



小兴安岭西北部卧都河地区落马湖岩群年代学及构造背景

付俊彧, 那福超, 钱程, 杨晓平, 孙巍, 钟辉, 张广宇, 刘英才

中国地质调查局 沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110034

摘要: 出露于小兴安岭西北部的“落马湖岩群”是多宝山矿集区重要的地质建造之一, 由于缺少化石及顶底不全, 其形成时代一直存在争议, 制约了对区域构造演化及成矿背景的认识。为了探讨其形成时代及古构造背景, 采用锆石 U-Pb(LA-ICP-MS)方法对卧都河乡附近的“落马湖岩群”变粉砂质泥岩的碎屑锆石进行了年代学研究, 85 个测点中 68 个有效测点年龄介于 216~2 636 Ma, 分为 8 个年龄组: 216~347 Ma ($n=8$), 430~443 Ma ($n=2$), 463~502 Ma (加权平均 485 ± 5 Ma, $n=21$), 513~572 Ma (加权平均 528 ± 7 Ma, $n=16$), 596~613 Ma (加权平均 606 ± 12 Ma, $n=7$), 718~739 Ma (加权平均 730 ± 12 Ma, $n=3$), 830~882 Ma (加权平均 850 ± 26 Ma, $n=5$), 1 769~2 636 Ma ($n=6$), 以第三—第七年龄组构成明显的峰值。综合分析锆石晶态、CL 图像、U 含量特征及地质体宏观岩相学特点, 认为第三年龄组代表样品层位沉积下限。结合区域研究成果, 认为“落马湖岩群”形成于奥陶纪至志留纪罗德洛世; 其碎屑锆石主要来源于“额尔古纳-兴安联合地块”及奥陶纪弧火山岩区, 形成于弧后盆地构造背景; 其与多宝山弧岩带共同构成早古生代弧-盆系。

关键词: 落马湖岩群; 变粉砂质泥岩; 锆石 U-Pb 年龄; 弧后盆地; 地质年代学; 小兴安岭

GEOCHRONOLOGY AND TECTONIC SETTING OF LUOMAHU COMPLEX IN WODUHE AREA, NORTHWESTERN DAXINGANLING MOUNTAINS

FU Jun-yu, NA Fu-chao, QIAN Cheng, YANG Xiao-ping, SUN Wei,

ZHONG Hui, ZHANG Guang-yu, LIU Ying-cai

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: Due to the lack of fossils and incomplete roof and bottom, the forming age of Luomahu Complex, one of the important geological formations in Duobaoshan ore concentration area, has been controversial, restricting the cognition of regional tectonic evolution and metallogenic background. The geochronology of detrital zircons in meta-silty mudstones from Luomahu Complex near Wuduhe Township are studied by zircon U-Pb LA-ICP-MS dating method to investigate the formation age and paleotectonic setting. Among the 85 survey points, 68 effective ones range in age from 216 to 2 636 Ma and can be divided into eight age groups: 216–347 Ma, 430–443 Ma, 463–502 Ma, 513–572 Ma, 596–613 Ma, 718–739 Ma, 830–882 Ma and 1 769–2 636 Ma, with the third to seventh groups forming obvious peak values. Based on the comprehensive analysis of zircon crystalline state, CL image, U content characteristics and macro

收稿日期: 2022-03-07; 修回日期: 2022-04-11. 编辑: 张哲.

基金项目: 中国地质调查局项目“东北地区区域基础地质调查”(编号 DD20221632); “中国大地构造演化和国际亚洲大地构造图编制”(编号 DD20190360).

作者简介: 付俊彧(1966—), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地质矿产研究, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//fjzyzy@163.com

通信作者: 钟辉(1964—), 女, 正高级工程师, 主要从事岩石学及矿物学研究工作, 通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号, E-mail//2418734955@qq.com

petrographic features of geological body, it is considered that the third age group represents the maximum sedimentary age of sample layers. Combined with the regional research results, it is concluded that Luomahu Complex was formed in Ordovician-Silurian Ludlovian, with the detrital zircons mainly derived from the Erguna-Xing'an block and Ordovician arc volcanic rocks and formed in the tectonic setting of back-arc basin. The Luomahu Complex, together with Duobaoshan arc magmatic belt, formed the Early Paleozoic arc-basin system.

Key words: Luomahu Complex; meta-silty mudstone; zircon U-Pb age; back-arc basin; geochronology; Xiaoxinganling Mountains

0 引言

中国东北地区主体位于中亚造山带东段与西太平洋陆缘活动带的叠加部位, 古生代古亚洲洋构造域时期, 由一系列微陆块及其间增生杂岩组成. 这些微陆块自北西往南东依次划分出了额尔古纳地块、兴安地块、松嫩-张广才岭地块、佳木斯-兴凯地块^[1-5], 历经古亚洲洋消减、陆缘增生、弧-陆碰撞及陆-陆碰撞多个演化阶段. 中生代蒙古-鄂霍次克构造域及西太平洋构造域的叠加, 发育巨量的深成侵入岩带及火山岩带, 伴有大型推覆构造^[6-8]及走滑断裂构造, 对于古生代构造带进行了强烈的改造^[9-11], 尤其前寒武纪变质岩系多呈孤岛状或残块状零星出露. 对其认识一直存在较大的争议, 严重制约了区域构造演化的认识. 兴华渡口岩群、倭勒根岩群、零点群、落马湖岩群被认为是额尔古纳地块及兴安地块的前寒武纪变质基底^[12]. 近年研究表明, 原划分为古元古代的兴华渡口岩群是主体形成于中-新元古代并包含有不同时代地质体的变质杂岩^[13-18]; 原划分为新元古代的倭勒根岩群、零点群浅变质岩系中也包括有新元古代、奥陶纪-志留纪地质体, 部分为蛇绿构造混杂岩带的组成部分^[19-21]. 出露于兴安地块东缘被划分为新元古代的落马湖岩群, 同样因为缺少顶底及化石依据, 对其形成时代存在认识分歧^[22-24]. 落马湖岩群是兴安地块东缘毗邻古生代多宝山岛弧带的组成部分, 其形成时代的准确厘定, 对多宝山岛弧带的形成演化历史及 Cu-Au-Mo 多金属矿集区构造-成矿作用研究具有重要意义.

1 区域地质背景

研究区位于小兴安岭西北部与大兴安岭接合部位的卧都河地区(图 1), 古生代隶属兴安地块东南缘的多宝山岛弧岩浆岩带; 中生代叠加晚三叠世-早侏罗

世强烈的深成侵入活动, 坐落于嫩江-开鲁断裂带北段上. 出露的主要地质体有: 奥陶系-志留系海相中基性火山岩-碎屑沉积岩夹碳酸盐岩建造和泥盆系海相碎屑沉积岩夹碳酸盐岩及中基性-中酸性火山岩建造, 都产丰富的海相动物化石, 它们共同构成岛弧带主体; 上泥盆统一下石炭统为海陆交互相-陆相碎屑沉积岩夹凝灰质砂岩及凝灰岩, 产植物化石; 上二叠统陆相中-酸性火山岩夹碎屑沉积岩不整合覆盖于其前地质体之上; 少量石炭纪花岗岩侵入落马湖岩群及奥陶系-泥盆系地层; 大面积出露晚三叠世-早侏罗世花岗岩类, 古元古代中深变质的兴华渡口岩群及新元古代中-浅变质的落马湖岩群呈孤岛状或残块状分布于其中; 沿北北东向的嫩江断裂带, 发育下三叠统陆相杂色-紫色粗碎屑岩组合及充填早白垩世火山断陷盆地的中基性火山岩夹碎屑含煤沉积, 并有早白垩世花岗岩类侵入前中生代地质体中(图 1b)^①.

本研究中的落马湖岩群位于黑龙江省黑河市卧都河乡、嫩江断裂带北东向次级断裂(卧都河断裂)带上(图 1a)^[5]. 其南侧大面积出露构成多宝山岛弧带主体的古生代地质体, 北侧接北东向分布的晚三叠世-早侏罗世花岗岩, 并发育片理化带. 采样地出露的落马湖岩群包括嘎拉山岩组及北宽河岩组, 该套地质体以岩石组合及不产大化石与邻近古生代地质体存在明显区别. 其中, 前者主要为二云母片岩及黑云角闪斜长片麻岩组合, 二者构造协调, 片理(或片麻理)产状为 $170^{\circ} \angle 55^{\circ}$, 岩相学及年代学研究结果表明, 黑云角闪斜长片麻原岩为形成于 246 Ma 左右并侵入其中的基性岩脉^[25]; 后者主要为绢云千枚岩、变长石岩屑杂砂岩、变粉砂质泥岩(产古球藻类化石)夹白色变流纹质沉火山灰凝灰岩, 岩层产状 $350^{\circ} \angle 35^{\circ}$ 、 $180^{\circ} \angle 60^{\circ}$ ~ $220^{\circ} \angle 50^{\circ}$, 并存在枢纽近东西向的褶皱构造, 其与晚

①黑龙江省地质调查研究院. 卧都河幅-黑河市幅 1:25 万区域地质调查报告. 2009.

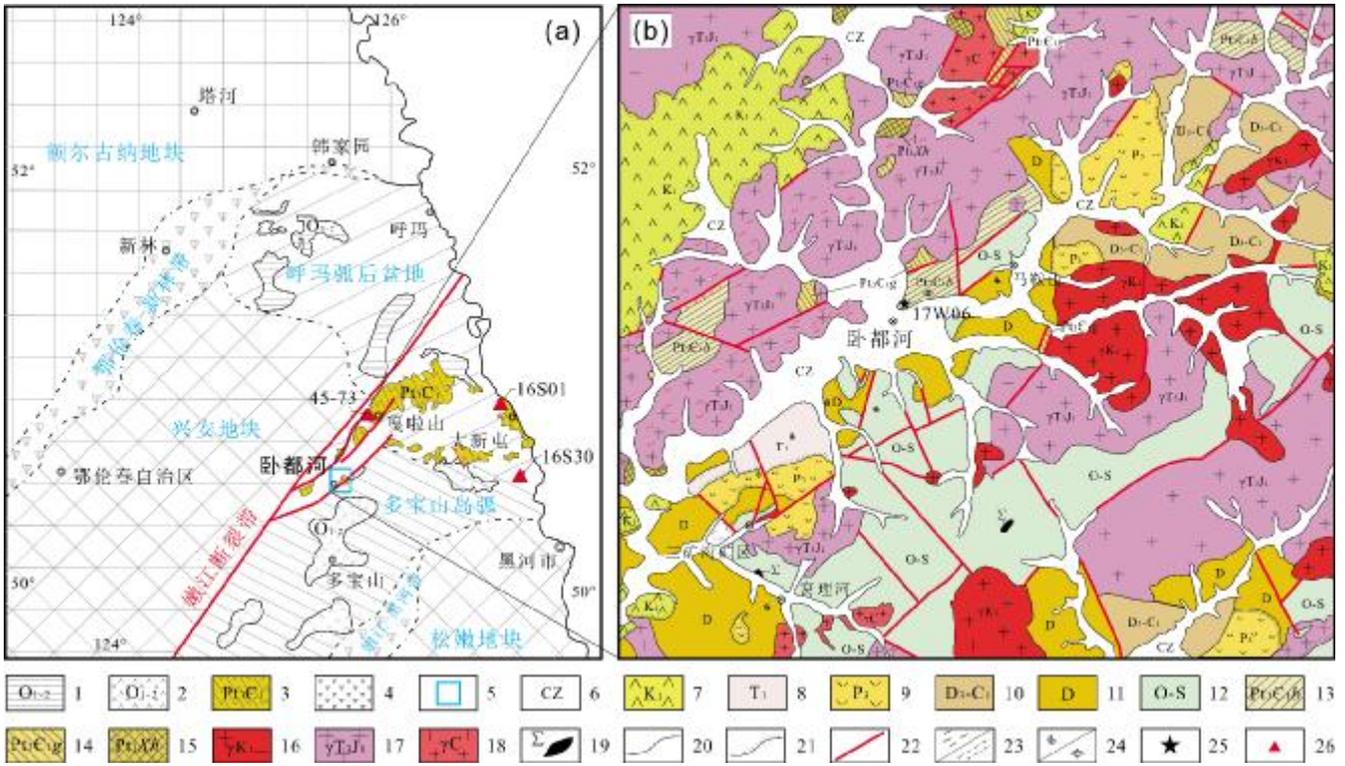


图 1 小兴安岭西北部卧都河地区地质简图

Fig. 1 Geological sketch map of Woduhe area in northwestern Xiaoxinganling Mountains

1—以碎屑沉积岩为主的下中奥陶统 (Lower-Middle Ordovician dominated by clastic sedimentary rock); 2—以中性火山岩为主的下中奥陶统 (Lower-Middle Ordovician dominated by intermediate volcanic rock); 3—落马湖群 (Luomahu Group); 4—蛇绿混杂岩带 (ophiolitic melange belt); 5—研究区位置 (study area); 6—新生界 (Cenozoic); 7—下白垩统 (Lower Cretaceous); 8—下三叠统 (Lower Triassic); 9—上二叠统 (Upper Permian); 10—上泥盆—下石炭统 (Upper Devonian-Lower Carboniferous); 11—泥盆系 (Devonian); 12—奥陶—志留系 (Ordovician-Silurian); 13—北宽河组 (Beikuanhe fm.); 14—嘎拉山组 (Galashan fm.); 15—兴华渡口岩群 (Xinghuadukou rock group); 16—早白垩世侵入岩 (Early Cretaceous intrusion); 17—晚三叠—早侏罗世侵入岩 (Late Triassic-Early Jurassic intrusion); 18—石炭纪侵入岩 (Carboniferous intrusion); 19—超镁铁质岩 (ultramafic rock); 20—地质界线 (geological boundary); 21—不整合线 (unconformity); 22—断层 (fault); 23—片理化/糜棱岩带 (foliated/mylonite zone); 24—动/植物化石 (animal/plant fossil); 25—本研究样品 (sample of this study); 26—前人样品 (45-73 据文献 [23], 16S01、16S30 据文献 [24]) (samples of previous study, 45-73 from Reference [23], 16S01 and 16S30 from Reference [24])

三叠世—早侏罗世侵入岩接触部位发育接触变质作用, 出现二云石英片岩及空晶石板岩^①。

2 样品测试方法及测试结果

测试样品 (17W06): 地理坐标 125°49'34"E, 50°32'35"N。岩性为变粉砂质泥岩, 岩石呈浅灰、灰白色, 层状构造 (图 2a)。变余粉砂泥质结构。粉砂屑见次棱角状石英 (约 15%), 粒径 0.04~0.08 mm, 局部可见隐晶状长英质; 其余为泥质, 重结晶新生的大量绢云母呈鳞片状或细丝状片状定向分布 (图 2b)。

样品锆石的挑选在河北省区域地质矿产研究所实验室完成, 岩石样品采用常规方法进行粉碎至

80 目, 然后用水粗淘、强磁分选、电磁分选和用酒精细淘, 之后在双目镜下挑选晶形较好、透明且无明显裂痕的锆石颗粒。锆石样品制靶、CL 图像采集由北京锆年领航科技有限公司完成, 将挑选出的锆石颗粒置于双面胶上, 灌上环氧树脂制靶, 固化并打磨刨光, 使锆石内部结构暴露, 用于 CL 图像采集及锆石微区单点 U-Pb 定年分析。锆石 U-Pb (LA-ICP-MS) 定年测试在北京科荟测试技术有限公司完成, 所用仪器为 AnalytikJena PQMS Elite 型 ICP-MS 及与之配套的 ESI NWR 193 nm 准分子激光剥蚀系统, 激光剥蚀所用斑束直径为 25 μm, 详细实验测试过程可参见文献 [26]。分析数据的离线处理 (包括对样品和空白信号的选择、

① 黑龙江省地质调查研究院. 卧都河幅—黑河市幅 1:25 万区域地质调查报告. 2009.

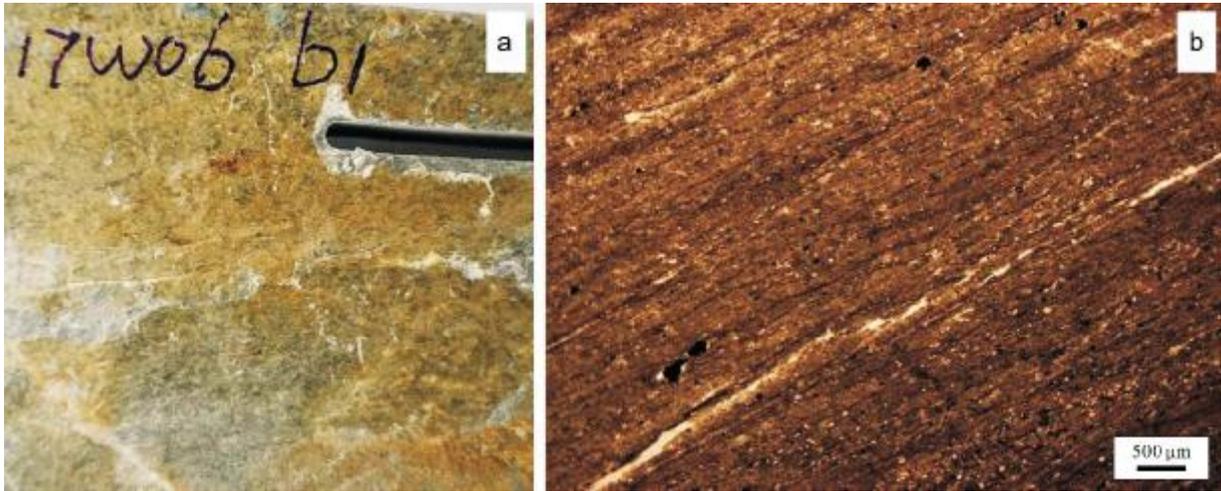


图2 变粉砂质泥岩岩相学特征

Fig. 2 Petrographic characteristics of meta-silty mudstone
a—岩石标本(rock specimen); b—显微结构(microstructure)

仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Th-Pb 同位素比值和年龄计算)采用 ICPMS DataCal 软件完成^[27]. 锆石 U-Pb 谐和图的绘制应用 Isoplot 程序完成^[28]. 测试数据、加权平均年龄的误差均为 1σ . 年龄取值:当小于 1 000 Ma 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,大于 1 000 Ma 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄.

随机测试了样品中 83 颗不同特征的锆石,共测试 85 个测点. 测试结果显示年龄分布区间较大(表 1,扫描首页 OSID 二维码可见),且存在多个测点数据偏离协和曲线(图 3a、b). 由于碎屑锆石的年龄数据是通过统计分析体现其地质意义,因此本次统计分析时首先对样本中的各个数据进行核定,去除偏离协和曲线较远、协和度较差($<95\%$)、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄差别较大(一般大于 50 Ma)的测点数据. 结合协和图,本次分析去除了点 3、8、19、22、24、32、36、39、46、64、69、72、75、78、82、84、85 共 17 个协和度较差的测点. 其他 68 个测点谐和度较好,均落在谐和线上或附近,年龄变化区间为 216~2 636 Ma,大致可划分为 8 个年龄组(图 3c、d),各年龄组典型锆石 CL 图像见图 4.

8 个年龄组中,以第三—VII 组构成明显的 5 个峰值(图 3d).

第 I 组(8 个测点)年龄介于 216~347 Ma,较分散(216、222、235、236、261、270、308、347 Ma),主要集中于晚三叠世. 锆石 CL 图像呈亮白色(以点 26、50、51、61、62、73 为典型),发育核边结构,有的核部残存深灰

色部分(以点 51、62 为典型),这些锆石具有异常高的 U 含量($749\times 10^{-6}\sim 2\,199\times 10^{-6}$). 高 U 含量锆石 CL 图像通常发光强度弱^[29],而样品中这些高 U 含量锆石 CL 图像强发光,应是后期强烈热事件引起蜕晶作用^[30-31]的结果,反映的应是后期热事件,这与研究区发育强烈的晚三叠世—早侏罗世、晚二叠世、晚石炭世岩浆活动及其与晚三叠世—早侏罗世侵入岩接触部位发育角岩化带地质现象相吻合.

第 II 组仅有 2 个测点,年龄分别为 430、443 Ma,锆石 CL 图像呈白色或灰白色,发育核边结构,边部白或灰白色,核部残存隐约的环带或云雾状(以测点 29 点为典型,U 含量为 $1\,125\times 10^{-6}$),显示为变质锆石特点^[29],同样应是后期构造热事件的反映.

第 III 组(21 个测点)是样品锆石年龄最大的众数,年龄介于 463~502 Ma. 锆石晶形与其他几组有较明显差别,有长柱状、短柱状两种,晶形较好. 其 CL 图像也发育核边结构,但增生边多较窄,个别有较宽的增生边(如测点 67),有的局部见有流动状环带(如测点 52),反映也受到后期热事件一定的扰动. 这组年龄是 5 个年龄峰值中最年轻的(图 3d),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 485 ± 5 Ma (MSWD=1.8, $n=21$),可能反映样品层位沉积时代下限.

第 IV 组年龄介于 513~572 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 528 ± 7 Ma (MSWD=1.6, $n=16$);第 V 组年龄介于 596~631 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 606 ± 12 Ma

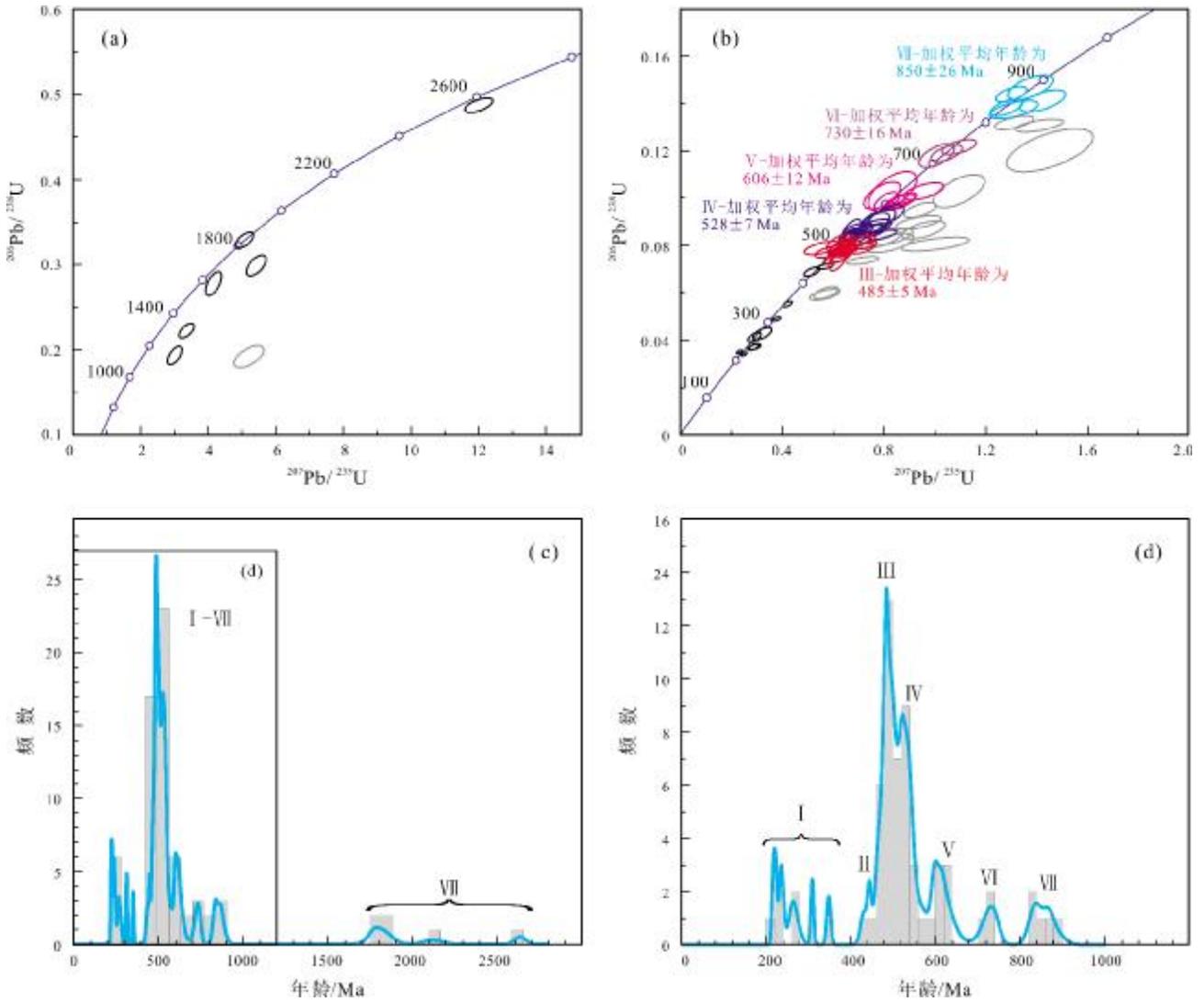


图 3 变粉砂质泥岩(17W06TW1)锆石 U-Pb 年龄谱和图

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram of meta-silty mudstone specimen

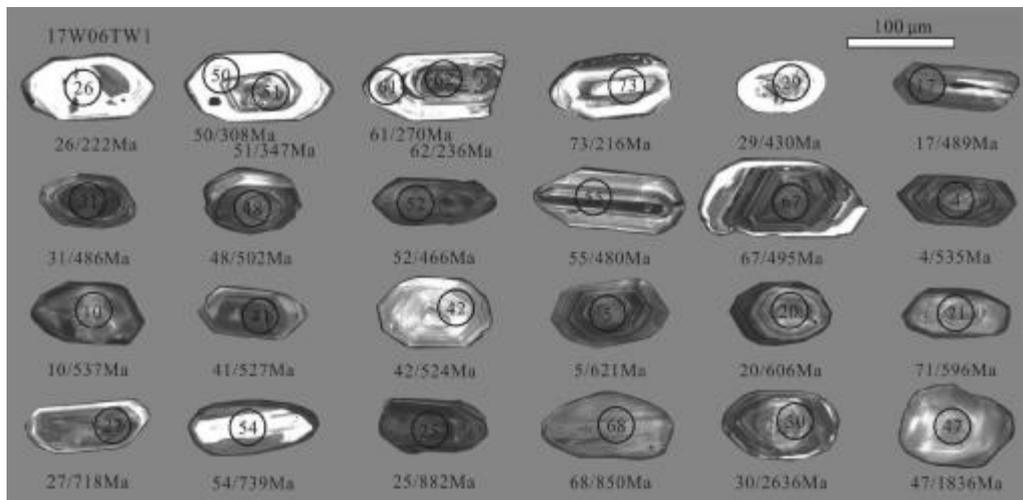


图 4 变粉砂质泥岩典型锆石 CL 图像

Fig. 4 CL image of typical zircons from meta-silty mudstone

(MSWD=1.2, $n=7$);第Ⅵ组年龄介于 718~739 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 730±16 Ma (MSWD=0.6, $n=3$);第Ⅶ组年龄介于 830~882 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 850±26 Ma (MSWD=2.0, $n=5$). 此外,还有第Ⅷ组(6个测点)年龄分散,介于 1 769~2 623 Ma 之间. 这几组年龄的锆石 CL 图像以浑圆状为典型特征,也发育核边结构,锆石核部有的发育扇形环带或流动状环带(图 4),表征碎屑锆石经历较长距离的搬运作用,并也经历后期强烈热事件的扰动.

3 讨论

3.1 落马湖岩群形成时代

落马湖岩群主要出露于嫩江断裂带以东小兴安岭西北部的嘎拉山林场、三卡至白石砬子一带,卧都河一带出露更零星,多呈孤岛状或残块状分布于晚三叠世—早侏罗世侵入岩之中,其岩石组合及缺少大化石与多宝山岛弧地区古生代地层有较大区别.《黑龙江省岩石地层》^[32]根据其岩石组合、变形变质的差异,将落马湖岩群自下而上划分为铁帽山组、嘎拉山组及北宽河组.铁帽山组为一套含夕线石、十字石、石榴石等特征变质矿物的黑云斜长变粒岩、片岩、片麻岩及白色大理岩的中级变质岩组合;嘎拉山组为一套含十字石、石榴石特征变质矿物的二云石英片岩、二云母片岩、白云(绢云)片岩、变粒岩等中浅变质岩组合;北宽河组为一套绢云板岩、千枚岩、片理化凝灰质砂岩、片理化中酸性火山岩、微晶片岩、长英角岩等原岩为碎屑沉积岩夹火山岩的浅变质岩石组合.由于早中生代巨量深成侵入岩侵入及晚中生代大面积火山岩覆盖,以及植被发育等因素,所见组间多为断层接触;偶有与奥陶系相伴出露的,二者间也表现为断层接触.早期据在三道卡地区北宽河组获得 Rb-Sr 等时线年龄 501 Ma^①、黑河张地营子一带北宽河组细碎屑沉积岩中产疑源类化石 *Trachysphaeridium-Baltisphaeridium* 组合^[22]^②,将其时代置于新元古代—早寒武世.《卧都河幅、黑河市幅 1:25 万区调报告》^③对落马湖岩群划分略作了修改,将铁帽山组及嘎拉山组中含夕线石、十字石的角闪岩相变质部分划为古元古代兴华渡口岩群;将含石榴石部

分仍保留为嘎拉山岩组,其与含疑源类化石 *Leiosphaeridia* sp. 的北宽河组时代仍置于新元古代—早寒武世.

碎屑锆石年龄尽管不能直接确定样品形成时代,但通过统计分析并结合区域地质背景特点,同样可以限定沉积地层的时代,尤其是在汇聚大陆边缘的弧前、弧背及弧后盆地地区,其沉积物中碎屑锆石年龄具有与大洋俯冲相关的岩浆弧火山活动时代相一致的年龄峰值,基本可以代表这些沉积物沉积的时限^[33].

本研究获得卧都河地区北宽河岩组变粉砂质泥岩碎屑锆石年龄分布区间大,介于 216~2 636 Ma,划分为 8 个年龄组.第 I 组 8 个测点,是样品中最小的年龄组,但年龄分散(晚三叠世 4 个,晚二叠世 2 个,早、晚石炭世各 1 个).通常以样品碎屑锆石最小年龄来确定沉积样品层位的沉积下限.尽管这组年龄最小,本研究认为其不能代表样品层位的沉积下限,而是后期热事件扰动的反映,主要依据 3 方面信息:①宏观岩相学,在样品层位与晚三叠世—早侏罗世侵入岩接触部位发育角岩化,本研究地质体主构造线为近东西走向,与邻近出露的晚二叠世陆相火山岩夹碎屑沉积岩主构造线为北东向明显不同,反映二者非同时异相地质体,在研究区北部(图 1)见其被石炭纪侵入岩(310~357 Ma, 锆石 U-Pb, SHRIMP)侵入^④,因此,其形成时代应早于石炭纪;②前述锆石 CL 图像具核边结构,核部残存隐约振荡环带,具高的 U 含量,但 CL 图像却显示强发光特点,应是后期强烈热事件扰动蜕晶化表现^[30-31],这与研究区及邻近地区发育强烈的晚三叠世、晚二叠世、石炭纪岩浆活动的地质背景相吻合;③中酸性火山喷发活动应为邻近同时异相的沉积地层提供大量的同时期岩浆锆石,研究区出露有大面积晚二叠世陆相中酸性火山岩(图 1b),而样品中未见该时期的岩浆锆石,间接说明二者非同时形成的地质体,因此,这组年龄应是后期热事件扰动的结果.第 II 组 2 个测点(430、443 Ma)锆石同样具有高 U 含量及 CL 图像强发光特点,也应是后期构造热事件扰动的表现.第 III 组 21 个测点(463~502 Ma),是样品锆石年龄最大的众数,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 485±5 Ma (MSWD=1.8,

①黑龙江省地质矿产局.三道卡-白石砬子幅 1:20 万区域地质调查报告.1986.

②黑龙江地质调查研究院.新峰幅等四幅 1:5 万区域地质调查报告.2000.

③黑龙江省地质调查研究院.卧都河幅-黑河市幅 1:25 万区域地质调查报告.2009.

$n=21$),也是样品 5 个峰值中最小峰值年龄. 尽管锆石 CL 图像也存在核边结构等反映受到后期热事件扰动,但其较自形的锆石晶形明显有别于其他几组年龄的锆石,反映为近源沉积的特点. 区域上北宽河岩组普遍夹有酸性火山岩或沉凝灰岩,因此,同沉积期火山活动应为样品提供了丰富的锆石来源. 毗邻落马湖群的多宝山弧岩浆带,主体是由早—中奥陶世(485~458 Ma)多宝山组(O_{1-2d})及铜山组(O_{1-2t})中基—中酸性火山岩夹碎屑沉积岩构成. 出露于多宝山铜矿附近的变安山岩形成于 457 ± 6 Ma (锆石 U-Pb, SHRIMP)^①,研究区南部窝里河一带铜山组变安山质晶屑凝灰岩年龄 503 ± 3 Ma (MSWD=1.4, $n=57$,作者未发表资料),多宝山裸河西岸多宝山组(O_{1-2d})英安岩年龄 485 ± 7 Ma^[23],这些年龄是研究样品中出现最多的年龄,也与最小峰值年龄(485 ± 5 Ma)基本一致,一方面暗示落马湖群与多宝山弧岩浆带的密切关系,另一方面说明 485 ± 5 Ma 年龄基本可以代表样品层位的沉积时限^[33].

嘎拉山组是落马湖群中以片岩为主体的部分,变质可达角闪岩相. 研究区内原认为属嘎拉山组的黑云角闪斜长片麻岩,位于北侧下伏的二云母片岩与南侧变粉砂质泥岩(本次研究样品)之间,岩石中保留有变余斑状结构,副矿物见有自形柱状磷灰石及榍石,研究表明其原岩为形成于 246 ± 1 Ma 并侵入于嘎拉山组中的基性岩脉^[25]. 孙巍^[23]在研究区之北呼玛县嘎拉山林场西南落马湖岩群二云石英片岩中获得碎屑锆石年龄介于 $419\sim 313$ Ma, 9 个峰值年龄中最小峰值 ($419\sim 421$ Ma)加权平均年龄为 420 ± 4 Ma (MSWD=0.02, $n=9$),认为其形成时代上限为志留纪罗德洛期. Miao et al.^[34]在嘎拉山村南嘎拉山组黑云角闪斜长片麻岩及侵入其中的强变形的长英质脉岩中分别获得 175 ± 3 、 159 ± 3 Ma 年龄,推断黑云角闪斜长片麻岩原岩为火成岩,认为落马湖岩群原岩形成时代为 180 Ma 左右的中生代. 而在区域上嘎拉山组变粒岩类、片岩类普遍含有石榴石特征变质矿物,原岩主要为一套富铝的碎屑岩及泥质岩^②. 综合上述资料,认为研究区黑云角闪斜长片麻岩及嘎拉山村南嘎拉山组中黑云角闪斜长片麻岩应都是后期侵入嘎拉山组中的侵入体,是遭受后期变形变质改造的结果.

赵院东等^[24]研究了三道卡及张地营子一带“落马湖岩群 2 件二云母片岩 (16S01、16S30) 锆石年代学. 测试了 16S01 样品 100 个点,76 个有效年龄(405~2716 Ma)分为 8 个年龄组,其中最年轻及次年轻的 2 组年龄分别为 405~411 Ma (2 个点)、437~459 Ma (19 点,加权平均 450 ± 3 Ma);测试了 16S30 样品 50 个点,45 个有效年龄(406~2672 Ma)也分为 8 个年龄组,其中最年轻及次年轻的 2 组年龄分别为 406~411 Ma (5 个点)、450~465 Ma (11 个点,加权平均 455 ± 3 Ma). 文献中,年龄介于为 405~411 Ma 的锆石晶形多呈浑圆状,与年龄为较老的早古生代晶棱较清晰自形锆石有明显区别,其 CL 图像有的显示为亮白色云雾状环带中局部残留隐约的浅灰色密集振荡环带,有的为冷杉叶状或补丁状,显示为变质锆石特点^[29],反映受到后期热事件的强烈扰动. 若排除这组年龄,2 件样品最年轻的峰值年龄分别为 450 ± 3 Ma、 455 ± 3 Ma,且其年龄结构与本次研究样品碎屑锆石年龄结构基本一致(图 5),这一方面反映区域上落马湖岩群二云(石英)片岩与本研究的变粉砂质泥岩原岩具有相同的物源区,另一方面表明二云母片岩原岩沉积层位时代下限为 450 Ma 左右. 此外,黄永卫等^[35]在三道卡—白石砬子一带落马湖岩群中发现 *Drepanodus orcadus*、*Reutterodus depress* 早奥陶世牙形石化石^②,证实其中存在早奥陶世的地质体.

综合上述测年资料及分析结果,认为落马湖岩群形成时代主体为奥陶纪,局部沉积可能延伸到志留纪罗德洛期.

3.2 物源分析及形成的构造古地理背景

本次研究的样品(17W06)碎屑锆石年龄出现明显集中的早古生代及新元古代峰值年龄,同时出现较多的古元古代年龄. 早古生代年龄包括第Ⅲ组(463~502 Ma,加权平均年龄 485 Ma)和第Ⅳ组(513~572 Ma,加权平均年龄 528 Ma),占测试数据的 54.4%;新元古代年龄(596~882 Ma,占 22.1%)包括第Ⅴ、Ⅵ、Ⅶ组,加权平均年龄分别为 606 ± 12 Ma、 730 ± 16 Ma、 850 ± 26 Ma;古元古代碎屑锆石年龄(1769~2636 Ma)占 8.8%. 年龄谱与孙巍^[23]、赵院冬等^[24]研究的落马湖岩群二云(石英)片岩获得的年龄谱基本一致(图 5),说

①黑龙江省地质调查研究院,卧都河幅—黑河市幅 1:25 万区域地质调查报告,2009.

②黑龙江地质矿产调查研究所,黑龙江省地质志,2018.

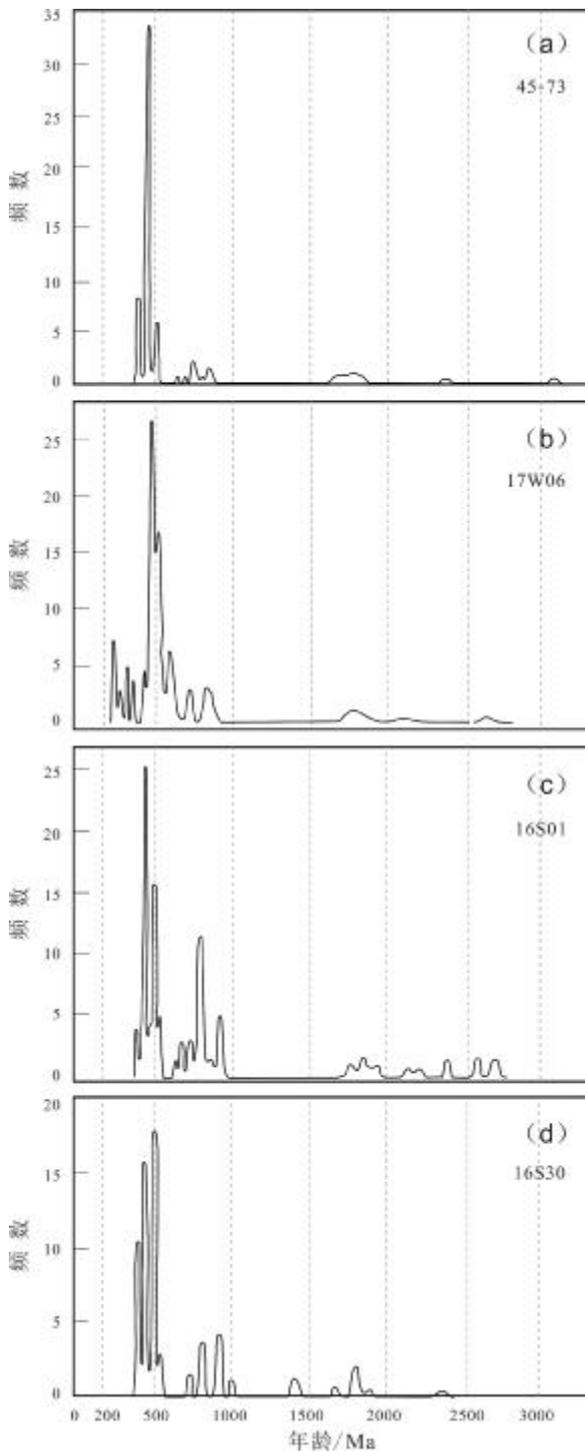


图5 落马湖群碎屑锆石U-Pb年龄频率

Fig. 5 Age frequency of detrital zircons from Luomahu Group
a—据文献[23](from Reference[23]); b—本研究样品(specimen of this study); c, d—据文献[24](from Reference[24])

明这几个时期构造-岩浆活动形成的地质体为重要的物源. 研究区位于兴安地块东缘多宝山弧岩浆岩带上, 以往研究认为额尔古纳-兴安联合地块与松嫩-张广才岭地块于晚古生代闭合^[36-44], 因此, 上述两个联合地块之间在晚古生代之前应存在大洋的阻隔, 如此, 样品中的新元古代及古元古代锆石可以排除源自松嫩-张广才岭地块的可能, 最大可能是来源于额尔古纳-兴安地块, 这与目前在额尔古纳地块上发现有新太古代、古元古代地质体及大量新元古代变质深成侵入体相吻合. 如: 在额尔古纳地块得耳布尔镇比列亚谷铅锌矿区发现新太古代 $2\ 606\pm 17\ \text{Ma}$ 片麻状二长花岗岩^[45], 塔河韩家园子镇发现古元古代 $1\ 741\sim 1\ 847\ \text{Ma}$ 眼球状或条带状花岗片麻岩^[16]及黑云斜长片麻岩^①, 在室韦、莫尔道嘎、满归、漠河、韩家园子地区发现有大量新元古代 $915\sim 737\ \text{Ma}$ 变质深成侵入岩^[17, 46-55]. 额尔古纳地块上这些地质体为重要物源之一, 一方面说明在早奥陶世时期, 额尔古纳地块为一隆升剥蚀区, 另一方面说明自蚀源区到沉积区(研究区)不存在沉积物运移障碍, 即没有深海沟及大洋的阻隔, 反映研究区奥陶纪-志留纪时期为大陆边缘的沉积背景.

第IV组 $513\sim 572\ \text{Ma}$, 加权平均年龄 $528\ \text{Ma}$ (相当于寒武纪纽芬兰世), 约占样品有效年龄 23.5%. 该时期有确切时代依据的地质体目前仅出露有额尔古纳地块东南缘北东段新林地区的零点岩群($\text{Pt}_3\text{-}\epsilon_1\text{L}$)、兴安地块西北缘北东段兴隆地区的兴隆岩群($\text{Pt}_3\text{-}\epsilon_1\text{X}$), 在代表额尔古纳地块与兴安地块拼合位置的鄂伦春-新林蛇绿构造混杂岩带之中也有出露^{②③}. 零点岩群及兴隆岩群均为陆源碎屑沉积岩夹大量中基性、中性、中酸性火山岩建造. 碎屑沉积岩中产代表新元古代—早寒武世生物组合面貌的 *Trachysphaeridium-Baltisphaeridium* 微古植物化石组合^{④⑤}, 获得绢云泥质板岩 $536\pm 4\ \text{Ma}$ 、变细砂粉砂岩 $519\pm 3\ \text{Ma}$ 年龄^①, 被 $499\pm 3\ \text{Ma}$ 的钠长岩侵入^②. 在鄂伦春-新林蛇绿混杂岩带发现有 $557\pm 3\ \text{Ma}$ 的糜棱岩化花岗闪长岩岩块^①. 上述资料说明, 该时期构造岩浆活动应为本研究样品碎屑锆石来源之一, 同时也暗示额尔古纳地块与兴安

① 黑龙江地质调查研究院. 加格达奇幅 1:25 万区域地质调查报告. 2015.

② 黑龙江地质矿产调查研究所. 黑龙江省地质志. 2018.

③ 黑龙江省地勘局. 六十林场幅、阿里河幅 1:20 万区调报告. 1993.

④ 黑龙江省地勘局. 塔源幅等四幅 1:5 万区调报告. 1995.

地块于早寒武世末已拼合隆升遭受剥蚀。

第Ⅲ组(463~502 Ma,加权平均年龄 485 Ma)约占样品有效年龄 30.9%,为样品中最大峰值,也是最年轻的年龄峰值。目前在多宝山岛弧带及研究区之北的额尔古纳地块上发现大量这个时期岩浆事件^[56-63],但在额尔古纳地块上仅发现有该时期深成侵入岩,而在多宝山岛弧带不仅发育该时期侵入岩,更多发育该时期的火山岩。深成侵入岩由于产于地下较深部位,不可能为同时期沉积岩提供物源,而火山岩有即时喷发即时遭受剥蚀或沉积的特点,可以为同时期沉积地层提供物源,因此,该年龄时段锆石不可能来自额尔古纳地块,而应来自多宝山岩浆弧带火山岩。据此认为,以碎屑沉积为主夹少量火山岩的落马湖岩群和以火山岩为主夹碎屑沉积岩的奥陶纪岩浆地质建造可能为同时异相的地质建造,形成于古生代多宝山弧-盆系不同的构造古地理背景。鉴于早古生代时期,古亚洲洋板块自南东朝北西(现今方位)向额尔古纳-兴安联合地块俯冲的极性^[5,64],以及落马湖岩群在空间上位于弧岩浆岩带的北西侧更靠近额尔古纳-兴安联合陆块,认为落马湖岩群形成的古构造背景应为弧后盆地。

3.3 地质意义

通过对卧都河地区落马湖岩群粉砂质泥岩中碎屑锆石年代学研究,碎屑锆石主要源自于北部额尔古纳地块及多宝山火山弧剥蚀区,认为落马湖岩群形成于奥陶纪-志留纪罗德洛期的弧后盆地并更靠近额尔古纳-兴安联合地块内陆边缘,它与多宝山弧岩浆岩带共同构成早古生代多宝山弧-盆系,这对早古生代区域构造演化研究具有重要参考意义。

多宝山弧-盆系是古亚洲洋板块北西向(现今方位)俯冲于额尔古纳-兴安联合地块之下形成的构造单元,其地质构造-建造是多宝山矿集区重要的成矿物质背景。多宝山矿集区是东北地区最重要的 Cu、Mo、Au 多金属矿产地,目前已发现的大型斑岩型多宝山铜钼矿床、铜山铜钼矿床,浅成低温热液型争光金矿床,夕卡岩型小多宝山铜铁矿床、三矿沟铜铁矿床等,都与早-中奥陶世弧岩浆活动及其物质建造有密切关系^[61-67]。落马湖岩群作为多宝山弧岩浆岩带同时期弧后盆地沉积,其物质组成具有高的 Au、Sb、As、Hg 背景,是目前发现的古利库岩金矿床^[68-69]、大兴屯金梯矿床^[70-71]等的重要矿源层。落马湖岩群形成时代及其构

造古地理背景的确定,为多宝山矿集区乃至大区域的成矿阶段及成矿规律的科学总结提供资料依据。

4 结论

通过对落马湖岩群年代学资料研究并结合区域地质背景分析,得出如下结论。

(1)测试了落马湖岩群变粉砂质泥岩 83 个锆石共 85 个测点,年龄介于 216~2 636 Ma,分为 8 个年龄组:216~347 Ma ($n=8$)、430~443 Ma ($n=2$)、463~502 Ma (加权平均 485 ± 5 Ma, $n=21$)、513~572 Ma (加权平均 528 ± 7 Ma, $n=16$)、596~613 Ma (加权平均 606 ± 12 Ma, $n=7$)、718~739 Ma (加权平均 730 ± 12 Ma, $n=3$)、830~882 Ma (加权平均 850 ± 26 Ma, $n=5$)、1 769~2 636 Ma ($n=6$),以第Ⅲ—Ⅶ年龄组构成明显的峰值。前两个年龄组数据分散,锆石具有异常高的 U 含量及 CL 图像强发光特征,为后期强烈岩浆热事件引起的锆石蜕晶作用的表现;第Ⅲ个年龄组(样品最小峰值年龄,加权平均 485 ± 5 Ma, $n=21$)代表样品层位沉积时限。结合区域研究成果,认为落马湖岩群主体形成于 485~450 Ma 的奥陶纪,部分可能延续到志留纪罗德洛期。

(2)落马湖岩群碎屑锆石主要源自额尔古纳-兴安联合地块及奥陶纪弧火山岩区,该沉积建造可能是多宝山弧岩浆建造同时期沉积,与多宝山弧岩浆岩带共同构成早古生代弧-盆系,形成于弧后盆地古构造背景。

致谢:样品测试分析先后得到了国土资源部东北矿产资源监督检测中心、河北省区域地质矿产调查研究所实验室、北京铍年领航科技有限公司、北京科荟测试技术有限公司等单位的大力支持,匿名审稿专家对文稿最终成文提供了宝贵的修改意见,在此一并表示诚挚的谢意。

参考文献(References):

- [1]Şengör A M C, Natal'in B A, Burtman V S. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia[J]. Nature, 1993, 364(6435): 299-307.
- [2]张兴洲,杨宝俊,吴福元,等.中国兴安-吉黑地区岩石圈结构基本特征[J].中国地质,2006,33(4): 816-823.

- Zhang X Z, Yang B J, Wu F Y, et al. The lithosphere structure in the Hingmong-Jihei (Hinggan-Mongolia-Jilin-Heilongjiang) region, northeastern China[J]. *Geology in China*, 2006, 33(4): 816–823.
- [3] 张兴洲, 周建波, 迟效国, 等. 东北地区晚古生代构造-沉积特征与油气资源[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2008, 38(5): 719–725.
- Zhang X Z, Zhou J B, Chi X G, et al. Late Paleozoic tectonic-sedimentation and petroleum resources in northeastern China [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2008, 38(5): 719–725.
- [4] 刘永江, 张兴洲, 金巍, 等. 东北地区晚古生代区域构造演化[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 943–951.
- Liu Y J, Zhang X Z, Jin W, et al. Late Paleozoic tectonic evolution in Northeast China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 943–951.
- [5] 付俊彧, 朱群, 杨雅军, 等. 中华人民共和国地质图(东北)(1:1500000)说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2019: 105–143.
- Fu J Y, Zhu Q, Yang Y J, et al. Geological map of the People's Republic of China (Northeast) (1:1500000)[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019: 105–143. (in Chinese)
- [6] 傅俊彧, 于荣文, 宋亚芹, 等. 黑龙江黑河西北洪业家推覆剪切构造带地质特征及其意义[J]. *地质力学学报*, 2005, 11(2): 145–152.
- Fu J Y, Yu R W, Song Y Q, et al. Geological characteristics of the Hongyedia thrust shear zone northwest of Heihe in the Heilongjiang River valley and its significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 2005, 11(2): 145–152.
- [7] 刘晓佳, 赵立国, 田珺, 等. 漠河逆冲推覆构造活动时代的 ESR 年龄证据[J]. *地质力学学报*, 2014, 20(3): 299–303.
- Liu X J, Zhao L G, Tian J, et al. ESR ages evidences of Mohe overthrust structure stage[J]. *Journal of Geomechanics*, 2014, 20(3): 299–303.
- [8] 赵书跃, 郑全波, 韩彦东. 漠河逆冲推覆构造中段地质特征与构造演化[J]. *地质通报*, 2016, 35(7): 1095–1105.
- Zhao S Y, Zheng Q B, Han Y D. Geological characteristics and tectonic evolution of the middle segment of Mohe thrust nappe [J]. *Geological Bulletin of China*, 2016, 35(7): 1095–1105.
- [9] 韩国卿, 刘永江, Neubauer F, 等. 松辽盆地西缘边界断裂带中北段尼尔基 L 型构造岩构造年代学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 1922–1934.
- Han G Q, Liu Y J, Neubauer F, et al. Chronology of L-type tectonite from Nierji area in the northern-middle segment of the western boundary fault of the Songliao Basin and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(7): 1922–1934.
- [10] 郑常青, 李娟, 金巍, 等. 松辽盆地西缘断裂带中花岗质糜棱岩的锆石 SHRIMP 和云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及其构造意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2015, 45(2): 349–363.
- Zheng C Q, Li J, Jin W, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating and mica laser ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of the granitic mylonites in ductile fracture belt in the western Songliao Basin and its tectonic implication [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2015, 45(2): 349–363.
- [11] 汪岩, 钱程, 马永非, 等. 吉林白城岭下地区花岗质糜棱岩锆石 U-Pb 年代学与地球化学特征对松辽盆地西缘晚古生代以来的俯冲背景的制约[J]. *地质学报*, 2019, 93(1): 117–137.
- Wang Y, Qian C, Ma Y F, et al. Geochronologic and geochemistic evidence of granitic mylonites from Lingxia area of Baicheng City, Jinlin: Constraints on subduction in the western of the Songliao basin since the Late Paleozoic [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(1): 117–137.
- [12] 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: 22–43.
- Heilongjiang Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional geology of Heilongjiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 22–43. (in Chinese)
- [13] 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): 591–601.
- Miao L C, Liu D Y, Zhang F Q, et al. 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*, 2007, 52(8): 1112–1124.
- [14] 周建波, 张兴洲, Wilde S A, 等. 中国东北~500 Ma 泛非期孔兹岩带的确定及其意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1235–1245.
- Zhou J B, Zhang X Z, Wilde S A, et al. Confirming of the Heilongjiang ~500 Ma Pan-African khondalite belt and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(4): 1235–1245.
- [15] Zhou J B, Wilde S A, Zhang X Z, et al. A >1300 km late Pan-African metamorphic belt in NE China: New evidence from the Xing'an block and its tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 2011, 509(3/4): 280–292.
- [16] 孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 内蒙古额尔古纳地块古元古代末期的岩浆记录——来自花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄证据[J]. *地质通报*, 2013, 32(2/3): 341–352.
- Sun L X, Ren B F, Zhao F Q, et al. Late Paleoproterozoic magmatic records in the Eerguna massif: Evidences from the zircon U-Pb dating of granitic gneisses [J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(2/3): 341–352.
- [17] Ge W C, Chen J S, Yang H, et al. Tectonic implications of new zircon U-Pb ages for the Xinghuadukou complex, Eerguna massif, northern Great Xing'an Range, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 106: 169–185.
- [18] 赵院冬, 许逢明, 车继英, 等. 锆石 U-Pb 定年对大兴安岭东北部“兴华渡口群”形成时代和组成的约束[J]. *中国地质*, 2017, 44(3): 575–587.

- Zhao Y D, Xu F M, Che J Y, et al. Constraints from the zircon U-Pb dating on the formation age and composition of the Xinhudukou Group in northeastern Da Hinggan Mountains[J]. *Geology in China*, 2017, 44(3): 575-587.
- [19] 余宏全, 李进文, 向安平, 等. 大兴安岭中北段原岩锆石 U-Pb 测年及其与区域构造演化关系[J]. *岩石学报*, 2012, 28(2): 571-594.
- She H Q, Li J W, Xiang A P, et al. U-Pb ages of the zircons from primary rocks in middle-northern Daxinganling and its implications to geotectonic evolution [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(2): 571-594.
- [20] 孙巍, 迟效国, 潘世语, 等. 大兴安岭北部新林地区倭勒根群大网子组锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(1): 176-185.
- Sun W, Chi X G, Pan S Y, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and its geological significance of the Dawangzi Formation from Wolegen Group in Xinlin area, northern Great Xing'an Range [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(1): 176-185.
- [21] 杜兵盈, 冯志强, 刘宇崴, 等. 大兴安岭环二库新元古代变质辉长岩的厘定及其地质意义[J]. *世界地质*, 2017, 36(3): 751-762.
- Du B Y, Feng Z Q, Liu Y W, et al. Determination of Neoproterozoic meta-gabbro from Huanerku, Da Hinggan Mountains and its geological significance[J]. *Global Geology*, 2017, 36(3): 751-762.
- [22] 表尚虎, 赵海滨, 傅俊彧. 黑龙江黑河变质地层微古植物化石的发现[J]. *中国区域地质*, 2000, 19(4): 445-447.
- Biao S H, Zhao H B, Fu J Y. Discovery of microflora fossils in metamorphic strata at Heihe, Heilongjiang [J]. *Regional Geology of China*, 2000, 19(4): 445-447.
- [23] 孙巍. 兴安地块“前寒武纪变质岩系”——下古生界锆石年代学研究及其构造意义[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- Sun W. Zircon geochronology constraints on the age and nature of “Precambrian metamorphic rocks” and Lower Paleozoic in the Xing'an block of Northeast China [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [24] 赵院冬, 车继英, 许逢明, 等. 碎屑锆石 U-Pb 年龄谱系对兴安地块落马湖群原岩形成时代的约束[J]. *地球科学*, 2020, 45(2): 489-502.
- Zhao Y D, Che J Y, Xu F M, et al. Constraints on the forming age of the Luomahu Group in the Xing'an block from the detrital zircon population [J]. *Earth Science*, 2020, 45(2): 489-502.
- [25] 付俊彧, 那福超, 李仰春, 等. 蒙古-鄂霍茨克洋南向俯冲: 小兴安岭西北部落马湖群中三叠世岩浆记录[J]. *地质通报*, 2021, 40(6): 889-904.
- Fu J Y, Na F C, Li Y C, et al. Southward subduction of the Mongol-Okhotsk Ocean: middle triassic magmatic records of the “Luomahu Group” in northwest of Lesser Khingan Mountains [J]. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(6): 889-904.
- [26] 侯可军, 李延河, 田有荣. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. *矿床地质*, 2009, 28(4): 481-492.
- Hou K J, Li Y H, Tian Y R. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS [J]. *Mineral Deposits*, 2009, 28(4): 481-492.
- [27] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [28] Ludwig K R. ISOPLLOT 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [29] 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.
- Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(15): 1554-1569.
- [30] 刘敦一, 简平, 张旗, 等. 内蒙古图林凯蛇绿岩中埃达克岩 SHRIMP 测年: 早古生代洋壳消减的证据[J]. *地质学报*, 2003, 77(3): 317-327.
- Liu D Y, Jian P, Zhang Q, et al. SHRIMP dating of adakites in the Tulingkai ophiolite, Inner Mongolia: Evidence for the Early Paleozoic subduction [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(3): 317-327.
- [31] 吴元保, 陈道公, 郑永飞, 等. 北大别漫水河混合岩化片麻岩中锆石微区微量元素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2004, 20(5): 1141-1150.
- Wu Y B, Chen D G, Zheng Y F, et al. Trace element geochemistry of zircons in migmatitic gneiss at Manshuihe, North Dabieshan and its geological implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2004, 20(5): 1141-1150.
- [32] 黑龙江省地质矿产局. 黑龙江省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 15-19.
- Heilongjiang Geology and Mineral Bureau. Stratigraphy (lithostratic) of Heilongjiang Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 15-19.
- [33] Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting [J]. *Geology*, 2012, 40(10): 875-878.
- [34] Miao L C, Zhang F Q, Zhu M S, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of metamorphic complexes in the conjunction of the Greater and Lesser Xing'an Ranges, NE China: Timing of formation and metamorphism and tectonic implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 634-648.
- [35] 黄永卫, 刘扬, 王喜臣, 等. 黑龙江北部多宝山矿区奥陶系的岩石特征和构造意义[J]. *地质科学*, 2009, 44(1): 245-256.
- Huang Y W, Liu Y, Wang X C, et al. Petrological features and tectonic significance of the Ordovician in Duobaoshan ore district, northern Heilongjiang [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2009, 44(1): 245-256.

- [36]孙德有, 吴福元, 李惠民, 等. 小兴安岭西北部造山后 A 型花岗岩的时代及与索伦山-贺根山-扎赉特碰撞拼合带东延的关系[J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2217-2222.
- Sun D Y, Wu F Y, Li H M, et al. Emplacement age of the postorogenic A-type granites in northwestern Lesser Xing'an Ranges, and its relationship to the eastward extension of Suolushan-Hegenshan-Zhalaithe collisional suture zone[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(5): 427-432.
- [37]赵芝, 迟效国, 潘世语, 等. 小兴安岭西北部石炭纪地层火山岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(8): 2452-2464.
- Zhao Z, Chi X G, Pan S Y, et al. Zircon U-Pb LA-ICP-MS dating of Carboniferous volcanics and its geological significance in the northwestern Lesser Xing'an Range [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(8): 2452-2464.
- [38]唐克东, 邵济安, 李永飞. 松嫩地块及其研究意义[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 57-65.
- Tang K D, Shao J A, Li Y F. Songnen massif and its research significance[J]. Earth Science Frontiers, 2011, 18(3): 57-65.
- [39]张兴洲, 乔德武, 迟效国, 等. 东北地区晚古生代构造演化及其石油地质意义[J]. 地质通报, 2011, 30(2/3): 205-213.
- Zhang X Z, Qiao D W, Chi X G, et al. Late-Paleozoic tectonic evolution and oil-gas potentiality in northeastern China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2/3): 205-213.
- [40]那福超, 付俊彧, 汪岩, 等. 内蒙古莫力达瓦旗哈达阳绿泥石白云母构造片岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2014, 33(9): 1326-1332.
- Na F C, Fu J Y, Wang Y, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age of the chlorite-muscovite tectonic schist in Hadayang, Morin Dawa Banner, Inner Mongolia, and its tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(9): 1326-1332.
- [41]汪岩, 付俊彧, 杨帆, 等. 嫩江-黑河构造带收缩与伸展——源自晚古生代花岗岩类的地球化学证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(2): 374-388.
- Wang Y, Fu J Y, Yang F, et al. Contraction and extension in Nenjiang-Heihe tectonic belt: Evidence from the Late Paleozoic granitoid geochemistry[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(2): 374-388.
- [42]付俊彧, 汪岩, 那福超, 等. 内蒙古哈达阳镁铁-超镁铁质岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学特征: 对嫩江-黑河地区晚泥盆世俯冲背景的制约[J]. 中国地质, 2015, 42(6): 1740-1753.
- Fu J Y, Wang Y, Na F C, et al. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the Hadayang maficultramafic rocks in Inner Mongolia: Constraints on the Late Devonian subduction of Nenjiang-Heihe area, Northeast China[J]. Geology in China, 2015, 42(6): 1740-1753.
- [43]Zhou Z G, Liu C F, Wang G S, et al. Geochronology, geochemistry and tectonic significance of the Dashizhai ophiolitic mélange belt, southeastern Xing'an-Mongolia orogenic belt[J]. International Journal of Earth Sciences, 2019, 108(1): 67-88, doi: 10.1007/s00531-018-1642-6.
- [44]刘永江, 冯志强, 蒋立伟, 等. 中国东北地区蛇绿岩[J]. 岩石学报, 2019, 35(10): 3017-3047.
- Liu Y J, Feng Z Q, Jiang L W, et al. Ophiolite in the eastern Central Asian orogenic belt, NE China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(10): 3017-3047.
- [45]邵军, 李永飞, 周永恒, 等. 中国东北额尔古纳地块新太古代岩浆事件——钻孔片麻状二长花岗岩锆石 LA-ICP-MS 测年证据[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015, 45(2): 364-373.
- Shao J, Li Y F, Zhou Y H, et al. Neo-Archaean magmatic event in Erguna Massif of Northeast China: Evidence from the zircon LA-ICP-MS dating of the gneissic monzogranite from the drill[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2015, 45(2): 364-373.
- [46]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.
- [47]余宏全, 梁玉伟, 李进文, 等. 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), 2011, 41(6): 1831-1864.
- She H Q, Liang Y W, Li J W, et al. The Early-Mesozoic magmatic activity at Moerdaoga district in Inner Mongolia and its geodynamic implication[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(6): 1831-1864.
- [48]孙立新, 任邦方, 赵凤清, 等. 额尔古纳地块太平川巨斑状花岗岩的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 114-122.
- Sun L X, Ren B F, Zhao F Q, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characteristics of Taipingchuan large porphyritic granite pluton of Erguna massif in the Great Xing'an Range [J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5): 114-122.
- [49]Tang J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of Neoproterozoic magmatism in the Erguna massif, NE China: Petrogenesis and implications for the breakup of the Rodinia supercontinent [J]. Precambrian Research, 2013, 224: 597-611.
- [50]张丽, 刘永江, 李伟民, 等. 关于额尔古纳地块基底性质和东界的讨论[J]. 地质科学, 2013, 48(1): 227-244.
- Zhang L, Liu Y J, Li W M, et al. Discussion on the basement properties and east boundary of the Ergun massif[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(1): 227-244.
- [51]Gou J, Sun D Y, Ren Y S, et al. Petrogenesis and geodynamic setting of Neoproterozoic and Late Paleozoic magmatism in the Manzhouli-Erguna area of Inner Mongolia, China: Geochronological, geochemical and Hf isotopic evidence [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 67-68: 114-137.
- [52]郭宇飞, 杨言辰, 韩世炯, 等. 大兴安岭北部凤凰山地区英云闪长

- 岩地球化学特征与锆石 U-Pb 定年[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(5): 1406-1417.
- Guo Y F, Yang Y C, Han S J, et al. Geochemistry and Zircon U-Pb dating of the Tonalite from Fenghuangshan area in northern Daxing'anling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(5): 1406-1417.
- [53] 赵硕, 许文良, 唐杰, 等. 额尔古纳地块新元古代岩浆作用与微陆块构造属性: 来自侵入岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素的制约[J]. 地球科学, 2016, 41(11): 1803-1829.
- Zhao S, Xu W L, Tang J, et al. Neoproterozoic magmatic events and tectonic attribution of the Erguna massif: Constraints from geochronological, geochemical and Hf isotopic data of intrusive rocks [J]. Earth Science, 2016, 41(11): 1803-1829.
- [54] 赵硕, 张进, 李锦轶, 等. 额尔古纳地块新元古代花岗岩榴石原位微区 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地质学报, 2020, 94(3): 757-767.
- Zhao S, Zhang J, Li J Y, et al. Titanite LA-ICP-MS U-Pb dating of the Neoproterozoic granites in the Erguna massif and their geological significance[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(3): 757-767.
- [55] 杨华本, 刘玉, 郑吉林, 等. 额尔古纳地块玻乌勒山地区新元古代斜长角闪岩-片麻状花岗岩的成因及其地质意义[J]. 地质通报, 2017, 36(2/3): 343-356.
- Yang H B, Liu Y, Zheng J L, et al. Petrogenesis and geological significance of Neoproterozoic amphibolite and granite in Bowuleshan area, Erguna massif, Northeast China [J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(2/3): 342-356.
- [56] 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, 50(12): 1239-1247.
- Ge W C, Wu F Y, Zhou C Y, et al. Emplacement age of the Tahe granite and its constraints on the tectonic nature of the Ergun block in the northern part of the Da Hinggan Range [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(18): 2097-2105.
- [57] 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.
- Ge W C, Sui Z M, Wu F Y, et al. Zircon U-Pb ages, Hf isotopic characteristics and their implications of the Early Paleozoic granites in the northeastern Da Hinggan Mts, northeastern China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(2): 423-440.
- [58] 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(20): 2278-2288.
- Wu G, Sun F Y, Zhao C S, et al. Discovery of the Early Paleozoic post-collisional granites in northern margin of the Erguna massif and its geological significance [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(23): 2733-2743.
- [59] 崔根, 王金益, 张景仙, 等. 黑龙江多宝山花岗闪长岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 世界地质, 2008, 27(4): 387-394.
- Cui G, Wang J Y, Zhang J X, et al. U-Pb SHRIMP dating of zircons from Duobaoshan granodiorite in Heilongjiang and its geological significance[J]. Global Geology, 2008, 27(4): 387-394.
- [60] 赵焕利, 朱春艳, 刘海洋, 等. 黑龙江多宝山铜矿床中花岗闪长岩锆石 SHRIMP U-Pb 测年及其构造意义[J]. 地质与资源, 2012, 21(5): 421-424.
- Zhao H L, Zhu C Y, Liu H Y, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating and its tectonic implications of the granodiorite in Duobaoshan copper deposit, Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources, 2012, 21(5): 421-424.
- [61] 向安平, 杨郦城, 李贵涛, 等. 黑龙江多宝山斑岩 Cu-Mo 矿床成岩成矿时代研究[J]. 矿床地质, 2012, 31(6): 1237-1248.
- Xiang A P, Yang Y C, Li G T, et al. Diagenetic and metallogenic ages of Duobaoshan porphyry Cu-Mo deposit in Heilongjiang Province [J]. Mineral Deposits, 2012, 37(6): 1237-1248.
- [62] 刘军, 周振华, 何哲峰, 等. 黑龙江省铜山铜矿床英云闪长岩锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 矿床地质, 2015, 34(2): 289-308.
- Liu J, Zhou Z H, He Z F, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of ore-bearing tonalite in Tongshan copper deposit, Heilongjiang Province[J]. Mineral Deposits, 2015, 34(2): 289-308.
- [63] 杨永胜, 吕新彪, 高荣臻, 等. 黑龙江争光金矿床英云闪长斑岩年代学、地球化学及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(4): 674-700.
- Yang Y S, Lü X B, Gao R Z, et al. Geochronology, geochemistry and geological significance of the tonalite porphyry in Zhengguang gold deposit, Heilongjiang Province[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2016, 40(4): 674-700.
- [64] Zhao C, Qin K Z, Song G X, et al. Early Palaeozoic high-Mg basalt-andesite suite in the Duobaoshan porphyry Cu deposit, NE China: Constraints on petrogenesis, mineralization, and tectonic setting[J]. Gondwana Research, 2019, 71: 91-116.
- [65] 付艳丽, 杨言辰. 黑龙江省争光金矿床成因及找矿标志[J]. 黄金, 2010, 31(6): 13-18.
- Fu Y L, Yang Y C. Deposit genesis and prospecting criteria of Zhengguang gold deposit, Heilongjiang[J]. Gold, 2010, 31(6): 13-18.
- [66] 赵忠海, 郑卫政, 曲晖, 等. 黑龙江多宝山地区铜金成矿作用及成矿规律[J]. 矿床地质, 2012, 31(3): 601-614.
- Zhao Z H, Zheng W Z, Qu H, et al. Cu-Au mineralization and metallogenic regularity of Duobaoshan area, Heilongjiang Province [J]. Mineral Deposits, 2012, 31(3): 601-614.

- [J]. *Journal of Geology*, 2019, 43(3): 349–358.
- [28]李麒麟, 李荣亮, 苏海伦, 等. 甘肃临泽县城区深部地热资源调查评价[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 999–1008, doi: 10.11720/wtyht.2020.0191.
- Li Q L, Li R L, Su H L, et al. Investigation evaluation and method study of deep geothermal resources in Linze County, Gansu Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 999–1008, doi: 10.11720/wtyht.2020.0191.
- [29]朱云起, 李帝铨, 胡艳芳, 等. 共和盆地恰卜恰地区广域电磁法勘查[C]// 2020年中国地球科学联合学术年会论文集(十五). 重庆: 北京伯通电子出版社, 2020.
- Zhu Q Y, Li D Q, Hu Y F, et al. Wide field electromagnetic exploration of the Qiabuqia geothermal area in Gonghe Basin [C]// 2020 Chinese Earth Science Joint Academic Essays (15). Chongqing: Beijing Botong Electronic Publishing House, 2020. (in Chinese)
- [30]曾何胜, 徐元璋, 刘磊, 等. 广域电磁法在复杂电磁干扰环境的应用研究——以某市周边地热勘查为例[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 1031–1038, doi: 10.11720/wtyht.2020.0228.
- Zeng H S, Xu Y Z, Liu L, et al. Researches on the application of wide field electromagnetic method to the complex electromagnetic interference environment: Exemplified by the geothermal exploration around a city [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 1031–1038, doi: 10.11720/wtyht.2020.0228.
- [31]田红军, 张光大, 刘光迪, 等. 黔北台隆区地热勘探中广域电磁法的应用效果[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 1093–1097, doi: 10.11720/wtyht.2020.0199.
- Tian H J, Zhang G D, Liu G D, et al. The application effect of the wide field electromagnetic method in geothermal exploration of Tailong area, northern Guizhou Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 1093–1097, doi: 10.11720/wtyht.2020.0199.
- [32]危志峰, 陈后扬, 吴西全. 广域电磁法在宜春某地地热勘查中的应用[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 1009–1018, doi: 10.11720/wtyht.2020.0216.
- Wei Z F, Chen H Y, Wu X Q. The application of wide field electromagnetic method to geothermal exploration in Yichun [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 1009–1018, doi: 10.11720/wtyht.2020.0216.
- [33]徐学思. 江苏省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- Xu X S. Petrostratigraphy of Jiangsu Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997. (in Chinese)
- [34]姜光政, 高珊, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892–2910, doi: 10.6038/cjg20160815.
- Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892–2910, doi: 10.6038/cjg20160815.

(上接第 13 页/Continued from Page 13)

- [67]Hao Y J, Ren Y S, Duan M X, et al. Metallogenic events and tectonic setting of the Duobaoshan ore field in Heilongjiang Province, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 442–458.
- [68]朱群, 李之彤. 大兴安岭古利库金矿区落马湖岩群变质岩系及其含矿性[J]. *地质与资源*, 2001, 10(4): 204–209.
- Zhu Q, Li Z T. The metamorphic rocks of Luomahu Group and its ore potentiality in Guliku gold field, Daxinganling Ridge [J]. *Geology and Resources*, 2001, 10(4): 204–209.
- [69]李春诚, 吕新彪, 高荣臻, 等. 大兴安岭北段古利库金(银)矿床地质特征及成因分析[J]. *矿床地质*, 2014, 33(S1): 523–524.
- Li C C, Lv X B, Gao R Z, et al. Geological characteristics and genetic analysis of Guli Kui Gold (Ag) deposit in the northern Da Hinggan Mountains [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(S1): 523–524.
- (in Chinese)
- [70]刘宝山, 王少轶, 牛延宏, 等. 黑龙江黑河大新屯金矿区地质特征及成因机理初探[J]. *黄金*, 2013, 34(11): 16–19.
- Liu B S, Wang S Y, Niu Y H, et al. Geological characteristics and genetic mechanism of the Daxintun gold deposit in Heihe, Heilongjiang Province [J]. *Gold*, 2013, 34(11): 16–19.
- [71]刘宝山, 李成禄. 黑河地区北宽河组地层含矿性地球化学评价——以黑河大新屯金矿矿区为例[J]. *地质调查与研究*, 2016, 39(4): 273–278.
- Liu B S, Li C L. Geochemical evaluation for ore potentiality of the Beikuanhe formation in Heihe area: A case study of the Daxintun gold deposit in Heihe [J]. *Geological Survey and Research*, 2016, 39(4): 273–278.