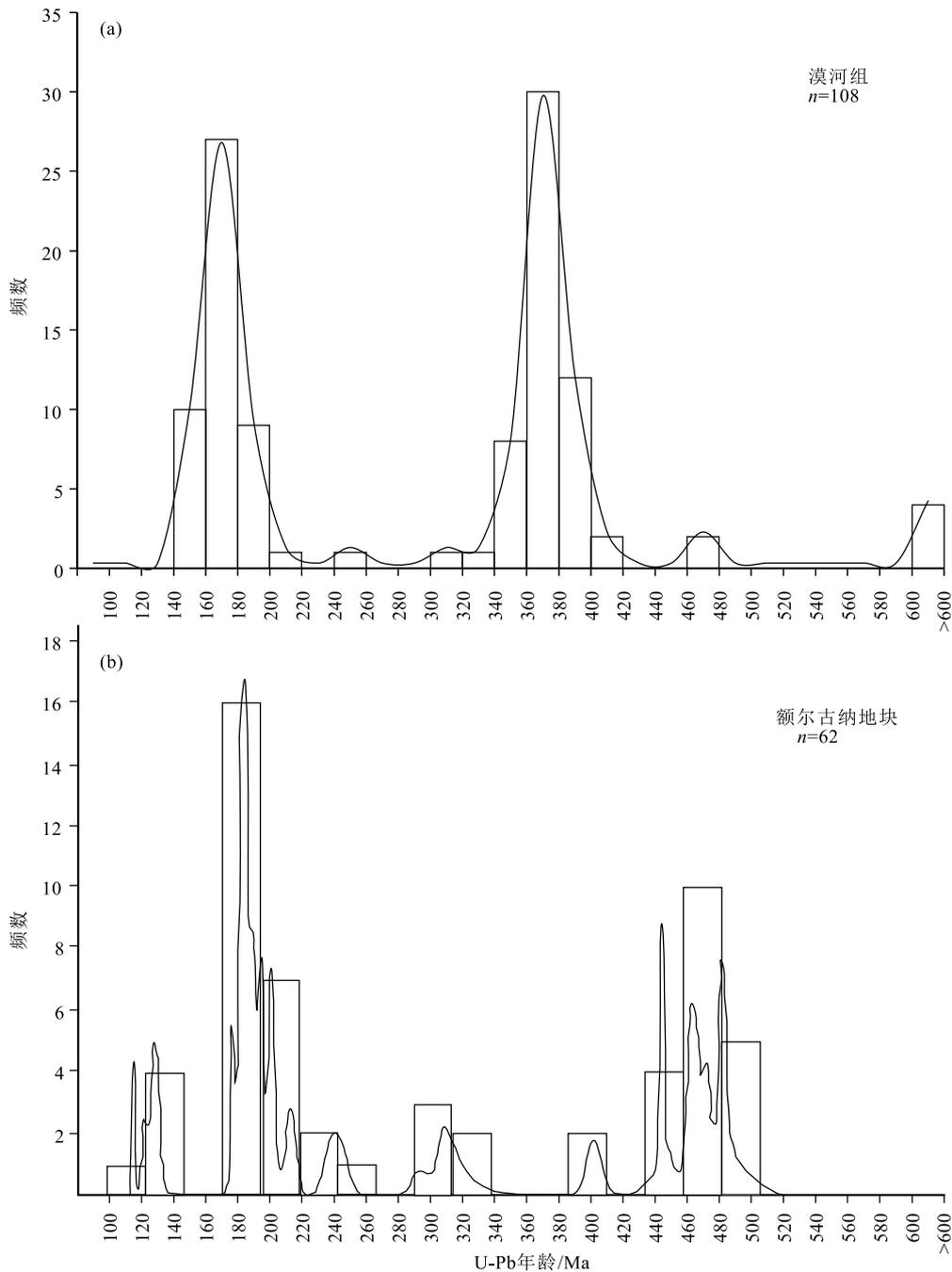


图 10 漠河组碎屑锆石与额尔古纳地块显生宙岩浆锆石 U-Pb 年龄对比

Fig. 10 Comparison between the U-Pb ages of detrital zircons from the Mohe Formation, and magmatic zircons from the Erguna block

a—漠河组碎屑锆石年龄频谱图;b—额尔古纳地块显生宙岩浆锆石年龄频谱图(数据据 Wu et al., 2011)

组成的混合岩。与区域岩石对比,变质岩可能为兴华渡口群和兴隆群(黑龙江省地质矿产局,1993;孙广瑞等,2002);中酸性岩可能为一系列产于额尔古纳地块北缘、早—中新生代及古生代同碰撞和后碰撞背景的花岗质岩石(葛文春等,2005;武广等,

2005);源区基性岩很可能为早古生代后碰撞的辉长岩(葛文春等,2005)。

5.4 大地构造背景

构造环境和物源特征对碎屑沉积中元素在表生环境下的地球化学行为有强烈影响,“解读”保存

在沉积物中的元素化学信息有助于恢复大地构造性质和碎屑物源(Bhatia, 1983; Roser et al., 1988; 和政军等, 2003)。漠河组砂岩在主要元素 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 和 $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ 构造判别图解(Bhatia, 1983; Roser et al., 1986)(图 11-a~c)上, 主要集中在活动陆缘和大陆岛弧区。稀土元素和 Th 在风化和沉积成岩过程中具有低溶解度特征, 可以有效识别源区。弧缘杂砂岩具有低 $\text{La} = (9.2 \pm 1.7) \times 10^{-6}$ 、 $\text{Th} = (1.4 \pm 0.6) \times 10^{-6}$ 、 $\text{U} = (0.52 \pm 0.2) \times 10^{-6}$ 和 $\text{Hf} = (2.1 \pm 0.6) \times 10^{-6}$ 特征, 大陆裂谷缘和陆缘盆地具有高 $\text{La} = (39 \pm 9.9) \times 10^{-6}$ 、 $\text{Th} = (16 \pm 0.6) \times 10^{-6}$ 、 $\text{U} = (3.40 \pm 0.5) \times 10^{-6}$ 和 $\text{Hf} = 7.9 \times 10^{-6}$ 特征, 而弧间

盆地沉积岩中的这些元素含量特征介于弧缘和陆缘之间(Bhatia et al., 1981)。漠河组样品 4 种元素平均值为 $\text{La} = 24.40 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Th} = 8.69 \times 10^{-6}$ 、 $\text{U} = 1.56 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Hf} = 4.18 \times 10^{-6}$ (表 3), 均介于陆缘和弧缘之间。一些迁移能力较弱的微量元素, 如 La、Th、Zr、Nb、Y 和 Sc, 可以有效识别砂岩的源区、反映大陆边缘或大洋盆地的性质(Bhatia et al., 1986)。漠河组砂岩样品在 La-Th-Sc 判别图解(图 11-d)中主要落入主动/被动陆缘区。此外, 将漠河组砂岩稀土元素特征值与不同构造背景下的沉积盆地杂砂岩稀土元素特征值对比(Bhatia, 1985), 漠河组砂岩稀土元素特征与活动大陆边缘和大陆岛弧背景相似(表 6)。综合岩石地球化学特征和各类判别图解, 漠河组物源区的

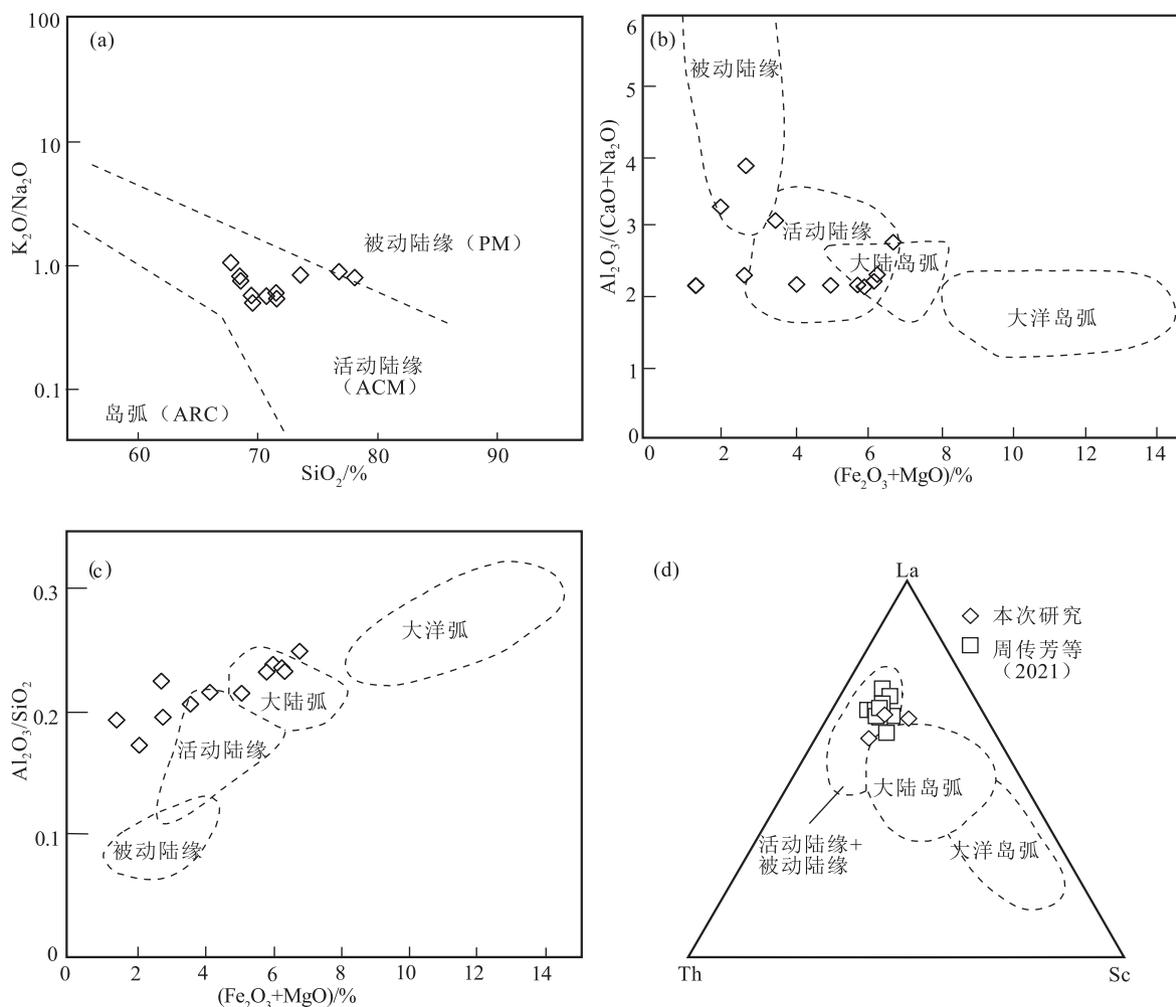


图 11 漠河组砂岩源区构造环境判别图解

Fig. 11 Tectonic setting discrimination diagrams for the provenance of Mohe Formation sandstones
 a— $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 判别图解 (Roser et al., 1986); b— $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})$ 判别图解 (Bhatia, 1983);
 c— $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}) - \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ 判别图解 (Bhatia, 1983); d—La-Th-Sc 判别图解 (Bhatia et al., 1986)

表 6 不同构造背景下砂岩稀土元素特征

构造背景	La /10 ⁻⁶	Ce /10 ⁻⁶	ΣREE /10 ⁻⁶	La/Yb	(La/Yb) _N	ΣLREE/ ΣHREE	Eu/Eu*	数据来源
海洋岛弧	8±1.7	19±3.7	58±10	4.2±1.3	2.8±0.9	3.8±0.9	1.04±0.11	Bhatia, 1985
大陆岛弧	27±4.5	59±8.2	146±20	11±3.6	7.5±2.5	7.7±1.7	0.79±0.13	
活动大陆边缘	37	78	186	12.5	8.5	9.1	0.6	
被动大陆边缘	39	85	210	15.9	10.8	8.5	0.56	
研究区	24.40	50.23	132.97	16.64	11.93	10.42	0.79	本次研究

构造背景为活动大陆边缘和大陆岛弧环境。

6 结 论

(1) 漠河盆地塔河地区漠河组砂岩碎屑锆石以岩浆锆石为主, 少部分为变质锆石。碎屑锆石最小年龄为 156±3 Ma, 结合古植物化石时代特征, 限定漠河组形成时代为晚侏罗世。

(2) 漠河组源区母岩经历了较弱程度的风化作用, 且为近源沉积。

(3) 漠河组沉积物母岩主要为中酸性岩浆岩、变质岩, 少部分沉积岩和基性岩; 源区变质岩可能为兴华渡口群和兴隆群, 额尔古纳地块北缘的早—中新生代及古生代同碰撞和后碰撞中酸性火成岩可能为盆地中酸性物源, 源区基性岩很可能为早古生代后碰撞辉长岩。

(4) 漠河组物源区大地构造背景为活动大陆边缘和大陆岛弧。

致谢: 在野外工作期间得到原武警黄金第三支队李向文总工程师和杨吉波高级工程师的大力支持和悉心指导, 在文章撰写期间得到中国地质大学(北京)孙思辰博士的帮助, 在此一并感谢。

参考文献

Belousova E A, Griffin W L, Pearson N J. Trace element composition and cathodoluminescence properties of southern African kimberlitic zircons[J]. Mineralogical Magazine, 1998, 62(3): 355-366.

Bhatia M R, Taylor S R. Trace element geochemistry and sedimentary provinces: A study from the Tasman Geosyncline, Australia[J]. Chemical Geology, 1981, 33(1/4): 115-125.

Bhatia M R. Rare earth element geochemistry of Australian Paleozoic graywackes and mudrocks: Provenance and tectonic control [J]. Sedimentary Geology, 1985, 45(1/2): 97-113.

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.

Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. The Journal of Geology, 1983, (91): 611-627.

Cawood P A, Nemchin A A. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia [J]. Sedimentary Geology, 2000, 134(3/4): 209-234.

Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, et al. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale[J]. Journal of the Geological Society, 1992, 149(2): 171-184.

Corfu F, Hancher J M, Hoskin P W O, et al. Atlas of Zircon Textures[J]. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 2003, 53(1): 469-500.

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.

Condie K C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales[J]. Chemical Geology, 1993, 104(1/4): 1-37.

Cullers R L, Basu A, Suttner L J. Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, U.S.A. [J]. Chemical Geology, 1988, 70(4): 335-348.

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.

Garzanti E, Resentini A, Vezzoli G, et al. Forward compositional modelling of Alpine orogenic sediments [J]. Sedimentary Geology, 2012, 280(4): 149-164.

Garzanti E, Vermeesch P, Andò S, et al. Provenance and recycling of Arabian desert sand [J]. Earth-Science Reviews, 2013, 120(1): 1-19.

Goldich S S. A study in Rock-Weathering [J]. The Journal of Geology, 1938, 46: 17-58.

Hermann J, Rubatto D, Korsakov A, et al. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan) [J]. Contributions to Mineralogy & Petrology, 2001, 141(1): 66-82.

- Herron M M. Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1988, 58(5): 820-829.
- Liang Q, Jing H, Gregoire D C. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Talanta*, 2000, 51(3): 507-513.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an Internal Standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- Ludwig K R. Isoplot/Ex Version 3.0: a Geochronological toolkit for microsoft excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center (Special Publication), 2003: 1-70.
- McLennan, S M, Taylor S R. Th and U in Sedimentary Rocks: Crustal Evolution and Sedimentary Recycling[J]. *Nature*, 1980, 285 (5767): 621-624.
- McLennan S M, Hemming S R, McDaniel D K, et al. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 1993, 284: 21-40.
- Moecher D P, Samson S D. Differential zircon fertility of source terranes and natural bias in the detrital zircon record: Implications for sedimentary provenance analysis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 247(3): 252-266.
- Morton A C, Hallsworth C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones [J]. *Sedimentary Geology*, 1994, 90(3/4): 241-256.
- Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. *Nature*, 1982, 299 (5885): 715-717.
- Rubatto D, Gebauer D. Use of Cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by Ion microprobe: some examples from the Western Alps[M]. Berlin Heidelberg, Springer, 2000: 373-400.
- 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.
- Roser B P, Korsch R J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O Ratio[J]. *The Journal of Geology*, 1986, 94(5): 635-650.
- Rudnick R, Gao S. Composition of the Continental Crust[J]. *Treatise on Geochemistry*, 2014, 4: 1-51.
- Sircombe K N. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1/4): 47-67.
- Sun M D. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42(1): 313-345.
- Tomaschek F, Kennedy A K, Villa I M, et al. Zircons from Syros, Cyclades, Greece-Recrystallization and Mobilization of Zircon During High-Pressure Metamorphism [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44 (11): 1977-2002.
- Wronkiewicz D J, Condie K C. Geochemistry and provenance of sediments from the Pongola supergroup, South Africa: Evidence for a 3.0-Ga-old continental craton[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(7): 1537-1549.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41(1): 1-30.
- 表尚虎, 郑卫政, 周兴福. 大兴安岭北部锆石 U-Pb 年龄对额尔古纳地块构造归属的制约[J]. *地质学报*, 2012, 86(8): 1262-1272.
- 蔡芑睿, 王涛, 王宗起, 等. 大兴安岭中段乐平统一中三叠统沉积物源分析: 来自重矿物组合及碎屑锆石年代学证据[J]. *岩石学报*, 2019, 35(11): 285-300.
- 杜兵盈, 张昱, 刘宇崑, 等. 大兴安岭北部壮志林场花岗岩年代学特征及其大地构造意义[J]. *地质学报*, 2019, 93(12): 71-84.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 等. 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[J]. *科学通报*, 2005, 12(50): 1239-1247.
- 葛文春, 隋振民, 吴福元, 等. 大兴安岭东北部早古生代花岗岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2): 423-440.
- 和政军, 李锦轶, 莫申国, 等. 漠河前陆盆地砂岩岩石地球化学的构造背景和物源区分析[J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, (12): 1219-1226.
- 和钟铎, 刘招君, 郭宏伟, 等. 漠河盆地中侏罗世沉积源区分析及地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008a, (3): 50-56.
- 和钟铎, 王玉芬, 侯伟. 漠河盆地中侏罗统砂岩地球化学特征及物源属性分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2008b, (4): 95-102.
- 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993: 6-50.
- 侯伟, 刘招君, 何玉平, 等. 漠河盆地上侏罗统物源分析及其地质意义[J]. *地质论评*, 2010a, 56(1): 71-81.
- 侯伟, 刘招君, 何玉平, 等. 漠河盆地上侏罗统沉积特征与构造背景[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010b, (2): 63-74.
- 胡军海, 杨华本, 周传芳, 等. 大兴安岭北段漠河富源沟林场早侏罗世花岗岩年代学、地球化学特征及构造意义[J]. *地质与资源*, 2018, 27(3): 224-234, 278.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 等. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. *矿物学报*, 2009, 29(S1): 600-601.
- 李锦轶, 和政军, 莫申国. 大兴安岭北部绣峰组下部砾岩的形成时代及其大地构造意义[J]. *地质通报*, 2004, 23(2): 120-129.
- 李亚萍, 李锦轶, 孙桂华, 等. 准噶尔盆地基底的探讨: 来自原泥盆纪卡拉麦里组砂岩碎屑锆石的证据[J]. *岩石学报*, 2007, 23(7): 19-32.
- 李良, 孙丰月, 李碧乐, 等. 漠河盆地二十二站组砂岩形成时代及物源区构造环境判别[J]. *地球科学*, 2017, 42(1): 35-52.
- 李研, 王建, 韩志滨, 等. 大兴安岭北段八大关地区早侏罗世流纹岩锆石 U-Pb 定年与岩石成因[J]. *中国地质*, 2017, 44(2): 346-357.
- 刘俊海, 杨香华, 于水, 等. 东海盆地丽水凹陷古新统沉积岩的稀土元素地球化学特征[J]. *现代地质*, 2003, 17(4): 421-427.
- 刘易斯. 实用岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1989.
- 苗来成, 刘敦一, 张福勤, 等. 大兴安岭韩家园子和新林地区兴华渡口群和扎兰屯群锆石 SHRIMP U-Pb 年龄[J]. *科学通报*, 2007, 52(5):

- 591-591.
- 沈阳地质矿产研究所. 东北地区古生物图册 [M]. 北京: 地质出版社, 1980.
- 斯行健, 周志炎. 中国中生代陆相地层 [M]. 北京: 科学出版社, 1962.
- 孙广瑞, 李仰春, 张昱. 额尔古纳地块基底地质构造 [J]. 地质与资源, 2002, (11): 129-139.
- 王国茹, 陈洪德, 朱志军, 等. 川东南—湘西地区志留系小河坝组砂岩中重矿物特征及地质意义 [J]. 成都理工大学学报 (自然科学版), 2011, 38(1): 7-14.
- 王少轶, 许虹, 杨晓平, 等. 大兴安岭北部中侏罗统漠河组砂岩 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄: 对漠河盆地源区的制约 [J]. 中国地质, 2015, (5): 1293-1302.
- 王远超, 赵元艺, 刘春花, 等. 漠河盆地二十二站组砂岩年代学、地球化学及其地质意义 [J]. 地质学报, 2020, 94(3): 209-233.
- 武广. 大兴安岭北部区域成矿背景与有色、贵金属矿床成矿作用 [D]. 吉林大学博士学位论文, 2006.
- 武广, 孙丰月, 赵财胜, 等. 额尔古纳地块北缘早古生代后碰撞花岗岩的发现及其地质意义 [J]. 科学通报, 2005, (50): 2278-2288.
- 吴河勇, 杨建国, 黄清华, 等. 漠河盆地中生代地层层序及时代 [J]. 地层学杂志, 2003, (3): 31-36.
- 吴琼, 丰成友, 瞿泓滢, 等. 大兴安岭北部漠河地区早奥陶世 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学及 Hf 同位素研究 [J]. 地质学报, 2019, 93(2): 368-380.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约 [J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589-1604.
- 肖传桃, 叶明, 文志刚, 等. 漠河盆地额木尔河群古植物群研究 [J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 299-309.
- 肖云鹏, 文志刚, 赵省民, 等. 漠河盆地额木尔河群岩石地层划分与对比 [J]. 能源与环保, 2018, 40(10): 107-112.
- 杨雪, 张玉芝, 崔翔, 等. 湘东北新元古代冷家溪群沉积岩的地球化学特征和碎屑锆石 U-Pb 年代学 [J]. 地球科学, 2020, 45(9): 3461-3474.
- 于跃江, 赵忠海, 杨欣欣, 等. 大兴安岭北段漠河前陆盆地早侏罗世火山岩时代的厘定 [J]. 中国地质, 2019, 48(2): 580-592.
- 曾方侣, 姜楷, 黄超, 等. 砂岩中重矿物的成因意义 [J]. 四川地质学报, 2020, 40(1): 26-29.
- 张顺, 林春明, 吴朝东, 等. 黑龙江漠河盆地构造特征与成盆演化 [J]. 高校地质学报, 2003, (3): 411-419.
- 赵立国, 杨晓平, 赵省民, 等. 漠河盆地额木尔河群锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. 地质力学学报, 2014, 20(3): 285-291.
- 赵书跃, 韩彦东, 张文龙, 等. 漠河盆地北部漠河组地层形成时代探讨——糜棱岩化微晶闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的制约 [J]. 地质调查与研究, 2016, 39(3): 177-183.
- 周传芳, 杨华本, 蔡艳龙. 漠河盆地西缘漠河组形成时代及物源区构造环境判别 [J]. 中国地质, 2021, 45(3): 832-853.