



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2024036

Citation: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2024036

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

何泽宇, 陈磊*, 李成元, 樊松浩, 薄海军, 高琪, 苏攀云, 刘伟, 靖安

(中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古呼和浩特 010010)

摘要: 早白垩世是二连盆地演化的一个重要演化阶段, 其构造环境与沉积物源的探讨对该盆地铀矿成因研究具有重要启示意义。笔者以二连盆地西部川井坳陷下白垩统巴彦花组为主要研究对象, 通过碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年, 结果显示下白垩统巴彦花组下部与上部具有不同年龄峰值, 其下部为 1 800~2 100 Ma 的主年龄峰值; 其上部为 250~330 Ma 的主年龄峰值, 综合区域内各地质体年代学研究, 认为巴彦花组沉积物质来源主要为宝音图隆起、索伦山隆起和狼山-白云鄂博隆起。结合钻孔综合测井结果, 认为下白垩统巴彦花组下部具有较高的 U 含量, 可作为研究区及周边寻找砂岩型铀矿的主要目标层位。

关键词: 川井坳陷; 二连盆地; 下白垩统; 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年; 砂岩型铀矿

中图分类号: P597; P694.14

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)01-0186-18

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

HE Zeyu, CHEN Lei*, LI Chengyuan, FAN Songhao, BO Haijun, GAO Qi, SU Panyun, LIU Wei, JING An

(Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China)

Abstract: The early Cretaceous is an important evolutionary stage of the evolution of the Erlian basin, and the exploration of its tectonic environment and sediment sources has significant implications for the study of the genesis of uranium deposits in the basin. This article focuses on the Bayanhua Formation of the Lower Cretaceous in the Chuanjing depression of the western Erlian basin. Through the dating results of detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb, it is shown that the lower and upper parts of the Bayanhua Formation of the Lower Cretaceous have different age peaks, with the lower part having a main age peak of 1 800~2 100 Ma; The upper part of the Bayanhua Formation has a main age peak of 250~330 Ma. Based on the study of plustid chronology in various

收稿日期: 2023-03-09; 修回日期: 2023-12-07; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质调查局项目“内蒙古二连盆地川井-达日罕乌拉地区砂岩型铀矿勘查”(DD20211549)和“内蒙古哈达门沟金矿南矿带金多金属资源勘查”(DD20220972)联合资助。

作者简介: 何泽宇(1992-), 男, 助理工程师, 主要从事基础地质调查研究、战略性矿产资源勘查。E-mail: 759987331@qq.com。

*通讯作者: 陈磊(1989-), 男, 工程师, 主要从事地质工程、岩心钻探及深部找矿。E-mail: 728341391@qq.com。

regions, it is believed that the sedimentary materials mainly come from the Baoyintu uplift, Sorenshan uplift, and Langshan Baiyunebo uplift. Based on the comprehensive drilling logging results, it is believed that the lower part of the Bayanhua Formation in the Lower Cretaceous has a high uranium content, which can be used as the main target layer for searching for sandstone type uranium deposits in the study area and surrounding areas.

Keywords: Chuanjing sag; Erlian basin; lower cretaceous; detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; sandstone-type uranium mineralization

二连盆地作为中国北方重要的煤、油、气产地及铀矿富集区之一,其东至大兴安岭隆起,西达狼山隆起,南、北两界分别受巴音宝力格-索伦山隆起和温都尔庙隆起控制,是发育在华力西期柔性褶皱基底和侏罗纪残留盆地基础之上,经强烈伸展、裂陷及不同类型盆地叠合而成的中生代陆相裂陷盆地(崔永谦等, 2011; 李先平等, 2015; 苗全芸等, 2015)。随着针对二连盆地煤、油气、铀矿等地质工作的深入,相继在盆地中部发现了诸如努和廷、苏崩、哈达图、巴彦乌拉、赛罕高毕等多个大、中型铀矿床(赵兴齐等, 2019; 刘佳林 2020),同时也对该区的地质、构造、物源等多方面特征有了较为深入的研究认识(卫三元等, 2006; 崔永谦等, 2011; 刘波等, 2016;)。现阶段,盆地中与铀矿有关的一系列地质工作及研究的重点区主要集中于二连盆地中部(刘波等, 2017; 刘佳林等, 2019; 彭云彪等, 2019; 李伟涛等, 2019)。相对而言,盆地西部川井地区的相关研究还相对薄弱。

作为二连盆地的重要组成部分,前人对川井坳陷的研究相对较少。彭云彪等(2018)认为坳陷自侏罗纪开始先后经历了断陷盆地发育期、断陷盆地发展期、断陷转换期、坳陷期、沉积期等多个构造演化时期得以形成。其地层主要包括中下侏罗统阿拉坦力群(J_{1-2al})、下白垩统大磨拐河组(K_1d)和巴彦花组(K_1b)、上白垩统二连组(K_2e)及第四系(Q)(李彤等, 2022; 李成元等, 2023)。冯雪东等(2017)通过对川井坳陷西部测老庙坳陷早白垩世古流向分析认为其物源来自于盆地北部。李西得等(2022)通过对川井坳陷赛汉组砂岩矿物学及地球化学特征的研究认为其碎屑物主要来自于中央隆起带。物源分析在盆地性质、构造演化、盆-山耦合关系等研究中扮演者极为重要的角色(李夔洲等, 2023)。在砂岩型铀矿找矿工作中,对含矿地层碎屑物的物源分析可以更好的指导找矿工作。但由于该区针对铀矿的工作程度较低,鲜有关于区内相关赋矿地层沉积物质来源的研究报道。

近期,基于钻探工作的持续开展,在该坳陷内发

现了多处铀矿化点,这些铀矿化主要产于下白垩统巴彦花组中。笔者主要针对盆地西部川井坳陷早白垩世沉积物质来源问题,根据钻探成果,选择铀矿主要富集层位巴彦花组灰白色砂岩为研究对象,开展了碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年分析,并结合前人相关研究成果,厘定早白垩世巴彦花组物源特征,以期在蚀源区成矿物质来源方面为二连盆地西部下白垩统砂岩型铀矿勘查提供依据。

1 区域地质

二连盆地位于中国中北部,大地构造位置处于西伯利亚板块和华北板块缝合带(宋景明等, 2012)。其是在内蒙古-大兴安岭褶皱基底之上、经燕山期拉张、翘断构造应力场作用发育起来的大型中、新生代陆相沉积盆地(漆家福等, 2015)。盆地总体走向呈 NE 向,盆地西、南部呈 NNE 向和 WE 向,其东西跨度约为 1 000 km,南北宽为 20~220 km(张以明等, 2019),总面积约为 $21 \times 10^4 \text{ km}^2$,整体形似三角形,具有西窄东宽的特征。盆内发育川井坳陷、乌兰察布坳陷、马尼特坳陷、乌尼特坳陷及腾格尔坳陷和苏尼特中央隆起(聂逢君等, 2015),其中川井坳陷位于盆地最西部,走向呈 EW 向(图 1b)。该坳陷受索伦山隆起和阴山-白云鄂博隆起控制,发育有扎嘎乌苏-索伦山-西拉木伦大断裂、巴音前达门-川井-白云鄂博大断裂以及 NE 向的白音查干坳陷西缘断裂(彭云彪等, 2018)(图 1a)。同时,其包含有白彦花凸起、巴音杭盖凸起、桑根达来凹陷、白音查干凹陷、包龙凹陷等次一级构造单元。坳陷基底为元古界、古生界变质岩和华力西期—燕山早期基性-酸性侵入岩组成,其上部盖层包括侏罗系、白垩系及第四系,缺失三叠系(李洪军等, 2012; 苗全芸等, 2016),其中下白垩统为坳陷富铀层位。依照最新一次地层厘定(李文国, 1996),区内下白垩统包含大磨拐河组和巴彦花组,以及夹于其中的以基性玄武岩为主体的甘河组。其中,大磨拐河组为一套含煤碎

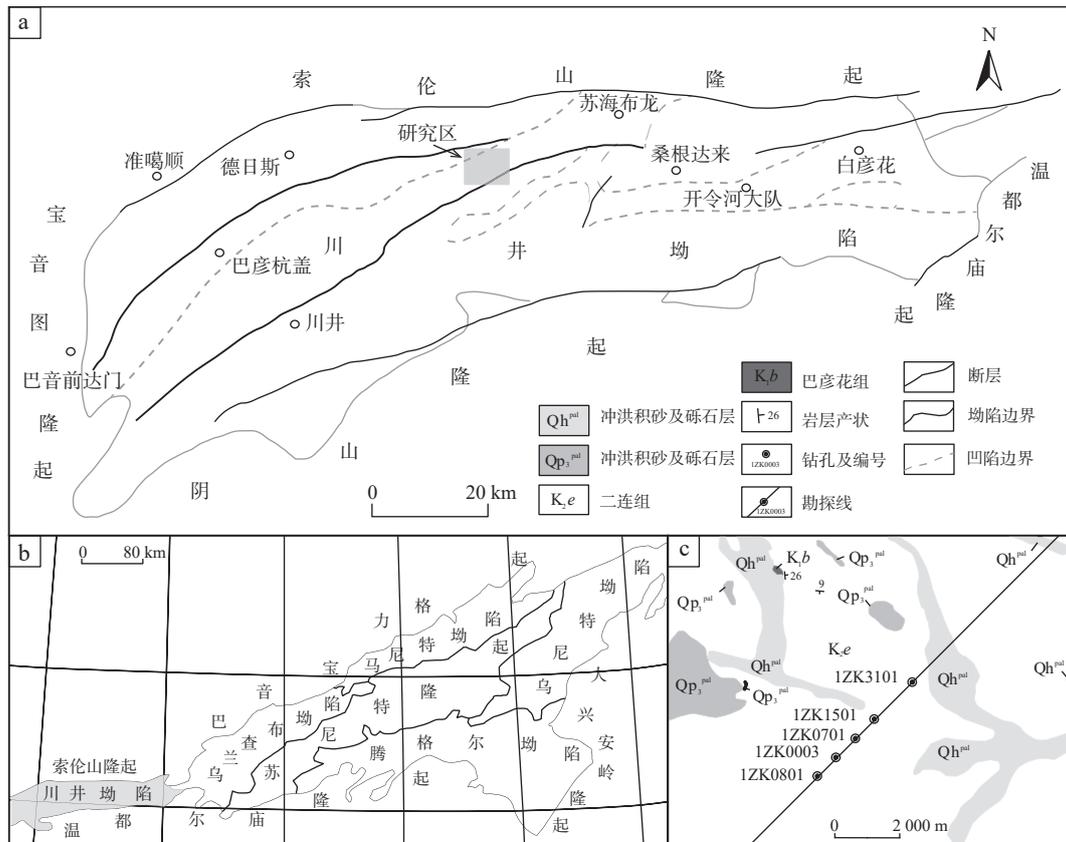


图1 川井坳陷区域地质构造简图

Fig. 1 Geological structure diagram of Chuanjing depression region

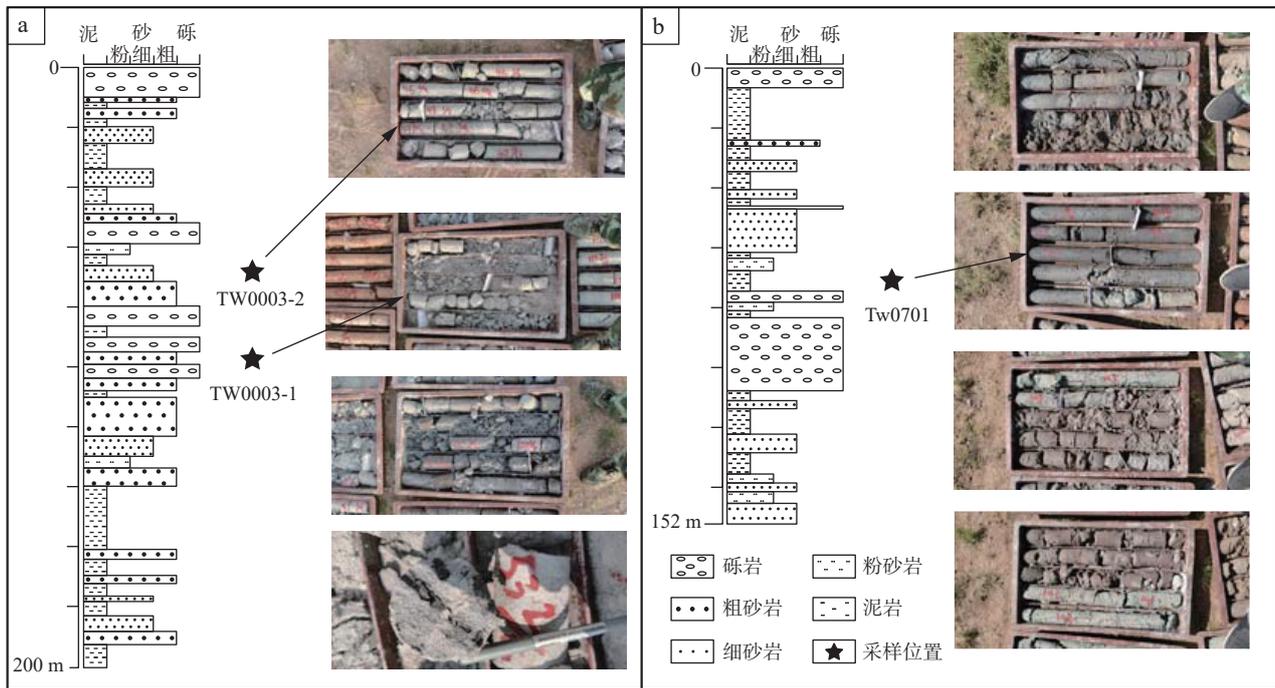
屑岩。巴彦花组以河流相—河湖相沉积为主,该组岩性整体以浅绿色泥岩、灰色或灰白色细砂岩、中砂岩为主,局部夹灰色粗砂岩、含砾粗砂岩。该组上部碳化明显,中下部零星见碳化,岩石颜色以浅绿色、灰色为主,反映沉积环境为氧化—还原过度环境。该组富矿砂岩主要为长石岩屑砂岩,中等分选,含少量砾石,砾石呈次圆状—次棱角状,指示其具有近源碎屑物的特征。该层为盆地一个重要富U地层。川井坳陷早白垩世岩浆活动频繁,区内可见多处岩浆岩出露,主要包括呈带状分布或呈岩株产出的华力西期、燕山早期的花岗岩、花岗闪长岩、闪长岩及辉橄岩、纯橄岩等(李保侠等,2002)。

2 样品与分析方法

本次研究样品采自二连盆地西部川井地区钻孔的下白垩统巴彦花组砂岩中,分别为1ZK0003钻孔和1ZK0701钻孔(图1c)3件样品,编号分别为:TW0003-1, TW0003-2, TW0701(图2)。其中TW0003-1样品和TW0003-2样品分别采自钻孔1ZK0003的97.95 m和

67.87 m处。样品主要为灰白色中—细粒长石岩屑砂岩;TW0701样品采自1ZK0701钻孔71.67 m处,样品主要为灰黑色含砾细砂质泥岩。TW0003-1样品位于矿化层下部,TW0003-2样品和TW0701样品属于矿化层上部。

本次用于测年的样品锆石分选、制靶及测试均在中国冶金地质总局山东局测试中心完成。样品重量均 ≥ 2 kg,将样品机械破碎至80~100目,后用磁选及重液方法粗选锆石,在双目镜下挑纯,并制作锆石样靶。对已抛光的锆石样靶进行透射光、反射光及阴极发光拍照,以确定锆石颗粒的内部结构。在测试过程中,选择环带清晰且无裂痕、无包裹体处进行测试。测试在激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)上完成,样品测试过程采用的激光束斑直径30 μm 。测试过程采用国际标准锆石91500/PL作为外表标准物质,选择NIST610作为元素成分标准样,Zr作为内标元素,具体实验步骤及方法参数见文献(耿建珍等,2011)。样品的同位素比值及元素含量计算采用ICP-MS-DATACAL数据处理程序,U-Pb谐和图、年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算采用Isoplot 3.0程



a. 钻孔 1ZK0003; b. 钻孔 1ZK0701

图2 钻孔岩性柱状图、岩心实物照片及采样位置

Fig. 2 Lithological histogram of borehole, physical core photos and sampling locations

序完成。本次研究主要选择谐和度介于 90% 到 100% 之间的碎屑锆石年龄, 谐和度 < 90% 的锆石年龄不参与本文的统计和分析。对于 U-Pb 锆石年龄 < 1 000 Ma 的年轻锆石, 采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄代表锆石的形成年龄; 对于 U-Pb 锆石年龄 > 1 000 Ma 的古老锆石, 采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄代表锆石的形成年龄。

3 分析结果

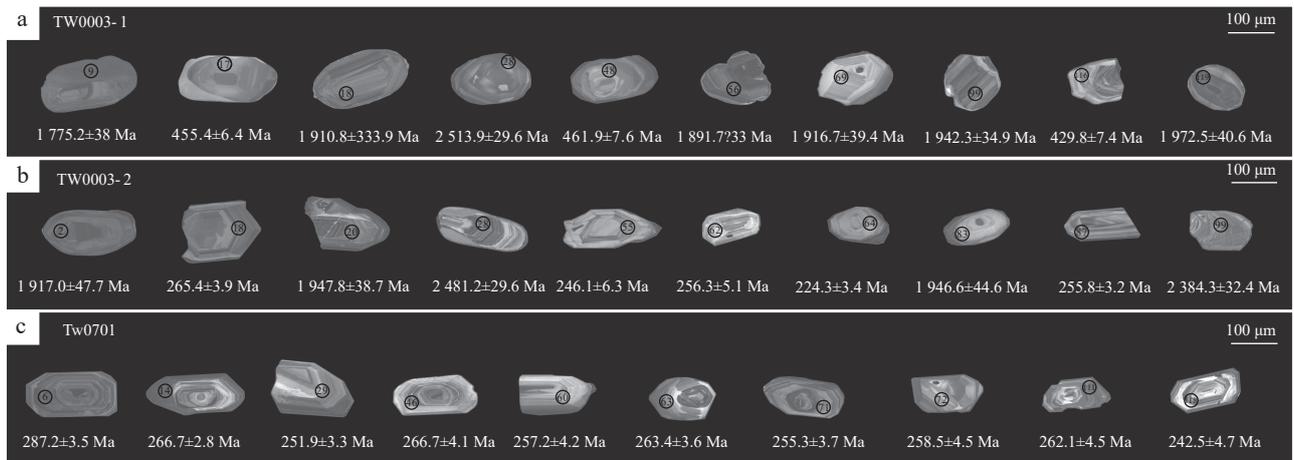
3 件测试样品中锆石形态及颜色相近, 绝大多数为无色透明或浅黄色, 锆石粒径普遍为 150~200 μm , 呈短柱状或次圆状, 可见裂痕、凹坑、断口磨蚀及包裹体, 显示其经历了一定距离的搬运。根据样品锆石 CL 图像可以看出, 大多数锆石具有核-幔结构, 发育有清晰规则的震荡环带, 指示其具有岩浆成因锆石的特征(杨济远等, 2023; 代新宇等, 2024; 刘昊等, 2024); 少数锆石无清晰震荡环带, 可见亮白色或暗色增生边, 可能为变质成因锆石(黄广文等, 2018)(图 3)。

本次测试的 3 件巴彦花组砂岩样品共获得 346 颗锆石颗粒的 346 个测试点的谐和年龄数据(表 1、表 2、表 3), 其中钻孔 1ZK0003 中的 TW0003-1 样品共获得 118 颗锆石年龄, TW0003-2 样品共获得 114 颗锆石年

龄; 钻孔 1ZK0701 中的 TW-0701 样品共获得 114 颗锆石年龄(图 4)。

采自钻孔 1ZK0003 的 TW0003-1 样品中的锆石年龄最小值为 138.5 Ma, 最大值为 3 044.1 Ma, 主要集中于 1 835.2~2 472.2 Ma ($n=86$) 和 236.9~324.9 Ma ($n=13$) 两个区间内, 其存在约 1 950 Ma 的主峰和约 250 Ma 的次峰(图 4)。其中, 锆石年龄较大的前寒武锆石共 95 颗, 占 80.5%; 采自钻孔 1ZK0003 的 TW0003-2 样品中的锆石年龄最小值为 224.3 Ma, 最大值为 2 713.9 Ma, 其主要集中于 1 636.1~2 500.0 Ma ($n=81$) 和 224.3~275.2 Ma ($n=26$) 两个区间中, 其峰值分别约为 1 934 Ma 和 257 Ma, 该样品锆石年龄在前寒武之前的共 88 颗, 占 77.2%。采自钻孔 1ZK0701 中的 TW-0701 样品中的锆石年龄最小值为 126.5, 最大值为 2 688.6 Ma, 主要集中于 251.7~329.6 Ma ($n=70$) 和 1 664.8~2 465.1 Ma ($n=19$), 其有约为 264 Ma 的主峰与 1 862 Ma 的次峰(图 4)。该样品中锆石年龄较年轻的三叠纪早期—石炭纪晚期锆石共 80 颗, 占 70.2%, 锆石年龄较大的前寒武锆石 (> 541 Ma) 共 25 颗, 占 21.9%。

从 1ZK0003 及 1ZK0701 两钻孔的 3 件样品的锆石年龄结果看, 其锆石年龄组成相近, 除同时缺失侏罗纪、泥盆纪和寒武纪外, 从太古代至晚中生代均有



a. 样品 TW0003-1 典型碎屑锆石阴极发光图像及测试位置； b. 样品 TW0003-2 典型碎屑锆石阴极发光图像及测试位置；
c. 样品 TW0701 典型碎屑锆石阴极发光图像及测试位置

图3 研究区典型碎屑锆石阴极发光图像及测试位置

Fig. 3 Cathodoluminescence images and testing locations of typical detrital zircon in the research area

分布,且各年龄段峰值相近。其中钻孔 1ZK0003 的两个样品的锆石年龄主要集中于前寒武时期的古元古代,而钻孔 1ZK0701 的样品锆石年龄主要集中于晚古生代。综上所述,巴彦花组沉积物主要由古远古代和晚古生代沉积物组成。

4 讨论

4.1 对巴彦花组物源的指示

根据锆石 Th/U 值及锆石形态特征对锆石成因进行判别(黄广文等, 2018),本次所测试样品具有较高的 Th/U 值。其中以 $Th/U > 0.4$ 的锆石为主, $Th/U < 0.1$ 的锆石很少(图 5),统计表明 $Th/U > 0.4$ 的锆石占总数的 55.2%, $Th/U < 0.1$ 的锆石仅占总数的 5.2%。3 件样品中锆石形态主要呈自形柱状,具有明显的晶棱,且发育清晰的震荡生长环带。因此,本次所获得的锆石成因以岩浆成因为主,含少量变质锆石。由 3 件样品的碎屑锆石分析结果显示(图 4),巴彦花组砂岩中的碎屑锆石年龄主要为 250~330 Ma(晚二叠世—晚石炭世)和 1630~2500 Ma(古元古代),其次为少量的 230~251 Ma(早三叠世)、420~440 Ma(志留纪)、450~460 Ma(中—晚奥陶世)及太古代的碎屑锆石。

盆地与造山带作为两个基本构造单元,两者之间存在着密切的演化和构造联系(周瑞, 2019)。华北地区受~2700 Ma 的大规模陆陆增生事件和古元古代末期的构造-热运动影响,产出大量岩浆岩及与其有关的变质作用(耿元生等, 2006)。在之后的~1000 Ma 至

250 Ma 期间,华北克拉通和西伯利亚克拉通碰撞所伴随的古亚洲洋闭合,形成了包括索伦山蛇绿岩带在内的中亚造山带(Chen et al., 2009; Wu et al., 2011),同时于早三叠世—晚二叠世中亚造山带与阴山—燕山造山带发生碰撞,并伴有大规模的岩浆作用(Wang et al., 2017; 周瑞, 2019)。随着之后的强烈构造运动,阴山—燕山造山带和索伦山蛇绿岩带发生了快速隆升(Ren et al., 2016)。从早—中侏罗世开始,受古太平洋俯冲作用影响二连盆地逐步形成(张国仁等, 2004)。

本次采集的样品以长石岩屑砂岩或岩屑长石砂岩为主,其形态特征表现为低磨圆度和较差的分选性,具有冲积扇—河流相沉积特征,指示其物源经历了较短距离的搬运作用。因此,认为下白垩统巴彦花组沉积碎屑物是由近源碎屑物质为主体组成。而分布于川井坳陷周围的索伦山、宝音图、狼山—白云鄂博等隆起可能为其沉积碎屑的重要源区。根据近年来学者们对研究区周边隆起区的年代学特征的研究认识(表 4),对比本次所获得的碎屑锆石年代学特征可以看出,位于坳陷北部的索伦山隆起发育大量二叠纪与石炭纪时期的基性岩浆岩和相对较少的酸性岩浆岩,这些岩浆岩的形成时期主要集中在 246~330 Ma (Miao et al., 2008; Jian et al., 2010; Chen et al., 2012; Jian et al., 2012; Chu et al., 2013; 王炎阳等, 2014; 柳志华等, 2020),属于晚二叠世至晚石炭世时期形成,其与坳陷内年龄为 250~330 Ma 的碎屑锆石一致;位于研究区南—东南部的狼山—白云鄂博隆起主要发育有酸性岩浆岩和中性岩浆岩,这些岩浆岩的年龄主要集中于

表 1 样品 TW0003-1 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试结果

Tab. 1 Sample TW0003-1 clastic zircon LA-ICP-MS U-Pb age test results

测试点	元素含量			同位素比值						年龄 (Ma)					
	(10 ⁻⁶)		Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
	Th	U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
1	62	97	0.64	0.158 47	0.004 22	10.590 36	0.262 01	0.481 83	0.007 19	2 439	45	2 488	23	2 535	31
2	111	194	0.57	0.106 32	0.002 71	3.950 59	0.095 50	0.267 75	0.003 77	1 739	42	1 624	20	1 529	19
3	87	157	0.56	0.054 97	0.002 09	0.549 05	0.019 10	0.073 47	0.001 26	409	85	444	13	457	8
4	73	182	0.40	0.114 04	0.002 58	5.445 22	0.117 67	0.343 65	0.004 34	1 865	36	1 892	19	1 904	21
5	53	209	0.25	0.115 11	0.002 52	5.188 68	0.107 32	0.324 85	0.003 94	1 883	39	1 851	18	1 813	19
6	285	339	0.84	0.053 17	0.001 50	0.507 63	0.013 18	0.069 34	0.000 94	345	32	417	9	432	6
7	93	336	0.28	0.155 93	0.003 16	9.808 55	0.200 15	0.454 10	0.005 97	2 413	34	2 417	19	2 413	26
8	41	369	0.11	0.115 60	0.002 48	5.683 97	0.122 69	0.354 78	0.004 43	1 900	39	1 929	19	1 957	21
9	100	254	0.39	0.107 37	0.002 48	5.119 89	0.119 60	0.346 31	0.005 33	1 755	38	1 839	20	1 917	26
10	101	191	0.53	0.111 56	0.002 83	5.587 57	0.136 04	0.362 99	0.005 15	1 825	41	1 914	21	1 996	24
11	95	70	1.35	0.117 72	0.003 86	5.633 88	0.156 55	0.348 42	0.005 59	1 922	59	1 921	24	1 927	27
13	44	227	0.19	0.116 85	0.002 74	5.716 90	0.130 66	0.353 51	0.004 76	1 909	42	1 934	20	1 951	23
14	152	619	0.25	0.112 15	0.002 31	3.774 28	0.084 23	0.243 05	0.003 64	1 835	37	1 587	18	1 403	19
15	96	445	0.22	0.054 48	0.001 70	0.316 87	0.009 91	0.042 02	0.000 56	391	70	279	8	265	3
16	53	261	0.20	0.053 53	0.002 02	0.284 82	0.010 66	0.038 71	0.000 62	350	85	254	8	245	4
17	85	143	0.59	0.055 17	0.001 99	0.553 86	0.018 83	0.073 20	0.001 07	420	77	448	12	455	6
18	63	255	0.25	0.116 99	0.002 21	5.593 61	0.106 06	0.344 50	0.003 79	1 911	34	1 915	16	1 908	18
19	45	499	0.09	0.111 40	0.002 02	4.715 42	0.086 92	0.304 76	0.003 30	1 833	32	1 770	15	1 715	16
20	162	504	0.32	0.119 40	0.002 21	6.430 08	0.142 90	0.386 93	0.005 93	1 947	33	2 036	20	2 109	28
21	26	74	0.35	0.167 86	0.003 63	11.879 07	0.265 54	0.509 82	0.007 07	2 536	36	2 595	21	2 656	30
22	197	152	1.30	0.166 07	0.003 59	11.262 16	0.302 53	0.485 77	0.008 45	2 518	35	2 545	25	2 552	37
23	152	267	0.57	0.114 00	0.002 55	5.227 54	0.102 83	0.329 85	0.003 71	1 865	36	1 857	17	1 838	18
24	452	539	0.84	0.055 03	0.001 60	0.318 00	0.008 40	0.041 93	0.000 52	413	65	280	6	265	3
25	19	55	0.34	0.120 24	0.002 87	6.230 28	0.152 40	0.374 22	0.005 28	1 961	43	2 009	21	2 049	25
26	57	258	0.22	0.120 62	0.002 15	6.326 07	0.108 96	0.378 04	0.004 05	1 965	33	2 022	15	2 067	19
27	71	163	0.43	0.113 59	0.002 17	5.398 43	0.101 19	0.341 86	0.003 65	1 858	29	1 885	16	1 896	18
28	406	200	2.03	0.165 65	0.002 94	10.727 87	0.175 25	0.467 28	0.004 72	2 514	30	2 500	15	2 472	21
29	253	247	1.02	0.109 82	0.002 37	4.901 97	0.092 13	0.314 76	0.003 84	1 798	34	1 803	16	1 764	19
30	46	126	0.36	0.177 77	0.003 93	11.661 30	0.223 38	0.464 73	0.005 99	2 632	37	2 578	18	2 460	26
31	98	133	0.74	0.131 65	0.003 09	6.774 38	0.153 65	0.370 95	0.006 26	2 120	41	2 082	20	2 034	29
32	62	833	0.07	0.112 60	0.002 46	4.660 41	0.117 85	0.298 56	0.005 35	1 843	35	1 760	21	1 684	27
33	113	218	0.52	0.115 85	0.002 59	5.414 24	0.116 94	0.338 60	0.004 56	1 894	40	1 887	19	1 880	22
34	84	68	1.23	0.093 16	0.002 54	3.349 34	0.086 76	0.261 35	0.004 00	1 491	52	1 493	20	1 497	20
35	74	616	0.12	0.118 62	0.002 17	5.832 31	0.137 13	0.355 53	0.005 88	1 936	33	1 951	20	1 961	28
36	37	77	0.48	0.135 64	0.003 54	7.209 63	0.182 96	0.388 35	0.006 60	2 173	45	2 138	23	2 115	31
37	79	399	0.20	0.117 30	0.002 37	5.554 30	0.097 72	0.344 16	0.003 55	1 917	36	1 909	15	1 907	17
38	24	363	0.07	0.050 77	0.001 86	0.289 50	0.010 10	0.042 02	0.000 63	232	90	258	8	265	4
39	164	223	0.74	0.120 34	0.002 58	6.160 79	0.121 65	0.374 23	0.004 41	1 961	38	1 999	17	2 049	21
40	238	506	0.47	0.053 54	0.001 30	0.531 23	0.012 91	0.072 43	0.000 94	350	56	433	9	451	6
41	974	890	1.09	0.053 09	0.001 67	0.308 99	0.008 91	0.042 75	0.000 59	332	103	273	7	270	4
42	316	390	0.81	0.142 18	0.003 17	6.442 65	0.140 08	0.325 21	0.004 06	2 254	38	2 038	19	1 815	20
43	173	438	0.40	0.056 72	0.001 53	0.544 72	0.015 40	0.068 95	0.000 90	480	59	442	10	430	5
44	50	331	0.15	0.117 42	0.002 31	5.854 61	0.115 88	0.358 92	0.004 51	1 917	35	1 955	17	1 977	21
45	165	472	0.35	0.119 31	0.002 13	5.766 77	0.103 43	0.347 10	0.004 31	1 946	32	1 941	16	1 921	21
46	66	256	0.26	0.119 11	0.002 10	5.772 63	0.101 68	0.347 12	0.003 54	1 943	33	1 942	15	1 921	17
47	67	100	0.67	0.161 46	0.003 19	8.578 45	0.200 48	0.381 29	0.006 71	2 472	33	2 294	21	2 082	31
48	100	154	0.65	0.058 02	0.002 16	0.597 46	0.022 95	0.074 28	0.001 26	532	77	476	15	462	8
49	92	94	0.98	0.228 87	0.004 56	17.839 78	0.354 97	0.558 47	0.007 01	3 044	32	2 981	19	2 860	29
50	128	128	1.00	0.069 85	0.002 09	1.377 26	0.038 92	0.142 53	0.002 12	924	61	879	17	859	12
51	106	131	0.81	0.070 12	0.002 39	1.238 62	0.039 50	0.127 25	0.001 81	931	75	818	18	772	10
52	102	108	0.94	0.119 36	0.002 85	5.965 53	0.134 40	0.358 12	0.004 91	1 947	43	1 971	20	1 973	23
53	76	114	0.66	0.046 73	0.002 68	0.314 40	0.016 54	0.049 50	0.000 96	35	133	278	13	311	6
54	71	143	0.49	0.157 31	0.003 62	8.400 55	0.160 93	0.373 60	0.005 00	2 428	39	2 275	17	2 046	23
55	49	445	0.11	0.114 47	0.002 13	5.869 85	0.117 40	0.366 34	0.005 29	1 872	33	1 957	17	2 012	25
56	46	588	0.08	0.115 75	0.002 12	5.755 74	0.099 26	0.355 31	0.003 96	1 892	33	1 940	15	1 960	19
57	89	158	0.56	0.159 84	0.003 17	9.979 99	0.190 82	0.446 80	0.005 72	2 454	34	2 433	18	2 381	26
58	41	90	0.45	0.116 44	0.002 67	5.944 84	0.147 61	0.365 66	0.006 44	1 902	41	1 968	22	2 009	30
59	59	633	0.09	0.112 33	0.002 40	4.734 33	0.110 63	0.300 27	0.004 79	1 839	39	1 773	20	1 693	24

续表 1

测试点	元素含量		Th/U	同位素比值								年龄 (Ma)							
	(10 ⁻⁶)			²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U					
	Th	U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ						
60	42	262	0.16	0.117 07	0.002 76	5.821 89	0.129 97	0.356 33	0.005 69	1 922	42	1 950	19	1 965	27				
61	283	300	0.94	0.095 03	0.002 47	3.512 55	0.090 36	0.264 41	0.004 59	1 529	49	1 530	20	1 512	23				
62	111	111	1.00	0.057 53	0.003 67	0.343 44	0.019 41	0.044 66	0.001 19	522	145	300	15	282	7				
63	65	323	0.20	0.109 23	0.002 68	5.354 36	0.124 66	0.352 16	0.005 89	1 787	44	1 878	20	1 945	28				
64	317	256	1.24	0.112 29	0.002 92	4.870 30	0.105 91	0.304 72	0.004 48	1 837	46	1 797	18	1 715	22				
65	159	235	0.68	0.052 82	0.002 24	0.357 40	0.016 03	0.048 64	0.000 99	320	96	310	12	306	6				
66	146	366	0.40	0.112 67	0.002 16	4.561 58	0.088 50	0.290 33	0.003 92	1 843	34	1 742	16	1 643	20				
67	71	437	0.16	0.117 86	0.002 09	5.660 38	0.104 52	0.344 48	0.004 48	1 924	32	1 925	16	1 908	22				
68	805	1 668	0.48	0.049 42	0.001 11	0.236 87	0.005 25	0.034 43	0.000 42	169	49	216	4	218	3				
69	53	97	0.54	0.117 28	0.002 63	5.503 66	0.114 27	0.330 65	0.004 61	1 917	39	1 901	18	1 842	22				
70	130	433	0.30	0.122 77	0.002 27	6.127 64	0.112 82	0.358 39	0.003 92	1 998	32	1 994	16	1 975	19				
71	74	320	0.23	0.120 46	0.002 65	5.848 90	0.118 65	0.341 28	0.004 02	1 965	39	1 954	18	1 893	19				
72	30	361	0.08	0.120 31	0.002 28	5.851 02	0.106 87	0.349 77	0.003 93	1 961	33	1 954	16	1 934	19				
73	249	573	0.43	0.053 12	0.001 54	0.274 90	0.008 44	0.037 43	0.000 71	345	32	247	7	237	4				
74	102	278	0.37	0.118 24	0.002 05	5.413 90	0.096 12	0.329 23	0.003 87	1 931	31	1 887	15	1 835	19				
75	404	624	0.65	0.125 78	0.002 02	5.712 84	0.089 20	0.326 36	0.003 03	2 040	33	1 933	14	1 821	15				
76	74	864	0.09	0.115 76	0.002 23	5.414 74	0.086 08	0.335 98	0.003 43	1 892	35	1 887	14	1 867	17				
77	87	475	0.18	0.122 83	0.002 07	5.822 70	0.097 78	0.340 67	0.003 36	1 998	29	1 950	15	1 890	16				
78	48	389	0.12	0.121 98	0.002 13	5.891 80	0.115 90	0.347 05	0.004 59	1 987	31	1 960	17	1 920	22				
79	60	150	0.40	0.119 25	0.002 37	5.563 89	0.108 83	0.336 44	0.004 22	1 946	35	1 911	17	1 870	20				
80	221	155	1.43	0.170 27	0.003 23	10.438 28	0.205 49	0.441 42	0.005 36	2 560	32	2 474	18	2 357	24				
81	281	379	0.74	0.058 27	0.001 63	0.567 98	0.016 48	0.070 08	0.001 00	539	61	457	11	437	6				
82	45	372	0.12	0.121 64	0.002 89	5.936 24	0.137 95	0.351 02	0.004 53	1 981	42	1 967	20	1 939	22				
83	212	308	0.69	0.052 94	0.002 12	0.294 72	0.011 58	0.040 23	0.000 60	328	91	262	9	254	4				
84	474	921	0.51	0.118 66	0.002 35	5.266 26	0.103 95	0.318 87	0.003 62	1 936	35	1 863	17	1 784	18				
85	66	448	0.15	0.118 78	0.002 29	5.689 10	0.116 40	0.343 55	0.004 00	1 939	35	1 930	18	1 904	19				
86	453	716	0.63	0.129 92	0.002 35	6.256 91	0.117 11	0.345 93	0.004 05	2 098	32	2 012	16	1 915	19				
87	140	132	1.06	0.081 71	0.002 11	2.308 73	0.054 51	0.204 81	0.002 79	1 239	50	1 215	17	1 201	15				
88	298	249	1.19	0.117 10	0.002 28	5.307 21	0.103 52	0.326 18	0.004 08	1 922	35	1 870	17	1 820	20				
89	144	441	0.33	0.113 35	0.002 14	5.179 16	0.097 60	0.327 69	0.003 35	1 854	33	1 849	16	1 827	16				
90	178	185	0.96	0.054 62	0.002 39	0.385 11	0.016 84	0.050 76	0.000 80	398	103	331	12	319	5				
92	109	255	0.43	0.120 12	0.003 29	5.988 52	0.142 97	0.349 44	0.004 67	1 958	48	1 974	21	1 932	22				
93	61	296	0.20	0.119 74	0.002 63	5.954 11	0.131 03	0.356 49	0.004 21	1 954	34	1 969	19	1 965	20				
94	56	395	0.14	0.115 96	0.002 31	5.789 58	0.114 01	0.358 36	0.004 35	1 895	37	1 945	17	1 974	21				
95	48	302	0.16	0.115 96	0.002 24	5.667 00	0.115 26	0.350 15	0.004 37	1 895	34	1 926	18	1 935	21				
96	57	78	0.73	0.054 12	0.003 52	0.382 16	0.022 60	0.051 70	0.001 20	376	142	329	17	325	7				
97	257	529	0.49	0.052 64	0.001 64	0.349 88	0.011 38	0.047 53	0.000 62	322	70	305	9	299	4				
98	78	390	0.20	0.114 22	0.002 06	4.872 88	0.094 58	0.305 14	0.004 02	1 933	32	1 798	16	1 717	20				
99	44	267	0.16	0.119 08	0.002 34	5.918 08	0.113 82	0.356 14	0.004 00	1 942	35	1 964	17	1 964	19				
100	120	259	0.46	0.118 22	0.002 33	6.023 81	0.116 86	0.364 91	0.004 07	1 929	35	1 979	17	2 005	19				
101	180	409	0.44	0.114 51	0.002 24	5.410 43	0.102 80	0.338 55	0.004 17	1 872	35	1 887	16	1 880	20				
102	22	128	0.17	0.117 22	0.002 80	5.930 05	0.133 14	0.363 49	0.004 99	1 915	47	1 966	20	1 999	24				
103	53	166	0.32	0.111 52	0.002 76	5.305 24	0.124 44	0.333 47	0.005 01	1 824	40	1 870	20	1 855	24				
104	168	280	0.60	0.104 30	0.002 27	4.415 46	0.093 00	0.303 44	0.003 61	1 702	41	1 715	17	1 708	18				
105	125	345	0.36	0.124 10	0.002 37	6.237 87	0.109 78	0.360 47	0.003 80	2 017	33	2 010	15	1 984	18				
106	29	273	0.11	0.117 44	0.002 32	5.501 16	0.103 82	0.335 77	0.003 60	1 918	35	1 901	16	1 866	17				
107	77	271	0.28	0.116 72	0.002 40	5.643 46	0.114 54	0.346 85	0.004 48	1 906	37	1 923	18	1 920	21				
108	153	221	0.69	0.045 92	0.003 00	0.135 90	0.008 30	0.021 71	0.000 44			129	7	138	3				
109	303	546	0.55	0.130 60	0.002 87	6.849 86	0.147 31	0.375 43	0.004 24	2 106	33	2 092	19	2 055	20				
110	63	611	0.10	0.119 44	0.002 84	5.738 32	0.129 26	0.344 50	0.004 07	1 948	43	1 937	20	1 908	20				
111	129	163	0.79	0.110 92	0.003 07	4.746 20	0.127 27	0.307 49	0.004 49	1 815	50	1 775	23	1 728	22				
112	48	425	0.11	0.118 27	0.003 58	5.461 76	0.161 25	0.331 28	0.005 23	1 931	54	1 895	25	1 845	25				
113	51	301	0.17	0.117 74	0.003 52	5.398 06	0.143 21	0.322 14	0.004 44	1 922	21	1 885	23	1 800	22				
114	523	356	1.47	0.119 04	0.003 08	5.539 08	0.138 31	0.333 97	0.004 41	1 943	46	1 907	22	1 858	21				
115	43	259	0.16	0.121 33	0.003 12	5.950 50	0.151 80	0.352 09	0.004 89	1 976	46	1 969	22	1 945	23				
116	61	135	0.45	0.055 39	0.002 51	0.523 92	0.022 59	0.068 95	0.001 23	428	100	428	15	430	7				
117	101	324	0.31	0.115 58	0.002 80	5.095 85	0.116 10	0.317 50	0.004 20	1 900	38	1 835	19	1 778	21				
118	61	304	0.20	0.120 49	0.002 68	5.765 86	0.124 45	0.344 00	0.004 03	1 965	39	1 941	19	1 906	19				
119	82	437	0.19	0.121 10	0.002 74	5.569 18	0.126 25	0.329 98	0.003 84	1 973	41	1 911	20	1 838	19				
120	63	660	0.10	0.118 97	0.002 71	5.211 34	0.116 70	0.314 87	0.003 91	1 943	41	1 854	19	1 765	19				

表 2 样品 TW0003-2 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试结果

Tab. 2 Sample TW0003-2 clastic zircon LA-ICP-MS U-Pb age test results

测试点	元素含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值								年龄 (Ma)			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
1	390	627	0.62	0.118 94	0.002 41	5.786 29	0.106 15	0.354 15	0.004 35	1 940	36	1 944	16	1 954	21
2	307	715	0.43	0.117 41	0.003 09	5.605 15	0.095 55	0.332 39	0.003 49	1 917	48	1 917	15	1 850	17
3	168	367	0.46	0.119 71	0.002 65	5.670 00	0.095 84	0.343 43	0.003 61	1 954	34	1 927	15	1 903	17
4	24	147	0.17	0.055 70	0.002 53	0.299 61	0.012 86	0.040 09	0.000 74	439	97	266	10	253	5
5	62	193	0.32	0.055 61	0.003 89	0.282 75	0.020 00	0.036 94	0.000 84	435	157	253	16	234	5
6	57	109	0.53	0.049 70	0.002 74	0.298 35	0.015 46	0.043 62	0.000 74	189	125	265	12	275	5
8	235	368	0.64	0.105 41	0.001 76	4.483 39	0.087 74	0.306 43	0.003 93	1 721	27	1 728	16	1 723	19
9	64	122	0.53	0.113 62	0.002 86	5.311 37	0.101 44	0.326 16	0.004 37	1 858	45	1 871	16	1 820	21
10	189	263	0.72	0.122 76	0.002 24	5.863 97	0.107 76	0.344 92	0.003 87	1 998	32	1 956	16	1 910	19
11	93	238	0.39	0.117 92	0.002 33	5.679 53	0.112 74	0.346 91	0.004 01	1 925	31	1 928	17	1 920	19
12	5	160	0.03	0.052 70	0.002 89	0.307 25	0.015 26	0.042 13	0.000 68	317	124	272	12	266	4
13	217	1 015	0.21	0.129 14	0.002 50	5.871 20	0.104 49	0.321 38	0.003 97	2 087	34	1 957	15	1 796	19
14	56	99	0.57	0.115 21	0.002 38	5.264 02	0.106 05	0.330 53	0.004 01	1 883	32	1 863	17	1 841	19
15	116	89	1.30	0.164 49	0.003 30	10.323 35	0.218 45	0.450 73	0.006 11	2 502	34	2 464	20	2 399	27
16	241	162	1.49	0.115 57	0.002 77	4.941 82	0.093 68	0.300 14	0.003 54	1 889	38	1 809	16	1 692	18
17	43	94	0.46	0.051 88	0.003 71	0.283 28	0.018 41	0.039 86	0.000 89	280	165	253	15	252	5
18	20	273	0.07	0.051 29	0.002 19	0.296 22	0.012 08	0.042 03	0.000 64	254	98	263	9	265	4
19	26	28	0.92	0.113 51	0.003 49	5.289 74	0.162 68	0.329 58	0.005 44	1 857	56	1 867	26	1 836	26
20	224	472	0.48	0.119 45	0.002 55	5.323 03	0.108 75	0.321 17	0.003 42	1 948	39	1 873	18	1 795	17
21	57	289	0.20	0.118 75	0.002 95	6.118 91	0.150 01	0.371 15	0.004 57	1 939	44	1 993	21	2 035	22
22	69	336	0.20	0.117 73	0.002 82	5.571 47	0.131 63	0.341 18	0.004 78	1 922	43	1 912	20	1 892	23
23	250	303	0.83	0.051 06	0.002 02	0.286 43	0.011 48	0.040 73	0.000 63	243	91	256	9	257	4
24	65	277	0.24	0.117 70	0.002 36	5.852 04	0.116 99	0.358 17	0.003 83	1 921	36	1 954	17	1 974	18
25	144	782	0.18	0.056 19	0.002 17	0.296 66	0.010 76	0.038 17	0.000 65	461	85	264	8	241	4
26	180	314	0.57	0.121 30	0.002 17	5.470 55	0.105 58	0.324 84	0.004 08	1 976	32	1 896	17	1 813	20
27	41	207	0.20	0.048 55	0.002 08	0.277 41	0.011 18	0.042 05	0.000 68	128	106	249	9	265	4
28	236	228	1.04	0.162 43	0.002 85	11.315 59	0.219 49	0.501 53	0.006 42	2 481	30	2 549	18	2 620	28
29	80	1 082	0.07	0.113 76	0.001 98	4.459 14	0.085 21	0.281 60	0.003 48	1 861	31	1 723	16	1 599	18
30	433	929	0.47	0.111 09	0.002 33	5.002 20	0.088 98	0.317 68	0.003 30	1 817	33	1 820	15	1 778	16
31	52	125	0.42	0.121 20	0.002 66	6.121 01	0.139 49	0.364 70	0.005 15	1 974	34	1 993	20	2 004	24
32	74	286	0.26	0.117 14	0.002 27	5.926 85	0.113 16	0.365 49	0.003 65	1 913	34	1 965	17	2 008	17
33	43	81	0.54	0.120 55	0.002 80	5.868 81	0.133 79	0.353 40	0.004 23	1 965	41	1 957	20	1 951	20
34	97	641	0.15	0.114 94	0.002 03	4.738 27	0.082 41	0.298 72	0.002 92	1 880	32	1 774	15	1 685	15
36	67	149	0.45	0.051 65	0.002 96	0.270 96	0.013 41	0.039 82	0.000 85	333	131	243	11	252	5
37	30	173	0.17	0.052 06	0.002 40	0.273 62	0.012 24	0.038 77	0.000 74	287	101	246	10	245	5
38	51	103	0.49	0.120 24	0.003 13	5.699 85	0.132 12	0.348 48	0.004 72	1 961	42	1 931	20	1 927	23
39	207	379	0.55	0.050 48	0.001 88	0.282 26	0.010 17	0.041 12	0.000 65	217	87	252	8	260	4
40	54	338	0.16	0.126 03	0.003 25	6.212 19	0.151 48	0.361 57	0.004 68	2 044	45	2 006	21	1 990	22
41	67	333	0.20	0.123 69	0.002 89	5.974 05	0.147 37	0.348 27	0.004 21	2 010	41	1 972	21	1 926	20
42	96	518	0.19	0.119 66	0.002 59	5.235 53	0.118 14	0.315 32	0.003 58	1 951	34	1 858	19	1 767	18
43	129	164	0.79	0.054 20	0.002 79	0.294 04	0.014 19	0.040 00	0.000 68	389	119	262	11	253	4
44	145	316	0.46	0.121 21	0.002 50	5.484 28	0.114 32	0.326 52	0.003 55	1 976	37	1 898	18	1 822	17
45	332	688	0.48	0.118 36	0.002 25	5.222 83	0.101 51	0.317 82	0.003 29	1 932	33	1 856	17	1 779	16
46	500	702	0.71	0.119 06	0.002 23	5.424 01	0.105 27	0.327 62	0.003 15	1 943	33	1 889	17	1 827	15
47	27	55	0.49	0.059 32	0.004 57	0.313 12	0.020 02	0.039 93	0.000 98	589	136	277	15	252	6
48	210	222	0.95	0.121 80	0.002 65	5.395 57	0.115 67	0.319 29	0.003 71	1 983	39	1 884	18	1 786	18
49	25	71	0.36	0.137 15	0.003 27	8.241 22	0.219 30	0.432 08	0.007 11	2 192	41	2 258	24	2 315	32
50	71	329	0.22	0.122 37	0.003 12	6.111 86	0.144 26	0.351 03	0.004 04	1 991	45	1 992	21	1 940	19
51	118	110	1.07	0.056 73	0.003 50	0.300 16	0.017 58	0.039 15	0.000 79	480	137	267	14	248	5
52	159	239	0.66	0.170 72	0.003 81	11.562 81	0.257 09	0.486 63	0.005 72	2 565	37	2 570	21	2 556	25
54	182	317	0.58	0.120 06	0.002 38	5.596 88	0.113 75	0.334 33	0.003 51	1 957	35	1 916	18	1 859	17
55	59	162	0.37	0.050 22	0.003 46	0.265 46	0.017 46	0.038 91	0.001 01	206	166	239	14	246	6
56	21	41	0.51	0.117 32	0.003 14	5.748 55	0.149 77	0.354 67	0.005 79	1 917	16	1 939	23	1 957	28
57	120	255	0.47	0.053 01	0.001 99	0.297 85	0.010 70	0.040 83	0.000 59	328	85	265	8	258	4
58	100	116	0.86	0.052 11	0.002 96	0.270 32	0.014 52	0.038 06	0.000 69	300	131	243	12	241	4
59	64	262	0.24	0.118 15	0.002 95	5.739 37	0.111 26	0.341 46	0.003 87	1 929	45	1 937	17	1 894	19

续表 2

测试点	元素含量 (10^{-6})			同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th/U		Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Th	U		1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ		
60	79	124	0.64	0.100 64	0.002 27	3.618 71	0.084 44	0.258 03	0.003 38	1 636	42	1 554	19	1 480	17
61	38	732	0.05	0.053 47	0.001 59	0.299 40	0.008 75	0.040 37	0.000 60	350	69	266	7	255	4
62	70	124	0.56	0.055 09	0.002 88	0.302 36	0.014 42	0.040 56	0.000 82	417	117	268	11	256	5
63	110	163	0.67	0.097 10	0.002 35	3.513 27	0.079 89	0.260 70	0.003 18	1 569	45	1 530	18	1 493	16
64	68	185	0.37	0.052 39	0.002 04	0.255 54	0.009 98	0.035 41	0.000 55	302	87	231	8	224	3
65	163	296	0.55	0.113 18	0.002 10	4.287 24	0.077 69	0.272 11	0.002 94	1 851	34	1 691	15	1 551	15
66	76	130	0.58	0.163 31	0.003 12	10.202 09	0.181 80	0.450 79	0.005 18	2 490	32	2 453	17	2 399	23
67	69	250	0.28	0.115 46	0.002 17	5.749 88	0.104 36	0.358 79	0.003 70	1 887	33	1 939	16	1 976	18
68	69	531	0.13	0.118 45	0.002 85	4.838 30	0.098 15	0.285 38	0.003 10	1 933	38	1 792	17	1 618	16
69	301	293	1.03	0.119 43	0.002 39	5.994 32	0.119 56	0.360 89	0.003 45	1 948	30	1 975	17	1 986	16
70	98	326	0.30	0.120 48	0.002 72	4.703 87	0.106 45	0.281 15	0.003 19	1 965	40	1 768	19	1 597	16
71	69	251	0.27	0.116 56	0.002 75	5.414 67	0.125 56	0.334 72	0.003 84	1 906	42	1 887	20	1 861	19
72	143	263	0.54	0.110 04	0.002 42	4.895 84	0.105 07	0.320 76	0.003 49	1 811	39	1 802	18	1 793	17
73	191	1 001	0.19	0.113 98	0.002 33	5.138 72	0.105 17	0.324 70	0.003 57	1 865	37	1 843	17	1 813	17
74	94	361	0.26	0.114 62	0.002 27	4.982 77	0.095 43	0.313 38	0.003 31	1 874	35	1 816	16	1 757	16
75	423	444	0.95	0.114 45	0.002 10	4.995 48	0.088 70	0.314 14	0.002 69	1 872	33	1 819	15	1 761	13
76	70	202	0.35	0.096 17	0.002 04	3.422 13	0.068 17	0.256 77	0.002 59	1 551	40	1 509	16	1 473	13
77	132	139	0.95	0.167 05	0.003 42	10.702 34	0.204 11	0.462 37	0.004 95	2 528	34	2 498	18	2 450	22
78	218	655	0.33	0.117 85	0.002 17	5.018 73	0.095 59	0.306 45	0.003 33	1 924	33	1 822	16	1 723	16
79	34	641	0.05	0.112 77	0.002 15	4.809 27	0.089 12	0.307 16	0.003 49	1 856	35	1 787	16	1 727	17
80	24	26	0.89	0.122 78	0.004 05	6.322 31	0.203 28	0.374 88	0.007 20	1 998	58	2 022	28	2 052	34
81	40	338	0.12	0.114 61	0.002 59	4.917 61	0.101 37	0.308 80	0.003 38	1 874	41	1 805	17	1 735	17
82	94	145	0.65	0.106 90	0.002 53	4.105 72	0.092 39	0.277 03	0.003 25	1 747	44	1 655	18	1 576	16
83	54	94	0.57	0.119 35	0.003 04	5.706 81	0.117 64	0.337 66	0.004 01	1 947	45	1 932	18	1 875	19
84	100	122	0.82	0.174 97	0.003 37	11.457 36	0.207 68	0.471 58	0.004 77	2 606	33	2 561	17	2 490	21
86	74	256	0.29	0.053 02	0.002 09	0.275 04	0.010 49	0.037 72	0.000 61	328	89	247	8	239	4
87	164	428	0.38	0.051 52	0.001 42	0.288 52	0.007 84	0.040 49	0.000 51	265	65	257	6	256	3
88	71	161	0.44	0.057 34	0.003 63	0.335 22	0.018 12	0.042 39	0.000 89	506	136	294	14	268	6
89	103	137	0.75	0.163 28	0.003 12	10.651 36	0.210 85	0.470 73	0.005 55	2 500	32	2 493	18	2 487	24
90	42	144	0.29	0.113 31	0.002 47	5.059 04	0.137 49	0.322 34	0.006 41	1 854	40	1 829	23	1 801	31
91	93	470	0.20	0.113 67	0.002 28	5.383 67	0.110 38	0.340 95	0.003 73	1 859	31	1 882	18	1 891	18
92	76	206	0.37	0.113 55	0.002 24	5.333 16	0.107 76	0.337 98	0.003 69	1 857	35	1 874	17	1 877	18
93	69	135	0.51	0.116 35	0.002 49	5.068 77	0.106 47	0.314 67	0.003 87	1 902	38	1 831	18	1 764	19
94	81	85	0.95	0.186 74	0.004 11	12.974 82	0.440 75	0.494 48	0.010 76	2 714	36	2 678	32	2 590	46
96	118	225	0.53	0.120 98	0.002 14	6.089 81	0.113 46	0.361 53	0.004 21	1 972	32	1 989	16	1 989	20
97	85	140	0.61	0.050 87	0.003 30	0.294 96	0.019 31	0.042 32	0.000 88	235	155	262	15	267	5
98	128	878	0.15	0.117 00	0.001 95	5.578 12	0.090 51	0.341 56	0.003 22	1 911	30	1 913	14	1 894	15
99	107	187	0.57	0.153 40	0.002 91	8.953 01	0.165 28	0.418 32	0.004 55	2 384	32	2 333	17	2 253	21
100	34	114	0.30	0.118 35	0.002 71	5.345 23	0.111 69	0.325 01	0.004 38	1 932	36	1 876	18	1 814	21
101	210	536	0.39	0.120 62	0.002 57	4.926 49	0.096 84	0.292 55	0.003 31	1 965	37	1 807	17	1 654	17
102	61	129	0.47	0.133 37	0.002 83	6.956 52	0.153 20	0.374 24	0.005 47	2 143	37	2 106	20	2 049	26
103	119	320	0.37	0.113 53	0.002 18	4.644 17	0.088 63	0.293 46	0.003 40	1 857	35	1 757	16	1 659	17
104	116	243	0.48	0.123 90	0.002 35	6.178 06	0.116 95	0.358 60	0.004 39	2 013	29	2 001	17	1 976	21
105	268	738	0.36	0.117 28	0.002 44	5.156 80	0.088 18	0.309 95	0.003 25	1 917	38	1 846	15	1 740	16
106	38	56	0.68	0.120 07	0.003 04	5.506 69	0.139 19	0.331 38	0.004 89	1 957	40	1 902	22	1 845	24
107	108	406	0.26	0.135 82	0.002 49	6.229 75	0.115 43	0.330 31	0.003 27	2 176	32	2 009	16	1 840	16
108	47	134	0.35	0.120 96	0.002 70	5.297 65	0.119 41	0.315 12	0.003 58	1 972	39	1 868	19	1 766	18
109	31	52	0.60	0.118 52	0.003 15	5.434 15	0.145 09	0.332 64	0.005 12	1 944	47	1 890	23	1 851	25
110	69	114	0.61	0.120 69	0.002 92	6.287 12	0.159 09	0.376 99	0.005 22	1 966	42	2 017	22	2 062	24
111	76	160	0.48	0.120 56	0.002 78	6.124 47	0.148 25	0.367 16	0.004 58	1 965	41	1 994	21	2 016	22
112	389	370	1.05	0.123 38	0.002 61	5.755 66	0.129 45	0.337 24	0.004 38	2 006	37	1 940	20	1 873	21
113	75	110	0.69	0.133 09	0.002 92	7.242 96	0.160 85	0.393 19	0.004 40	2 139	38	2 142	20	2 138	20
114	40	830	0.05	0.114 28	0.002 09	4.960 45	0.095 13	0.313 02	0.003 24	1 869	33	1 813	16	1 756	16
115	91	133	0.68	0.120 73	0.002 86	5.740 37	0.134 36	0.343 98	0.004 14	1 969	42	1 937	20	1 906	20
116	47	40	1.18	0.110 38	0.003 16	4.887 84	0.133 53	0.324 55	0.005 69	1 806	52	1 800	23	1 812	28
117	54	138	0.39	0.057 63	0.003 05	0.307 69	0.015 77	0.038 91	0.000 73	517	117	272	12	246	5
118	43	418	0.10	0.118 25	0.002 22	4.871 19	0.118 59	0.296 19	0.005 11	1 931	34	1 797	21	1 672	25
120	51	575	0.09	0.121 21	0.002 40	5.579 70	0.110 89	0.331 21	0.003 79	1 976	35	1 913	17	1 844	18

表 3 样品 TW0701 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测试结果
Tab. 3 Sample TW0701 clastic zircon LA-ICP-MS U-Pb age test results

测试点	元素含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
1	156	183	0.85	0.051 61	0.002 39	0.326 92	0.011 88	0.043 42	0.000 70	333	103	287	9	274	4
2	256	261	0.98	0.046 09	0.002 30	0.136 57	0.006 58	0.021 94	0.000 38	400	-283	130	6	140	2
3	238	392	0.61	0.050 42	0.001 78	0.318 52	0.011 42	0.045 77	0.000 74	213	81	281	9	288	5
4	46	96	0.48	0.115 75	0.002 23	6.188 11	0.134 92	0.383 87	0.004 54	1 892	34	2 003	19	2 094	21
5	101	185	0.55	0.052 24	0.001 97	0.377 26	0.013 84	0.052 21	0.000 75	295	92	325	10	328	5
6	262	351	0.75	0.051 84	0.001 76	0.326 88	0.009 13	0.045 56	0.000 57	280	78	287	7	287	4
7	91	182	0.50	0.048 67	0.002 52	0.362 74	0.015 49	0.050 91	0.001 19	132	122	314	12	320	7
8	46	233	0.20	0.113 28	0.002 15	4.954 23	0.088 42	0.314 48	0.003 45	1 854	34	1 812	15	1 763	17
10	984	1 238	0.79	0.049 94	0.001 23	0.318 07	0.007 48	0.045 87	0.000 61	191	28	280	6	289	4
11	24	53	0.45	0.057 79	0.003 53	0.580 25	0.029 47	0.072 28	0.001 68	520	131	465	19	450	10
12	131	618	0.21	0.049 68	0.001 58	0.302 16	0.008 50	0.043 92	0.000 59	189	74	268	7	277	4
13	92	136	0.67	0.053 68	0.003 36	0.312 82	0.018 59	0.041 86	0.000 86	367	143	276	14	264	5
14	111	693	0.16	0.050 96	0.001 40	0.301 97	0.008 01	0.042 24	0.000 46	239	63	268	6	267	3
15	106	272	0.39	0.055 42	0.001 68	0.558 26	0.014 65	0.071 21	0.000 91	428	67	450	10	443	5
16	176	717	0.25	0.052 42	0.001 35	0.330 56	0.008 11	0.045 33	0.000 54	306	59	290	6	286	3
17	53	77	0.69	0.055 71	0.003 13	0.395 98	0.018 86	0.049 79	0.001 06	439	126	339	14	313	7
18	85	221	0.38	0.057 15	0.002 21	0.343 43	0.012 85	0.043 47	0.000 70	498	90	300	10	274	4
19	86	190	0.45	0.052 55	0.002 49	0.299 49	0.013 07	0.041 49	0.000 84	309	107	266	10	262	5
20	70	175	0.40	0.049 90	0.002 03	0.357 00	0.013 86	0.051 88	0.000 83	191	92	310	10	326	5
21	78	131	0.60	0.056 24	0.003 31	0.335 49	0.015 96	0.043 29	0.000 94	461	131	294	12	273	6
22	82	507	0.16	0.053 20	0.001 60	0.308 12	0.009 11	0.041 79	0.000 54	345	67	273	7	264	3
23	74	101	0.73	0.050 32	0.002 58	0.364 15	0.018 49	0.052 46	0.000 98	209	119	315	14	330	6
24	60	263	0.23	0.118 26	0.002 16	6.124 94	0.114 81	0.371 47	0.003 72	1 931	32	1 994	16	2 036	18
25	352	419	0.84	0.055 24	0.001 47	0.544 09	0.013 71	0.071 07	0.000 76	420	59	441	9	443	5
26	235	282	0.83	0.125 76	0.002 24	6.753 25	0.143 65	0.386 30	0.006 77	2 039	31	2 080	19	2 106	31
27	39	66	0.59	0.095 40	0.002 27	3.497 73	0.082 93	0.264 16	0.003 10	1 536	40	1 527	19	1 511	16
28	166	232	0.72	0.051 34	0.002 05	0.320 30	0.012 20	0.045 29	0.000 72	257	93	282	9	286	4
29	41	270	0.15	0.049 86	0.001 76	0.275 14	0.010 13	0.039 86	0.000 53	187	114	247	8	252	3
30	128	287	0.45	0.051 14	0.001 93	0.304 55	0.010 62	0.043 03	0.000 56	256	82	270	8	272	3
31	156	129	1.20	0.114 49	0.002 51	5.319 64	0.118 96	0.334 58	0.003 83	1 872	40	1 872	19	1 861	19
32	85	164	0.52	0.052 90	0.002 16	0.305 30	0.011 98	0.042 45	0.000 74	324	93	271	9	268	5
33	145	336	0.43	0.114 05	0.002 19	5.417 26	0.101 82	0.342 36	0.003 89	1 865	34	1 888	16	1 898	19
34	156	499	0.31	0.160 89	0.002 72	9.874 25	0.167 37	0.441 76	0.004 62	2 465	29	2 423	16	2 358	21
35	37	97	0.38	0.051 69	0.002 57	0.343 63	0.015 65	0.049 49	0.000 89	272	118	300	12	311	5
37	146	848	0.17	0.050 34	0.001 14	0.303 31	0.007 13	0.043 35	0.000 51	209	47	269	6	274	3
38	149	762	0.20	0.051 59	0.001 29	0.294 60	0.007 24	0.041 20	0.000 51	333	57	262	6	260	3
39	100	400	0.25	0.112 49	0.002 04	4.937 19	0.087 42	0.316 09	0.003 60	1 840	33	1 809	15	1 771	18
40	34	211	0.16	0.054 80	0.003 37	0.321 82	0.014 87	0.042 98	0.000 92	467	169	283	11	271	6
41	93	1 851	0.05	0.050 58	0.001 16	0.353 62	0.008 00	0.050 22	0.000 62	220	52	307	6	316	4
42	131	223	0.59	0.050 40	0.001 93	0.300 60	0.011 08	0.043 60	0.000 65	213	89	267	9	275	4
43	50	67	0.74	0.171 14	0.003 94	10.823 91	0.255 48	0.445 91	0.007 02	2 569	38	2 508	22	2 377	31
44	98	148	0.66	0.109 98	0.002 10	4.483 59	0.090 72	0.294 52	0.003 49	1 799	34	1 728	17	1 664	17
45	78	297	0.26	0.052 02	0.001 78	0.277 30	0.008 75	0.038 30	0.000 53	287	78	249	7	242	3
46	42	283	0.15	0.054 28	0.002 33	0.314 68	0.013 70	0.042 23	0.000 66	383	96	278	11	267	4
47	70	456	0.15	0.051 76	0.001 63	0.297 00	0.009 35	0.041 67	0.000 57	276	68	264	7	263	4
48	87	579	0.15	0.049 91	0.001 54	0.292 55	0.009 03	0.042 22	0.000 52	191	72	261	7	267	3
49	91	180	0.51	0.055 87	0.002 33	0.369 24	0.015 00	0.047 91	0.000 71	456	94	319	11	302	4
50	137	131	1.05	0.052 91	0.003 35	0.286 09	0.016 39	0.039 15	0.000 72	324	144	255	13	248	4
52	23	297	0.08	0.113 73	0.003 69	5.483 92	0.170 82	0.347 68	0.005 76	1 861	53	1 898	27	1 924	28
53	278	548	0.51	0.050 57	0.002 00	0.268 08	0.010 12	0.038 95	0.000 89	220	91	241	8	246	6
54	97	245	0.40	0.053 37	0.002 93	0.303 41	0.016 08	0.041 85	0.000 77	343	124	269	13	264	5
55	59	328	0.18	0.115 72	0.002 86	5.793 76	0.139 21	0.359 86	0.004 04	1 891	40	1 945	21	1 981	19
56	135	734	0.18	0.056 39	0.001 81	0.329 27	0.010 12	0.042 10	0.000 56	478	72	289	8	266	3
57	85	105	0.82	0.052 62	0.003 59	0.281 59	0.017 39	0.039 25	0.000 82	322	156	252	14	248	5
58	40	315	0.13	0.051 80	0.001 88	0.292 61	0.010 56	0.040 68	0.000 69	276	88	261	8	257	4
59	204	327	0.62	0.050 65	0.003 34	0.277 64	0.017 36	0.039 67	0.000 66	233	154	249	14	251	4

续表 3

测试点	元素含量 (10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄 (Ma)					
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
60	132	241	0.55	0.052 18	0.002 27	0.290 51	0.011 79	0.040 70	0.000 67	300	100	259	9	257	4
61	157	592	0.27	0.053 18	0.001 60	0.294 39	0.008 44	0.040 06	0.000 48	345	67	262	7	253	3
62	89	156	0.57	0.054 30	0.002 58	0.307 09	0.013 63	0.040 48	0.000 67	383	107	272	11	256	4
63	151	375	0.40	0.050 09	0.001 84	0.298 04	0.010 14	0.041 70	0.000 58	198	81	265	8	263	4
64	139	402	0.34	0.113 45	0.002 01	4.344 93	0.079 44	0.275 35	0.003 17	1 855	27	1 702	15	1 568	16
65	139	234	0.59	0.052 37	0.001 99	0.331 73	0.011 67	0.046 33	0.000 75	302	87	291	9	292	5
66	139	822	0.17	0.050 66	0.001 29	0.286 09	0.007 48	0.040 57	0.000 46	233	59	255	6	256	3
67	99	551	0.18	0.052 66	0.001 52	0.298 59	0.007 93	0.041 00	0.000 53	322	67	265	6	259	3
68	22	35	0.63	0.102 16	0.002 91	4.372 24	0.122 93	0.310 48	0.005 19	1 665	53	1 707	23	1 743	26
69	67	635	0.11	0.116 72	0.002 04	5.662 31	0.094 73	0.347 80	0.003 44	1 906	31	1 926	14	1 924	16
70	153	886	0.17	0.051 20	0.001 56	0.296 31	0.007 96	0.040 78	0.000 48	250	64	264	6	258	3
71	28	406	0.07	0.050 54	0.001 91	0.281 52	0.009 85	0.040 39	0.000 59	220	87	252	8	255	4
72	63	155	0.41	0.051 95	0.002 88	0.296 44	0.014 61	0.040 92	0.000 72	283	128	264	11	259	4
74	593	455	1.30	0.051 72	0.001 80	0.319 42	0.011 75	0.044 86	0.000 97	272	80	281	9	283	6
75	78	243	0.32	0.049 18	0.002 15	0.250 87	0.010 21	0.037 09	0.000 66	167	102	227	8	235	4
76	659	878	0.75	0.055 24	0.001 48	0.319 07	0.008 25	0.041 47	0.000 49	420	59	281	6	262	3
77	89	598	0.15	0.051 93	0.001 68	0.278 89	0.009 22	0.038 76	0.000 65	283	74	250	7	245	4
78	249	531	0.47	0.056 92	0.001 74	0.512 51	0.015 28	0.064 72	0.000 83	487	67	420	10	404	5
79	379	397	0.96	0.054 35	0.001 98	0.322 39	0.011 48	0.042 80	0.000 61	387	81	284	9	270	4
80	372	528	0.71	0.059 06	0.002 29	0.326 60	0.012 04	0.039 94	0.000 53	569	83	287	9	252	3
81	130	250	0.52	0.074 58	0.002 20	1.694 24	0.048 08	0.163 05	0.002 13	1 057	59	1 006	18	974	12
82	83	119	0.70	0.055 27	0.002 95	0.372 22	0.017 70	0.049 59	0.000 99	433	120	321	13	312	6
83	112	180	0.62	0.052 87	0.002 61	0.371 80	0.013 68	0.050 13	0.000 86	324	113	321	10	315	5
84	88	200	0.44	0.050 27	0.002 42	0.292 48	0.012 81	0.042 80	0.000 76	206	111	261	10	270	5
85	118	225	0.53	0.052 07	0.002 51	0.309 62	0.014 64	0.043 27	0.000 80	287	111	274	11	273	5
86	159	366	0.44	0.058 51	0.001 72	0.572 22	0.016 72	0.070 49	0.000 98	550	65	459	11	439	6
87	112	113	0.99	0.052 31	0.003 33	0.291 14	0.017 43	0.039 81	0.000 80	298	146	259	14	252	5
88	915	1 992	0.46	0.051 97	0.001 40	0.143 29	0.004 05	0.019 82	0.000 28	283	63	136	4	126	2
89	192	163	1.18	0.053 60	0.003 16	0.298 59	0.016 62	0.041 07	0.000 72	354	133	265	13	259	4
90	61	271	0.22	0.051 42	0.002 70	0.313 28	0.014 67	0.042 56	0.000 60	261	88	277	11	269	4
91	40	322	0.12	0.072 69	0.001 75	1.253 39	0.027 72	0.124 55	0.001 47	1 006	44	825	13	757	8
92	76	198	0.38	0.121 98	0.002 76	6.020 95	0.130 46	0.355 97	0.004 27	1 987	39	1 979	19	1 963	20
93	164	856	0.19	0.052 28	0.001 47	0.310 28	0.008 30	0.042 93	0.000 55	298	65	274	6	271	3
94	42	386	0.11	0.052 09	0.001 55	0.289 96	0.008 98	0.040 27	0.000 54	300	73	259	7	254	3
95	66	109	0.61	0.097 73	0.002 40	3.569 69	0.084 66	0.263 90	0.003 17	1 581	42	1 543	19	1 510	16
96	95	313	0.30	0.054 71	0.001 99	0.319 67	0.011 33	0.042 29	0.000 53	467	81	282	9	267	3
97	131	158	0.83	0.053 25	0.002 55	0.306 37	0.014 43	0.042 17	0.000 78	339	114	271	11	266	5
98	79	297	0.27	0.121 97	0.002 53	5.439 41	0.117 95	0.320 86	0.003 84	1 987	37	1 891	19	1 794	19
100	73	182	0.40	0.116 97	0.002 84	5.039 72	0.119 91	0.310 65	0.003 74	1 910	44	1 826	20	1 744	18
101	318	794	0.40	0.052 10	0.001 80	0.274 94	0.008 95	0.037 39	0.000 54	300	80	247	7	237	3
102	89	197	0.45	0.048 12	0.002 47	0.264 25	0.012 25	0.040 99	0.000 89	106	115	238	10	259	5
103	163	647	0.25	0.052 85	0.001 89	0.287 76	0.009 11	0.038 44	0.000 49	324	114	257	7	243	3
104	24	83	0.28	0.183 93	0.004 96	12.094 93	0.347 57	0.474 04	0.009 49	2 689	44	2 612	27	2 501	42
105	231	620	0.37	0.054 66	0.001 80	0.319 52	0.010 03	0.042 24	0.000 57	398	77	282	8	267	4
106	69	566	0.12	0.049 36	0.001 69	0.277 69	0.009 14	0.040 60	0.000 56	165	80	249	7	257	3
107	118	224	0.53	0.056 04	0.002 71	0.392 06	0.015 10	0.050 84	0.000 92	454	112	336	11	320	6
108	122	189	0.65	0.051 68	0.002 50	0.323 86	0.012 39	0.045 60	0.000 81	272	111	285	10	287	5
109	132	352	0.37	0.137 83	0.003 09	6.369 93	0.143 46	0.330 80	0.004 73	2 211	39	2 028	20	1 842	23
111	254	595	0.43	0.049 81	0.001 65	0.287 61	0.009 05	0.041 49	0.000 73	187	78	257	7	262	4
112	128	293	0.44	0.048 34	0.002 02	0.276 17	0.010 58	0.040 26	0.000 84	122	100	248	8	254	5
113	2 120	1 626	1.30	0.054 70	0.001 68	0.153 24	0.004 82	0.020 06	0.000 39	467	73	145	4	128	2
114	282	288	0.98	0.055 44	0.002 59	0.324 14	0.014 75	0.042 02	0.000 87	432	106	285	11	265	5
115	137	241	0.57	0.055 67	0.002 22	0.598 47	0.022 04	0.074 19	0.001 27	439	89	476	14	461	8
116	75	117	0.64	0.055 50	0.004 31	0.308 69	0.022 46	0.040 53	0.000 90	432	174	273	17	256	6
117	121	385	0.31	0.054 82	0.002 12	0.336 36	0.012 15	0.044 29	0.000 71	406	92	294	9	279	4
118	180	345	0.52	0.054 04	0.003 07	0.287 53	0.013 69	0.038 33	0.000 76	372	128	257	11	242	5
119	96	162	0.60	0.121 14	0.002 36	5.741 52	0.111 59	0.340 57	0.003 98	1 973	34	1 938	17	1 889	19
121	303	999	0.30	0.055 17	0.001 36	0.330 55	0.008 50	0.043 24	0.000 59	420	54	290	6	273	4

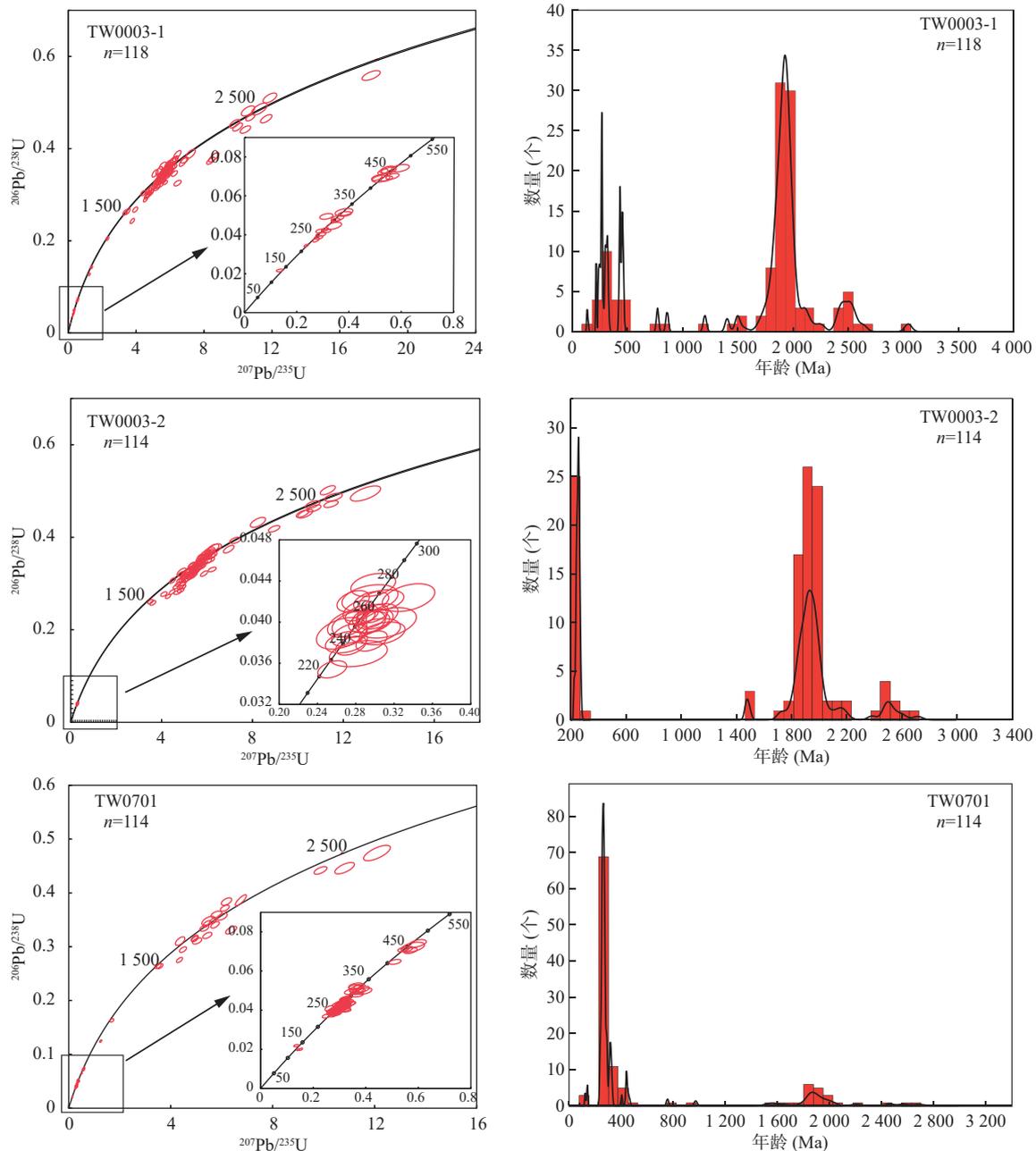


图4 研究区样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图及年龄分布直方图

Fig. 4 U-Pb age covariance plot and age distribution histogram of zircon fragments in the study area

243~321 Ma(皮桥辉等, 2010; 于延秋, 2011; 胡鸿飞等, 2013; 吴亚飞等, 2013), 亦与研究区内的沉积碎屑在年代学方面显示很好的相关性。此外, 本次还获得了部分 824~859 Ma 的锆石年龄, 与该隆起 816~805 Ma 的变质酸性火山岩(彭润民等, 2010)对应, 利用索伦山隆起和狼山-白云鄂博隆起锆石年龄分布情况与本次所获得的样品 TW0701 碎屑锆石年龄分布特征对比可以看出(图 6c、图 6d), 下白垩统巴彦花组上部砂岩碎屑锆石年龄表现为一个主峰和一个次峰(图 6c), 这

与其周边的索隆山隆起和狼山-白云鄂博隆起的锆石年龄分布相近(图 6d), 显示了两者之间具有较好的亲源性。坳陷西部的宝音图隆起发育的岩浆岩主要为经变质的基性岩、中性岩和部分酸性岩, 这些变质岩浆岩的原岩年代学研究显示其主要形成于古元古代(徐备等, 2000; 孙立新等, 2013; 滕飞等, 2019), 其年龄主要表现出一个 1700~1900 Ma 的主峰和一个 2400~2600 Ma 次峰(图 6b), 与本次所获得的巴彦花组下部砂岩碎屑锆石年龄分布特征相近(图 6a), 对比

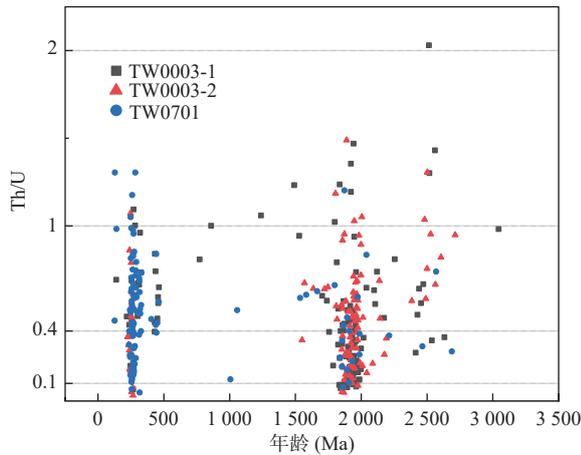


图5 研究区碎屑锆石年龄与 Th/U 值关系图

Fig. 5 Relationship between the age of detrital zircons and Th/U values in the study area

其锆石形态特征及锆石 Th/U 特征,可以发现宝音图隆起可能是巴彦花组下部砂岩物源的主要供给区。此外,巴彦花组下部砂岩碎屑锆石年龄分布特征显示其还具有一个 200~300 Ma 的次峰,该峰所指示的特征与索伦山隆起和狼山-白云鄂博隆起的锆石年龄分

布特征相近,表明以上两个隆起区极大可能为该组下部也提供了部分物源。

综上所述,川井坳陷具有多物源特征,其中巴彦花组下部物源可能主要来自于现今地理位置西部的宝音图隆起,少部分来自于索伦山隆起与狼山-白云鄂博隆起;巴彦花组上部物源可能主要来自于索伦山隆起与狼山-白云鄂博隆起,指示早白垩时期研究区内沉积碎屑物质来源发生相应变化,为进一步研究川井坳陷下白垩统巴彦花组沉积碎屑物质来源及相应时期古环境变化提供了有力依据。

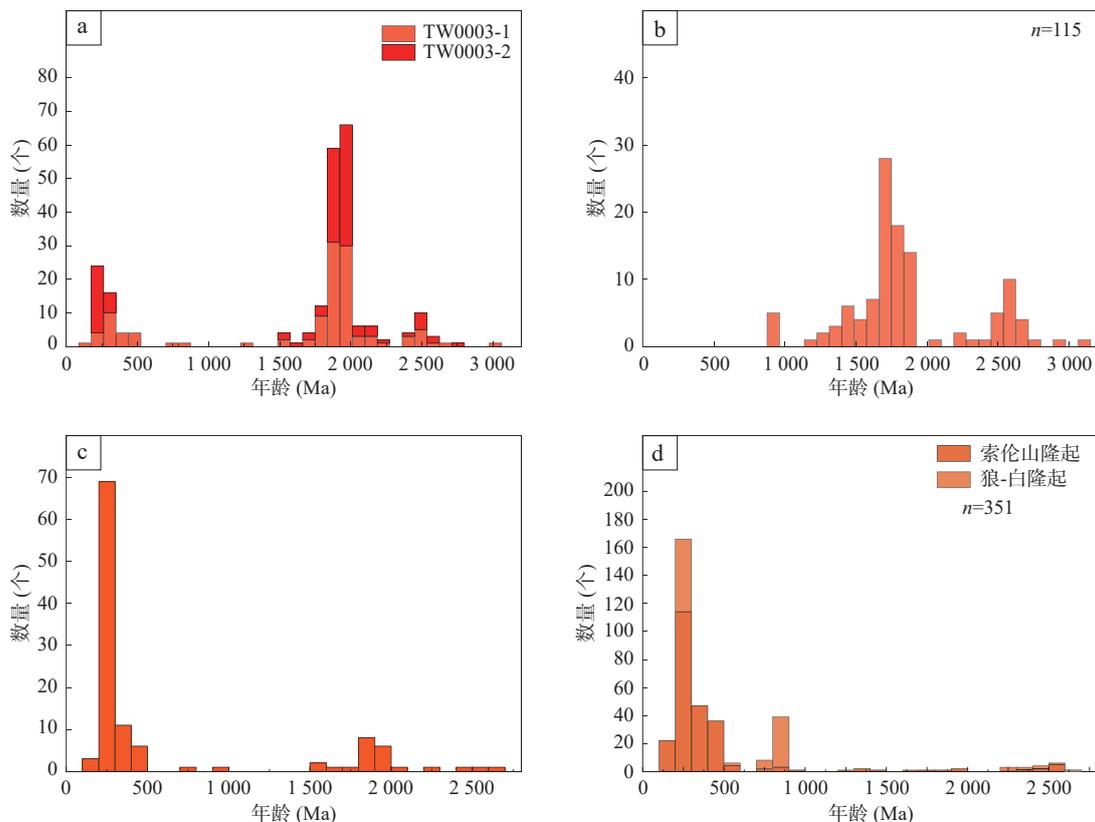
4.2 对川井坳陷砂岩型铀矿勘查的意义

对于砂岩型铀矿而言,其成矿物质主要来源于具有较高放射性 U 元素含量的中酸性岩浆岩、古老变质岩系(李姣莉等, 2023)。通过对川井坳陷周边各隆起的研究认为,其 U 含量为 $3.2 \times 10^{-6} \sim 5.1 \times 10^{-6}$, Th/U 为 4.1~5.2,且具有明显的 U 迁出特征,是坳陷内铀矿的重要铀源(彭云彪等, 2018)。结合上述对下白垩统巴彦花组物源的讨论,可以认为该组具有较好的铀矿成矿潜力。通过对研究区多个机械岩心钻孔的综合测

表 4 研究区周边各隆起岩石年代学研究成果

Tab. 4 Chronology research results of uplifts around the study area

隆起区	岩性	测试方法	年龄 (Ma)	数据来源
索伦山隆起	辉长岩	SHRIMP 锆石 U-Pb、Ar-Ar	295~298	Miao et al., 2008
	辉长岩、斜长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	284~288	Jian et al., 2010
	纯橄岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	354~333	Jian et al., 2012
	辉长岩、玄武岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	278.5、273.7	Chen et al., 2012
	玄武岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	246~261	Chu et al., 2013
	基性岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	277	王炎阳等, 2014
	玄武岩、辉长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	276~273	柳志华等, 2020
狼山-白云鄂博隆起	辉长闪长岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	273.9	皮桥辉等, 2010
	变质酸性火山岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	816.9~805	彭润民等, 2010
	花岗闪长岩、黑云母花岗岩	锆石 U-Pb 法	243~272	于延秋, 2011
	白云母二长花岗岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	259.4	吴亚飞等, 2013
宝音图隆起	闪长岩	TMS 锆石 U-Pb 法	321~304	胡鸿飞等, 2013
	斜长角闪片岩	Sm-Nd 全岩等时线	2485	徐备等, 2000
		Rb-Sr 全岩等时线	623	
	变质基性岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	895.5	滕飞等, 2019
	石英岩	LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 法	1284、1319、1395	
	基性火山岩	Sm-Nd 全岩等时线	2496、2486	孙立新等, 2013
	片麻状二长花岗岩	SHRIMP 锆石 U-Pb	1672	



a. 样品 TW0003-1 和 TW0003-2 碎屑锆石年龄直方图; b. 宝音图隆起岩浆岩年龄直方图 (数据源自孙立新等, 2013; 滕飞等, 2019); c. 样品 TW0701 碎屑锆石年龄直方图; d. 索伦山隆起和狼山—白云鄂博隆起岩浆岩年龄直方图, (数据源自 Miao et al., 2008; Jian et al., 2010; 皮桥辉等, 2010; 彭润民等, 2010; Chen et al., 2012; Jian et al., 2012; Chu et al., 2013; 吴亚飞等, 2013; 王炎阳等, 2014; 柳志华等, 2020)

图 6 下白垩统巴彦花组砂岩碎屑锆石与潜在源区锆石年龄直方图

Fig. 6 Ages histogram of detrital zircons and potential source zircons from the lower cretaceous Bayanhua formation sandstones

井(表 5)发现, 巴彦花组整体 $\omega_{(U)} \geq 0.5 \times 10^{-4}$, 其下部 $\omega_{(U)} \geq 3 \times 10^{-4}$, 与该组上部相比有较高的 $\omega_{(U)}$, 指示研究区富铀层为巴彦花组下部(图 7)。这是由于下白垩统巴彦花组砂体发育, 水动力较强, 且 U 元素相对于其他元素活泼, 在氧化环境下 U 元素极易发生氧化反应, 进而使得其随水发生迁移。川井地区早白垩世经历了干旱、温湿、半干旱过渡性气候、干旱 4 个阶段(陈功等, 1997)。在温湿气候阶段, 研究区巴彦花组下部以河流相—河湖相沉积为主, 致使在该时期形成厚度 40~60 m 富含有机质碳屑、碳化植物碎屑及少量黄铁矿的湖相沉积, 其良好的还原性为随水动力发生迁移至此的富 U 碎屑物中 U 元素的富集提供了有利的环境(徐阳等, 2020)。巴彦花组上部主要为干旱氧化沉积环境下形成的灰色、灰白色及局部灰黄色的碎屑岩, 这种还原—氧化环境的变化为 U 元素的迁移和富集提供了良好的地球化学环境。其次, 巴彦花组上部—二连组下部发育的稳定砖红泥岩与巴彦花组下部泥岩

表 5 研究区钻孔综合测井数据表

Tab. 5 Comprehensive logging data of boreholes in the study area

钻孔编号	深度(m)	$\omega_{(U)} (10^{-4})$	数据来源
1ZK0003	55~78	≥ 0.5	本研究
	80~103	≥ 2.0	本研究
1ZK0005	57~65	≥ 0.5	本研究
1ZK0701	70~72	≥ 0.5	本研究
	80~84	≥ 3.0	本研究
1ZK0702	51~53	≥ 0.5	本研究
	72~79	≥ 0.5	本研究
	92~96	≥ 1.0	本研究
1ZK0705	32~40	≥ 0.5	本研究
	65~77	≥ 0.8	本研究

和上部砂岩构成了稳定的泥—砂—泥结构为铀成矿提供了有利成矿空间(李成元等, 2023)。通过对巴彦花

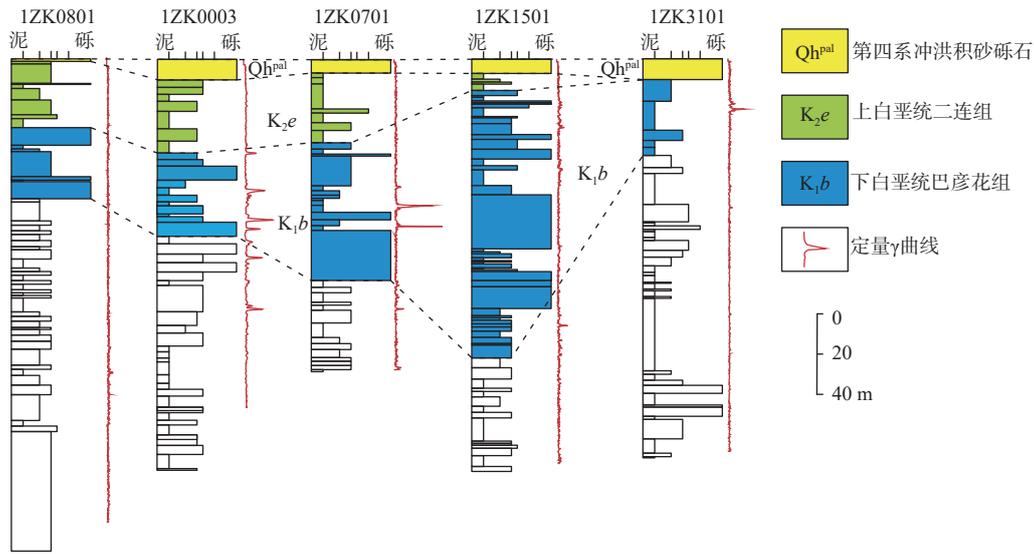


图7 研究区已施工钻孔剖面图

Fig. 7 Cross section of drilled holes constructed in the research area

组碎屑锆石的研究表明,其碎屑物的物源主要为川井坳陷周边各隆起具有较高放射性U元素含量的中酸性岩浆岩和古老变质岩系,这为铀成矿提供了丰富的成矿物质来源。因此,可以认为该组是研究区内一个良好的找矿目的层。

综合以上特征,对比二连盆地其他坳陷,川井坳陷砂岩型铀矿整体勘查程度相对较低。但通过近几年的勘查成果显示,该区具有多个矿化点或异常区,研究区及其周边可能具有砂岩型铀矿的资源潜力。

5 结论

(1)川井地区早白垩世巴彦花组碎屑锆石年龄显示,其主要包含晚二叠世—晚石炭世和古元古代两个年龄峰值。

(2)巴彦花组上、下段具有不同的物质来源,其下部主要由前寒武酸性岩浆岩为其提供物源,其上部主要由晚二叠世—晚石炭世索伦山隆起与狼山—白云鄂博隆起等为其提供沉积物质来源。

(3)研究区内钻孔综合测井数据显示,巴彦花组整体 $\omega_{(U)} \geq 0.5 \times 10^{-4}$,其下部 $\omega_{(U)} \geq 3 \times 10^{-4}$,指示区内主要含矿层位于巴彦花组下部,为后续区内砂岩型铀矿勘查方向提供了依据。

致谢: 本文写作得到了中国地质大学(北京)申俊峰教授和中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心矿产资源调查室副主任杨彪的帮助与指导,在此表示由衷的感谢; 感谢匿名审稿人对本文提出

的宝贵建议与意见。

参考文献(References):

- 陈功, 邓金贵, 张克芳, 等. 二连盆地及邻区铀成矿地质条件及成矿远景评价[J]. 中国核科技报告, 1997, 1-12.
- CHEN Gong, DENG Jingui, ZHANG Kefang, et al. Evaluation on Uranium Mineralizing Geological Conditions and Prospect in Erlian Basin and Its Adjacent Area[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 1997, 1-12.
- 崔永谦, 刘喜恒, 孙朝辉, 等. 内蒙古二连盆地深层地球物理特征和上古生界的地质结构[J]. 地质通报, 2011, 30(2-3): 265-272.
- CUI Yongqian, LIU Xiheng, SUN Zhaohui, et al. The Deep physical geographic characteristics and Neopaleozoic geological structural exploration of Erlian basin, Inner Mongolia, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(2-3): 265-272.
- 代新宇, 周斌, 李新林, 等. 西昆仑奇台达坂北中新世石英二长岩侵入岩年代学、地球化学及其构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 191-205.
- DAI Xinyu, ZHOU Bin, LI Xinlin, et al. Geochronology, Geochemistry and Tectonic Significance of Miocene Quartz Monzonite from the Northern of Qitai Mountain in Western Kunlun[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 191-205.
- 冯雪东, 吕洪波, 张海春, 等. 乌拉特后旗测老庙坳陷早白垩世古流向分析[J]. 地质论评, 2017, 63(2): 277-286.
- FENG Xuedong, LV Hongbo, ZHANG Haichun, et al. An Analysis on the Early Cretaceous Paleocurrent Direction in the Celao-miao Depression, Urad Rear Banner, Inner Mongolia, China[J]. Geological Review, 2017, 63(2): 277-286.
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 等. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定[J]. 地质通报, 2011, 30(10): 1508-1513.
- GENG Jianzhen, LI Huaishem, ZHANG Jian, et al. Zircon Hf iso-

- tope analysis by means of LA-MC-ICP-MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 2011, 30(10): 1508–1513.
- 耿元生, 杨崇辉, 万渝生. 吕梁地区古元古代花岗岩浆作—来自同位素年代学的证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(2): 305–314.
- GENG Yuansheng, YANG Chonghui, WAN Yusheng. Paleoproterozoic granitic magmatism in the Lvliang area, North China Craton: constraint from geochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(2): 305–314.
- 胡鸿飞, 张永全, 胡华斌, 等. 内蒙古滴水沟闪长岩体地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2013, 27(6): 1308–1315.
- HU Hongfei, ZHANG Yongquan, HU Huabin, et al. Geochemical Characteristics of Dishuigou Diorite in Inner Mongolia and Its Geological Significance[J]. *Geoscience*, 2013, 27(6): 1308–1315.
- 黄广文, 薛完文, 潘家永, 等. 伊犁盆地蒙古尔砂岩型铀矿源区体系与构造背景分析——来自碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2018, 42(6): 1108–1141.
- HUANG Guangwen, XUE Wanwen, PAN Jiayong, et al. Provenance and Tectonic Setting of Sandstones in the Mengqiguer Sandstone-type Uranium Deposit, Yili Basin: Evidence from Zircon U-Pb Chronology[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2018, 42(6): 1108–1141.
- 李保侠, 郑克文, 魏观辉. 二连盆地川井坳陷铀成矿环境及成矿有利地段研究[J]. *铀矿地质*, 2002, 18(2): 77–84.
- LI Baoxia, ZHEN Kewen, WEI Guanhui. Study of uranium metallogenetic circumstance and metallogenetic prospective area selection in Chuanjin depression, Erlian basin[J]. *Uranium Geology*, 2002, 18(2): 77–84.
- 李成元, 薄海军, 李钢柱, 等. 川井坳陷砂岩型铀矿含矿地层孢粉组合及古气候意义[J]. *地质学报*, 2023, 97(4): 1262–1277.
- LI Chengyuan, BO Haijun, LI Gangzhu, et al. Palynomorph assemblage of ore-bearing strata for sandstone type uranium deposit in Chuanjing depression and its paleoclimatic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(4): 1262–1277.
- 李洪军, 申科峰, 聂逢君, 等. 二连盆地中生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): 302–309.
- LI Hongjun, SHEN Kefeng, NIE Fengjun, et al. Sedimentary evolution in meso-cenozoic and uranium mineralization of Erlian basin[J]. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 2012, 35(4): 302–309.
- 李姣莉, 王建强, 彭恒, 等. 鄂尔多斯盆地南部白垩统宜君组碎屑锆石 U-Pb 年龄及物源意义[J]. *沉积学报*, 2023, 41(5): 1609–1623.
- LI Jiaoli, WANG Jianqiang, PENG Heng, et al. Detrital Zircon U-Pb Dating and Provenance Significance of the Lower Cretaceous Yijun Formation in the Southern Ordos Basin[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(5): 1609–1623.
- 李夔洲, 侯明才, 赵子霖, 等. 扬子陆块北缘大洪山地区莲沱组物源分析: 来自沉积学和碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据[J/OL]. *沉积学报*, 2023, 1–17. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.095.
- LI Kuizhou, HOU Mingcai, ZHAO Zilin, et al. Provenance analysis of the Liantuo Formation in Dahongshan area, the northern Yangtze Block: evidence from sedimentology and detrital zircon U-Pb chronology[J/OL]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 1–17. DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2023.095.
- 李彤, 俞初安, 杨桐旭, 等. 二连盆地西部白彦花地区砂岩型铀矿地质特征及控矿因素分析[J]. *华北地质*, 2022, 45(4): 38–47.
- LI Tong, YU Reng'an, YANG Tongxu, et al. Geological characteristics and ore control factors of sandstone-type uranium deposits in Baiyanhua area of Western Erlian Basin[J]. *North China Geology*, 2022, 45(4): 38–47.
- 李伟涛, 李子颖, 康世虎, 等. 二连盆地哈达图铀矿床的赋存状态研究[J]. *地质论评*, 2019, 65(S1): 157–158.
- LI Weitao, LI Ziyang, KANG Shihu, et al. Study on uranium occurrences in Hadatu uranium deposit, Erlian Basin[J]. *Geological Review*, 2019, 65(S1): 157–158.
- LI Wenguo. Lithostratigraphy of Inner Mongolia[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- 李西得, 孙祥, 邱林飞, 等. 川井坳陷赛汉组沉积物源分析及其对砂岩型铀成矿的控制作用[J]. *南华大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(1): 66–71.
- LI Xide, SUN Xiang, QIU Linfei, et al. Sediment Source Analysis of Saihan Formation in Chuanjing Depression and Its Impact on Sandstone Type Uranium Mineralization[J]. *Journal of University of South China (Science and Technology)*, 2022, 36(1): 66–71.
- 李先平, 张少华, 李林波, 等. 二连盆地早白垩世断陷及基底构造的耦合性[J]. *地质科学*, 2015, 50(1): 88–99.
- LI Xianping, ZHANG Shaohua, LI Linbo, et al. Coupling of faulted sags to basement in the Early Cretaceous Erlian Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(1): 88–99.
- 刘波, 杨建新, 彭云彪, 等. 二连盆地中东部含铀古河谷构造建造及典型矿床成矿模式研究[J]. *矿床地质*, 2017, 36(1): 126–142.
- LIU Bo, YANG Jianxin, PENG Yunbiao, et al. Study of structure and formation in uranium-bearing paleo-valley and typical metallogenetic models in eastern part of Erlian Basin[J]. *Mineral Deposits*, 2017, 36(1): 126–142.
- 刘波, 杨建新, 秦彦伟, 等. 二连盆地中东部赛汉组古河谷砂岩型铀矿床控矿成因相研究[J]. *地质与勘探*, 2016, 52(6): 1037–1047.
- LIU Bo, YANG Jianxin, QIN Yanwei, et al. Research on the ore-controlling genetic facies of the sandstone type uranium deposits in the paleovalley of Saihan Formation of the Erlian Basin[J]. *Geology and Exploration*, 2016, 52(6): 1037–1047.
- 刘佳林, 刘武生, 虞航, 等. 二连盆地巴彦乌拉铀矿区花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素特征及地质意义[J]. *地质通报*, 2020, 39(8): 1285–1295.
- LIU Jialin, LIU Wusheng, YU Hang, et al. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of the granites from Bayanwula area and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(8): 1285–1295.
- 刘昊, 崔军平, 金玮, 等. 松辽盆地东部地区花岗岩地球化学特征及其地质意义[J]. *西北地质*, 2024, 57(2): 46–58.

- LIU Hao, CUI Junping, JIN Wei, et al. Geochemical Characteristics and Geological Significance of Granites in Eastern Songliao Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(2): 46–58.
- 刘佳林, 刘武生, 虞航, 等. 二连盆地中部白垩系赛汉组碎屑锆石 U-Pb 年代学及地质意义[J]. *地质论评*, 2019, 65(S1): 73–74.
- LIU Jialin, LIU Wusheng, YU Hang, et al. U-Pb geochronology of detrital zircons from the Cretaceous Saihan formation in the middle of the Erlian Basin and its geological implications[J]. *Geological Review*, 2019, 65(S1): 73–74.
- 柳志华, 顾雪祥, 章永梅, 等. 内蒙古索伦山蛇绿岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. *现代地质*, 2020, 34(3): 399–417.
- LIU Zhihua, GU Xuexiang, ZHANG Yongmei, et al. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry Characteristics and Geological Significance of the Solonker Ophiolite, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 2020, 34(3): 399–417.
- 苗全芸, 漆家福, 肖阳, 等. 二连盆地乌尼特拗陷伸展构造特征及成盆演化[J]. *中国地质*, 2016, 43(6): 2036–2045.
- MIAO Quanyun, QI Jiafu, XIAO Yang, et al. Extensional structures and basin evolution of the Wunite depression in Erlian Basin[J]. *Geology in China*, 2016, 43(6): 2036–2045.
- 苗全芸, 漆家福, 肖阳, 等. 二连盆地乌尼特拗陷早白垩世构造特征—深部构造与浅部构造的关联[J]. *地质科学*, 2015, 50(2): 553–563.
- MIAO Quanyun, QI Jiafu, XIAO Yang, et al. Early Cretaceous structural feature of the Wunite depression in Erlian Basin: A connection between deep-level and shallow-level structures[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2015, 50(2): 553–563.
- 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.
- 彭润民, 翟裕生, 王建平, 等. 内蒙狼山新元古代酸性火山岩的发现及其地质意义[J]. *科学通报*, 2010, 55(26): 2611–2620.
- PENG Runming, ZHAI Yusheng, WANG Jianping, et al. Discovery of Neoproterozoic acid volcanic rock in the western section of Langshan, Inner Mongolia, and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(26): 2611–2620.
- 彭云彪, 刘波, 秦彦伟, 等. 二连盆地川井拗陷构造演化对砂岩型铀矿成矿作用的约束[J]. *地质与勘探*, 2018, 54(5): 917–928.
- PENG Yunbiao, LIU Bo, QIN Yanwei, et al. Constraints of tectonic evolution on sandstone-type uranium metallogenesis in the Chuanjin depression, Erlian basin[J]. *Geology and Exploration*, 2018, 54(5): 917–928.
- 彭云彪, 鲁超. 二连盆地乌兰察布拗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 Ulancharu Depression, Erlian Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(3): 46–57.
- 皮桥辉, 刘长征, 陈岳龙, 等. 内蒙古霍各乞海西期侵入岩形成时代、成因及其与铜矿体的关系[J]. *矿床地质*, 2010, 29(3): 437–451.
- PI Qiaohui, LIU Changzheng, CHEN Yuelong, et al. Formation epoch and genesis of intrusive rocks in Huogeqi orefield of Inner Mongolia and their relationship with copper mineralization[J]. *Mineral Deposits*, 2010, 29(3): 437–451.
- 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, DIAO Xianzheng, LI Xianping, et al. The distribution of Early Cretaceous faulted sags and their relationship with basement structure within Erlian Basin. [J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(3): 118–128.
- 宋景明, 金凤鸣, 王玉青, 等. 二连盆地重磁异常地质意义及上古生界结构认识[J]. *石油地球物理勘探*, 2012, 47(S1): 140–146.
- SONG Jingming, JIN Fengming, WANG Yuqing, et al. Geological implications of gravity and magnetic anomalies in Erlian Basin and understanding of Upper Paleozoic structures[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2012, 47(S1): 140–146.
- 孙立新, 赵凤清, 王惠初, 等. 内蒙古狼山地区宝音图地块变质基底的锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. *地质学报*, 2013, 87(2): 197–207.
- SUN Lixin, ZHAO Fengqing, WANG Huichu, et al. Zircon U Pb Geochronology of Metabase Rocks from the Baoyintu Block in the Langshan Area Inner Mongolia and Its Tectonic Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(2): 197–207.
- 滕飞, 滕学建, 刘洋, 等. 内蒙古宝音图-霍各乞地区宝音图岩群的时代约束及构造属性[J]. *地球科学*, 2019, 44(1): 161–178.
- TENG Fei, TENG Xuejian, LIU Yang, et al. Geochronological Constraint on the Baoyintu Group and Its Tectonic Significance in Baoyintu-Huogeqi Area, Inner Mongolia[J]. *Earth Science*, 2019, 44(1): 161–178.
- 王炎阳, 徐备, 程胜东, 等. 内蒙古克什克腾旗五道石门基性火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2014, 30(7): 2055–2061.
- WANG Yanyang, XU Bei, CHENG Shengdong, et al. Zircon U-Pb dating of the mafic lava from Wudaoshimen, Hexigten, Inner Mongolia and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(7): 2055–2061.
- 卫三元, 秦明宽, 李月湘, 等. 二连盆地晚中生代以来构造沉积演化与铀成矿作用[J]. *铀矿地质*, 2006, 22(2): 76–81.
- WEI Sanyuan, QIN Mingkuan, LI Yuexiang, et al. Tectono sedimentary evolution of Erlian basin since Late Mesozoic and sandstone hosted uranium metallogenesis[J]. *Uranium Geology*, 2006, 22(2): 76–81.
- 吴亚飞, 曾键年, 曹建劲, 等. 内蒙古东升庙海西期岩体锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素特征[J]. *地质科技情报*, 2013, 32(6): 22–30.
- WU Yafei, ZENG Jiannian, CAO Jianjin, et al. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes of Hercynian Intrusion in Dongshenmiao, Inner Mongolia[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2013, 32(6): 22–30.

- 徐备, 刘树文, 王长秋, 等. 内蒙古西北部宝音图群 Sm-Nd 和 Rb-Sr 地质年代学研究[J]. 地质论评, 2000, 46(1): 86-90.
- XU Bei, LIU Shuwen, WANG Changqiu, et al. Sm-Nd, Rb-Sr Geochronology of the Baoyintu Group in Northwestern Inner Mongolia[J]. Geological Review, 2000, 46(1): 86-90.
- 徐阳, 凌明星, 薛硕, 等. 鄂尔多斯盆地双龙地区砂岩型铀矿富集、迁移和成矿机制[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(5): 937-957.
- XU Yang, LING Mingxing, XUE Shuo, et al. Enrichment, Transportation and Ore Forming Mechanism of Sandstone-type Uranium Deposits in Shuanglong Area, Ordos Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(5): 937-957.
- 杨济远, 李杰, 白春东, 等. 冀西北宣化盆地侏罗纪九龙山组凝灰岩形成时代、构造环境及地质意义[J]. 西北地质, 2023, 56(6): 314-328.
- YANG Jiyuan, LI Jie, BAI Chundong, et al. Formation Age, Tectonic Setting and Geological Significance of The Jurassic Jiulongshan Formation Tuff in Xuanhua Basin, Northwest Hebei[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(6): 314-328.
- 于延秋, 郭守钰, 王立峰. 内蒙古狼山浩日格山海西期花岗岩体特征与形成环境[J]. 世界地质, 2011, 30(3): 345-351.
- YU Yanqiu, GUO Shouyu, WANG Lifeng. Characteristics and formation environment of Hercynian granites in Haorigeshan of Langshan, Inner Mongolia[J]. Global Geology, 2011, 30(3): 345-351.
- 张国仁, 江淑娥, 杨占兴, 等. 辽宁寒岭—偏岭平移断裂带特征及其形成动力机制[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 183-192.
- ZHANG Guoren, JIANG Shu'e, YANG Zhanxing, et al. The features for mechanism of the Hanling-Pianling strike slip fault zone in Liaoning Province, Northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 183-192.
- 张以明, 刘震, 付升, 等. 二连盆地基底特征及演化新认识[J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(2): 404-416.
- ZHANG Yiming, LIU Zhen, FU Sheng, et al. New understandings of the basement characteristics and evolution process of Erlian Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(2): 404-416.
- 赵兴齐, 秦明宽, 范洪海, 等. 内蒙古二连盆地中部古河道型铀矿床中烃类流体特征与铀成矿关系[J]. 地球学报, 2019, 40(3): 405-415.
- ZHAO Xingqi, QIN Mingkuan, FAN Honghai, et al. Relationship between Uranium Mineralization and Hydrocarbon Fluids Characteristics in Paleo-channel Uranium Deposits of Central Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2019, 40(3): 405-415.
- 周瑞. 华北中北部晚古生代末期-早中生代沉积与构造作用的关系研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- ZHOU Rui. Study on the Relationship between Sedimentation and Tectonism of Late Paleozoic- Early Mesozoic Sediments in the North-central North China Craton[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- Chen Bin, Jahn Bor-ming, TIAN Wei. Evolution of the Solonker suture zone: Constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd-Sr isotope compositions of subduction- and collision-related magmas and forearc sediments[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 34(3): 245-257.
- Chen Chen, Zhang Zhicheng, Guo Zhaojie. Geochronology, geochemistry, and its geological significance of the Permian Mandala mafic rocks in Damaoqi, Inner Mongolia[J]. Science China Earth Sciences, 2012, 55(1): 39-52.
- Chu Hang, Zhang Jinrui, Wei Chunjing. A new interpretation of the tectonic setting and age of meta-basic volcanics in the Ondor Sum Group, Inner Mongolia[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(28-29): 3580-3587.
- Jian Ping, Alfred Kröner, Brian F Windley. Carboniferous and Cretaceous mafic-ultramafic massifs in Inner Mongolia (China): A SHRIMP zircon and geochemical study of the previously presumed integral "Hegenshan ophiolite"[J]. Lithos, 2012, 142-143: 48-66.
- Jian Ping, Liu Dunyi, Alfred Kröner, 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.
- Miao Laicheng, Fan Weiming, Liu Dunyi, et al. Geochronology and geochemistry of the Hegenshan ophiolitic complex: Implications for late-stage tectonic evolution of the Inner Mongolia-Daxinganling Orogenic Belt, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2008, 32(5-6): 348-370.
- Ren Qiang, Zhang Shihong, Wu Huaichun, et al. Further paleomagnetic results from the ~155 Ma Tiaojishan Formation, Yanshan Belt, North China, and their implications for the tectonic evolution of the Mongol-Okhotsk suture[J]. Gondwana Research, 2016, 35: 180-191.
- Wang Yongchao, Dong Shuwen, Shi Wei, et al. The Jurassic structural evolution of the western Daqingshan area, eastern Yinshan belt, North China[J]. International Geology Review, 2017, 59(15): 1885-1907.
- Wu Fuyuan, Sun Deyou, Ge Wenchun, et al. Geochronology of the Phanerozoic granitoids in northeastern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(1): 1-30.