

doi: 10.12029/gc20210427001

刘华健, 金若时, 徐增连, 汤超, 段明, 肖鹏, 魏佳林, 张鹏鹏. 2025. 松辽盆地北部大庆长垣南端晚白垩世赋铀沉积物源演化——来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 中国地质, 52(3): 1036–1054.

Liu Huajian, Jin Ruoshi, Xu Zenglian, Tang Chao, Duan Ming, Xiao Peng, Wei Jialin, Zhang Pengpeng. 2025. Provenance evolution of the Late Cretaceous uranium-bearing sediments in the southern Daqing placanticline of the northern Songliao Basin: Evidence from detrital zircon U-Pb chronology[J]. Geology in China, 52(3): 1036–1054(in Chinese with English abstract).

松辽盆地北部大庆长垣南端晚白垩世赋铀沉积物源演化——来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据

刘华健^{1,2}, 金若时^{1,2}, 徐增连^{1,2}, 汤超^{1,2}, 段明^{1,2}, 肖鹏^{1,2}, 魏佳林^{1,2}, 张鹏鹏³

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170; 2. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170; 3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

摘要:【研究目的】松辽盆地北部大庆长垣南端嫩江组五段、四方台组和明水组是近年来新发现的重要赋铀层位。由于缺乏系统性的物源演化研究, 严重制约了该地区古地理及铀成矿理论的进一步认识。【研究方法】本文通过碎屑锆石 LA-ICP-MS 原位微区测年分析, 与已收集到的盆地周缘岩体年龄进行对比, 同时结合砂岩岩屑及重矿物组成, 综合分析了研究区晚白垩世嫩江组五段—明水组物源变化。【研究结果】嫩江组五段锆石年龄总体呈现出 2994~1765 Ma、281~178 Ma 和 125~79 Ma 三个年龄区间, 四方台组锆石总体呈现出 2797~1739 Ma、462~455 Ma、296~174 Ma 和 125~79 Ma 四个年龄区间, 明水组锆石总体呈现出 2448~1792 Ma、237~220 Ma 和 117~87 Ma 三个年龄区间。【结论】大庆长垣南端嫩江组五段物源可能来自于盆地东部的张广才岭、吉黑地区以及东南部的辽源地区, 四方台组沉积时期除盆地东部的张广才岭、吉黑地区以及东南部的辽源地区外, 盆地北部的小兴安岭东部也开始为研究区提供一定的物源, 明水组物源则可能来自于盆地北部的小兴安岭东部和东部的张广才岭。这一结果对于进一步认识大庆长垣南端晚白垩世古地理格局和大庆长垣构造演化具有重要地质意义。

关键词: 砂岩型铀矿; 沉积盆地; 物源分析; 碎屑锆石 U-Pb 测年; 嫩江组五段; 四方台组; 明水组; 地质调查工程; 大庆长垣南端

创 新 点: (1) 碎屑锆石总体上可划分出早白垩世晚期—晚白垩世、早侏罗世—三叠纪以及前寒武纪三个主要年龄区段; (2) 松辽盆地北部大庆长垣南端晚白垩世地层发育以盆地东部为主体的沉积物源体系。

中图分类号: P619.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)03-1036-19

Provenance evolution of the Late Cretaceous uranium-bearing sediments in the southern Daqing placanticline of the northern Songliao Basin: Evidence from detrital zircon U-Pb chronology

LIU Huajian^{1,2}, JIN Ruoshi^{1,2}, XU Zenglian^{1,2}, TANG Chao^{1,2}, DUAN Ming^{1,2}, XIAO Peng^{1,2},
WEI Jialin^{1,2}, ZHANG Pengpeng³

收稿日期: 2021-04-27; 改回日期: 2022-02-22

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(92162212)、国家重点研发计划项目(2018YFC0604200)、国际地球科学计划(IGCP-675)和中国地质调查局项目(DD20190121)联合资助。

作者简介: 刘华健, 男, 1993 年生, 工程师, 主要从事砂岩型铀矿地质调查与沉积地质学方面的研究工作; E-mail: liuhj_geo@163.com。

(1. *Tianjin Centre (North China Geological Science and Technology Innovation Center), China Geological Survey, Tianjin 300170, China*; 2. *Key Laboratory of Uranium Geology of China Geological Survey, Tianjin 300170, China*; 3. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China*)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] The 5th member of Nenjiang Formation, along with Sifangtai Formation and Mingshui Formation at the southern Daqing placanticline of the northern Songliao Basin, has been identified in recent years as important uranium-bearing stratigraphic units. However, the absence of comprehensive studies on provenance evolution has severely hindered further understanding of both palaeogeographic conditions and uranium mineralization mechanisms in this region. **[Methods]** In this study, we conducted LA-ICP-MS dating of detrital zircons and compared the results with the ages of surrounding rock masses collected around the basin. Integrated the sandstone composition and heavy minerals characteristics, we comprehensively analyzed the provenance evolution from the 5th member of Nenjiang Formation to Mingshui Formation. **[Results]** The detrital zircon ages exhibit age ranges across the formations: (1) The 5th member of Nenjiang Formation displays three predominant age ranges: 2994–1765 Ma, 281–281 Ma, and 125–79 Ma. (2) Sifangtai Formation exhibits four characteristic age ranges: 2797–1739 Ma, 462–455 Ma, 296–174 Ma, and 125–79 Ma. (3) Mingshui Formation shows three distinct age ranges: 2448–1792 Ma, 237–220 Ma, and 117–87 Ma. **[Conclusions]** The provenance of the 5th member of Nenjiang Formation was primarily derived from the Zhangguangcai Range, along with the Jihei area to the east and the Liaoyuan area to the southeast of the Songliao Basin. Additionally, the eastern Lesser Xing'an Mountains to the northern Songliao Basin began contributing sediments to Sifangtai Formation. The provenance of Mingshui Formation was mainly sourced from the Zhangguangcai Range and the eastern Lesser Xing'an Mountains. The findings provide important insights for reconstructing Late Cretaceous paleogeography and understanding the tectonic evolution of Daqing placanticline.

Key words: sandstone-type uranium deposits; sedimentary basin; provenance analysis; detrital zircon U–Pb dating; 5th member of Nenjiang Formation; Sifangtai Formation; Mingshui Formation; geological survey engineering; southern Daqing placanticline

Highlights: (1) The age of detrital zircons can generally be divided into three main age sections of the late Early Cretaceous–Late Cretaceous, Early Jurassic–Triassic and Precambrian; (2) The Late Cretaceous strata at the southern of the Daqing placanticline in the northern Songliao Basin developed a sedimentary source system dominated by the eastern part of the basin.

About the first author: LIU Huajian, male, born in 1993, engineer, mainly engaged in the sandstone-type uranium deposits geological survey and sedimentary geology research; E-mail: liuhj_geo@163.com.

Fund support: Supported by the projects of National Science Foundation of China (No.92162212), National Key Research and Development Program (No.2018YFC0604200), International Geoscience Program (No.IGCP-675) and China Geological Survey (No.DD20190121).

1 引言

沉积盆地物源分析在基础地质研究和沉积型矿产勘查中具有重要的科研价值,尤其是针对盆地古地貌特征和岩相古地理重建、盆地沉积体系和沉积格局研究、母岩性质追踪以及源区大地构造背景和盆地成盆动力学演化等方面的应用,一直以来备受学者们的关注(赵红格和刘池洋, 2003; 徐亚军等, 2007; 杨仁超等, 2013)。近年来,随着理论体系和技术方法的不断完善,盆地陆源碎屑沉积物的物源分析结果变得更为精确,更具说服力(Lei and Shu, 2010; 付雨等, 2011; 孙宁亮等, 2019; 张超等, 2023;

刘晓雪等, 2024)。碎屑沉积物中锆石具有分布广泛,在成岩过程中不易丢失源区信息,稳定性较强等特征,使其成为当前较为热门的物源分析手段(Giulio et al., 2012; Xu et al., 2013; 陈印等, 2017; 郭佩等, 2017; Yu et al., 2021; 刘华健等, 2024)。根据碎屑锆石的形态,化学组成及其反映的年龄信息,可以限定沉积物沉积时限,示踪盆地物源区以及探讨区域构造演化(闫义等, 2003)。

铀矿是保证国家安全,改善能源结构的重要矿产资源。随着松辽盆地南部钱家店超大型砂岩型铀矿床的发现,松辽盆地的产铀前景被诸多学者和专家看好,并不断将找矿战线向北转移。通

通过对松辽盆地北部油田钻孔的筛查,发现了大量良好的放射性异常,其主要赋矿层位为嫩江组五段、四方台组和明水组一段(汤超等, 2018; 魏佳林等, 2018; 孙大鹏等, 2021; 陈路路等, 2022)。针对含矿目的层位,前人已经做了较多研究,包括沉积相分析(程日辉等, 2009; 刘华健等, 2018; 肖鹏等, 2018)、层序地层学(徐增连等, 2018; Hu et al., 2019)、构造背景演化(钟延秋和马文娟, 2011; Cheng et al., 2020)、地层古生物和古气候(崔璨等, 2016; Yoshino et al., 2017; 徐增连等, 2021)等。然而,目前对于上述地层的沉积物源分析方面的研究涉及较少,一些学者从沉积学、层序地层学等角度进行了初步的判断,认为四方台组为南北向长轴物源,明水组为近东西向短轴物源(张雷等, 2009),而在实际勘查工作中所得出的认识与前人结论有偏差。近年来,肖鹏等(2018)、陈路路等(2018)利用重矿物和砂岩碎屑组分分析,提出了大庆长垣南端四方台组以盆地东部张广才岭为主要物源区的新认识,有效指导了区内铀储层展布规律研究工作,但尚未形成完整的物源演化体系。沉积物源研究对于铀源及铀成矿理论的理解极为重要。因此,松辽盆地北部嫩江组五段、四方台组和明水组的沉积物源问题亟待解决。

本文以大庆长垣南端为研究区,利用砂岩中的碎屑锆石进行 LA-ICP-MS 原位微区测年工作,并结合砂岩岩屑及重矿物分析,探讨松辽盆地北部大庆长垣南端嫩江组五段、四方台组及明水组的沉积物源问题,以期对铀成矿物质来源的梳理和今后的找矿工作提供进一步的帮助。

2 区域地质背景

松辽盆地位于中国东北部,总面积约 26 万 km²,呈北东向展布,是世界上著名的中、新生代大型陆相含油气盆地,蕴含丰富的油气资源和沉积型矿产(Hou et al., 2018; Lu et al., 2020)。盆地发育在古亚洲洋构造域之上,四周被大型构造断裂带所包围,成盆动力学十分复杂。盆地经历了晚侏罗世—早白垩世断陷、晚白垩世坳陷和晚白垩世末—新生代多次构造反转,形成相应的构造层(葛荣峰等, 2010)。中生代以来,盆地构造活动较为强烈,形成一系列北东向褶皱和断层,为砂岩型铀矿

提供了有利运移通道和赋矿空间(于文斌等, 2008; 赵忠华等, 2018)。特别是渐新世—中新世末次隆升事件,对砂岩型铀矿的形成起到了重要的影响(Cheng et al., 2018, 2019)。盆地基底由前古生代、古生代变质岩系、晚古生代、中生代花岗岩及闪长岩等火山岩系组成(裴福萍等, 2006; 余星等, 2008)。基底之上广泛分布着近万米晚侏罗世—新生代碎屑岩及火山岩沉积盖层,由老到新依次为火石岭组、沙河子组、营城组、登娄库组、泉头组、青山口组、姚家组、嫩江组、四方台组、明水组、依安组、大安组、泰康组和第四系(黄清华等, 1999)。盆地周缘广泛分布着大兴安岭、小兴安岭、张广才岭、吉黑地区以及辽源地区的大量火山岩和变质岩,可为盆地提供充足的碎屑物质(图 1)。

研究区地处松辽盆地北部大庆长垣南倾伏端,属于二级构造单元中的中央坳陷区,西侧为齐家古龙凹陷,东侧为三肇凹陷,南邻长岭凹陷和扶新隆起。区内铀矿勘查钻孔中可见嫩江组五段、四方台组、明水组、泰康组和第四系。四方台组和明水组为一套连续沉积序列,底部不整合于嫩江组五段地层,其上被新近系泰康组和第四系不整合覆盖,其整体为一套滨浅湖—曲流河相沉积组合,发育典型的红黑岩系组合(金若时等, 2017; 程银行等, 2024),可见深灰色、红棕色泥岩、泥质粉砂岩和浅灰色、灰绿色、红棕色粉砂岩、细砂岩、中砂岩以及砂砾岩。晚白垩世末期研究区内水体发育较浅,岩性整体以砂泥岩交替产出为主,形成良好的泥—砂—泥结构。在含铀岩系嫩江组五段、四方台组一段及明水组一段中,赋矿砂体以河道亚相为主,砂体厚度稳定,分布范围广泛,以中粗粒砂岩和细砂岩为主,并见灰黑色碳质薄层和大量星散状黄铁矿,可为铀成矿提供良好的铀储层(图 2)。

3 样品采集与制备

选择研究区内具代表性的钻孔 ZKMX06 进行取样,共计 3 件样品,采样位置分布如图 2 所示。自嫩江组五段至明水组编号依次为 ZKMX06-GS3、ZKMX06-GS2、ZKMX06-GS1,主要岩性特征为浅灰色、灰绿色中粗砂岩和含砾粗砂岩。

样品采用常规方法进行机械性破碎,然后通过重力浮选和磁选粗选锆石,最后在双目镜下进一步

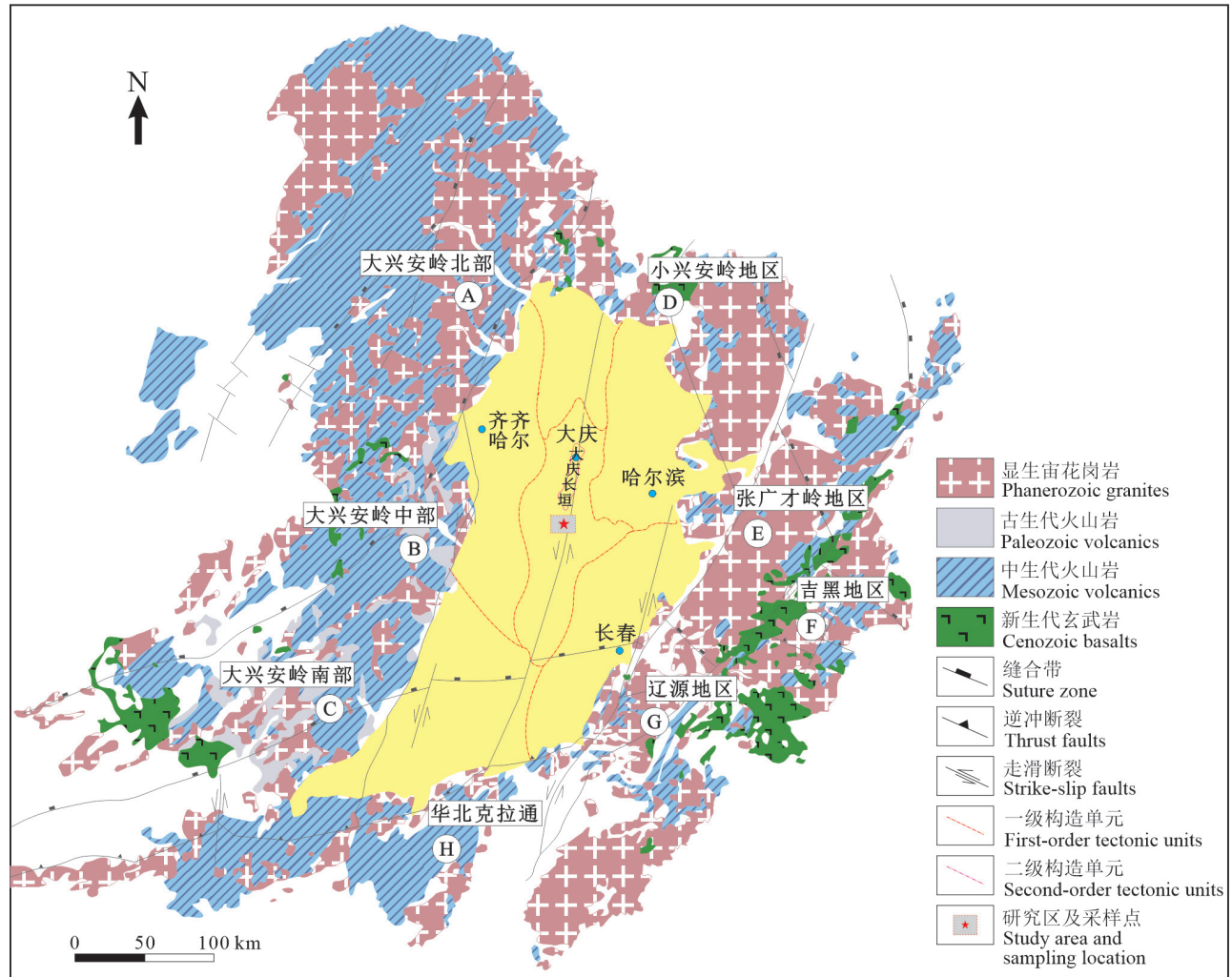


图 1 松辽盆地区域地质图(据葛荣峰等, 2010; Wu et al., 2011 修改)

Fig.1 Geological map of the Songliao Basin (modified from Ge Rongfeng et al., 2010; Wu et al., 2011)

分选提纯。将锆石颗粒随机排列在双面胶上,并用环氧树脂灌注固定,经打磨剖光后制成靶,分别进行透射光、反射光和阴极发光显微照相,以便观察锆石表面和内部结构特征,确定最佳测试点。

锆石 U-Pb 测年在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成,采用激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)进行锆石原位微区测年工作。仪器具体配置和操作流程参考 Yuan et al.(2010)。分析中使用的激光束斑直径为 35 μm ,采用 GJ-1 作为外标年龄标准进行分馏校正,应用人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标计算锆石中的 U、Pb 含量,数据处理采用 ICP-MSDateCal 程序(Liu et al., 2008),数据成图由 Isoplot 4.0 程序完成(Ludwig, 2003)。

4 测试结果

4.1 锆石特征

镜下锆石颜色整体呈浅黄色、浅棕色至无色,内含大量暗色包裹体。锆石形态特征主要分为两类:一类锆石为半自形长柱状或短柱状,表面较为光滑,偶见裂纹和破碎,这类锆石的磨圆度往往较低,反映了物源区较近的特征,搬运痕迹不明显,四方台组和嫩江组样品中这类锆石较多,占 20.6%~23.1%,而明水组仅占 9.8%;另一类锆石则呈浑圆状颗粒,表面较为粗糙,磨圆度高,分选性好,搬运痕迹明显,反映了较长距离的风化和磨蚀作用。

CL 图象(图 3)显示样品 ZKMX06-GS1、ZKMX06-GS2、ZKMX06-GS3 中分别有 62.2%、68.6%、

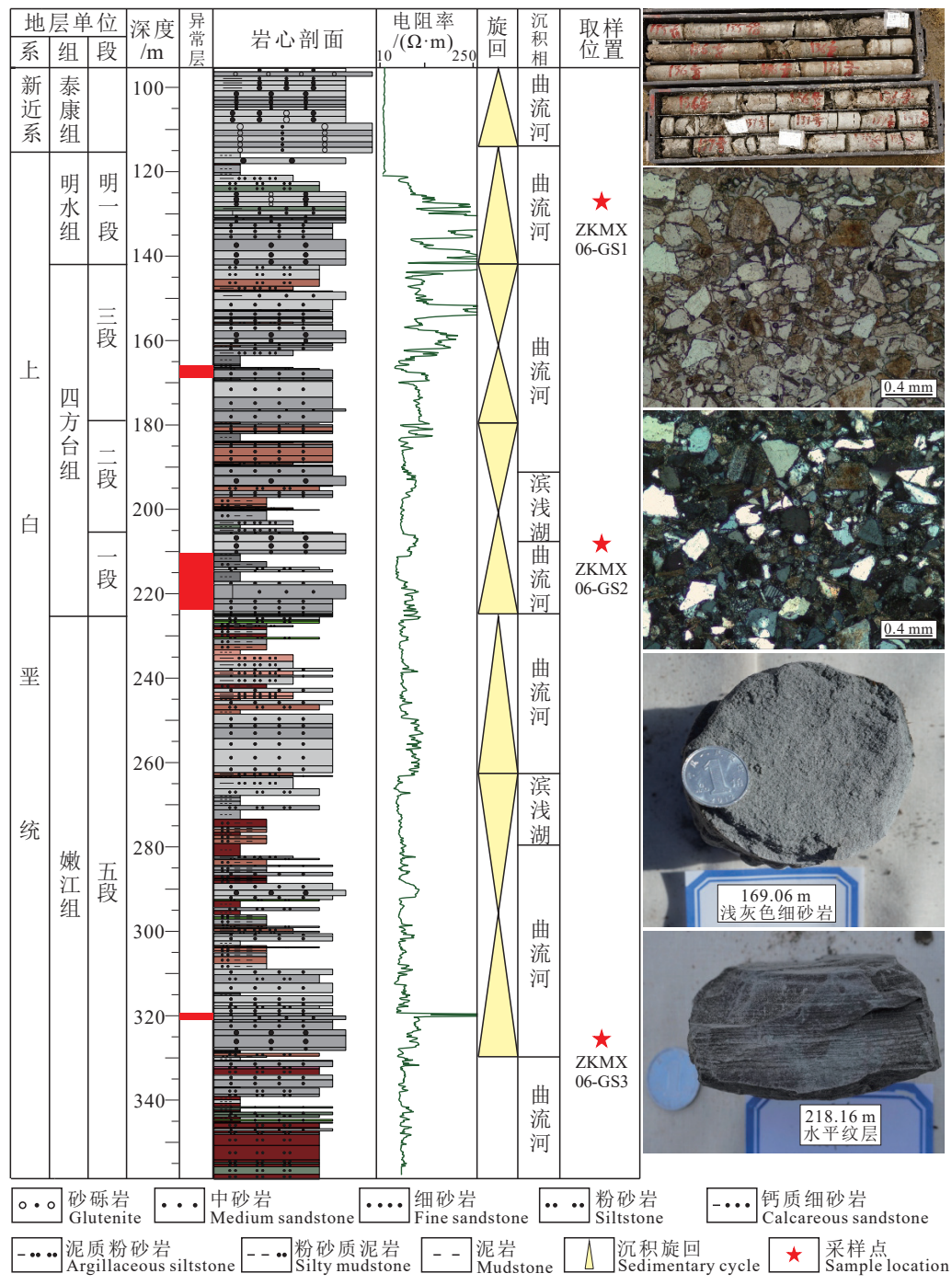


图2 钻孔 ZKMX06 岩心综合柱状图、采样层位和样品镜下特征和手标本照片
Fig.2 Stratigraphic column of ZKMX06 and sampling location, micrographs and specimens

60.9% 的锆石发育明显的振荡环带或条痕状吸收, 偶见扇形分带, 具典型的岩浆锆石成因特征(吴元保和郑永飞, 2004)。个别岩浆锆石可见残留核, 属继承性锆石, 火山岩中的锆石长宽比值多大于 2。变质锆石内部结构多较为均一, 无分带、弱分带、面状

分带或云雾状分带, 有的锆石具明显核幔构造, 幔部显示 CL 强度较弱, 属于变质增生锆石, 部分锆石可见港湾状溶蚀(吴元保等, 2004)。

大量研究表明, 锆石 Th/U 比值可判断锆石成因(Hoskin and Black, 2000; Belousova et al., 2002;



图 3 研究区典型碎屑锆石阴极发光图像及测点位置
Fig.3 CL images and dating spots of typical zircons in the study area

吴元保等, 2004)。岩浆锆石一般具有较高的 Th、U 含量, $Th/U > 0.4$, 而变质锆石 Th、U 含量则相对较低, $Th/U < 0.1$ 。本研究中锆石 Th/U 比值变化范围较大, 为 0.0073~1.8703。三组样品中分别有 67.2%、65.8%、59.6% 的锆石颗粒 $Th/U > 0.4$, 显示岩浆成因特征, 分别有 7.8%、8.1%、5.8% 的锆石颗粒 $Th/U < 0.1$, 显示变质锆石成因特征(图 4、表 1), 与 CL 显微图像显示特征基本趋于一致。

4.2 锆石年龄特征

三个砂岩样品分别测试了 120 个数据点, 共计 360 个。分析年龄结果时, 对于 < 1000 Ma 的锆石, 采用 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄值, 对于 > 1000 Ma 的锆石, 使用 $^{207}Pb/^{235}Pb$ 年龄值。为了满足统计要求, 将谐和度小于 90% 和大于 110% 的数据点剔除掉, 共得到有效数据点 331 个。由这些数据点生成的 U-Pb 年龄谐和图和年龄分布直方图见图 5。

嫩江组五段样品 ZKMX06-GS3 共获得有效数

据点 104 个, 其中 51 颗锆石 (49.0%) 为显生宙锆石, 其余 53 颗锆石 (51.0%) 为元古宙和太古宙锆石

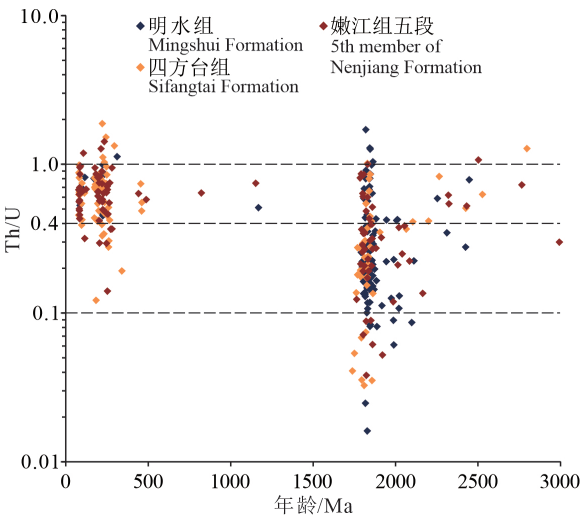


图 4 研究区样品碎屑锆石年龄分布与 Th/U 关系图
Fig.4 Distribution of detrital zircon ages in the study area and Th/U relationship diagram

表 1 研究区砂岩样品碎屑锆石年龄分布

Table 1 Age distribution of detrital zircons from sandstone samples in the study area

样品编号	年龄范围/Ma	年龄组/Ma				主峰值/Ma			弱峰值/Ma			
		1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
ZKMX06-GS1	2448~87	2448~1792		237~220	117~87	1836	226	111	2047			
ZKMX06-GS2	2797~79	2797~1739	462~455	296~174	125~79	1820	229	88	2166	459	245	174
ZKMX06-GS3	2994~79	2994~1765		281~178	125~79	1863	207	88	2397		259	224

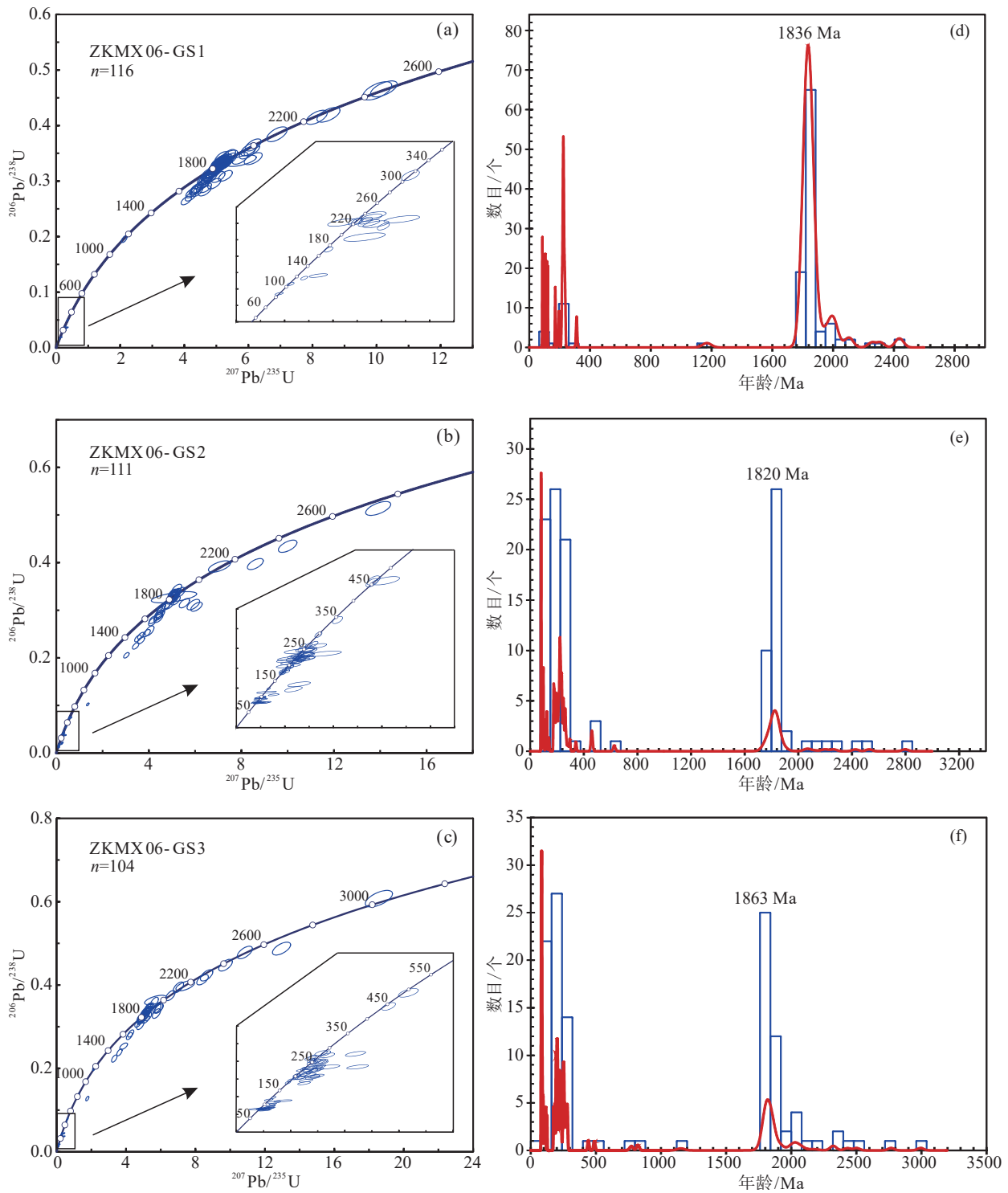


图5 研究区砂岩样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(a~c)与年龄分布直方图(d~f)
Fig.5 U-Pb concordia diagrams of detrital zircons from sandstone samples in the study area (a~c) and age distribution histograms (d~f)

(图 5c)。锆石年龄分布范围为 2994~79 Ma, 可划分出 3 组年龄区间: 第一组 2994~1765 Ma, 共 51 颗

锆石, 约占 49.0%; 第二组 281~178 Ma, 共 33 颗锆石, 约占 31.8%; 第三组 125~79 Ma, 共 16 颗锆石,

约占 15.4%。对应的主峰值年龄为 1863 Ma、207 Ma 和 88 Ma, 弱峰值年龄为 2397 Ma、259 Ma 和 224 Ma。

四方台组样品 ZKMX06-GS2 共获得有效数据点 111 个, 其中 66 颗锆石 (59.5%) 为显生宙锆石, 其余 45 颗锆石 (40.5%) 为元古宙和太古宙锆石 (图 5b)。锆石年龄分布范围为 2797~79 Ma, 可划分出 4 组年龄区间: 第一组 2797~1739 Ma, 共 45 颗锆石, 约占 40.5%; 第二组 462~455 Ma, 共 3 颗锆石, 约占 2.7%; 第三组 296~174 Ma, 共 45 颗锆石, 约占 40.5%; 第四组 125~79 Ma, 共 17 颗锆石, 约占 15.3%。对应的主峰值年龄为 1820 Ma、229 Ma 和 88 Ma, 弱峰值年龄为 2166 Ma、459 Ma、245 Ma 和 174 Ma。

明水组样品 ZKMX06-GS1 共获得有效数据点 117 个, 其中仅 13 颗锆石 (11.2%) 为显生宙锆石, 其余 103 颗锆石 (88.8%) 显示元古宙年龄 (图 5a)。锆石年龄分布范围为 2448~87 Ma, 可划分出 3 组年龄区间: 第一组 2448~1792 Ma, 共 102 颗锆石, 约占 87.9%; 第二组 237~220 Ma, 共 8 颗锆石, 约占 6.9%; 第三组 117~87 Ma, 共 3 颗锆石, 约占 2.6%。对应的主峰值年龄为 1836 Ma、226 Ma 和 111 Ma, 弱峰值年龄为 2047 Ma。

5 讨论

5.1 碎屑锆石的物源区讨论

笔者对近年来前人在盆地周缘不同地区内各地质体的测年数据进行了收集, 包括岩浆锆石、变质锆石和碎屑锆石等, 共计 3681 个数据点, 其中锆石 U-Pb 测年数据点 3612 个, 其他同位素测年数据点 69 个 (Rb-Sr 法、K-Ar 法等)。在与研究区的空间关系上, 笔者根据区域地质图和前人的研究基础, 将大兴安岭北部、大兴安岭中部、大兴安岭南部、小兴安岭、张广才岭、吉黑东部和辽源地体等 7 个地区视为潜在的物源供给区 (图 1), 基本反映了盆地周缘物源供给的时空分布特征 (图 6)。样品 ZKMX06-GS1、ZKMX06-GS2、ZKMX06-GS3 的测年结果显示, 3 组样品具有相似的年龄分布范围, 总体上可划分出早白垩世晚期—晚白垩世、早侏罗世—三叠纪以及前寒武纪 3 个主要年龄区段。然而, 各年龄区段内的锆石数量比例和峰值年龄不尽

相同, 表明从嫩江组五段至明水组沉积时期, 物源区既存在相似性, 又有一定的差异性。

5.1.1 嫩江组五段物源分析

嫩江组五段的测试样品中, 早白垩世晚期—晚白垩世 125~79 Ma 的年龄区间与盆地东部吉黑地区和东南部辽源地体大面积出露的中生代晚期岩体年龄相符 (许文良, 2008; 孙景贵等, 2008)。208~178 Ma 的年龄区间与张广才岭、吉黑东部地区相对应, 张广才岭发育大量 A 型花岗岩和双峰式火山岩组合, 定年结果显示 220~170 Ma 的年龄范围 (Wu et al., 2002, 2004, 2011; 唐杰等, 2011; 郝文丽等, 2014)。与之相邻的吉黑东部延边地区分布大量 192~168 Ma 的侏罗纪花岗岩 (Zhang et al., 2004; Wu et al., 2011), 可能为盆地提供物源。235~215 Ma 的弱峰值年龄段岩体在吉黑东部地区很少出露。281~248 Ma 的主峰年龄与吉黑东部多地产出的花岗岩和火山岩年龄相近 (Zhang et al., 2004; Miao et al., 2005; Liu et al., 2010; Wu et al., 2011)。盆地东南部辽源地体大量岩体年龄分布在 290~240 Ma (张晓晖等, 2005), 也可能向盆内提供了大量碎屑物质。此外, 443 Ma 与 489 Ma 两颗碎屑锆石可能来自于盆地东部的张广才岭 (陈雷等, 2009; Wu et al., 2011)。小兴安岭地区大面积出露的 320~280 Ma 的年龄峰值 (Wu et al., 2002; 赵院冬等, 2015) 在样品中并没有年龄记录, 是判断其不是嫩江组五段物源区的重要标志。

5.1.2 四方台组物源分析

吉黑东部地区 93~123 Ma 和辽源地体北东部大量 125 Ma 左右的岩浆活动记录与四方台组晚白垩世—早白垩世晚期锆石年龄具有高度的一致性 (孙景贵等, 2008; 许文良, 2008)。四方台组早侏罗世—三叠纪锆石年龄主要在 296~201 Ma, 并且存在 198~174 Ma 的锆石年龄。通过对比可知, 张广才岭 240~200 Ma 的年龄峰值 (Wu et al., 2002, 2004, 2011) 与样品该年龄段吻合, 吉黑东部地区和辽源地体虽然在该年龄段内有大量岩体出露, 但主要由 290~260 Ma 的岩体组成 (张晓晖等, 2005; Liu et al., 2010), 指示了吉黑东部地区和辽源地区在此时可能是盆地潜在的物源区, 但比重略有减小。小兴安岭东部地区岩体则主要形成于 230~210 Ma (Wu et al., 2011), 该年龄段更是构成了小兴安岭地

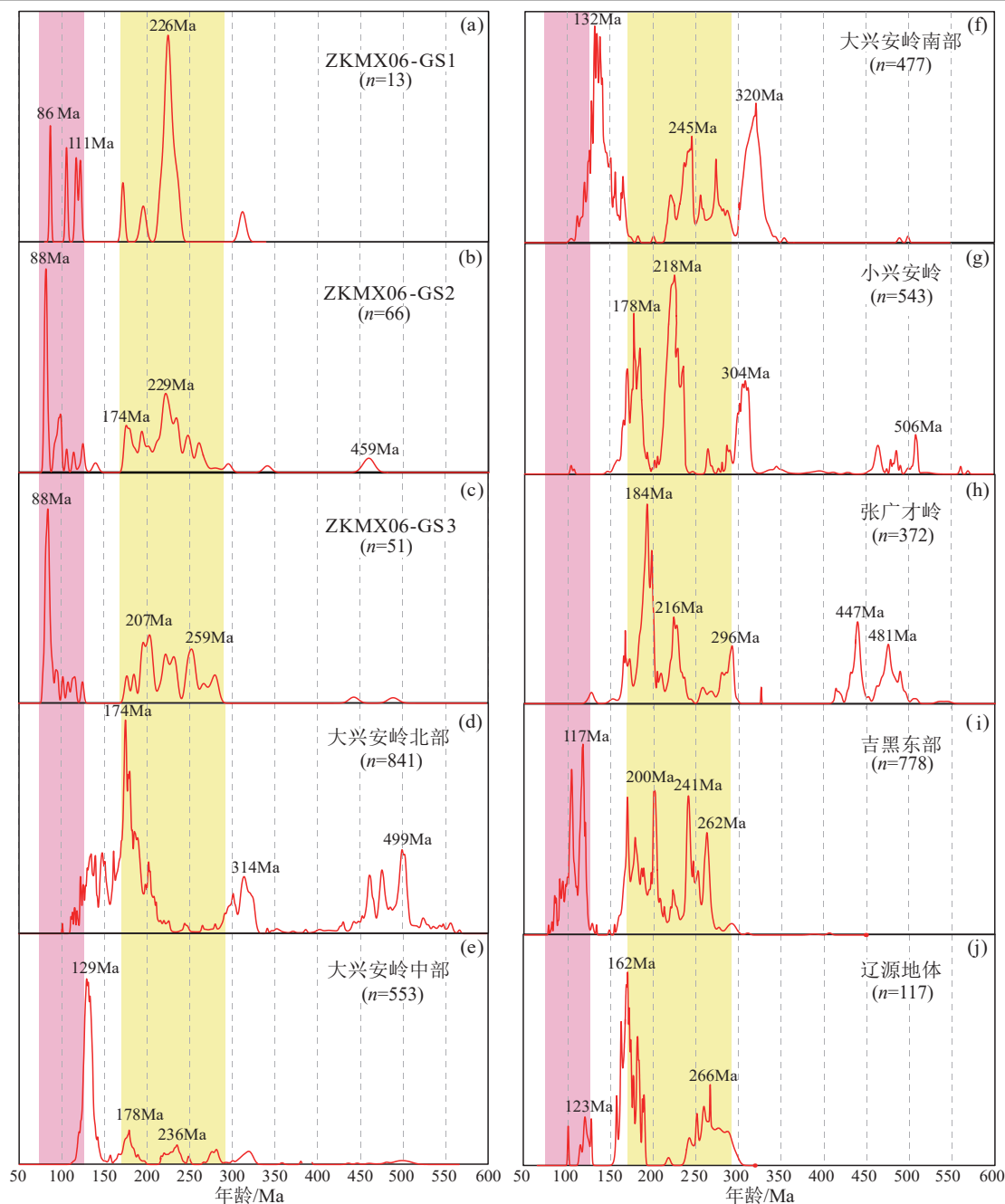


图 6 研究区砂岩样品碎屑锆石年龄分布频谱与盆地周缘岩体年龄频谱对比图

Fig.6 Spectrum of age distribution of detrital zircons from sandstone samples in the study area and age spectrum comparison of rock mass around the basin

区岩体年龄分布的主体,和样品峰值年龄具有高度的一致性。此外,在样品中还存在 341 Ma 以及 462~455 Ma 的锆石年龄记录,指示其可能来自于小兴安岭和张广才岭(陈雷等, 2009; Wu et al., 2011; Wang et al., 2012)。样品中 198~174 Ma 的弱峰值区间可能来自于盆地北部的小兴安岭东部(杨言辰

等, 2012)、东部的张广才岭(Wu et al., 2002, 2011; 唐杰等, 2011; 郝文丽等, 2014)、吉黑地区(Zhang et al., 2004; Wu et al., 2011)以及盆地东南部的辽源地区(Wu et al., 2011)。

5.1.3 明水组物源分析

明水组显生宙锆石中绝大部分锆石年龄分布

在 237~220 Ma。由于明水组缺少 300~240 Ma 的年龄记录,因此可以基本排除盆地东部的吉黑地区和盆地东南部的辽源地区作为该时期物源区的可能性。张广才岭地区 240~200 Ma 的年龄峰值(Wu et al., 2002, 2004, 2011)可以和样品结果相对应,并且该地区还分布有 200~170 Ma 的岩石组合(Wu et al., 2002, 2011; 唐杰等, 2011; 郝文丽等, 2014)。小兴安岭地区与样品的年龄分布特征相似度极高, 245~215 Ma 年龄区间内的岩体与样品高度匹配(孙德有等, 2004), 同时存在 190~150 Ma 的年龄区间(杨言辰等, 2012; 李宇等, 2015)。312 Ma 的锆石也可能来自于小兴安岭和张广才岭(Wu et al., 2011)。

5.1.4 大兴安岭物源

大兴安岭北部地区(图 6d)显生宙岩体的锆石年龄分布区间主要为 235~100 Ma(主峰值年龄 177 Ma), 355~280 Ma(主峰值年龄 323 Ma), 560~420 Ma(主峰值年龄 501 Ma, 弱峰值年龄 451 Ma 和 476 Ma)(Wu et al., 2002, 2011; 葛文春等, 2007; 苗来成等, 2007; 王召林等, 2010; 余宏全等, 2011)。大兴安岭中部地区(图 6e)显生宙以来存在大量 155~114 Ma 的岩体, 其余岩体年龄分布较为分散, 共形成 197~170 Ma、251~225 Ma、286~275 Ma、325~305 Ma 以及 490~420 Ma 五个弱峰值区(Wu et al., 2011; 王兴安等, 2012; 张渝金等, 2016)。大兴安岭南部地区(图 6f)显生宙则广泛发育 174~105 Ma、355~216 Ma 的岩体(施光海等, 2004; Liu et al., 2005, 2009; 薛怀民等, 2010; Wu et al., 2011; 李红英等, 2015)。由此可见, 上述 3 个地区的峰值年龄范围与 3 组样品的年龄分布特征不相匹配, 并且在大兴安岭北部和中部地区几乎没有 270~250 Ma 的岩体出露, 大兴安岭南部则缺失 200~170 Ma 的岩体, 120~80 Ma 的岩体在整个大兴安岭一带少见报道。因此, 大兴安岭的北部、中部和南部地区均不是研究区嫩江组五段、四方台组和明水组的物源供给区, 暗示了此时, 研究区缺少西部和北西部的物源支持。

5.2 岩屑与重矿物的证据支持

3 组样品中显生宙锆石的 Th/U 比值 90% 以上均显示出 >0.4 的岩浆成因特征, 与源区大面积出露的花岗岩体关系密切。早古生代花岗岩主要出露于小兴安岭东南部和张广才岭中部地区, 发育有二

长花岗岩、碱性花岗岩和闪长岩等。晚古生代(主要为石炭纪晚期至二叠纪)和中生代花岗岩在松辽盆地东部全区分布广泛。小兴安岭地区发育有门鹿河顶子含黑云二长花岗岩、冷川花岗闪长岩、大黑山正长花岗岩、小山屯碱长花岗岩和孙吴地区白云母花岗岩等。张广才岭、吉黑地区和辽源地区则大量发育正长花岗岩、碱长花岗岩、花岗闪长岩、辉长岩、石英正长岩等。其中, 白垩纪花岗岩出露相对较少, 主要分布在吉黑东部地区, 辽源地区零星分布, 岩石类型主要为二长花岗岩和花岗闪长岩。此外, 在研究区还可见流纹岩、安山岩等火山岩以及花岗质糜棱岩、黑云斜长片麻岩、片岩等变质岩出露。

嫩江组五段、四方台组和明水组砂岩的岩屑占比较大, 总含量可达 40%~70%, 镜下观察岩屑组成以火成岩和变质岩为主, 并含有少量沉积岩岩屑。火成岩岩屑中主要以花岗岩岩屑为主, 占 60%~80%, 还可见安山岩、流纹岩等隐晶质岩屑。陈路路等(2018)利用研究区砂岩三端元组分进行了碎屑成分构造三角图投点, 样品点集中落在了再旋回造山区, 个别点落在了切割岛弧区, 说明源区可能经历了俯冲缝合到造山的过程, 伴随有大量的岩浆活动, 形成火山岩和侵入岩, 认为物源可能来自于研究区东部的岩浆活动区和再旋回造山带等不稳定的构造区。

碎屑沉积物中的重矿物组合特征可作为厘定沉积地层物源区的重要标志(和钟铎等, 2001)。研究区四方台组一段砂岩中重矿物以钛铁矿、锆石、电气石、锐钛矿、石榴石、白钛石、磁铁矿、绿帘石、磷灰石和榍石等为主(表 2)。参照样品种类重矿物含量占比情况, 综合认为四方台组重矿物组合具有明显的两分格局, 反映了至少存在两种不同的物源体系(图 7)。其中, A 区位于研究区的北部, 发育“钛铁矿+石榴石+锆石”的重矿物组合带, 钛铁矿含量占明显优势。B 区位于研究区的东部和东南部, 重矿物组合仍以“钛铁矿+石榴石+锆石”为主要特征, 但该区重矿物中钛铁矿含量明显降低, 石榴石、锆石和绿帘石含量普遍升高。因此, A 区的重矿物组合表现为“高钛铁矿+低石榴石+低锆石”, 可能对应了盆地北部的物源体系, 如小兴安岭地区。B 区的重矿物组合表现为“低钛铁矿+高石榴石+高

表 2 研究区四方台组重矿物组成统计

Table 2 Heavy mineral composition of Sifangtai Formation in the study area

重矿物类型	重矿物组成		
	主要 (>10%)	次要 (10%~0.5%)	少量 (<0.5%)
超稳定重矿物	锆石	电气石	金红石、锐钛矿
稳定重矿物	石榴石、钛铁矿	磁铁矿、榍石、白钛石	磷灰石、十字石、萤石、独居石、铬铁矿、铬尖晶石
中等稳定重矿物	/	绿帘石	重晶石、褐帘石
不稳定重矿物	/	赤褐铁矿、黄铁矿	/

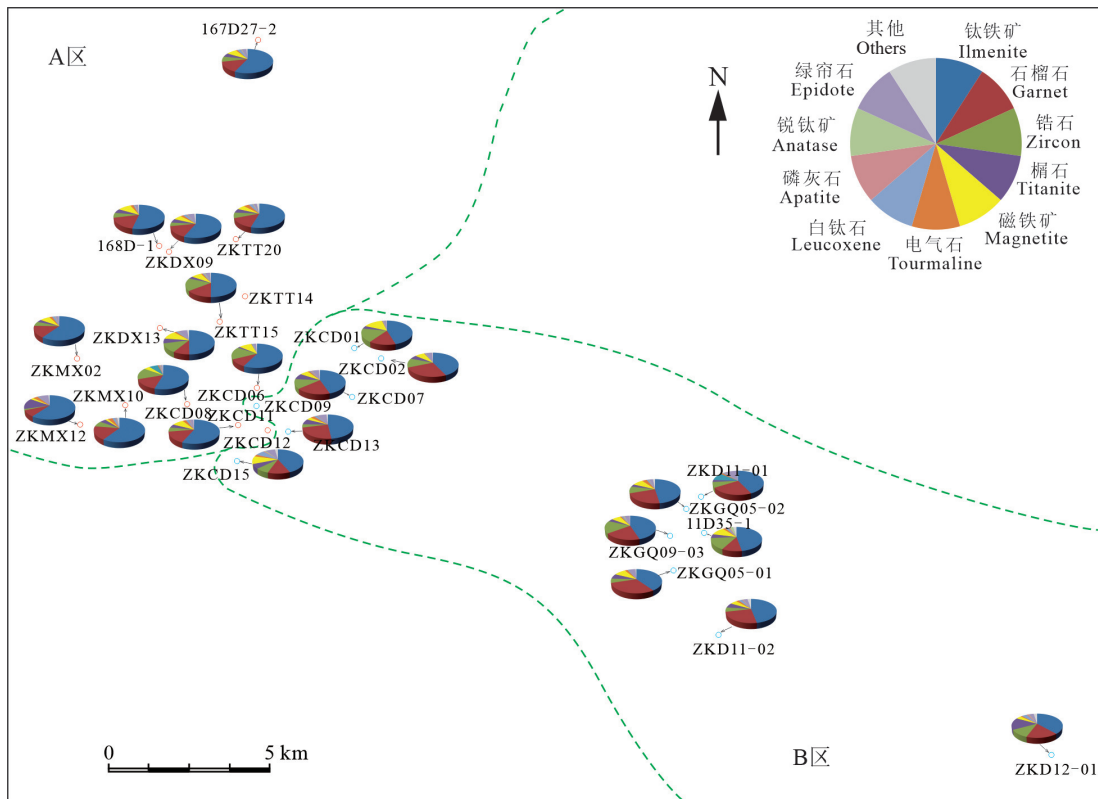


图 7 研究区四方台组重矿物组合类型平面分布特征

Fig.7 Distribution characteristics of heavy mineral assemblages of Sifangtai Formation in the study area

锆石”，可能对应了盆地东部的物源体系，如张广才岭地区和吉黑东部地区。

综合分析和讨论研究区周缘岩体的年龄分布特征，与样品实际测得碎屑锆石年龄频谱进行对比，结合砂岩岩屑及重矿物结果推断：大庆长垣南端嫩江组五段沉积物源可能来自于盆地东部的张广才岭、吉黑地区以及盆地东南部的辽源地体（图 8a）；四方台组沉积物源除了可能来自于盆地东部的张广才岭、吉黑地区以及盆地东南部的辽源地体，盆地北部的小兴安岭东部地区也开始为研究区输送少量碎屑物质（图 8b）；明水组沉积物源则可能来自于盆地北部的小兴安岭东部地区和盆地东部的张广才岭，盆地东部吉黑地区和东南部辽源地区

的物源供给逐渐消失（图 8c）。

5.3 隐生宙锆石的来源探讨

从锆石数量上分析，自嫩江组五段至明水组具隐生宙年龄的锆石均占了很大比重，明水组样品中更是增至 88%，成了物质来源的主体。这些锆石年龄集中分布在古元古代早期，嫩江组五段年龄峰值为 1863 Ma，四方台组年龄峰值为 1820 Ma，明水组年龄峰值为 1836 Ma，其余锆石则零星分布在新元古代、古元古代晚期、新太古代及中太古代，最古老的一颗锆石年龄为 2994 Ma。从这些锆石的形态上来看，绝大部分锆石呈半自形—他形，具有较高的磨圆度，呈浑圆状，暗示经历了较长距离的搬运作用。并且 75% 以上的锆石 Th/U 比值(0.10~1.71)较高，

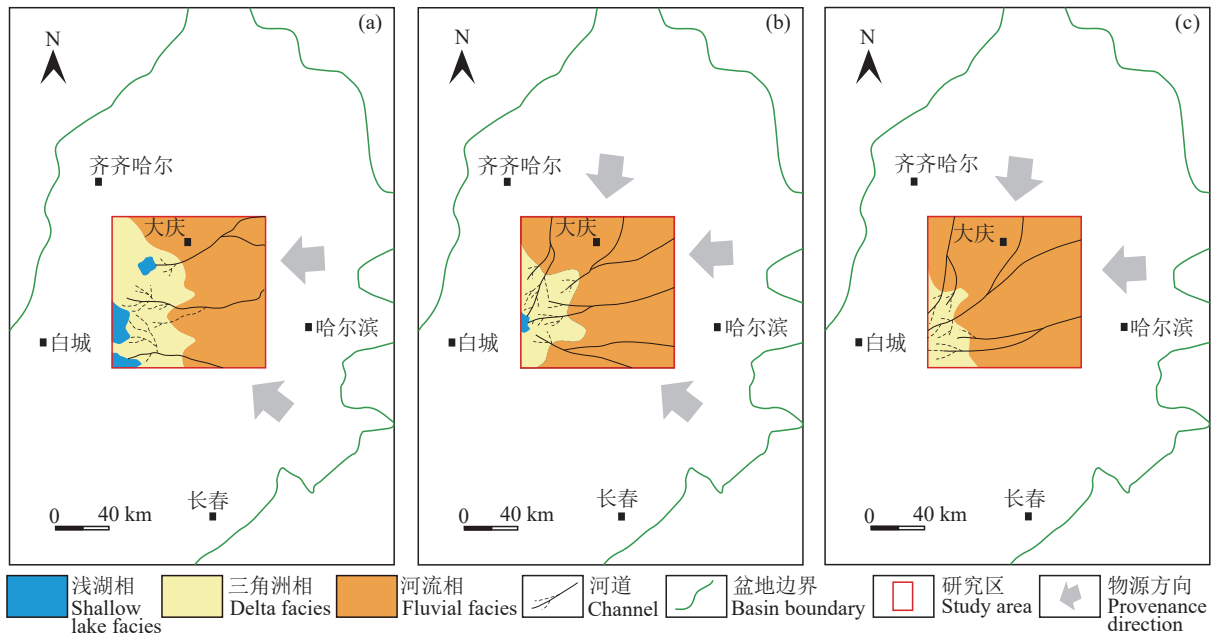


图 8 研究区嫩江组五段(a)、四方台组(b)和明水组(c)沉积物源演化图

Fig.8 The sedimentary source evolution of the 5th member of Nenjiang Formation (a), Sifangtai Formation (b) and Mingshui Formation (c) in the study area

阴极发光图象可见明显的振荡环带,暗示其可能为岩浆成因;其余 25% 的锆石 CL 图象则呈现出无分带、弱分带或云雾状构造,或见重结晶和增生边,指示其可能为变质锆石,或经历了多次构造-热事件的改造。松辽盆地北部在古生代期间经历了额尔古纳、兴安、松嫩等地块的拼合和古亚洲洋的构造演化,对这些微陆块之上是否存在前寒武纪古老基底一直存在分歧。值得注意的是,具类似年龄的地质体在研究区内并未见报道,但在盆地北部徐家围子断陷营城组早白垩世火山岩中发现了古元古代、中元古代捕获锆石(章凤奇等, 2008)。在盆地东南部辽源地区有学者进行了分析和测年工作(王颖等, 2006; 石成龙等, 2020),发现呈零星分布的前寒武纪地质体。在盆地东部张广才岭和北部小兴安岭古生代—中生代地层中取得碎屑锆石也出现了大量元古代和太古代的年龄峰值,暗示了研究区周缘可能存在同一时期的岩浆事件,与本文样品碎屑锆石年龄相匹配(Meng et al., 2010; 高福红等, 2013, 2016; Wang et al., 2014; 仲米山等, 2018)。在对姚家组和嫩江组四段的碎屑锆石测年结果中也发现了较多前寒武纪年龄(Zhao et al., 2013)。可见松辽盆地北部白垩纪地层中含隐生宙锆石是一种普遍现象。

由此推断,在嫩江组五段至明水组沉积时期,研究区隐生宙锆石主要来自于盆地北部、东部和东南部地表浅部具相当年龄的古老地体残片或地层沉积物的再旋回作用,暗示了盆地可能曾存在前寒武纪基底或残余微陆块,但是随着东北地区洋盆收缩闭合等构造演化,以及盆地东部的隆升剥蚀加剧,现已被严重改造和破坏。

5.4 对松辽盆地构造演化的启示

由于伊泽纳崎板块持续消亡,太平洋板块向西俯冲加剧(Wallis et al., 2009),松辽盆地自嫩江组沉积末期已经遭受了 NW-SE 向较强的挤压作用,造成盆地东部持续的抬升和剥蚀,湖盆萎缩明显。研究区主要接受了来自盆地东部和东南部的碎屑物质,与嫩江组四段的物源方向具有继承性(Zhao et al., 2013),明水组主要接受了来自小兴安岭和张广才岭的碎屑物质,而东南部辽源地区碎屑物质减少,与前人研究成果一致(Gao et al., 2013)。研究区晚白垩世物源方向的变化可能与作用于松辽盆地的构造应力方向转换有关,侧面反映了自嫩江组沉积末期至明水组沉积时期存在太平洋板块俯冲方向的偏移(Song et al., 2014)。总体来看,研究区物源信息反映了松辽盆地受板块俯冲的影响,至少自

嫩江组沉积末期就已经受到了挤压作用,并一直持续至明水组沉积早期,挤压应力方向自 NW 向不断向 NWW 向发生偏移。由此推断,松辽盆地晚白垩世的构造反转可能开始于嫩江组五段沉积之前,且至少持续到明水组沉积时期。大庆长垣是白垩纪晚期反转构造作用的产物,并且可能于嫩江组五段沉积之前长垣南部就已经开始隆升,随着挤压应力方向的转变,长垣中部和北部的隆升逐渐加速,而长垣北部的隆升则至少持续到明水组沉积时期,造成长垣北部晚白垩世沉积地层的大量缺失。

6 结 论

(1)大庆长垣南端上白垩统嫩江组五段碎屑锆石 U-Pb 年龄呈现出 3 个年龄区间: 2994~1765 Ma、281~178 Ma 和 125~79 Ma, 主峰值年龄为 1863 Ma、207 Ma 和 88 Ma, 弱峰值年龄为 2397 Ma、259 Ma 和 224 Ma; 四方台组碎屑锆石 U-Pb 年龄呈现出 4 个年龄区间: 2797~1739 Ma、462~455 Ma、296~174 Ma 和 125~79 Ma, 主峰值年龄为 1820 Ma、229 Ma 和 88 Ma, 弱峰值年龄为 2166 Ma、459 Ma、245 Ma 和 174 Ma; 明水组碎屑锆石 U-Pb 年龄呈现出 3 个年龄区间: 2448~1792 Ma、237~220 Ma 和 117~87 Ma, 主峰值年龄为 1836 Ma、226 Ma 和 111 Ma, 弱峰值年龄为 2047 Ma。主体上对应于前寒武纪、早侏罗世—三叠纪以及早白垩世晚期—晚白垩世 3 个主要年龄段。

(2)根据研究区碎屑锆石年龄分布特征与盆地周缘岩体年龄对比分析,结合砂岩岩屑及重矿物结果推断,大庆长垣南端嫩江组五段沉积物源可能来自于盆地东部的张广才岭、吉黑地区以及盆地东南部的辽源地体;四方台组沉积物源除了可能来自于盆地东部的张广才岭、吉黑地区以及盆地东南部的辽源地区,盆地北部的小兴安岭东部地区也开始为研究区输送少量碎屑物质;明水组沉积物源则可能来自于盆地北部的小兴安岭东部地区和盆地东部的张广才岭,吉黑地区和辽源地区的物源供给逐渐消失。盆地西部大兴安岭地区年龄分布特征则与研究区样品年龄分布不完全匹配,说明此时大兴安岭可能对研究区没有物源贡献。

致谢:感谢中国地质调查局天津地质调查中心铀矿项目组曾辉、张超、陈路路、李艳峰等同

事的帮助和支持,感谢审稿专家提出的宝贵修改意见!

References

- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 143(5): 602–622.
- Chen Lei, Sun Jingui, Chen Xingshi, Zhao Yujun, Chen Dong, Zhao Junkang. 2009. Zircon LA-ICP MS U-Pb dating of the early Paleozoic granite in the district of Yingchengzi gold deposit in the east of Zhangguangcailing area and its geological significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(9): 1327–1334 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lulu, Li Ming, Tang Chao, He Jing, Chen Yin, Zhao Hualei, Tang Li. 2022. Petrology and mineralogy characteristics of the uranium-bearing sandstone from Sifantai Formation in Sanzhao Depression of Northern Songliao Basin and their geological implications[J]. *North China Geology*, 45(4): 1–9, 20 (in Chinese with English abstract).
- Chen Lulu, Tang Chao, Li Jianguo, Zhong Yanqiu, Gu Shefeng, Wei Jialin, Xiao Peng, Xu Zenglian, Zeng Hui, Liu Huajian, Chen Yin. 2018. Petrology characteristics of the uranium-bearing layer of Sifantai Formation in Daqing placanticline of Songliao Basin and their geological implications[J]. *Geological Survey and Research*, 41(1): 33–39 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yin, Feng Xiaoxi, Chen Lulu, Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Miao Aisheng, Tang Chao, Wang Gui, Liu Zhongren. 2017. An analysis of U-Pb dating of detrital zircons and modes of occurrence of uranium minerals in the Zhiluo Formation of northeastern Ordos Basin and their indication to uranium sources[J]. *Geology in China*, 44(6): 1190–1206 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Rihui, Wang Guodong, Wang Pujun, Gao Youfeng. 2009. Uppermost Cretaceous sediments: Sedimentary microfacies and sedimentary environment evolution of Sifantai Formation and Mingshui Formation in SK- I (n)[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(6): 85–95 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Jin Ruoshi, Cuney M, Petrov V A, Miao Peisen. 2024. The strata constraint on large scale sandstone-type uranium mineralization in Meso-Cenozoic basins, northern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 98(7): 1953–1976 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Y H, Wang S Y, Li Y, Ao C, Li Y F, Li J G, Li H L, Zhang T F. 2018. Late Cretaceous–Cenozoic thermochronology in the southern Songliao Basin, NE China: New insights from apatite and zircon fission track analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 95–106.
- Cheng Y H, Wang S Y, Jin R S, Li J G, Ao C, Teng X M. 2019. Global Miocene tectonics and regional sandstone-style uranium

- mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 106: 238–250.
- Cheng Y H, Wang S Y, Zhang T F, Teng X M, Ao C, Jin R S, Li H L. 2020. Regional sandstone-type uranium mineralization rooted in Oligo–Miocene tectonic inversion in the Songliao Basin, NE China[J]. *Gondwana Research*, 88: 88–105.
- Cui Can, Xi Dangpeng, Huang Qinghua, Nie Zhiyang, Shi Zhongye, Wan Xiaoqiao. 2016. Palynological assemblages from the Mingshui Formation of well LD17, western Songliao Basin, northeast China and their geological implications[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 33(1): 21–32 (in Chinese with English abstract).
- Fu Li, Qiu Huaning, Huo Qiuli, Wang Xue, Zeng Huasen. 2011. ^{40}Ar – ^{39}Ar dating of illite and its application in source of sediments of Lower Cretaceous Quantou 4 member and oil emplacement in North Songliao Basin[J]. *Geochimica*, 40(5): 418–427 (in Chinese with English abstract).
- Gao Fuhong, Wang Feng, Xu Wenliang, Yang Yang. 2013. Formation timing of “Paleoproterozoic” Dongfengshan Group in the Lesser Xing’an Range, NE China and its tectonic implications: Constraints from zircon U–Pb geochronology[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(2): 440–456 (in Chinese with English abstract).
- Gao Fuhong, Wang Lei, Xu Wenliang, Wang Feng. 2016. Age and provenance of the Late Paleozoic strata in Lesser Xing’an Range: Evidence from field geology and detrital zircon U–Pb ages[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 46(2): 469–481 (in Chinese with English abstract).
- Gao Y, Wang C S, Liu Z F, Zhao B, Zhang X F. 2013. Clay mineralogy of the middle Mingshui Formation (Upper Campanian to Lower Maastrichtian) from the SKIn borehole in the Songliao Basin, NE China: Implications for palaeoclimate and provenance[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 385: 162–170.
- Ge Rongfeng, Zhang Qinglong, Wang Liangshu, Xie Aiguo, Xu Shiyin, Chen Juan, Wang Xiyong. 2010. Tectonic evolution of Songliao Basin and the prominent tectonic regime transition in Eastern China[J]. *Geological Review*, 56(2): 180–195 (in Chinese with English abstract).
- Ge Wenchun, Wu Fuyuan, Zhou Changyong, Zhang Jiheng. 2007. The metallogenic epoch and geodynamic significance of the porphyry Cu, Mo ore deposits in eastern Xing’an–Mongolian orogenic belt[J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(20): 2407–2417 (in Chinese with English abstract).
- Giulio D A, Ronchi A, Sanfilippo A, Tiepolo M, Pimentel M, Ramos V A. 2012. Detrital zircon provenance from the Neuquen Basin (south-central Andes): Cretaceous geodynamic evolution and sedimentary response in a retroarc–foreland basin[J]. *Geology*, 40(6): 559–562.
- Guo Pei, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Li Changzhi. 2017. Considerations on the application of detrital–zircon geochronology to sedimentary provenance analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(1): 46–56 (in Chinese with English abstract).
- Hao Wenli, Xu Wenliang, Wang Feng, Tang Jie, Xu Meijun, Gao Fuhong. 2014. Geochronology of the “Neoproterozoic” Yimianpo Group in the Zhangguangcai Range, NE China: Constraints from U–Pb ages of detrital and magmatic zircons[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 30(7): 1867–1878 (in Chinese with English abstract).
- He Zhonghua, Liu Zhaojun, Zhang Feng. 2001. Latest progress of heavy mineral research in the basin analysis[J]. *Geological Science and Technology Information*, 20(4): 29–32 (in Chinese with English abstract).
- Hoskin P W O, Black L P. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(4): 423–439.
- Hou H S, Wang C S, Zhang J D, Ma F, Fu W, Wang P J, Huang Y J, Zou C C, Gao Y F, Gao Y, Zhang L M, Yang J, Guo R. 2018. Deep continental scientific drilling engineering project in Songliao Basin: Progress in earth science research[J]. *China Geology*, 1(2): 173–186.
- Hu F, Li J G, Liu Z J, Zhao D M, Wan T, Xu C. 2019. Sequence and sedimentary characteristics of Upper Cretaceous Sifangtai Formation in northern Songliao Basin, northeast China: Implications for sandstone-type uranium mineralization[J]. *Ore Geology Reviews*, 111: 102927.
- Huang Qinghua, Tan Wei, Yang Huichen. 1999. Stratigraphic succession and chronostrata of Cretaceous in Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 18(6): 15–17 (in Chinese).
- Jin Ruoshi, Cheng Yinhang, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Miao Peisen, Wang Shaoyi, Ao Cong, Li Hongliang, Li Yanfeng, Zhang Tianfu. 2017. Late Mesozoic continental basin “Red and Black beds” coupling formation constraints on the sandstone uranium mineralization in northern China[J]. *Geology in China*, 44(2): 205–223 (in Chinese with English abstract).
- Lei X, Shu L S. 2010. Pre–Devonian tectonic evolution of the eastern South China Block: Geochronological evidence from detrital zircons[J]. *Science China: Earth Sciences*, 53(10): 1427–1444.
- Li Hongying, Zhou Zhiguang, Zhang Da, Li Pengju, Liu Changfeng, Chen Lizhen, Chen Cheng, Gu Congnan. 2015. Geochronology, geochemistry and geological significance of Late Triassic rhyolites in Geerchulu, Xi Ujimqin Qi, Inner Mongolia[J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology & Geochemistry*, 34(3): 546–555 (in Chinese with English abstract).
- Li Yu, Ding Leilei, Xu Wenliang, Wang Feng, Tang Jie, Zhao Shuo, Wang Zijin. 2015. Geochronology and geochemistry of muscovite granite in Sunwu area, NE China: Implications for the timing of closure of the Mongol–Okhotsk Ocean[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 56–66 (in Chinese with English abstract).
- Liu Huajian, Jin Ruoshi, Xiao Peng, Tang Chao, Xu Zenglian, Li Jianguo, Wang Tiejun, Chen Lulu, Wei Jialin. 2018. Grain-size characteristics of the Sifangtai Formation of uranium-bearing series in Guqia area, northern Songliao basin and its sedimentary

- environmental implications[J]. Geological Survey and Research, 41(1): 40–50 (in Chinese with English abstract).
- Liu Huajian, Xu Zenglian, Tang Chao, Jin Ruoshi, Duan Ming, Wei Jialin, Zeng Hui, Zhang Chao. 2024. Provenance characteristics of uranium-bearing sediments of upper Saihan Formation and its implications for sandstone-type uranium mineralization in Manite depression, Erlian basin[J]. Earth Science, 49(10): 3589–3609 (in Chinese with English abstract).
- Liu S, Hu R Z, Gao S, Feng C X, Feng G Y, Coulson I M, Li C, Wang T, Qi Y Q. 2010. Zircon U–Pb age and Sr–Nd–Hf isotope geochemistry of Permian granodiorite and associated gabbro in the Songliao Block, NE China and implications for growth of juvenile crust[J]. Lithos, 114(3): 423–436.
- Liu W, Pan X F, Liu D Y, Chen Z Y. 2009. Three-step continental-crust growth from subduction accretion and underplating, through intermediary differentiation, to granitoid production[J]. International Journal of Earth Sciences, 98(6): 1413–1439.
- Liu W, Siebel W, Li X J, Pan X F. 2005. Petrogenesis of the Linxi granitoids, northern Inner Mongolia of China: Constraints on basaltic underplating[J]. Chemical Geology, 219(1/4): 5–35.
- Liu Xiaoxue, Zhao Lijun, Yu Reng'an, Tang Chao. 2024. Rock geochemistry characteristics and geological significance of sandstone-type uranium deposits in Luhai area, Erlian Basin[J]. North China Geology, 47(3): 36–45 (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Hu Z C, ShanGao, Detlef G, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA–ICP–MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 257(1/2): 34–43.
- Lu Y Q, Jiang Y L, Wang W, Du J F, Liu J D, 2020. Coupling relationship between reservoir diagenesis and hydrocarbon accumulation in Lower Cretaceous Yingcheng Formation of Dongling, Changling fault depression, Songliao Basin, Northeast China[J]. China Geology, 3(2): 247–261.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center Special Publication.
- Meng E, Xu W L, Pei F P, Yang D B, Yu Y, Zhang X Z. 2010. Detrital-zircon geochronology of Late Paleozoic sedimentary rocks in eastern Heilongjiang Province, NE China: Implications for the tectonic evolution of the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Tectonophysics, 485: 42–51.
- Miao Laicheng, Liu Dunyi, Zhang Fuqin, Fan Weiming, Shi Yurao, Jie Hangqiang. 2007. Zircon SHRIMP U–Pb ages of the “Xinghuadukou Group” in Hanjiayuanzi and Xinlin areas and the “Zhalantun Group” in Inner Mongolia, Da Hinggan Mountains[J]. Chinese Science Bulletin, 52(5): 591–601 (in Chinese with English abstract).
- Miao L C, Qiu Y M, Fan W M, Zhang F Q, Zhai M G. 2005. Geology, geochronology, and tectonic setting of the Jiapigou gold deposits, southern Jilin Province, China[J]. Ore Geology Reviews, 26(1): 137–165.
- Pei Fupin, Xu Wenliang, Yang Debing, Zhao Quanguo, Liu Xiaoming, Hu Zhaocu. 2006. Zircon U–Pb chronology and its geological significance in basement metamorphic rocks of Songliao Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 51(24): 2881–2887 (in Chinese without English abstract).
- She Hongquan, Liang Yuwei, Li Jinwen, Guan Jidong, Zhang Dequan, Yang Yuncheng, Xiang Anping, Jin Jun, Tan Gang, Zhang Bin. 2011. The Early–Mesozoic magmatic activity at Moerdaoga district in Inner Mongolia and its geodynamic implication[J]. Journal of Jilin University, 41(6): 1831–1864 (in Chinese with English abstract).
- Shi Chenglong, Zhou Xiaodong, Nie Lijun, Zhou Kai, Sun Gang. 2020. Discovery and geological significance of Mesoproterozoic strata in Erdaobaihe Area, southern Jilin Province[J]. Earth Science, 45(7): 2441–2451 (in Chinese with English abstract).
- Shi Guanghai, Miao Laicheng, Zhang Fuqin, Jian Ping, Fan Weiming, Liu Dunyi. 2004. The age and regional tectonic significance of A–type granite in Xilinhot, Inner Mongolia[J]. Chinese Science Bulletin, 49(4): 384–389 (in Chinese).
- Song Y, Ren J Y, Stepashko A, Li J G. 2014. Post–rift geodynamics of the Songliao Basin, NE China: Origin and significance of T11 (Coniacian) unconformity[J]. Tectonophysics, 634: 1–18.
- Sun Dapeng, Tang Chao, Wei Jialin, Zeng Hui, Chen Jun, Xiao Defu. 2021. Logging responsive characteristics of formation lithology from Nenjiang Formation to Taikang Formation in southern Daqing Placanticline[J]. North China Geology, 44(1): 14–20 (in Chinese with English abstract).
- Sun Deyou, Wu Fuyuan, Gao Shan. 2004. LA–ICPMS zircon U–Pb age of the Qingshui pluton in the east Xiao Hinggan mountains[J]. Acta Geoscientia Sinica, 25(2): 213–218 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jinggui, Chen Lei, Zhao Junkang, Men Lanjing, Pang Wei, Chen Dong, Liang Shuneng. 2008. SHRIMP U–Pb dating of zircons from Late Yanshanian granitic complex in Xiaoxinancha gold-rich copper ore field of Yanbian and its geological implications[J]. Mineral Deposits, 27(3): 319–328 (in Chinese with English abstract).
- Sun Ningliang, Zhong Jianhua, Ni Liangtian, Hao Bing, Luo Ke, Qu Junli, Liu Chuang, Yang Guanqun, Cao Mengchun. 2019. Provenance analysis and thermal evolution of Upper Triassic Yanchang Formation in the southern Ordos Basin[J]. Geology in China, 46(3): 537–556 (in Chinese with English abstract).
- Tang Chao, Jin Ruoshi, Gu Shefeng, Li Jianguo, Zhong Yanqiu, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Wei Jialin. 2018. Discovery and significance of industrial uranium ore in Sifangtai Formation, north Songliao Basin[J]. Geological Survey and Research, 41(1): 1–8 (in Chinese with English abstract).

- Tang Jie, Xu Wenliang, Wang Feng, Gao Fuhong, Cao Huahua. 2011. Petrogenesis of bimodal volcanic rocks from Maoershan Formation in Zhangguangcai Range: Evidence from geochronology and geochemistry[J]. *Global Geology*, 30(4): 508–520 (in Chinese with English abstract).
- Wallis S R, Anczkiewicz R, Endo S, Aoya M, Platt J P, Thirlwall M, Hirata T. 2009. Plate movements, ductile deformation and geochronology of the Sanbagawa belt, SW Japan: Tectonic significance of 89–88 Ma Lu–Hf eclogite ages[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27: 93–105.
- Wang F, Xu W L, Meng E, Cao H H, Gao F H. 2012. Early Paleozoic amalgamation of the Songnen–Zhangguangcai Range and Jiamusi massifs in the eastern segment of the Central Asian Orogenic Belt: Geochronological and geochemical evidence from granitoids and rhyolites[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49(3): 234–248.
- Wang F, Xu W L, Gao F H, Zhang H H, Pei F P, Zhao L, Yang Y. 2014. Precambrian terrane within the Songnen–Zhangguangcai Range Massif, NE China: Evidence from U–Pb ages of detrital zircons from the Dongfengshan and Tadong groups[J]. *Gondwana Research*, 26(1): 402–413.
- Wang Xingan, Xu Zhongyuan, Liu Zhenghong, Zhu Kai. 2012. Petrogenesis and tectonic setting of the K–feldspar granites in Chaihe area, central Greater Xing'an Range: Constraints from petro–geochemistry and zircon U–Pb isotope chronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(8): 2647–2655 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ying, Zhang Fuqin, Zhang Dawei, Miao Laicheng, Li Tiesheng, Xie Hangqiang, Meng Qingren, Liu Dunyi. 2006. Zircon SHRIMP U–Pb dating of meta–diorite from the basement of the Songliao Basin and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 51(15): 1877–1883 (in Chinese).
- Wang Zhaolin, Jin Jun, Li Zhanlong, Lu Baizhi, Zhang Zhongyi, Ke Xusheng, Zhao Wei, Zhou Yanan, Zhou Jufang. 2010. Zircon U–Pb ages and Hf isotopic characteristics of mineralized porphyries in the Mordaoga area, northern–central Da Hinggan Mountains, and their metallogenic significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 796–810 (in Chinese with English abstract).
- Wei Jialin, Tang Chao, Xu Zenglian, Xiao Peng, Liu Huajian, Zeng Hui, Chen Lulu, Zhao Lijun, Guo Hu, Zhang Chao, Zhu Qiang, Li Yanfeng. 2018. Research on sandstone–hosted uranium mineralization of the Sifangtai Formation in southern Daqing placanticline[J]. *Geological Survey and Research*, 41(1): 9–17 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Sun D Y, Li H M, Jahn B M, Wilde S A. 2002. A–type granites in northeastern China: Age and geochemical constraints on their petrogenesis[J]. *Chemical Geology*, 187(1/2): 143–173.
- Wu F Y, Wilde S A, Zhang G L, Sun D Y. 2004. Geochronology and petrogenesis of the post–orogenic Cu–Ni sulfide–bearing mafic–ultramafic complexes in Jilin Province, NE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 781–797.
- Wu F Y, Sun D Y, Ge W C, Zhang Y B, Grant M L, Wilde S A, Jahn B M. 2011. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41(1): 1–30.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U–Pb age[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- Xiao Peng, Jin Ruoshi, Tang Chao, Liu Huajian, Deng Yonghui, Wei Jialin, Xu Zenglian. 2018. Provenance system of the Late Cretaceous Sifangtai Formation in the south of Daqing placanticline of the northern Songliao Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(4): 493–501 (in Chinese with English abstract).
- Xu J Q, Li Z, Shi Y H. 2013. Jurassic detrital zircon U–Pb and Hf isotopic geochronology of Luxi Uplift, eastern North China, and its provenance implications for tectonic–paleogeographic reconstruction[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 78(15): 184–197.
- Xu Wenliang. 2008. Zircon U–Pb age from basement granites in Yishu graben and its tectonic implications[J]. *Earth Science*, 33(2): 145–150 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yajun, Du Yuansheng, Yang Jianghai. 2007. Prospects of sediment provenance analysis[J]. *Geological Science & Technology Information*, 26(3): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zenglian, Tang Chao, Li Jianguo, Wei Jialin, Zeng Hui, Xiao Peng, Liu Huajian, Chen Lulu. 2018. Sequence stratigraphy of the Sifangtai Formation and its relationship with uranium mineralization in the Sanzhao depression, northern Songliao Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 41(1): 24–32 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zenglian, Tang Chao, Wei Jialin, Zeng Hui, Xiao Peng, Liu Huajian. 2021. Late Cretaceous palynological record and its paleoclimate significance in the southern of Daqing placanticline[J]. *North China Geology*, 44(2): 74–80 (in Chinese with English abstract).
- Xue Huaimin, Guo Lijun, Hou Zengqian, Tong Ying, Pan Xiaofei, Zhou Xiwen. 2010. SHRIMP zircon U–Pb ages of the Middle Neopaleozoic unmetamorphosed magmatic rocks in the southwestern slope of the Da Hinggan Mountains, Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 29(6): 811–823 (in Chinese with English abstract).
- Yan Yi, Lin Ge, Li Zian. 2003. Provenance tracing of sediments by means of synthetic study of shape, composition and chronology of zircon[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 27(2): 184–190 (in Chinese with English abstract).
- Yang Renchao, Li Jinbu, Fan Aiping, Zong Min, Zhang Tao. 2013. Research progress and development tendency of provenance analysis on terrigenous sedimentary rocks[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(1): 99–107 (in Chinese with English abstract).
- Yang Yanchen, Han Shijiong, Sun Deyou, Guo Jia, Zhang Sujiang. 2012. Geological and geochemical features and geochronology of

- porphyry molybdenum deposits in the Lesser Xing'an Range-Zhangguangcai Range metallogenic belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(2): 227-235 (in Chinese with English abstract).
- Yoshino K, Wan X Q, Xi D P, Li W, Matsuoka A. 2017. Campanian-Maastrichtian palynomorph from the Sifangtai and Mingshui Formations, Songliao Basin, Northeast China: Biostratigraphy and paleoflora[J]. *Palaeoworld*, 26(2): 352-368.
- Yu R A, Wang S B, Zhu Q, Si Q H, Teng X M, Liu X X, Liu H N, Tang Y X. 2021. Zircon U-Pb ages and provenance characteristics of the Zhiluo Formation sandstones and the formation background of the uranium deposit in Huangling area, Ordos Basin, China[J]. *China Geology*, 4(4): 600-615.
- Yu Wenbin, Dong Qingshui, Zhou Lianrong, Zhu Jianfeng, Zhang Yi. 2008. Action of reversal fault structure on sandstone type uranium mineralization in the south of Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 24(4): 195-200 (in Chinese with English abstract).
- Yu Xing, Xiao Jun, Chen Hanlin, Zhang Fengqi, Xu Yan, Dong Chuanwan, Pang Yanming. 2008. Phanerozoic magmatic events in the basement of Songliao Basin: SHRIMP dating of captured zircons from Yingcheng Formation volcanic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 24(5): 1123-1130 (in Chinese with English abstract).
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Detlef G, Wu F Y. 2010. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry[J]. *Geostandards & Geoanalytical Research*, 28(3): 353-370.
- Zhang Chao, Si Qinghong, Yu Reng'an, Wang Shanbo, Cheng Yinhang, Yu Hang, Feng Ping, Shi Guangshun, Ao Cong, Li Zhidan, Gao Xuefeng. 2023. Analysis of the relationship between sedimentary characteristics and uranium deposits from the Neogene Shizigou Formation in Huatugou area, Northwest Qaidam Basin[J]. *Geology in China*, 50(5): 1327-1342 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Fengqi, Chen Hanlin, Dong Chuanwan, Yu Xing, Xiao Jun, Pang Yanming, Cao Ruicheng, Zhu Defeng. 2008. Evidence for the existence of Precambrian basement under the northern Songliao basin[J]. *Geology in China*, 35(3): 421-428 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lei, Wang Yingmin, Li Shuqing, Han Jianhui, Zhang Xintao, Zhu Yanhe, Wang Gaiyun, Yang Ting. 2009. High-resolution sequence stratigraphic characteristic and favorable hydrocarbon accumulation prediction of Sifangtai to Mingshui Formation in the north of Songliao Basin[J]. *Journal of Central South University*, 40(6): 1679-1688 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaohui, Su Wenji, Wang Hui. 2005. Zircon SHRIMP geochronology of the Faku tectonites in the northern Liaoning Province: Implications for the northern boundary of the North China Craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 135-142 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y B, Wu F Y, Wilde S A, Zhai M G, Lu X P, Sun D Y. 2004. Zircon U-Pb ages and tectonic implications of 'Early Paleozoic' granitoids at Yanbian, Jilin Province, northeast China[J]. *Island Arc*, 13(4): 484-505.
- Zhang Yujin, Wu Weixin, Yang Yajun, Cui Tianri, Jiang Bin, Guo Wei, Zhang Chao, Qian Cheng, Chen Huijun. 2016. Discovery and geological significance of adakitic rocks in the Late Paleozoic Gegenao Formation in Zhalantun area, middle Daxinganling mountains[J]. *Geology & Resources*, 25(3): 227-236 (in Chinese with English abstract).
- Zhao B, Wang C S, Wang X F, Feng Z Q. 2013. Late Cretaceous (Campanian) provenance change in the Songliao Basin, NE China: Evidence from detrital zircon U-Pb ages from the Yaojia and Nenjiang Formations[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 385: 83-94.
- Zhao Hongge, Liu Chiyang. 2003. Approaches and prospects of provenance analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 21(3): 409-415 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yuandong, Mo Xuanxue, Li Shichao, Che Jiyang, Xu Fengming, Wu Datian, Zhang Qianfeng, Zhao Jun, Wang Kuiliang. 2015. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating, petrogeochemical features of granitic mylonite in Northwestern Lesser Hinggan Mountains, and tectonic significance[J]. *Geological Review*, 61(2): 443-456 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhonghua, Bai Jingping, Nai Tiangong. 2018. Reversal structure and its relation to metallization of sandstone type uranium deposit in northern Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 34(5): 274-279 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Mishan, Wang Haipeng, Zhang Chengbin, Mu Yanan, Wang Qi, Wang Yilong, Yang Yunlai, Tan Chao, Zhao Chen. 2018. Formation time and provenance of the Xinxing Formation of Zhangguangcailing Group in southeastern Heilongjiang Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(11): 2318-2330 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Yanqiu, Ma Wenjuan. 2011. Mesozoic, Cenozoic tectonic movements and the control on sandstone-hosted uranium deposit in north Songliao Basin[J]. *Contributions to Geology & Mineral Resources Research*, 26(4): 411-416 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈雷, 孙景贵, 陈行时, 赵雨君, 陈冬, 赵俊康. 2009. 张广才岭东侧英城子金矿区花岗岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *地质学报*, 83(9): 1327-1334.
- 陈路路, 李名, 汤超, 贺静, 陈印, 赵华雷, 唐力. 2022. 松辽盆地北部三肇凹陷四方台组含铀砂岩岩石学、矿物学特征及其地质意义[J]. *华北地质*, 45(4): 10-20.
- 陈路路, 汤超, 李建国, 钟延秋, 谷社峰, 魏佳林, 肖鹏, 徐增连, 曾辉, 刘华建, 陈印. 2018. 松辽盆地大庆长垣南端四方台组含铀砂岩岩石学特征及地质意义[J]. *地质调查与研究*, 41(1): 33-39.

- 陈印, 冯晓曦, 陈路路, 金若时, 苗培森, 司马献章, 苗爱生, 汤超, 王贵, 刘忠仁. 2017. 鄂尔多斯盆地东北部直罗组内碎屑锆石和铀矿物赋存形式简析及其对铀源的指示[J]. *中国地质*, 44(6): 1190–1206.
- 程日辉, 王国栋, 王璞珺, 高有峰. 2009. 松科 1 井北孔四方台组—明水组沉积微相及其沉积环境演化[J]. *地学前缘*, 16(6): 85–95.
- 程银行, 金若时, Cuney M, Petrov V A, 苗培森. 2024. 中国北方盆地大规模铀成矿作用: 地层篇[J]. *地质学报*, 98(7): 1953–1976.
- 崔璨, 席党鹏, 黄清华, 聂志阳, 史忠叶, 万晓樵. 2016. 松辽盆地西部斜坡区 LD17 井明水组孢粉组合及其地质意义[J]. *微体古生物学报*, 33(1): 21–32.
- 付丽, 邱华宁, 霍秋立, 王雪, 曾花森. 2011. 伊利石⁴⁰Ar–³⁹Ar 定年技术在松辽盆地北部下白垩统泉头组四段物源和油气成藏时代研究中的应用[J]. *地球化学*, 40(5): 418–427.
- 高福红, 王枫, 许文良, 杨扬. 2013. 小兴安岭“古元古代”东风山群的形成时代及其构造意义: 锆石 U–Pb 年代学证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 43(2): 440–456.
- 高福红, 王磊, 许文良, 王枫. 2016. 小兴安岭“晚古生代”地层的时代与物源: 地质与碎屑锆石 U–Pb 年代学证据[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 46(2): 469–481.
- 葛荣峰, 张庆龙, 王良书, 解国爱, 徐士银, 陈娟, 王锡勇. 2010. 松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换[J]. *地质论评*, 56(2): 180–195.
- 葛文春, 吴福元, 周长勇, 张吉衡. 2007. 兴蒙造山带东段斑岩型 Cu、Mo 矿床成矿时代及其地球动力学意义[J]. *科学通报*, 52(20): 2407–2417.
- 郭佩, 刘池洋, 王建强, 李长志. 2017. 碎屑锆石年代学在沉积物源研究中的应用及存在问题[J]. *沉积学报*, 35(1): 46–56.
- 郝文丽, 许文良, 王枫, 唐杰, 徐美君, 高福红. 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[J]. *岩石学报*, 30(7): 1867–1878.
- 和钟铎, 刘招君, 张峰. 2001. 重矿物在盆地分析中的应用研究进展[J]. *地质科技情报*, 20(4): 29–32.
- 黄清华, 谭伟, 杨会臣. 1999. 松辽盆地白垩纪地层序列与年代地层[J]. *大庆石油地质与开发*, 18(6): 15–17.
- 金若时, 程银行, 李建国, 司马献章, 苗培森, 王少轶, 奥琮, 里宏亮, 李艳锋, 张天福. 2017. 中国北方晚中生代陆相盆地红—黑岩系耦合产出对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. *中国地质*, 44(2): 205–223.
- 李红英, 周志广, 张达, 李鹏举, 柳长峰, 陈利贞, 陈诚, 谷丛楠. 2015. 内蒙古西乌旗格爾楚鲁晚三叠世流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(3): 546–555.
- 李宇, 丁磊磊, 许文良, 王枫, 唐杰, 赵硕, 王子进. 2015. 孙吴地区中侏罗世白云母花岗岩的年代学与地球化学: 对蒙古—鄂霍茨克洋闭合时间的限定[J]. *岩石学报*, 31(1): 56–66.
- 刘华健, 金若时, 肖鹏, 汤超, 徐增连, 李建国, 王铁军, 陈路路, 魏佳林. 2018. 松辽盆地北部古恰地区含铀岩系四方台组粒度特征及其沉积环境指示意义[J]. *地质调查与研究*, 41(1): 40–50.
- 刘华健, 徐增连, 汤超, 金若时, 段明, 魏佳林, 曾辉, 张超. 2024. 二连盆地马尼特坳陷赛汉组上段赋铀沉积物源特征及其对砂岩型铀成矿的启示[J]. *地球科学*, 49(10): 3589–3609.
- 刘晓雪, 赵丽君, 俞初安, 汤超. 2024. 二连盆地陆海地区砂岩型铀矿岩石地球化学特征及地质意义[J]. *华北地质*, 47(3): 36–45.
- 苗来成, 刘敦一, 张福勤, 范蔚茗, 石玉若, 颜炳强. 2007. 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*, 52(5): 591–601.
- 裴福萍, 许文良, 杨德彬, 赵全国, 柳小命, 胡兆初. 2006. 松辽盆地基底变质岩中锆石 U–Pb 年代学及其地质意义[J]. *科学通报*, 51(24): 2881–2887.
- 余宏全, 梁玉伟, 李进文, 关继东, 张德全, 杨郎城, 向安平, 金俊, 谭刚, 张斌. 2011. 内蒙古莫尔道嘎地区早中生代岩浆作用及其地球动力学意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(6): 1831–1864.
- 石成周, 周晓东, 聂立军, 周凯, 孙罡. 2020. 吉林省南部二道白河地区中元古代地层的发现及其地质意义[J]. *地球科学*, 45(7): 2441–2451.
- 施光海, 苗来成, 张福勤, 简平, 范蔚茗, 刘敦一. 2004. 内蒙古锡林浩特 A 型花岗岩的时代及区域构造意义[J]. *科学通报*, 49(4): 384–389.
- 孙大鹏, 汤超, 魏佳林, 曾辉, 陈军, 肖德富. 2021. 大庆长垣南端含铀岩系地层测井响应特征及应用[J]. *华北地质*, 44(1): 14–20.
- 孙德有, 吴福元, 高山. 2004. 小兴安岭东部清水岩体的锆石激光探针 U–Pb 年龄测定[J]. *地球学报*, 25(2): 213–218.
- 孙景贵, 陈雷, 赵俊康, 门兰静, 逢伟, 陈东, 梁树能. 2008. 延边小西南岔富金铜矿田燕山晚期花岗杂岩的锆石 SHRIMP U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *矿床地质*, 27(3): 319–328.
- 孙宁亮, 钟建华, 倪良田, 郝兵, 罗可, 曲俊利, 刘闯, 杨冠群, 曹梦春. 2019. 鄂尔多斯盆地南部上三叠统延长组物源分析及热演化[J]. *中国地质*, 46(3): 537–556.
- 汤超, 金若时, 谷社峰, 李建国, 钟延秋, 苗培森, 司马献章, 魏佳林. 2018. 松辽盆地北部四方台组工业铀矿体的发现及其意义[J]. *地质调查与研究*, 41(1): 1–8.
- 唐杰, 许文良, 王枫, 高福红, 曹花花. 2011. 张广才岭帽儿山组双峰式火山岩成因: 年代学与地球化学证据[J]. *世界地质*, 30(4): 508–520.
- 王兴安, 徐仲元, 刘正宏, 朱凯. 2012. 大兴安岭中部柴河地区钾长花岗岩的成因及构造背景: 岩石地球化学、锆石 U–Pb 同位素年代学的制约[J]. *岩石学报*, 28(8): 2647–2655.
- 王颖, 张福勤, 张大伟, 苗来成, 李铁胜, 颜炳强, 孟庆任, 刘敦一. 2006. 松辽盆地南部变闪长岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *科学通报*, 51(15): 1811–1816.
- 王召林, 金凌, 李占龙, 卢百志, 张忠义, 可旭升, 赵伟, 周亚男, 周菊芳. 2010. 大兴安岭中北段莫尔道嘎地区含矿斑岩的锆石 U–Pb 年龄、Hf 同位素特征及成矿意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 796–810.
- 魏佳林, 汤超, 徐增连, 肖鹏, 刘华健, 曾辉, 陈路路, 赵丽君, 郭虎, 张超, 朱强, 李艳锋. 2018. 大庆长垣南部四方台组砂岩型铀矿化特征研究[J]. *地质调查与研究*, 41(1): 9–17.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 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*, 49(16): 1589–1604.

- 肖鹏, 金若时, 汤超, 刘华健, 邓永辉, 魏佳林, 徐增连. 2018. 松辽盆地北部大庆长垣南端上白垩统四方台组物源体系分析[J]. *石油实验地质*, 40(4): 493–501.
- 许文良. 2008. 伊舒地堑基底花岗岩的锆石 U–Pb 年代学及其构造意义[J]. *地球科学*, 33(2): 145–150.
- 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 2007. 沉积物物源分析研究进展[J]. *地质科技情报*, 26(3): 26–32.
- 徐增连, 汤超, 李建国, 魏佳林, 曾辉, 肖鹏, 刘华健, 陈路路. 2018. 松辽盆地北部三肇凹陷四方台组层序地层及其与砂岩型铀矿化的关系[J]. *地质调查与研究*, 41(1): 24–32.
- 徐增连, 汤超, 魏佳林, 曾辉, 肖鹏, 刘华健. 2021. 大庆长垣南端晚白垩世泡粉组特征及其古气候记录[J]. *华北地质*, 44(2): 74–80.
- 薛怀民, 郭利军, 侯增谦, 童英, 潘晓菲, 周喜文. 2010. 大兴安岭西南坡成矿带晚古生代中期末变质岩浆岩的 SHRIMP 锆石 U–Pb 年代学[J]. *岩石矿物学杂志*, 29(6): 811–823.
- 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[J]. *大地构造与成矿学*, 27(2): 184–190.
- 杨仁超, 李进步, 樊爱萍, 宗敏, 张涛. 2013. 陆源沉积岩物源分析研究进展与发展趋势[J]. *沉积学报*, 31(1): 99–107.
- 杨言辰, 韩世炯, 孙德有, 郭嘉, 张苏江. 2012. 小兴安岭—张广才岭成矿带斑岩型钼矿床岩石地球化学特征及其年代学研究[J]. *岩石学报*, 28(2): 227–235.
- 于文斌, 董清水, 周连永, 朱建峰, 张毅. 2008. 松辽盆地南部断裂反转构造对砂岩型铀矿成矿的作用[J]. *铀矿地质*, 24(4): 195–200.
- 余星, 肖骏, 陈汉林, 章凤奇, 徐岩, 董传万, 庞彦明. 2008. 松辽盆地基底显生宙岩浆热事件: 来自营城组火山岩捕获锆石的 SHRIMP 定年证据[J]. *岩石学报*, 24(5): 1123–1130.
- 章凤奇, 陈汉林, 董传万, 余星, 肖骏, 庞彦明, 曹瑞成, 朱德丰. 2008. 松辽盆地北部存在前寒武纪基底的证据[J]. *中国地质*, 35(3): 421–428.
- 张超, 司庆红, 俞初安, 王善博, 程银行, 于航, 冯平, 石广顺, 奥琮, 李志丹, 高雪峰. 2023. 柴西北缘花土沟地区新近系狮子沟组沉积特征与砂岩型铀矿关系分析[J]. *中国地质*, 50(5): 1327–1342.
- 张雷, 王英民, 李树青, 韩建辉, 张新涛, 祝彦贺, 王改云, 杨婷. 2009. 松辽盆地北部四方台组—明水组高精度层序地层特征与有利区带预测[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 40(6): 1679–1688.
- 张晓晖, 宿文姬, 王辉. 2005. 辽北法库构造岩系的锆石 SHRIMP 年代学研究及与华北地台北缘边界[J]. *岩石学报*, 21(1): 135–142.
- 张渝金, 吴新伟, 杨雅军, 崔天日, 江斌, 郭威, 张超, 钱程, 陈会军. 2016. 大兴安岭扎兰屯地区晚古生代格根敖包组埃达克岩的发现及地质意义[J]. *地质与资源*, 25(3): 227–236.
- 赵红格, 刘池洋. 2003. 物源分析方法及研究进展[J]. *沉积学报*, 21(3): 409–415.
- 赵院冬, 莫宣学, 李士超, 车继英, 许逢明, 吴大天, 张乾峰, 赵君, 王奎良. 2015. 小兴安岭西北部花岗质糜棱岩锆石 LA–ICP–MS–Pb 年龄、岩石地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 61(2): 443–456.
- 赵忠华, 白景萍, 赖天功. 2018. 松辽盆地北部反转构造与砂岩型铀矿成矿作用[J]. *铀矿地质*, 34(5): 274–279.
- 仲米山, 王海鹏, 张呈彬, 穆亚男, 王岐, 王艺龙, 杨运来, 谭超, 赵晨. 2018. 黑龙江省东南部张广才岭群新兴组的形成时代及物源[J]. *地质学报*, 92(11): 2318–2330.
- 钟延秋, 马文娟. 2011. 松辽盆地北部中、新生代构造运动特征及对砂岩型铀矿的控制作用[J]. *地质找矿论丛*, 26(4): 411–416.