



引文格式: 罗宁, 陈印, 陈路路, 等. 二连盆地脑木根凹陷下白垩统赛汉组沉积时代和物源: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的约束[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 228–245. DOI: 10.12401/j.nwg.2025080

Citation: LUO Ning, CHEN Yin, CHEN Lulu, et al. Deposition Age and Provenances of Lower Cretaceous Saihan Formation in Naomugen Depression, Erlian Basin: Constraints from the Detrital Zircons U-Pb Chronology[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 228–245. DOI: 10.12401/j.nwg.2025080

二连盆地脑木根凹陷下白垩统赛汉组沉积时代和物源: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的约束

罗宁¹, 陈印^{2,3,*}, 陈路路^{2,3}, 李名¹, 余小林¹, 臧永亮¹, 姜晓辉¹

(1. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司, 河北 任丘 062552; 2. 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; 3. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170)

摘要: 二连盆地作为中国重要的砂岩型铀矿富集区, 位于中亚造山带中东段。该盆地下白垩统赛汉组是主要的铀矿含矿层。由于受到多次构造运动和古河谷演化的共同作用, 不同时间点及凹陷区域的物源存在差异, 且赛汉组的确切沉积时代尚不明确。笔者聚焦于二连盆地脑木根凹陷的赛汉组, 采用岩石学、碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年法以及微量元素分析等方法, 探讨了赛汉组底部含矿砂岩的最大沉积年龄及其沉积物来源, 并深入讨论了其构造意义。研究表明, 赛汉组下段的碎屑锆石主要来源于中生代、古生代花岗岩和基性岩, 对应的峰值年龄分别为 140 Ma、265 Ma 和 434 Ma。基于对样品中最年轻的单颗粒锆石定年结果, 确定赛汉组的最大沉积年龄为 (108 ± 2) Ma, 表明其属于早白垩世阿尔必期。通过与周边地区的对比分析, 发现赛汉组的物质来源包括苏尼特隆起中部和西部暴露的岩体、火山岩或前白垩纪地层, 巴音宝力格隆起附近地区暴露的岩体, 以及盆地西南边缘白乃庙岛弧西端暴露的加里东期和华力西期岩体。结合腾格尔组内火山岩年代学信息, 推断在早白垩世晚期 (约 110 Ma), 二连盆地经历了快速的隆升和剥蚀过程, 导致巴音宝力格隆起和苏尼特隆起的迅速抬升和侵蚀, 形成了盆缘的构造缓坡, 开始向盆地内部提供丰富的碎屑沉积物和含铀物质。

关键词: 二连盆地; 赛汉组; 锆石 U-Pb 定年; 物源区; 最大沉积年龄

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0228-18

Deposition Age and Provenances of Lower Cretaceous Saihan Formation in Naomugen Depression, Erlian Basin: Constraints from the Detrital Zircons U-Pb Chronology

LUO Ning¹, CHEN Yin^{2,3,*}, CHEN Lulu^{2,3}, LI Ming¹, YU Xiaolin¹, ZANG Yongliang¹, JIANG Xiaohui¹

(1. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, Hebei, China; 2. Tianjin Center of China Geological Survey / North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China; 3. Laboratory of Petroleum Geomechanics,

收稿日期: 2025-02-17; 修回日期: 2025-05-20; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国石油华北油田科技项目 (HBYT-L-2022-JS-180、HBYT-L-2024-JS-338), 国家重点研发计划项目 (2023YFC2906700), 国家自然科学基金项目 (92162212), 中国地质调查项目 (DD20230624), 国际地球科学计划 (IGCP675) 联合资助。

作者简介: 罗宁 (1965–), 男, 正高级工程师, 主要从事油气勘探、新能源开发利用工作。E-mail: 365740634@qq.com。

* 通讯作者: 陈印 (1984–), 男, 副研究员, 主要从事盆地分析、砂岩型铀矿地质调查与研究。E-mail: chenyingchain@sina.com。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

Abstract: The Erlian basin, an essential sandstone-type uranium enrichment basin in northern China, is situated in the central segment of the Central Asian Orogenic Belt. In the basin, the Lower Cretaceous Saihan Formation constitutes the most significant uranium-bearing layer. Influenced by tectonic overturning and paleo-valley evolution, provenances experienced intensely spatial and temporal transition, and the precise depositional age of the Saihan Formation remains ambiguous. In this study, we conducted an integrated investigation of the Saihan Formation in the Naomugen Depression, employing petrographic analysis, LA-ICP-MS U-Pb geochronology and trace element geochemistry of detrital zircons. These methodologies are to determine the maximum depositional age, identify provenance characteristics of the uranium-bearing sandstones, and elucidate tectonic implications. Detrital zircon geochronological results reveal three predominant age clusters: 434 Ma (Caledonian), 265 Ma (Variscan), and 140 Ma (Yanshanian), indicating multiple magmatic sources spanning the Paleozoic to the Early Mesozoic. Notably, the youngest single-grain ages (125 ± 3 Ma, 115 ± 6 Ma, 122 ± 2 Ma, 108 ± 2 Ma) and weighted mean ages (113.3 Ma, 123 Ma) collectively constrain the maximum depositional age of the Saihan Formation to (108 ± 2) Ma, corresponding to the Albion stage of the Early Cretaceous. Provenance analysis demonstrates that detrital materials were derived from: Cretaceous exposures in the central-western Sonid Uplift, Weijing intrusions in the Bayinbaolige Uplift, and Caledonian-Variscan complexes in the western Bainaimiao Arc. Integrating with volcanic records from the Tengger Formation, our findings confirm a rapid tectonic uplift event at ~ 110 Ma during the late Early Cretaceous. This tectonic episode created optimal metallogenic conditions through the formation of structural slopes and thick sandstone sequences, providing critical constraints for uranium exploration models in the region.

Keywords: Erlian basin; Saihan Formation; zircon U-Pb dating; provenance; maximum deposition age

二连盆地位于中亚造山带的中东段,呈“三隆+两坳”的构造格局,是中国重要的煤、油气、铀等多能源盆地(图1)。自20世纪80年代以来,二连盆地内铀矿获得众多找矿突破,先后发现了赛罕高毕、巴彦乌拉、陆海、恩格日因、哈达图、白彦花等砂岩型铀矿及努和廷等泥岩型铀矿床(图2)。砂岩型铀矿含铀岩系主要为白垩系赛汉组和二连组河流相砂体,发育优异的“泥-砂-泥”结构,具有典型古河谷沉积特征。对于这些古河谷型砂岩型铀矿,前人已经从区域构造背景、铀成矿条件、关键控矿要素、矿床成因及成矿模式等方面开展了大量工作,取得了一系列重要认识,提出了“多物源供给”“古河谷沉积相控矿”“多阶段构造叠加改造”“不同还原性介质成矿”“双重铀源供给”等观点(聂逢君等, 2015; 韩效忠等, 2018; Nie et al., 2020; 俞初安等, 2020; 林效宾等, 2021; 李子颖等, 2022; 刘华健等, 2024)。但受构造改造影响,二连盆地经历了多期次断陷和反转活动,发育众多次级凹陷和隆起,给示踪不同地区含矿目的层沉积体系物质来源带来了众多困难。

乌兰察布坳陷位于二连盆地中部西段、卫境岩体南缘(图2)。近年来,乌兰察布坳陷内脑木根-齐哈日格图凹陷等地区成为砂岩型铀矿找矿重点区和成矿理论研究新区。通过古地理恢复及物源示踪等分析,众多学者认为二连盆地地下白垩统赛汉组沉积期,乌兰察布坳陷内古水流自西南向东北流,沉积物主要来自于苏尼特隆起(吕永华等, 2019; 谢惠丽等, 2020; 刘佳林等, 2020; 颜小波等, 2022)。但脑木根地区下白垩统赛汉组是否接受了来自北部巴音宝力格隆起的富铀物源还存在争论。通过对研究区北部卫境岩体铀丢失和构造演化的研究,聂逢君等(2022)指出乌兰察布坳陷内铀源主要来自于卫境岩体或物源为卫境岩体的含矿层。但是现有地震资料显示,脑木根凹陷与北部额仁淖尔凹陷之间存在隆起(图1)。因此,在下白垩统赛汉组沉积期,脑木根地区是否具有北部巴音宝力格隆起和南部苏尼特隆起双重物源供给的特性,或者卫境岩体能否向脑木根地区提供沉积物和铀源,目前还缺乏足够的证据。

为进一步匹配沉积序列与构造事件、成矿事件的

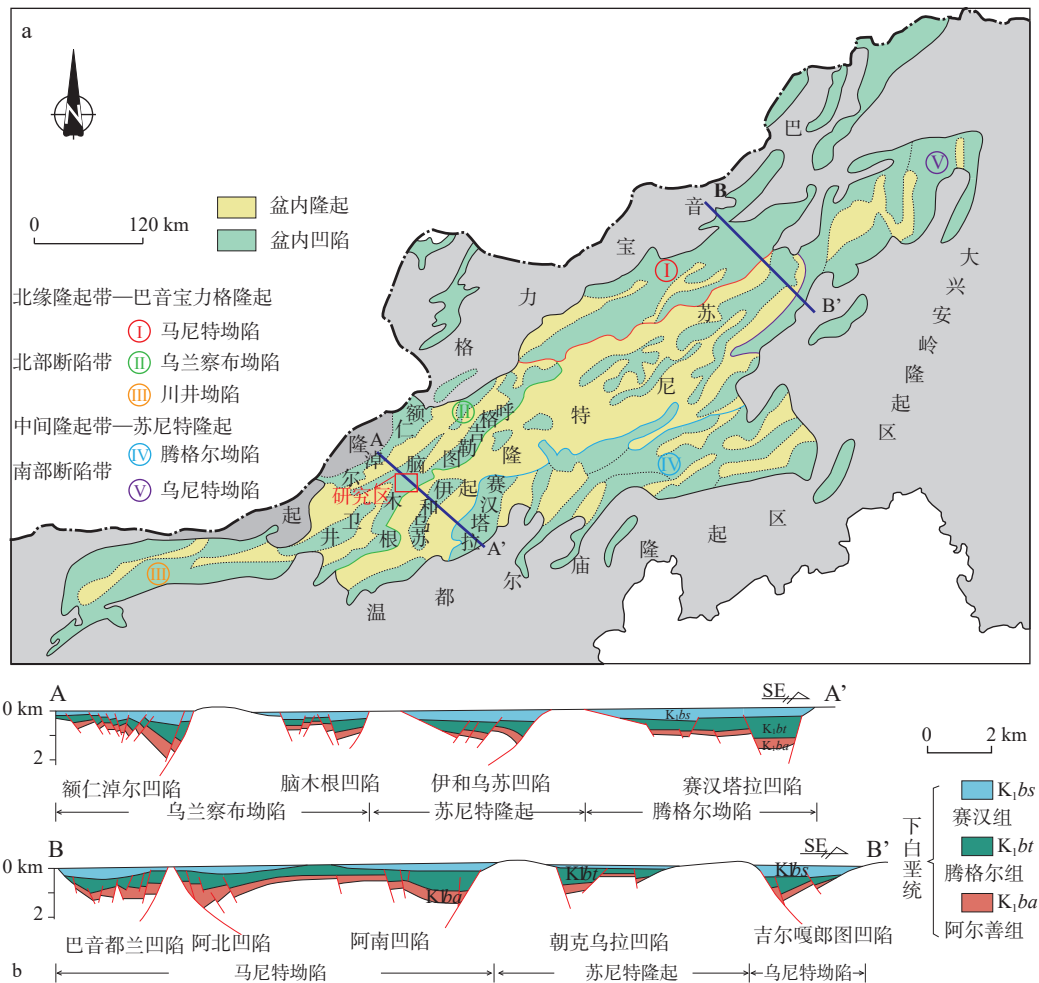


图1 二连盆地区域构造位置及地震解译剖面(A-A'、B-B'地震剖面据漆家福等, 2015)

Fig. 1 Regional tectonic sketch and seismic sections of the Erlian basin

联系,盆地构造热演化、沉积时限及铀成矿时间常进行综合考虑,前人已经通过低温热年代学及铀矿物定年等手段,先后确定了早侏罗世以来二连盆地经历了多期次断陷-隆起的循环演化,导致了富铀地质体出露、含矿砂岩发育及有利构造缓坡形成,为砂岩型铀成矿提供了重要条件(聂逢君等, 2022; 刘华健等, 2024; 刘晓雪等, 2024)。针对脑木根地区,前人甚少从沉积时间方向讨论构造-沉积与铀成矿的联系。除了古地磁、古生物等信息,沉积岩中火山岩夹层或凝灰岩夹层常被用来限定沉积时代(Guo et al., 2018, 2019)。但二连盆地赛汉组内尚未发现此类夹层,导致其沉积时代尚未精确限定。沉积时间与构造活动时间的耦合联系,有助于理解物源区隆升历史及其向盆地的物质供给时间,是进一步讨论物质供给与铀成矿的重要基础。

本次工作将聚焦于二连盆地脑木根凹陷下白垩

统赛汉组下段砂岩型铀矿含矿层段,拟通过沉积岩石学、碎屑锆石 U-Pb 年代学和微量元素等研究,对比分析盆地周缘主要物源区的前人研究成果和二连盆地构造-热演化,示踪含矿段物质来源,约束赛汉组沉积时间,揭示区域构造演化,为深入了解脑木根凹陷砂岩型铀成矿作用提供重要支撑。

1 区域地质背景

二连盆地呈 NE 向展布,东西界为大兴安岭隆起和索伦山隆起,南北界为温都尔庙隆起和巴音宝力格隆起。盆地属于中朝克拉通北缘与西伯利亚板块之间的拼接带,是中生代后期在华力西期褶皱基底和侏罗系残留盆地基础上,经断陷、反正等地质活动形成的一系列中、小型盆地群组合。盆地包括川井凹陷、乌兰察布凹陷、马尼特凹陷、腾格尔凹陷、乌尼特凹

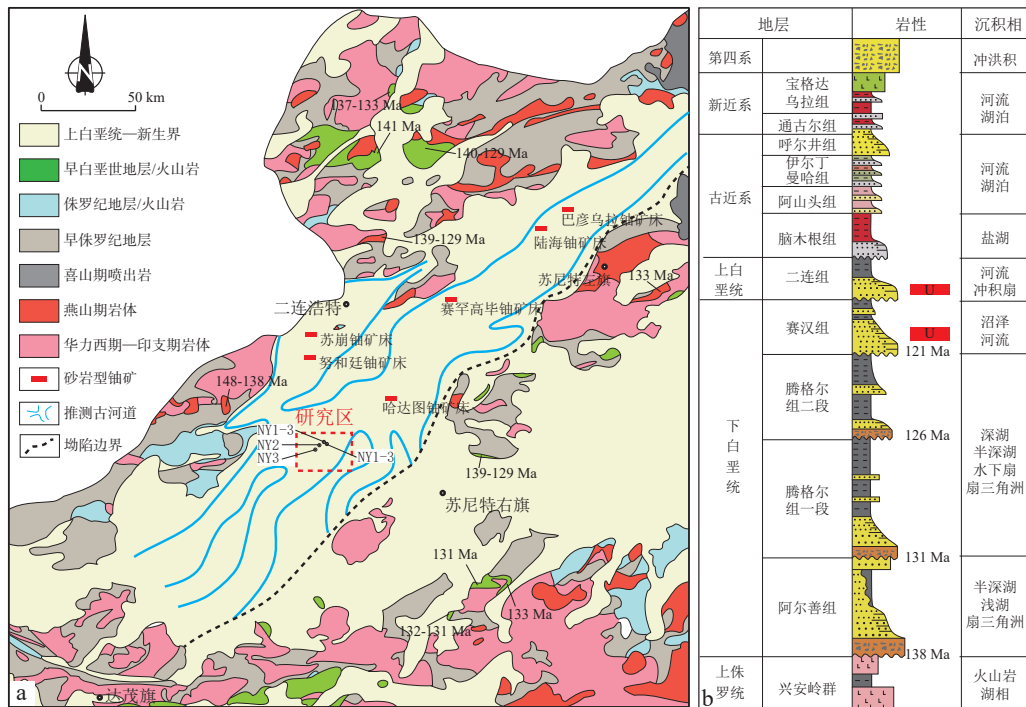


图2 二连盆地中西部构造地质简图和(a)综合柱状图(b, 据 Tang et al., 2019 修改)

Fig. 2 (a) Geological schematic map and (b) column of the central and western Erlian basin

陷、苏尼特隆起等6个二级构造单位(图1b; 彭云彪等, 2019; 何泽宇等, 2025)。中生代以来, 二连盆地经历了侏罗纪—早白垩世中早期伸展断陷、早白垩世晚期拗陷、晚白垩世及其后构造反转等阶段(马新华等, 2000; 屈晓艳等, 2013; 刘武生等, 2018; Liu et al., 2022; Xu et al., 2023; 俞初安等, 2024)。受中朝板块与西伯利亚板块碰撞拼贴、古/新太平洋俯冲等影响, 盆地周缘广泛发育华力西期、印支期、燕山期中酸性侵入岩及喜山期喷出岩, 提供了重要的沉积物和铀源。

盆地基底由元古界和古生界的变质岩及以海西期、加里东期为主的岩浆岩组成, 并发育一系列的复式褶皱和深大断裂。沉积盖层主要由侏罗系的阿拉坦合力群、兴安岭群, 白垩系的阿尔善组、腾格尔组、赛汉组、二连组, 古近系—第四系组成(图2b)。其中, 赛汉组主要发育一套河流、沼泽相沉积, 是二连盆地主要的赋矿层位。前人将赛汉组划分为上、下两段或三段。下部为杂色粉砂岩、砂砾岩夹泥岩, 中部灰色泥岩、灰黑色碳质泥岩和可采褐煤层; 上部为灰色砂岩夹灰绿、紫红、棕红色泥岩。

研究区位于乌兰察布坳陷脑木根凹陷东北部, 其下白垩统发育阿尔善组、腾格尔组和赛汉组(图3)。钻探揭露发现赛汉组具明显的岩性组合差异, 其中下段为一套河流相砾岩、砂岩等粗碎屑沉积组合, 为该

地区主要含矿层位; 上段为一套河流—湖泊相泥岩夹砂岩组合, 以细碎沉积为主, 为厚层隔水层。砂岩型铀矿呈板状, 埋藏为600~780 m。含矿岩性主要为灰色、灰绿色中粗砂岩、含砾砂岩和砾岩。显微特征显示, 含矿砂岩颗粒分选性差, 磨圆度低, 多呈棱角状, 以泥质胶结、颗粒支撑为主, 局部可见钙质胶结(图4)。

2 样品采集和分析测试方法

本次工作共采集6件岩心样品, 均来自于二连盆地中西部脑木根凹陷下白垩统赛汉组下段内主要含矿层上、下围岩(图3)。样品主要为红色、黄色、绿灰色砂岩、含砾砂岩和砂砾岩。

锆石挑选由河北廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成, 将岩石样品粉碎至100 μm后, 经磁选和浮选出锆石精样, 并在双目镜下手工挑选。随机挑选的锆石, 由中国地质调查局天津地质调查中心实验测试室完成制靶、阴极发光(CL)照相和锆石U-Pb同位素定年。锆石定年使用激光烧蚀多接收器等离子质谱仪LA-ICP-MS (Agilent 7900)测定, 并选取91500 (1065 Ma)及Plesovice锆石(337 Ma)作为标样。年龄数据处理采用ISOPLOT (Ludwig, 2003)和ISOPLOT (Vermeesch, 2018)程序完成。

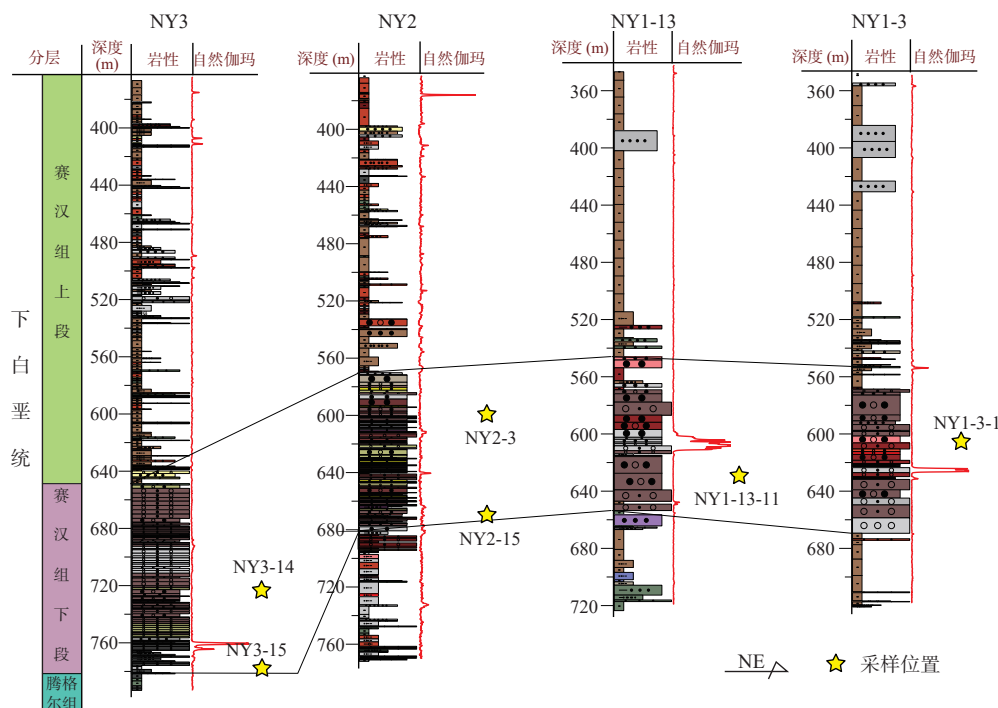


图3 连井剖面及采样位置(钻井位置见图 2a)

Fig. 3 Well profile and sampling locations (Please see the Fig.2a for the location of the drills)

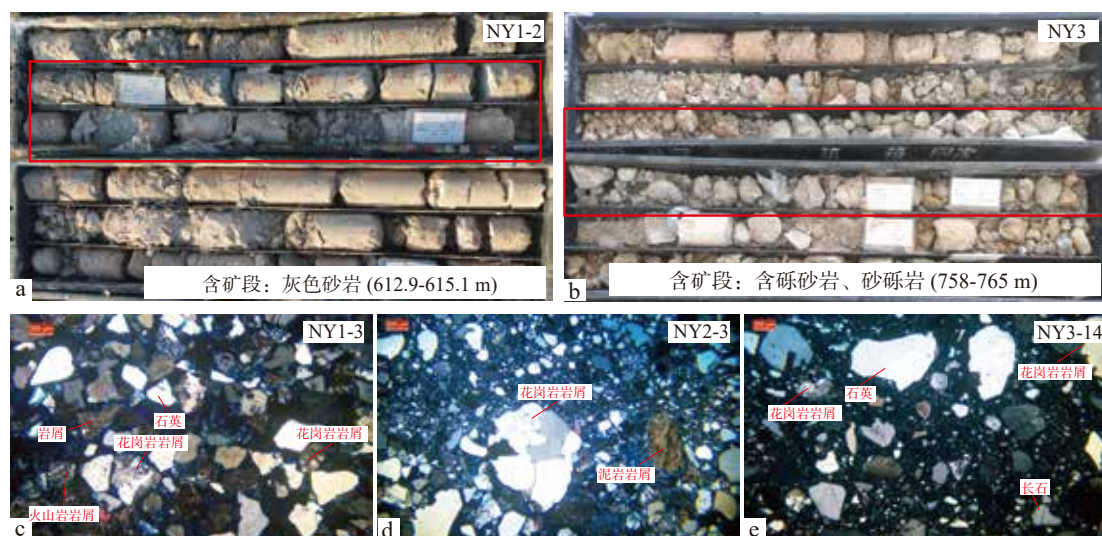


图4 含矿段岩心及显微照片(正交偏光)

Fig. 4 Cores and micrographs of ore-bearing layers (Under orthogonal polarized light)

3 测试结果

3.1 锆石形貌特征和微量元素

锆石 CL 图像显示, 样品锆石形态主要呈短柱状, 最大直径为 150~300 μm , 具体很好的晶型或棱角状。锆石岩浆晶型完整, 晶棱锋锐清晰, 具有很好的震荡环带。少量变质锆石呈浑圆状、扇状, 具有变质环带

或没有环带结构。6 个样品碎屑锆石 Th/U 值一般大于 0.4, 显示了岩浆锆石成因特征(Hermann et al., 2001; 吴元保等, 2004)。多数前寒武纪碎屑锆石 Th/U 值仍大于 0.1(图 5), 这可能与 U 含量较低有关, 指示了变质锆石具有加快的生长速度(Vavra et al., 1999)。

碎屑锆石微量元素分析显示, 碎屑锆石多具有大陆锆石属性, 少量具有洋壳锆石, 进一步表现为大陆岛弧型或洋岛型(图 6)。锆石赋存原岩主要为花岗闪

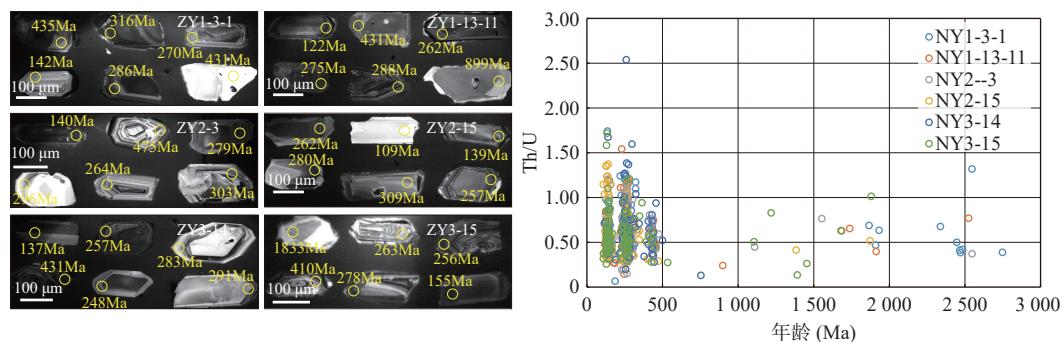


图5 样品碎屑锆石 CL 图像特征和 Th/U 值

Fig. 5 CL images and Th/U ratio of detrital zircons

长岩、闪长岩或基性岩。这些属性与二连盆地所处的区域构造位置相符,记录了古亚洲洋及蒙古-鄂霍次克洋闭合的构造-岩浆演化过程。碎屑锆石形态和微量元素特征显示,样品具有近物源特征,且主要来自于花岗岩和基性岩。

3.2 碎屑锆石 U-Pb 年代学

由于沉积物中的碎屑锆石由多个年龄组分混合而成,为增加碎屑锆石年代学数据的有效性,本次工

作对每件样品选取 200 颗锆石进行 U-Pb 年代学测试 (Vermeesch, 2004)。当年龄大于 1 500 Ma 时,本次工作选择 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄;当年龄小于 1 500 Ma 时,选择 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Spencer et al., 2016)。碎屑锆石定年结果分析显示(图 7),除少数数据稍偏离谐和线外,绝大多数锆石 U-Pb 年龄落在谐和线上,反映了部分锆石可能存在 Pb 丢失或 U 丢失。剔除谐和度较小的年龄后,年龄数据均集中分布在 500 Ma 以来,具有 3 个明

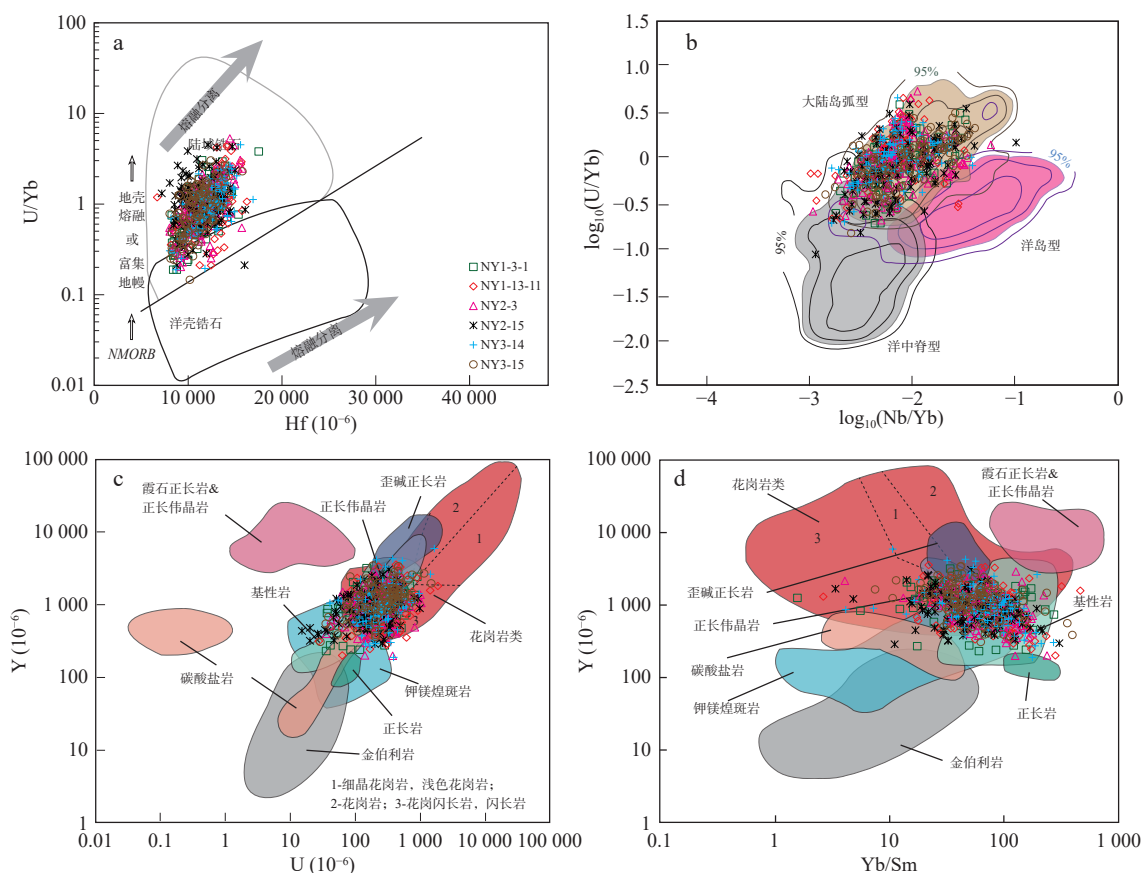
a. Hf-U/Yb 图解; b. $\lg(\text{Nb/Yb})$ - $\lg(\text{U/Yb})$ 图解; c. Y-U 图解; d. Y-Yb/Sm 图解

图6 碎屑锆石微量元素分析图解(据 Grimes et al., 2007, 2015; Belousova et al., 2002)

Fig. 6 Analysis patterns of trace elements in detrital zircons

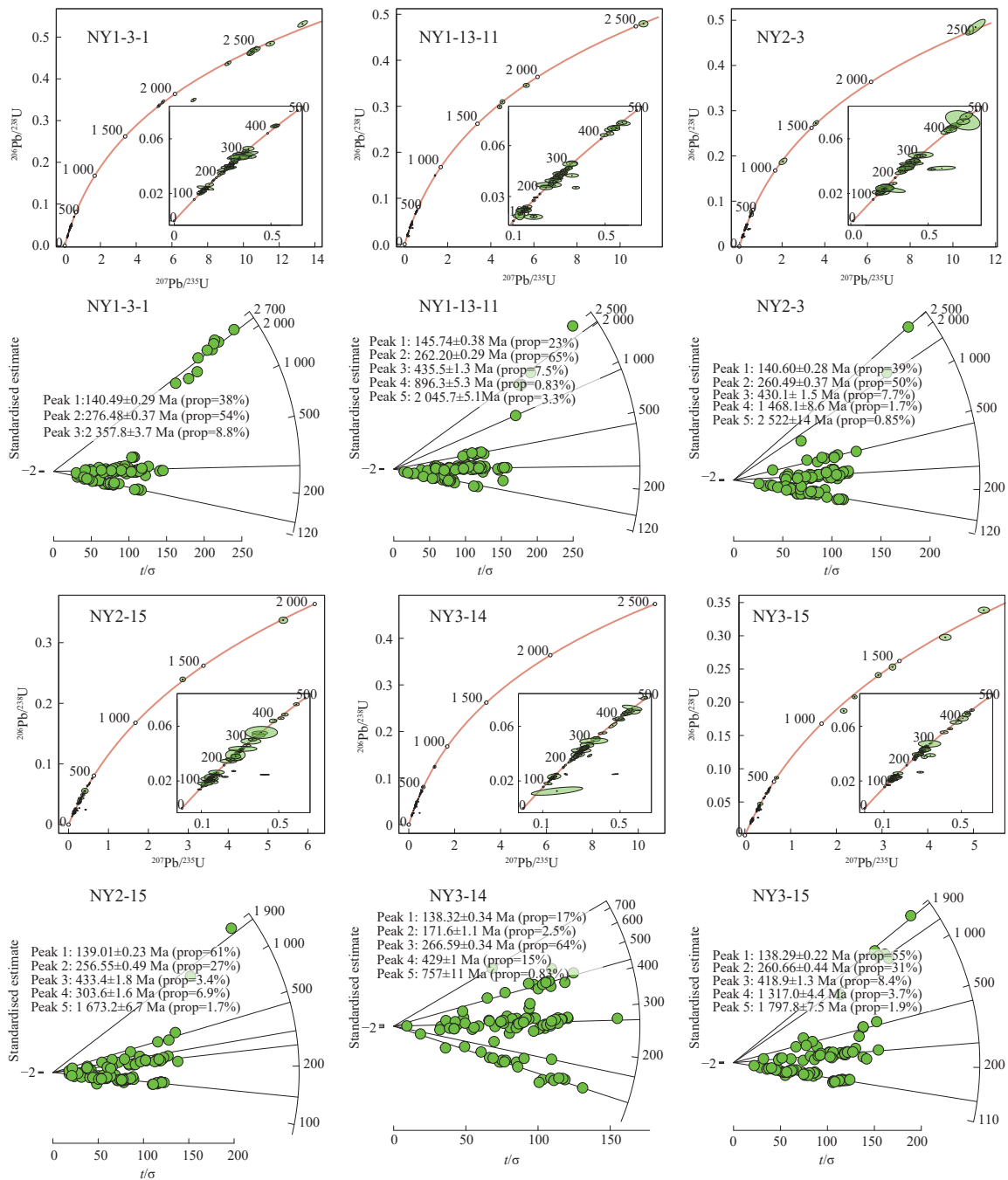


图7 碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图和雷达图

Fig. 7 Detrital zircons U-Pb age concordia diagrams and radar patterns

显相匹配的峰值。虽然年龄分布雷达图分析结果和直方-核密度分析结果所显示的峰值年龄有些差距,但峰值分布规律基本一致(图7、图8)。

ZY1-3-1 样品采自于 ZY1-3 钻孔含矿段上部,具有 125 Ma 的最小单颗粒年龄。年龄雷达图(图7)显示,样品具有 3 个峰值年龄: 140.49 Ma(38%), 276.48 Ma(54%)和 2357.8 Ma(8.8%)。直方-核密度图(图8)显示,该样品主峰值年龄为 140 Ma、263 Ma、432 Ma,

次峰值年龄为 1877 Ma 和 2478 Ma。

ZY1-13-11 样品采自于 ZY1-13 钻孔含矿段下部,具有 115 Ma 的最小单颗粒年龄。年龄雷达图(图7)显示,该样品具有 5 个峰值: 145.74 Ma(23%)、262.2 Ma(65%)、435.5 Ma(7.5%)、896.3 Ma(0.83%)和 2045.7 Ma(3.3%)。年龄直方-核密度图(图8)显示,其年龄具有类似的分布规律,但集中分布于 500 Ma 以来,峰值为 137 Ma、262 Ma 和 438 Ma。

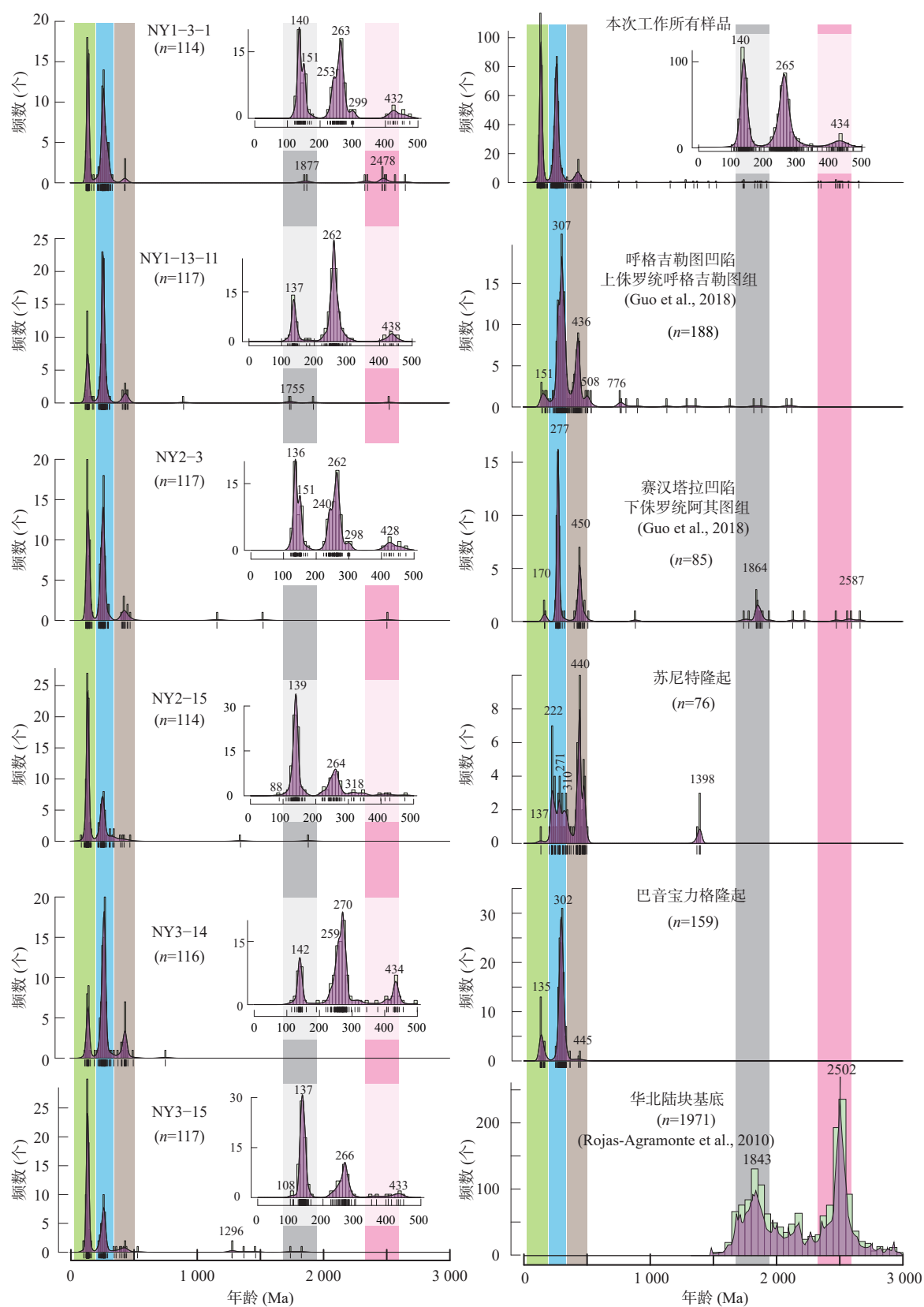


图8 碎屑锆石年龄及潜在源区年龄直方-核密度图

Fig. 8 Detrital zircon age distribution diagrams in this study and the potential provenances

ZY2-3 和 ZY2-15 分别来自于 ZY2 钻孔放射性异常段的顶部和地层底部。其中, ZY2-3 具有 122 Ma 的最小单颗粒年龄。年龄雷达分布图(图 7)显示, 其具有 5 个年龄峰值: 140.6 Ma(39%)、260.49 Ma(50%)、430.1 Ma(7.7%)、1 468.1 Ma(1.7%)和 2 522 Ma(0.85%)。年龄直方-核密度图具有 136 Ma、262 Ma 和 428 Ma 的峰值年龄(图 8)。ZY2-15 具有 88 Ma 的最小单颗粒年龄。该样品来自于下白垩统赛汉组下段底部, 所有碎屑锆石年龄最小应大于 100 Ma, 因子最小单颗粒的年龄在后期讨论中剔除。年龄雷达分布图(图 7)显示, 该样品有 5 期峰值年龄: 139.01 Ma(61%)、256.55 Ma(27%)、303.6 Ma(6.9%)、433.4 Ma(3.4%)和 1 673.2 Ma(1.7%)。年龄直方-核密度图显示 139 Ma、264 Ma 和 318 Ma 的峰值年龄(图 8)。相对于 NY2-3, NY2-15 样品中 200~500 Ma 所占比值有所下降。

NY3-14 和 NY3-15 分别来自于 NY3 钻孔含矿段的顶部和底部。其中, NY3-14 具有 115 Ma 的最小单颗粒年龄。雷达分布图(图 7)显示, 该样品具有 5 个峰值年龄: 138.32 Ma(17%)、171.6 (2.5%)、266.59 Ma(64%)、429 Ma(15%)和 757 Ma(0.83%)。年龄直方-核密度图显示 142 Ma、270 Ma 和 434 Ma 的峰值年龄(图 8)。其中, 相对于其他样品, 该样品具有最高的 429~434 Ma 年龄占比。NY3-15 具有 108 Ma 的最小单颗粒年龄。雷达分布图(图 7)显示, 该样品记录了 5 期峰值年龄: 138.29 Ma(55%)、260.66 Ma(31%)、418.9 Ma(8.4%)、1 317 Ma(3.7%)和 1 797.8 Ma(1.9%)。年龄直方-核密度图具有 137 Ma、266 Ma 和 433 Ma 的峰值年龄(图 8)。相对于 NY3-15, NY3-14 具有更高的 400~500 Ma 年龄占比。

所有样品年代学分析数据显示, 下白垩统赛汉组下段具有 140 Ma、265 Ma 和 434 Ma 的峰值年龄, 其中 100~200 Ma 年龄占比约 39%, 200~350 Ma 年龄占比约 49%, 400~500 Ma 年龄占比约 8%。此外, 在 1 750~1 880 Ma 和 2 480 Ma 年龄区间, 样品具有少量富集。本次工作与前人成果最大的区别, 体现在大量早白垩世碎屑锆石的存在, 且前人未对此类锆石的物源未进行详细探讨(刘佳林等, 2020)。

4 讨论

4.1 下白垩统赛汉组最大沉积年龄

二连盆地地质及地震资料显示, 下白垩统赛汉组与腾格尔组之间存在区域角度不整合面(Guo et al.,

2018; 图 2b)。因此, 赛汉组最大沉积年龄的限定, 对于认识区域构造演化具有重要意义。根据沉积物碎屑锆石年代学限定地层最大沉积年龄, 前人已经提出了①最年轻单颗粒年龄(YSG)、②最年轻图像碎屑锆石年龄(YPP)、③最年轻碎屑锆石年龄(YDZ)、④加权平均年龄(YC1 σ)(颗粒数 2+)、⑤加权平均年龄(YC2 σ)(3+)、⑥算术平均年龄(WA)、⑦Tuffzirc 年龄(6+)等众多研究方法(Dickinson et al., 2009; Tucker et al., 2013; 曹高社等, 2019)。Dickinson et al.(2009)认为, 以多粒年龄为基础的最年轻年龄测定方法与沉积年龄的匹配性较好, 但最年轻的单粒年龄与沉积年龄的相容性>90%, 并指出在美国科罗拉多高原中生界约 60% 的样品中, 最年轻的单粒年龄与沉积年龄的匹配性在 5 Ma 以内。此外, YDZ 年龄与 YSG 年龄或无显著差异, 或优于 YSG 年龄。而 YPP 年龄、YC1 σ (2+)年龄、YC2 σ (3+)年龄和 WA 年龄由于统计的锆石年龄的离散性, 比实际地层年龄大。

现有古生物、古地磁等资料显示, 二连盆地下白垩统赛汉组属于的阿普第—阿尔必期(杨静等, 2003; 聂逢君等, 2007), 或将赛汉组底部年龄定为 121 Ma(聂逢君等, 2005), 但依然缺乏有效的热年代学证据。上述 7 种方法所获得的 6 件样品的最大沉积年龄均属于下白垩统阿普第—阿尔必期(图 9), 能够用以讨论赛汉组最大沉积年龄。NY1-3-1 样品 YPP 年龄大于 YDZ 年龄和其他年龄。但 YSG 年龄与 Tuffzirc 年龄、YC1 σ (2+)年龄、YC2 σ (3+)年龄和 WA 年龄在误差范围内一致。因此, YSG 年龄(125 $\pm$ 3 Ma)代表了 NY1-3-1 样品所记录的最大沉积年龄。NY1-13-11、NY2-3 具有与 NY1-3-1 类似的特征, 但其 YSG 年龄分别为 (115 $\pm$ 6)Ma 和 (122 $\pm$ 2)Ma, 代表了最大沉积年龄。NY2-15 样品 Tuffzirc 年龄大于 YC1 σ (2+)年龄、YC2 σ (3+)年龄和 WA 年龄, 且均大于 YSG 年龄。前文已经提到, YSG 年龄选择 109 Ma, 而非 88 Ma。对比发现, 本次工作选择 WA 年龄(113.3 Ma)作为该样品记录的最大沉积年龄。NY3-14 样品 YC1 σ (2+)年龄、YC2 σ (3+)年龄和 WA 年龄基本一致, 稍大于 YSG 年龄。因此, 本次工作选择 WA 年龄(123 Ma)作为最大沉积年龄。NY3-15 的 YSG 年龄与 YC1 σ (2+)年龄一致, 可以作为该样品记录的最大沉积年龄(108 $\pm$ 2 Ma)。

此外, 二连盆地内赛汉组下伏地层腾格尔组内火山岩夹层年龄为 116~132 Ma(Guo et al., 2019)。鉴于碎屑锆石为岩浆锆石, 来自于凹陷周缘隆起区岩浆岩。

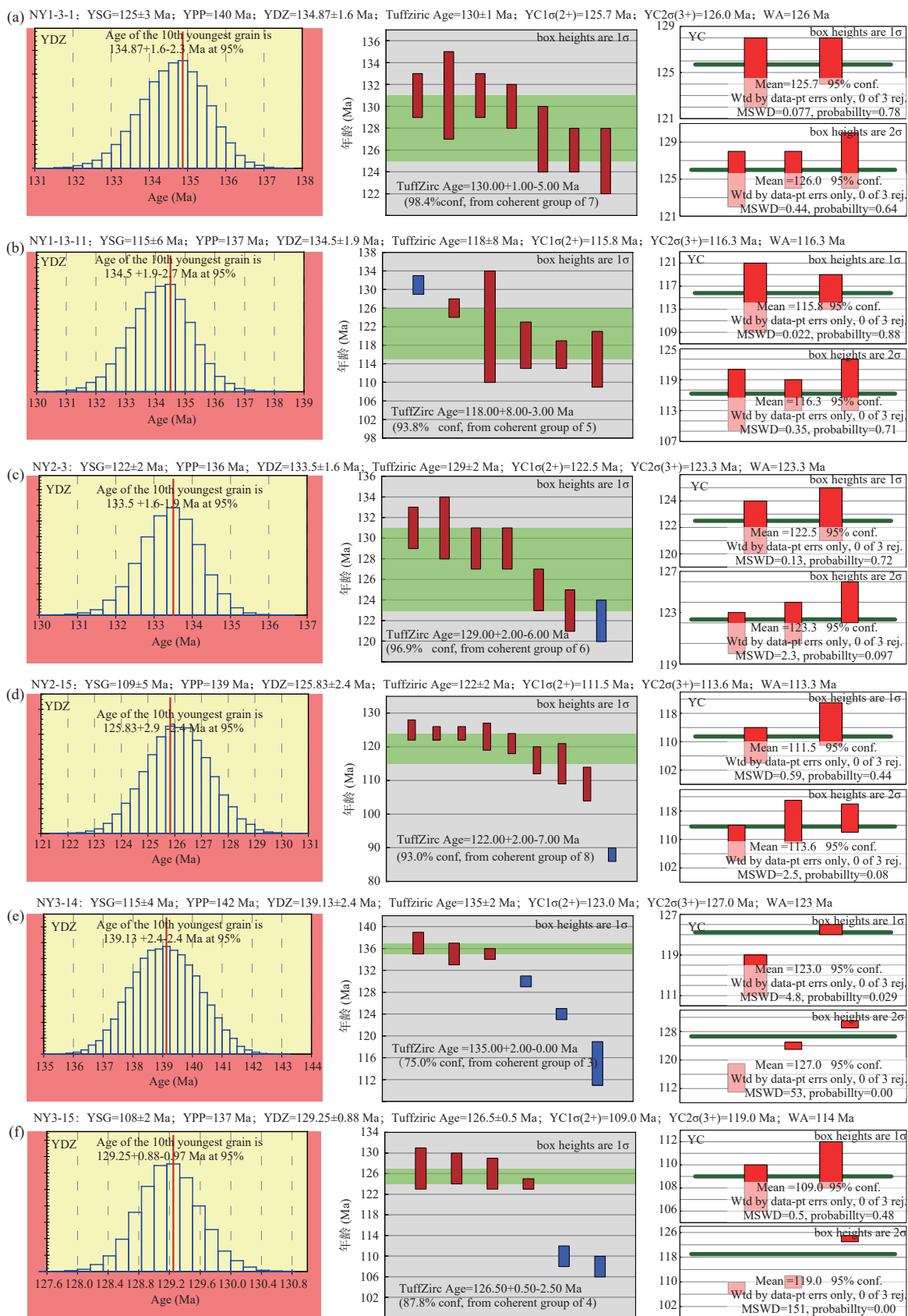


图9 下白垩统赛汉组最大沉积年龄

Fig. 9 Maximum depositional ages of the lower Cretaceous Saihan Formation

不同最大沉积年龄计算方法显示,本次工作获得了赛汉组最大沉积年龄为 142~108 Ma, 其中最大沉积年龄频谱图显示峰值约为 124 Ma(图 10), 大于下伏地层中火山岩夹层年龄。此外,虽然采样位置相近,但同一钻孔不同深度样品显示,深部样品记录的最大沉积年龄要小于浅部样品,如 NY3-15(108 Ma)<NY3-14(123 Ma)、NY2-15(113.3 Ma)<NY2-3(122 Ma)。这表明深部样品物源区中年轻岩体更早剥露至地表,作为赛汉组物源。此外,受碎屑锆石分布不均一性影响,不同样品保存了不同年代的碎屑锆石。综上所述,通过碎屑锆石 U-Pb 年代学分析,本次工作选择所有样品中最小年龄(108 ± 2 Ma)来限定下白垩统赛汉组最大沉积年龄,属于早白垩世阿尔必期。

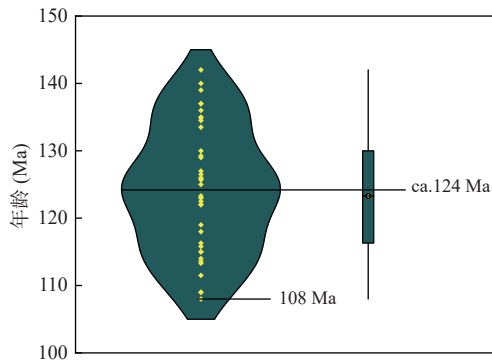
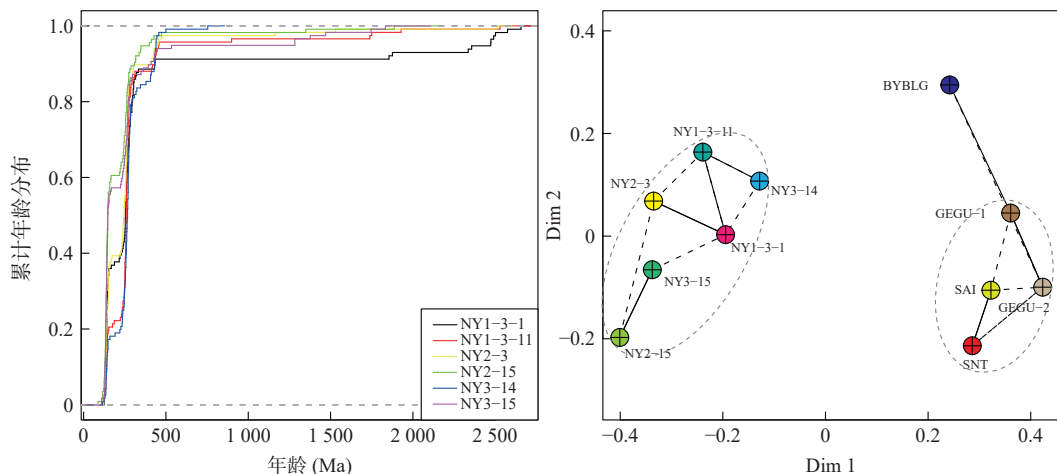


图 10 下白垩统赛汉组最大沉积年龄频谱分布图

Fig. 10 Distribution pattern of maximum depositional ages for the lower Cretaceous Saihan Formation

4.2 赛汉组物源分析

碎屑锆石 U-Pb 年代学分析显示,研究区赛汉组



SNT. 苏尼特隆起; BYBLG. 巴音宝力格隆起; GEGU-1、GEGU-2 和 SAI 数据来自 Guo et al.(2018)

图 11 碎屑锆石累计年龄分布(a)和二维定标分析(b)

Fig. 11 (a) Detrital zircon cumulative age distributions and (b) 2d-Multidimensional scaling

物源主要表现为加里东期、华力西期和燕山期岩浆岩,记录了二连盆地周缘峰期岩浆活动时间。其中,物源区华力西期和燕山期岩浆岩提供了更多的物质。通过年代学频谱图分析发现,样品中前寒武纪年代学记录较少,主要来自于华北克拉通变质基底。但受碎屑锆石多期次沉积循环的影响,该部分锆石在赛汉组下伏地层中已经富集。本次工作认为,样品中该部分锆石主要来自于老地层,对于物源区的指示意义较小,故不再详细讨论。此外,样品碎屑锆石所获得的 3 个主要峰值年龄与苏尼特隆起和巴音宝力格隆起具有很好的匹配性(图 8)。碎屑锆石累积年龄分布显示,6 件样品在中生代碎屑锆石年龄分布概率上具有一定的差异,但整体年龄分布轨迹变化趋势一致(图 11)。如果剔除中生代碎屑锆石年龄,6 件样品具有一致的累积年龄分布轨迹,表明所有样品具有统一的物源。碎屑锆石年代学二维定标分析同样指示,所有样品具有统一物质来源。虽然二维定标分析结果显示样品与苏尼特隆起具有差异,但临近凹陷内侏罗系样品(GEGU-1、GEGU-2 和 SAI; Guo et al., 2018)主要来自于苏尼特隆起,且与巴音宝力格隆起具有一定的联系。直方-核密度图对比分析显示,除中生代碎屑锆石年龄外,样品与上述侏罗系样品具有一致的分布规律。结合碎屑颗粒分选性差、颗粒呈棱角状(图 5),碎屑颗粒具有近源特征。

此外,碎屑锆石 U-Pb 年代学显示,碎屑锆石记录了大量早白垩世年龄。但前人年代学分析显示,在乌兰察布凹陷周缘的苏尼特隆起甚少发育早白垩世岩

体(图2),而在研究区北部巴音宝力格隆起内发育卫境岩体(148~138 Ma; 聂逢君等, 2018, 2022),与碎屑锆石记录的早白垩世年龄一致(图8)。因此,苏尼特隆起和巴音宝力格隆起均是研究区赛汉组的重要潜在物源区。

随着华北克拉通与古亚洲洋构造域、蒙古-鄂霍次克洋构造域和古太平洋构造域相互作用体制的转换,二连盆地周缘发育了蒙古弧、贺根山弧、宝力道弧及白乃庙岛弧等岩浆岩带(王博等, 2021; 王涛等, 2022; 刘建峰等, 2022),为二连盆地中生代以来沉积提供了重要物源。童英等(2010)对中蒙边界中段的花岗岩进行了系统统计分析,发现时间上具有早—中古生代(490~387 Ma)、石炭纪(342~302 Ma)、二叠纪(282~257 Ma)、三叠纪(249~204 Ma)和晚中生代(152~118 Ma)5个重要期次。中亚造山带中段岩浆分布研究表明,二连-苏左旗周缘广泛发育了晚泥盆世—石炭纪、中石炭世—中二叠世、晚二叠世—三叠纪岩浆岩,且晚泥盆世—石炭纪岩浆及早白垩世岩浆主体分布在巴音宝力格隆起带(图2a; 杨俊泉, 2016; 刘建峰等, 2022)。受贺根山洋闭合和古亚洲洋板块向华北板块俯冲增生造山的影响,沿二连-贺根山缝合带和白乃庙岛弧发育了520~420 Ma、350~300 Ma的岩浆岩(赵越等, 2017; 徐冰, 2018)。内蒙古东南部二连浩特-贺根山蛇绿岩带以北和以南晚古生代—早中生代岩浆岩锆石 U-Pb 年龄统计结果显示,北部以270~330 Ma年龄为主,南部具有220~260 Ma、270~290 Ma、310~340 Ma等多个年龄区间(赵越等, 2017; 刘建峰等, 2022)。索伦和西拉木伦河蛇绿岩的锆石年代学研究表明,其形成时代为280~250 Ma (Jian et al., 2010; Song et al., 2015)。受岩石圈减薄导致的陆内伸展影响,二连盆地内发育大量晚中生代火山岩和岩浆岩,如达来庙钾长花岗岩(160 Ma)、红格尔查干诺尔组流纹岩(142 Ma)和不拉根哈迭组基性火山岩(129 Ma)、卫境岩体(148~138 Ma)、苏右旗白音高老组流纹岩(124.5 Ma)等(聂凤军等, 2008; 陈志广等, 2009; 薛富红等, 2015; 聂逢君等, 2018, 2022; 邵永旭和许展, 2023; 刘金宝等, 2023)。因此,巴音宝力格隆起、苏尼特隆起和温都尔庙隆起区为研究区的潜在物源区(图2)。

通过古地理恢复,研究区下白垩统赛汉组沉积期古地理表现为古河道沉积体系,水流为从西向东,并加持了南北两侧隆起区的物质供给(吕永华等, 2019;

谢慧丽等, 2020; 聂逢君等, 2022; 颜小波等, 2022)。因此,本次工作推测脑木根地区下白垩统赛汉组潜在物源区为苏尼特隆起区、巴音宝力格隆起卫境地区、盆地西南缘白乃庙隆起西部巴特敖包地区。

前人年代学研究显示,二连市西南部卫境-艾力格庙地区发育了508~418 Ma的加里东岩体、查干德勒岩体(276 Ma)、卫境杂岩体(276 Ma, 148~138 Ma)等(郭磊等, 2015; 姚广, 2016; 聂逢君等, 2018, 2022; 刘金宝等, 2023)。碎屑锆石年代学显示,艾力格庙群峰值年龄为420~540 Ma(姚广, 2016); 二叠纪西里庙组峰值年龄为304 Ma和450 Ma,上段流纹质凝灰岩年龄为(282±2) Ma(王世超等, 2019)。此外,该地区发育了晚侏罗世地层,但地层内碎屑锆石年代学特征尚不明确。综合对比发现,样品古生代和中生代锆石年龄与卫境-艾力格庙地区具有较好的对应关系。

二连盆地晚中生代构造演化显示,苏尼特隆起在晚侏罗世—早白垩世因构造翻转,遭受隆升剥蚀,并在边缘发育了冲积扇等边缘相沉积体系(图11; Li et al., 2016; 吕永华等, 2019; Liu et al., 2022; 郭知鑫, 2023)。因此,在早白垩世,苏尼特隆起阻挡了盆地南部温都尔庙隆起区白乃庙岛弧带岩浆岩向乌兰察布坳陷的物质供给。虽然苏尼特隆起以南腾格尔坳陷都日木-温都尔庙一带赛汉组碎屑锆石年代学具有129~152 Ma(峰值141 Ma)、243~281 Ma(峰值263 Ma)两个主要区间和1个次级区间400~500 Ma,与研究区具有较好的相似度。但杨勇等(2023)认为腾格尔坳陷内物源主要来自白乃庙岛弧内温都尔庙-镶黄旗一带更靠近盆地一侧的中酸性岩浆岩。磷灰石裂变径迹年代学显示,盆地西南部白乃庙岛弧带西端在185.5~125.5 Ma经历了快速隆升(Li et al., 2016)。结合古地理恢复显示,盆地西南部白乃庙岛弧西端的岩浆岩(446.8~440 Ma、278.5~273.7 Ma),能够沿古河道自西向东提供物质供给(图12; Li et al., 2016 及其内部参考文献; 谢慧丽等, 2020),但缺少早白垩世岩浆活动记录。因此,样品中生代碎屑锆石可能来自于盆地巴音宝力格隆起和白乃庙岛弧带西端,而非温都尔庙-镶黄旗一带。

苏尼特隆起位于二连盆地EW向古河道的南缘(图2)。隆起北部的乔尔古、哈达图、准达赖、陆海、恩格日因等地区赛汉组物源分析均显示,物质主要来自于苏尼特隆起(吕永华等, 2019; 刘佳林等, 2020; 谢慧丽等, 2020; 俞初安等, 2020)。地震资料显示,苏尼

特隆起区出露侏罗系(漆家福等, 2015)。呼格吉勒图凹陷上侏罗统呼格吉勒图组及赛汉塔拉凹陷下侏罗统阿其图组碎屑锆石年代学显示(图 8), 除早白垩世岩浆锆石年龄外, 与研究区赛汉组年龄频谱图具有很好的相似度, 表明苏尼特隆起内发育的前白垩纪沉积体系能够为乌兰察布凹陷下白垩统提供物质来源, 导致了碎屑锆石的再循环。受蒙古-鄂霍次克大洋闭合后伸展和古太平洋俯冲影响, 二连盆地-大兴安岭地区早白垩世发生了大规模岩浆活动(Gilder et al., 1997; Wu et al., 2001), 如玛尼吐组火山岩(128~146 Ma)、白音高老组火山岩(127~141 Ma)等(杨俊泉, 2016; 刘建峰等, 2022; 杨勇等, 2023 及其内部参考文献)。现有资料表明, 二连盆地及邻区早白垩世火山岩及亚火山岩年龄集中在 120.2~146 Ma, 且具有 131 Ma 的峰期年龄(Tang et al., 2019)。在苏右旗东北部, 苏尼特隆起内凝灰岩夹层锆石 U-Pb 年龄为 146 Ma(Tang et al., 2019), 也进一步表明早白垩世碎屑锆石来自苏尼

特隆起的可能性, 但与古流向不一致。此外, 基于下白垩纪腾格尔组内火山岩年代学的研究, Guo et al.(2018, 2019)认为二连盆地内腾格尔组的时代为 116~132 Ma。结合赛汉组内大量 100~130 Ma 碎屑锆石的发育, 认为强烈构造运动可能导致了部分早白垩世火山岩的快速出露, 为赛汉组提供了物源。

通过系统的年代学对比分析和前人对古河谷的恢复, 本次工作认为脑木根地区下白垩统赛汉组沉积物主要来自于苏尼特隆起中西部、巴音宝力格隆起卫镜地区和盆地西南缘白乃庙岛弧西端(图 12)。

4.3 对区域构造演化的指示意义

二连盆地是研究中国中生代构造转换的关键地区, 先后经历了古亚洲洋闭合-中亚造山、蒙古-鄂霍次克洋闭合及古(近)太平洋板块俯冲等(Li et al., 2016; Guo et al., 2018; 王涛等, 2022)。在晚中生代, 盆地经历了多期次的构造翻转, 体现为沉积层位间的区域角度不整合(Guo et al., 2018; 图 2b)。物源区快速隆升、

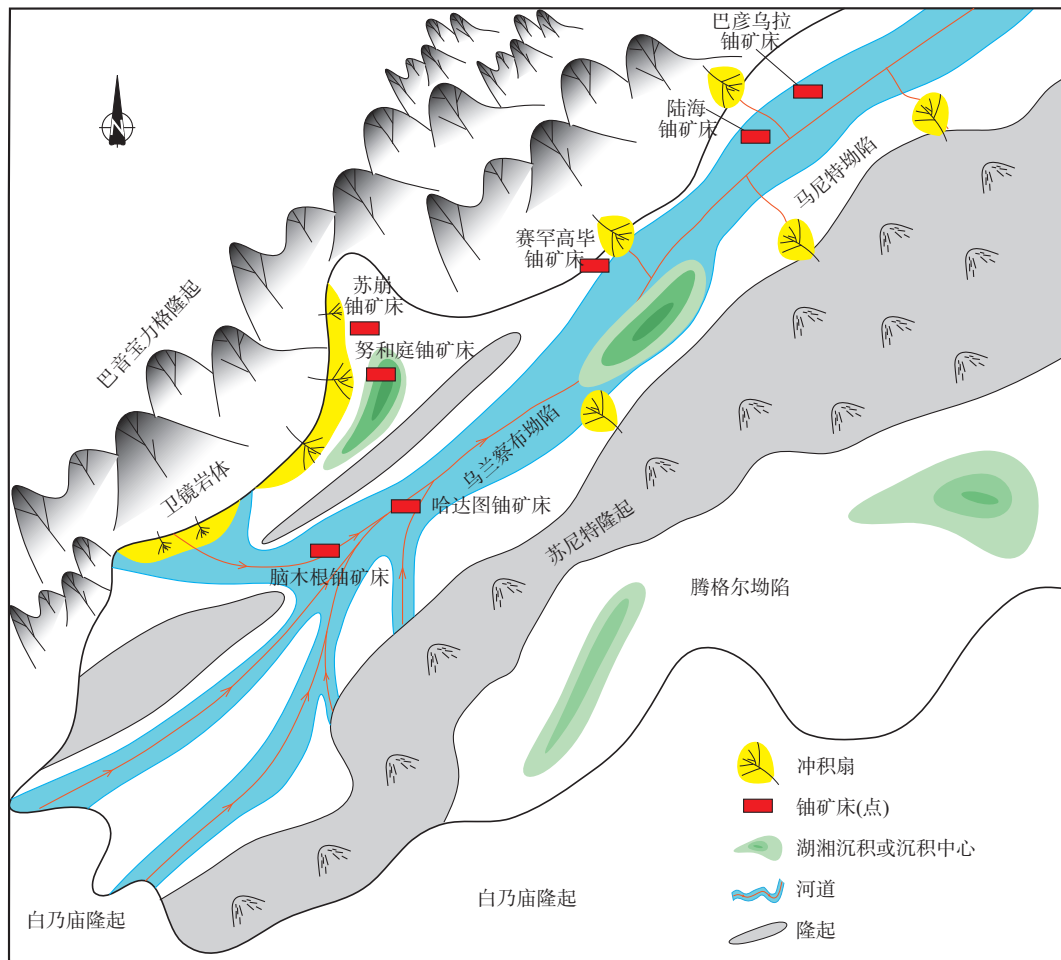


图12 二连盆地乌兰察布凹陷下白垩统沉积古地理示意图

Fig. 12 Early Cretaceous paleogeography map in the Wulanchabu depression of Erlian basin

区域角度不整合面及深大断裂的发育,为晚白垩世以来的砂岩型铀成矿提供了有利条件,形成了世界级的古河谷型砂岩型铀成矿带(Nie et al., 2020)。

矿物 U-Pb 年代学和裂变径迹年代学分析显示,二连盆地在早白垩世晚期经历了一次快速隆升事件。首先通过碎屑锆石 U-Pb 年代学分析,本次工作认为下白垩统赛汉组最大沉积年龄为(108±2)Ma, 沉积碎屑主要来自于苏尼特隆起西南部、巴音宝力格隆起卫镜地区和盆地西南缘白乃庙岛弧,部分锆石具有再循环的特征。但赛汉组下伏地层腾格尔组内火山岩夹层锆石 U-Pb 年代学显示,腾格尔组的沉积时代约为116~132 Ma(Guo et al., 2019), 且与赛汉组之间发育区域角度不整合面(李洪军等, 2012)。此外,二连盆地及邻区早白垩世火山岩及亚火山岩年龄集中在120.2~146 Ma(Tang et al., 2019), 表明赛汉组内早白垩世碎屑锆石可能来自于巴音宝力格隆起卫镜地区及盆内早白垩世火山岩、亚火山岩。腾格尔组内发育的火山岩夹层沉积后被快速剥露至地表,成为后续赛汉组的重要物源。裂变径迹年代学显示,在约 110 Ma 受古太平洋板块俯冲影响,二连盆地经历了一次快速隆升冷却剥蚀事件(郭知鑫等, 2023; Xu et al., 2023), 与下白垩统赛汉组最大沉积时代相一致。该快速隆升事件,导致巴音宝力格隆起和苏尼特隆起的进一步隆升,为盆地提供重要物源,导致赛汉组发育大规模砂岩,为后期砂岩型铀成矿形成了有利构造缓坡带和含矿砂岩。此外,磷灰石裂变径迹年代学分析显示,卫镜岩体在早白垩世 76.7~53.8 Ma 经历了强烈隆升,可为研究区下白垩统赛汉组内铀成矿提供大量铀源(聂逢君等, 2018)。

5 结论

(1)二连盆地脑木根凹陷赛汉组 6 件样品 YSG 年龄(NY1-3-1、NY1-13-11、NY2-3、NY3-15)和 WA 年龄(NY2-15、NY3-14)分别为(125±3)Ma、(115±6)Ma、(122±2)Ma、(108±2)Ma、113.3 Ma、123 Ma。下白垩统赛汉组最大沉积年龄为(108±2)Ma, 属于早白垩世阿尔必期。

(2)下白垩统赛汉组下段中 100~200 Ma 年龄占比约 39%, 200~350 Ma 年龄占比约 49%, 400~500 Ma 年龄占比约 8%, 对应峰值年龄为 140 Ma、265 Ma 和 434 Ma。赛汉组物源为苏尼特隆起区中西部出露

的岩体、火山岩或前白垩纪地层、巴音宝力格隆起卫镜地区出露的岩体以及盆地西南缘白乃庙岛弧西端出露的加里东期和海西期岩体。

(3)二连盆地在早白垩世晚期(约 110 Ma)经历了快速隆升剥蚀,导致了巴音宝力格隆起和苏尼特隆起的快速隆升,形成构造缓坡,且开始为盆地赛汉组提供大量沉积碎屑和富铀物质。

致谢:感谢中陕核工业集团地质调查院有限公司在样品采集方面提供的帮助。特别感谢匿名专家的评审意见。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 曹高社, 方磅礴, 孙凤余, 等. 华北陆块南部平顶山砂岩的最大沉积年龄和物源区: 来自碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据[J]. 岩石学报, 2019, 35(8): 2518-2544.
- CAO Gaoshe, FANG Bangbang, SUN Fengyu, et al. Maximum sedimentary age and provenance of Pingdingshan sandstone in the southern part of North China Block: Evidence from detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb age[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(8): 2518-2544.
- 陈志广, 张连昌, 吴华英, 等. 二连盆地北缘晚中生代火山岩 Ar-Ar 年代、地球化学及构造背景[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 297-310.
- CHEN Zhiguang, ZHANG Lianchang, WU Huaying, et al. Ar-Ar age, geochemistry and petrogenesis of Late Mesozoic volcanic rocks in the northern marginal region of Erlian basin, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(2): 297-310.
- 郭磊, 童英, 莫南, 等. 中亚造山带东南缘额仁淖尔地区早二叠世花岗岩锆石 U-Pb 年代学、源区特征及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(5): 601-619.
- GUO Lei, TONG Ying, MO Nan, et al. Zircon U-Pb ages and isotope characteristics of Early Permian granitoids in Eren Nur area on the southeastern margin of Central Asian Orogenic Belt and their tectonic implications[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2015, 34(5): 601-619.
- 郭知鑫, 杨永太, 任祎, 等. 二连盆地吉尔嘎朗图凹陷南部基底花岗岩形成演化及其大地构造背景研究[J]. 地学前缘, 2023, 30(2): 259-271.
- GUO Zhixin, YANG Yongtai, REN Yi, et al. Emplacement and epis-

- odic denudation of basement granites from the southern Jiergalangtu Sag, Erlian Basin and its tectonic implications[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(2): 259–271.
- 何泽宇, 陈磊, 李成元, 等. 内蒙古川井坳陷巴彦花组砂岩碎屑锆石年代学特征对物源及砂岩型铀矿勘查的启示[J]. *西北地质*, 2025, 58(1): 186–203.
- HE Zeyu, CHEN Lei, LI Chengyuan, et al. Inspiration of Zircon Chronological Characteristics of Sandstone Fragments from Bayanhua Formation in Chuanjing Depression, Inner Mongolia on Exploration of Source and Sandstone Type Uranium Deposits[J]. *Northwestern Geology*, 2025, 58(1): 186–203.
- 李洪军, 申科峰, 聂逢君, 等. 二连盆地中新代沉积演化与铀成矿[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 35(4): 301–308.
- LI Hongjun, SHEN Kefeng, NIE Fengjun, et al. Sedimentary evolution in Meso-Cenozoic and uranium mineralization of Erlian basin[J]. *Jouimal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 2012, 35(4): 301–308.
- 李子颖, 刘武生, 李伟涛, 等. 内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J]. *中国地质*, 2022, 49(4): 1009–1047.
- LI Ziyang, LIU Wusheng, LI Weitao, et al. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 2022, 49(4): 1009–1047.
- 林效宾, 李西得, 刘武生. 二连盆地铀矿床成矿类型及时空分布特征[J]. *铀矿地质*, 2021, 37(6): 1013–1026.
- LI Xiaobin, LI Xide, LIU Wusheng. Metallogenic Types and Spatiotemporal Distribution Characteristics of Uranium Deposits in Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 2021, 37(6): 1013–1026.
- 刘华健, 徐增连, 汤超, 等. 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*, 2024, 49(10): 3589–3609.
- LIU Huajian, XU Zenglian, TANG Chao, et al. 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*, 2024, 49(10): 3589–3609.
- 刘佳林, 刘武生, 虞航, 等. 二连盆地哈达图地区赛汉组上段碎屑锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(1): 14–19.
- LIU Jialin, LIU Wusheng, YU Hang, et al. U-Pb Geochronology of Detrital Zircons From the Upper Member of Saihan Formation and its Geological Implications in Hadatu Area, Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(1): 14–19.
- 刘建峰, 李锦轶, 赵硕, 等. 中亚造山带东南部晚古生代-早中生代地壳增生和古亚洲洋演化: 来自内蒙古东南部林西-东乌旗地区岩浆岩的证据[J]. *岩石学报*, 2022, 38(8): 2181–2215.
- LIU Jianfeng, LI Jinyi, ZHAO Shuo, et al. Crustal accretion and Paleo-Asian Ocean evolution during Late Paleozoic Early Mesozoic in southeastern CentralAsian Orogenic Belt: Evidence from magmatism in Linxi Dongwuqi area, southeastern Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2022, 38(8): 2181–2215.
- 刘金宝, 朱洛婷, 李龙雪, 等. 内蒙古艾力格庙地区卫境岩体的地球化学特征及其构造意义[J]. *现代地质*, 2023, 37(2): 419–432.
- LIU Jinbao, ZHU Luoting, LI Longxue, et al. Geochemistry and Tectonic Significance of the Weijing Pluton in Airgin Sum Area, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 2023, 37(2): 419–432.
- 刘晓雪, 赵丽君, 俞初安, 等. 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*, 2024, 47(3): 36–45.
- LIU Xiaoxue, ZHAO Lijun, YU Reng'an, et al. Rock geochemistry characteristics and geological significance of sandstone-type uranium deposits in Luhai area, Erlian Basin[J]. *North China Geology*, 2024, 47(3): 36–45.
- 刘武生, 赵兴齐, 康世虎, 等. 二连盆地反转构造与砂岩型铀矿成矿作用[J]. *铀矿地质*, 2018, 34(2): 81–89.
- LIU Wusheng, ZHAO Xingqi, KANG Shihu, et al. Inversion Structure and Its Relationship with Sandstone Type Uranium Metallization in Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 2018, 34(2): 81–89.
- 吕永华, 刘武生, 康世虎, 等. 乌兰察布坳陷赛汉组下段铀成矿地质条件及找矿方向[J]. *铀矿地质*, 2019, 35(5): 273–281.
- LU Yonghua, LIU Wusheng, KANG Shihu, et al. Geological Conditions of Uranium Metallization and Prospecting of the Lower Member of Saihan Formation in Wulanchabu Depression[J]. *Uranium Geology*, 2019, 35(5): 273–281.
- 马新华, 肖安成. 内蒙古二连盆地的构造反转历史[J]. *西南石油学院学报*, 2000, 22(2): 1–4.
- MA Xinhua, XIAO Ancheng. Structure Reversal History of Erlian Basin in Inner Mongolia[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2000, 22(2): 1–4.
- 聂逢君. 二连盆地中西部中生代地层对比研究[R]. 东华理工学院, 2005.
- 聂逢君, 陈安平, 胡青华, 等. 内蒙古二连盆地早白垩世砂岩型铀矿目的层时代探讨[J]. *地层学杂志*, 2007, 31(3): 272–279.
- NIE Fengjun, CHEN Anping, HU Qinghua, et al. Discussion on the Early Cretaceous Sandstone-type Uranium Deposits, Erlian basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2007, 31(3): 272–279.
- 聂逢君, 李满根, 邓居智, 等. 内蒙古二连裂谷盆地“同盆多类型”铀矿床组合与找矿方向[J]. *矿床地质*, 2015, 34(4): 711–729.
- NIE Fengjun, LI Mangen, DENG Juzhi, et al. Multiple type uranium

- deposit assemblage and uranium exploration in Erlian rift Basin, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 2015, 34(4): 711–729.
- 聂逢君, 夏菲, 严兆彬, 等. 二连盆地西部隆起区卫境岩体铀丢失与盆内铀矿成矿关系探讨[J]. *地球学报*, 2022, 43(5): 616–632.
- NIE Fengjun, XIA Fei, YAN Zhaobin, et al. Study on Uranium Loss of Weijing Granite and Sandstone-type Uranium Mineralization in Erlian Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2022, 43(5): 616–632.
- 聂逢君, 张进, 严兆彬, 等. 卫境岩体磷灰石裂变径迹年代学与华北北缘晚白垩世剥露事件及铀成矿[J]. *地质学报*, 2018, 92(2): 313–329.
- NIE Fengjun, ZHANG Jin, YAN Zhaobin, et al. Apatite Fission Track Chronology of the Weijing Granite and Denudation Event in the Northern Margin of North China During the Late Cretaceous and Their Implications to Uranium Mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2018, 92(2): 313–329.
- 聂凤军, 许东青, 江思宏, 等. 内蒙古苏莫查干敖包特大型萤石矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 2008, 27(1): 1–13.
- NIE Fengjun, XU Dongqing, JIANG Sihong, et al. Geological features and origin of Sumoqagan Obo superlarge independent fluorite deposit, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 2008, 27(1): 1–13.
- 彭云彪, 鲁超. 二连盆地乌兰察布坳陷西部赛汉塔拉组下段砂岩型铀矿成矿模式[J]. *西北地质*, 2019, 52(3): 46–57.
- PENG Yunbiao, LU Chao. Metallogenic Model of Sandstone-Type Uranium Deposits in the Lower Section of Saihantala Formation, Western Ulanqab Depression, Erlian Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 46–57.
- 漆家福, 赵贤正, 李先平, 等. 二连盆地早白垩世断陷分布及其与基底构造的关系[J]. *地学前缘*, 2015, 22(3): 118–128.
- QI Jiafu, ZHAO Xianzheng, LI Xianping, et al. The distribution of Early Cretaceous faulted-sags and their relationship with basement structure within Erl Jan Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 118–128.
- 屈晓艳, 杨明慧, 罗晓华, 等. 二连盆地赛汉塔拉凹陷伸展构造特征及其控藏作用[J]. *现代地质*, 2013, 27(5): 1023–1032.
- QU Xiaoyan, YANG Minghui, LUO Xiaohua, et al. Extensional Tectonic Feature and Its Control on Hydrocarbon Accumulation of Saihantala Sag in Erlian Basin[J]. *Geoscience*, 2013, 27(5): 1023–1032.
- 邵永旭, 许展. 内蒙古苏尼特右旗温德尔呼地区白音高老组流纹岩地球化学特征、锆石 U-Pb 同位素测年及构造指示[J]. *西部资源*, 2023(2): 1–8.
- GUO Yongxu, XU Zhan. Geochemical characteristics, zircon U-Pb isotope dating and tectonic indications of rhyolite of Baiyingao Lao Formation in Wendeerhu area, Sunite Right Banner, Inner Mongolia[J]. *Western Resources*, 2023(2): 1–8.
- 童英, 洪大卫, 王涛, 等. 中蒙边境中段花岗岩时空分布特征及构造和找矿意义[J]. *地球学报*, 2010, 31(3): 395–412.
- TONG Ying, HONG Dawei, WANG Tao. Spatial and Temporal Distribution of Granitoids in the Middle Segment of the Sino-Mongolian Border and Its Tectonic and Metallogenic Implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(3): 395–412.
- 王博, 赵国春. 古亚洲洋的最终闭合时限: 来自白乃庙岛弧带东段二叠纪-三叠纪岩浆作用的证据[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6): 1019–1030.
- WANG Bo, ZHAO Guochun. Final closure of the Paleo-Asian ocean: Constraints from Permian-Triassic magmatism in the eastern segment of the Bainaimiao Arc Belt[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(6): 1019–1030.
- 王世超, 徐备, 王志伟, 等. 内蒙古艾力格庙地区二叠纪火山-沉积岩系的层序、时代及其构造意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(2): 262–276.
- WANG Shichao, XU Bei, WANG Zhiwei, et al. Stratigraphy, Geochronology and Tectonic Significance of the Permian Volcanic-Sedimentary Rock Series in Airgin Sum Area, Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2019, 55(2): 262–276.
- 王涛, 张建军, 李舫, 等. 东北亚晚古生代—中生代岩浆时空演化: 多重板块构造体制范围及叠合的鉴别证据[J]. *地学前缘*, 2022, 29(2): 28–44.
- WANG Tao, ZHANG Jianjun, LI Shan, et al. Distinctive spatial-temporal evolution of Late Paleozoic to Mesozoic magmatic systems in Northeast Asia: Evidences for identification of the extent and super position of multiple plate tectonic regimes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(2): 28–44.
- 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 Yuanbao, ZHENG Yongfei. Zircon petrogenic mineralogy and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- 谢惠丽, 李西得, 刘武生, 等. 二连盆地乔尔古-齐哈地区赛汉组上段砂体成因分析及找矿意义[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(5): 354–361.
- XIE Huili, LI Xide, LIU Wusheng, et al. Genesis Analysis of Sandstone of the Upper Member of Saihan Formation and Its Prospecting Significance in the Qiaoguo-Qiha Area of Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(5): 354–361.
- 徐冰. 蒙古弧地体南缘古生代构造演化: 来自二连浩特地区沉积岩和花岗岩的证据[D]. 西安: 西北大学, 2018.
- XU Bing. The Paleozoic tectonic evolution of the southern Margin of the Mongolian arcs: evidences from sedimentary rocks and granites in the Erenhot area[D]. Xi'an: Northwest University, 2018.
- 薛富红, 张晓晖, 邓江夏, 等. 内蒙古中部达拉地区晚侏罗世 A

- 型花岗岩: 地球化学特征、岩石成因与地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(6): 1774–1788.
- XUE Fuhong, ZHANG Xiaohui, DENG Jiangxia, et al. Late Jurassic A-type granite from the Dalai region of central Inner Mongolia: geochemistry, petrogenesis and tectonic implication. [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(6): 1774–1788.
- 颜小波, 李华明, 康世虎, 等. 二连盆地哈达图铀矿床赛汉组上段物源分析[J]. 铀矿地质, 2022, 38(5): 867–878.
- YAN Xiaobo, LI Huaming, KANG Shihu, et al. Sediment Source Analysis for the Upper Member of Saihan Formation of Hadatu Uranium Deposit in the Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 2022, 38(5): 867–878.
- 杨静, 王志萍, 王伟栋. 二连盆地西部赛汉塔拉组轮藻化石及其时代意义[J]. 大庆石油地质与开发, 2003, 22(3): 19–21.
- YANG Jing, WANG Zhiping, WANG Weidong. Charophyte fossils from the Saihantala Formation in the western Erlian Basin and their chronological significance[J]. *Petroleum Geology and Oil-field Development in Daqing*, 2003, 22(3): 19–21.
- 杨俊泉. 二连—东乌旗地区岩浆演化及与成矿作用的关系[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- YANG Junquan. Magmatic Evolution and its Relationship with Metallogenesis in Erenhot- Dongwuqi Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- 杨勇, 宋志杰, 王果, 等. 二连盆地腾格尔坳陷都日本地区下白垩统赛汉组砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其对铀源的制约[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(6): 1344–1358.
- YANG Yong, SONG Zhijie, WANG Guo, et al. U-Pb chronology and Hf isotope characteristics of detrital zircons from sandstones of the lower Cretaceous Saihan formation within the Durimu area in the Tengger depression of the Erlian basin and their constraints to the uranium source[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2023, 42(6): 1344–1358.
- 姚广. 内蒙古中西部艾力格庙群锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 硕士学位论文, 2016.
- YAO Guang. Zircon U-Pb dating from Elliger Temple Group, and its Geological significance, Midwest Inner Mongolia[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2016.
- 俞弼安, 司庆红, 彭胜龙. 砂岩型铀矿综合探测技术和实践——以二连盆地 BYH 铀矿为例[J]. 华北地质, 2024, 47(3): 23–35.
- YU Reng'an, SI Qinghong, PENG Shenglong. Comprehensive exploration techniques and Practices for Sandstone type uranium deposit: a case study of BYH uranium deposit in Erlian Basin[J]. *North China Geology*, 2024, 47(3): 23–35.
- 俞弼安, 吴兆剑, 司马献章, 等. 二连盆地马尼特坳陷南缘赛汉塔拉组砂岩碎屑锆石年龄及其地质意义[J]. 地球科学, 2020, 45(5): 1609–1621.
- YU Ren'an, WU Zhaojian, SIMA Xianzhang, et al. Geochronology and Geological Significance of Sandstone Detrital Zircons from Saihantala Formation in Southern Manite Depression, Erlian Basin[J]. *Earth Science*, 2020, 45(5): 1609–1621.
- 赵越, 翟明国, 陈虹, 等. 华北克拉通及相邻造山带古生代—侏罗纪早期大地构造演化[J]. 中国地质, 2017, 44(1): 44–60.
- ZHAO Yue, ZHAI Mingguo, CHEN Hong, et al. Paleozoic-early Jurassic tectonic evolution of North China Craton and its adjacent orogenic belts[J]. *Geology in China*, 2017, 44(1): 44–60.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143, 602–622.
- Dickinson W R, Gehrels G E. Use of U–Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: a test against a Colorado Plateau Mesozoic database[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288(1–2): 115–125.
- Gilder S, Courtillot V. Timing of the North - South China collision from new middle to late Mesozoic paleomagnetic data from the North China Block[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B8): 17713–17727.
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, et al. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: A method for distinguishing detrital zircon provenance [J]. *Geology*, 2007, 35(7), 643–646.
- Grimes C B, Wooden J L, Cheadle M J, et al. “Fingerprinting” tectono-magmatic provenance using trace elements in igneous zircon [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2015, 170: 1–26.
- Guo Z X, Shi Y P, Yang Y T, et al. Inversion of the Erlian Basin (NE China) in the early Late Cretaceous: Implications for the collision of the Okhotomorsk Block with East Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 154: 49–66.
- Guo Z X, Yang Y T, Zhao X Z, et al. Early Cretaceous tectonostratigraphic evolution of the Erlian Basin, NE China: A record of Late Mesozoic intraplate deformation in East Asia [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 110: 539–564.
- Guo Z X, Zhao X Z, Yang Y T, et al. Jurassic-earliest Cretaceous tectonostratigraphic evolution of the Erlian Basin, Northeast China: records of polyphase intracontinental deformation in Northeast Asia[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 96: 405–428.
- 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 and Petrology*, 2001, 141: 66–82.
- Jian P, Liu D, Kröner A, et al. Evolution of a Permian intraoceanic arc-trench system in the Solonker suture zone, Central Asian Orogenic Belt, China and Mongolia[J]. *Lithos*, 2010, 118(1–2): 169–190.

- Li K, Jolivet M, Zhang Z, et al. Long-term exhumation history of the Inner Mongolian Plateau constrained by apatite fission track analysis[J]. *Tectonophysics*, 2016, 666: 121–133.
- Liu C, Li Z, Liu W, et al. Unrecognized post-rifting deposition and uplift history of the Erlian Basin, Northern China: Evidence from seismic reflection data and apatite fission-track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 2022, 833: 229374.
- Ludwig K R. A geochronological toolkit for Microsoft Excel [Z]. *Isoplot*, 2003, 3: 1–70.
- Nie F, Yan Z, Feng Z, et al. Genetic models and exploration implication of the paleochannel sandstone-type uranium deposits in the Erlian Basin, North China—A review and comparative study[J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 127: 103821.
- Song S, Wang M M, Xu X, et al. Ophiolites in the Xing'an - Inner Mongolia accretionary belt of the CAOB: Implications for two cycles of seafloor spreading and accretionary orogenic events[J]. *Tectonics*, 2015, 34(10): 2221–2248.
- Spencer C J, Kirkland C L, Taylor R J M. Strategies towards statistically robust interpretations of in situ U-Pb zircon geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 2016, 7(4): 581–589.
- Tang J, Zhang Z, Ji Z, et al. Early Cretaceous volcanic and sub-volcanic rocks in the Erlian Basin and adjacent areas, Northeast China: new geochemistry, geochronology and zircon Hf isotope constraints on petrogenesis and tectonic setting[J]. *International Geology Review*, 2019, 61(12): 1479–1503.
- Tucker R T, Roberts E M, Hu Y, et al. Detrital zircon age constraints for the Winton Formation, Queensland: contextualizing Australia's Late Cretaceous dinosaur faunas[J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(2): 767–779.
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite-to-granulite facies zircons: geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1999, 134: 380–404.
- Vermeesch P. How many grains are needed for a provenance study?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224(3–4): 441–451.
- Vermeesch P. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology[J]. *Geoscience Frontiers*, 2018, 9(5): 1479–1493.
- 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*, 2001, 41(1): 1–30.
- Xu W, Zhou Y, Zhang J, et al. Thermo-tectonic evolution of the northern Erlian Basin (NE China): Evidence from fission track and (U-Th)/He thermochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 248: 105620.