

文章编号: 1671-1505(2026)03-0949-21 DOI:10.7605/gdxb.2026.110

# 柴西北晚新生代沉积源区分析： 来自碎屑锆石U-Pb年龄及 Hf 同位素的约束\*

肖梦晗 郑绵平 张永生 侯献华 施林峰

中国地质科学院矿产资源研究所，自然资源部盐湖资源与环境重点实验室，北京 100037

**摘要** 柴达木盆地处于青藏高原东北缘，其特殊的地层岩性及沉积特征反映了复杂的盆山系统和多种物源区成因。柴达木盆地西北部大浪滩—黑北凹地发育一套巨厚的晚新生代砂砾石沉积层系，为新型“砂砾型”卤水钾盐矿赋存地层。本研究选取大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井不同埋深的 7 个砂岩样品进行了碎屑锆石 U-Pb 年代学、锆石微量元素特征分析与 Lu-Hf 同位素研究。结果表明，研究区碎屑锆石以岩浆成因为主，Th/U 值为 0.02~1.26，稀土元素配分模式呈现重稀土元素相对富集、显著 Eu 负异常和 Ce 正异常。碎屑锆石 U-Pb 年龄总体介于 213.9~3307 Ma 之间，主要包括 4 组年龄，分别是：200~300 Ma，330~510 Ma，740~990 Ma，1.1~3.3 Ga。通过与周缘潜在源区对比发现，柴钾 2 井七个泉组物源以东昆仑祁漫塔格为主，柴钾 3 井七个泉组主要受阿尔金山和柴北缘共同影响；狮子沟组表现出更明显的多源混合特征，其中柴钾 2 井狮子沟组反映东昆仑祁漫塔格、柴北缘、南祁连山和阿尔金山共同供源，柴钾 3 井狮子沟组则以东昆仑祁漫塔格物源为主，同时接受阿尔金山和柴北缘的部分输入。总体上，柴钾 2 井、柴钾 3 井之间的物源差异反映出山前冲洪积扇相沉积体系的横向分异与晚新生代构造活动增强共同控制。研究结果可为阿尔金山及青藏高原北缘快速隆升提供可靠的年龄证据，对探索柴达木盆地“砂砾型”含钾卤水资源提供了新的年代制约。

**关键词** 锆石 U-Pb 年龄 Hf 同位素 LA-ICP-MS 物源分析 柴达木盆地

**第一作者简介** 肖梦晗，女，1999 年生，博士研究生，主要从事盐湖学与古地磁学研究。E-mail: xiaomenghan4869@163.com。

**通讯作者简介** 张永生，男，1963 年生，博士，研究员，博士生导师，主要从事盐类矿床地质与“油钾兼探”研究。E-mail: zys\_601@126.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

## Provenance analysis of the Late Cenozoic sediments in Dalangtan area, northwestern Qaidam Basin: evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopes

XIAO Menghan ZHENG Mianping ZHANG Yongsheng HOU Xianhua SHI Linfeng

MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources,  
Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

\* 国家重点研发计划项目 (编号: 2023YFC2906501) 和中国地质调查局地质调查项目 (编号: DD20230755) 联合资助。[Co-funded by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFC2906501) and the Geological Survey Project of the China Geological Survey (No. DD20230755)]

收稿日期: 2026-02-27 改回日期: 2026-04-15

**Abstract** The Qaidam Basin, on the northeastern margin of the Tibetan Plateau, preserves distinctive stratigraphic and sedimentary records of a complex basin-mountain system and multiple provenance sources. In the Dalangtan-Heibei sag of the northwestern basin, a thick Late Cenozoic gravel succession hosts a newly recognized gravel-type potash-bearing brine deposit. In this study, seven sandstone samples from different depths in boreholes CJ-2 and CJ-3 were analyzed for detrital zircon U-Pb geochronology, trace elements, and Lu-Hf isotopes. The detrital zircons are predominantly magmatic in origin, with Th/U ratios of 0.02–1.26 and REE patterns characterized by HREE enrichment, pronounced negative Eu anomalies, and positive Ce anomalies. U-Pb ages range from 213.9 to 3307 Ma and define four main age groups: 200–300 Ma, 330–510 Ma, 740–990 Ma, and 1.1–3.3 Ga. Provenance comparison shows that the Qigequan Formation in borehole CJ-2 was sourced mainly from the East Kunlun-Qimantagh, whereas that in borehole CJ-3 was influenced chiefly by the Altyn Tagh and the northern Qaidam margin. The Shizigou Formation shows stronger multi-source mixing: in borehole CJ-2 it records contributions from the East Kunlun-Qimantagh, northern Qaidam margin, South Qilian Mountains, and Altyn Tagh, whereas in borehole CJ-3 it was derived mainly from the East Kunlun-Qimantagh, with subordinate input from the Altyn Tagh and northern Qaidam margin. These inter-well provenance differences reflect the combined effects of lateral differentiation within the piedmont alluvial-proluvial fan system and intensified Late Cenozoic tectonic activity. The results can provide reliable age evidence for the rapid uplift of the Altun Mountains and the northern margin of the Tibetan Plateau, and offer new age constraints for exploring the gravel type potassium-bearing brine resources in the Dalangtan-Heibei sag of Qaidam Basin.

**Key words** Zircon U-Pb dating, Hf isotopic, LA-ICP-MS, provenance analysis, Qaidam Basin

**About the first author** XIAO Menghan, born in 1999, Ph.D. candidate, is primarily engaged in researches on salinology and paleomagnetism. E-mail: xiaomenghan4869@163.com.

**About the corresponding author** ZHANG Yongsheng, born in 1963, Ph.D., researcher and Ph.D. supervisor, is primarily engaged in researches on the geology of salt deposits and “oil-potash dual exploration”. E-mail: zys\_601@126.com.

柴达木盆地是青藏高原东北部最大的高海拔陆相盆地 (Hanson *et al.*, 2001; Cao *et al.*, 2008), 新生代沉积序列厚度较大, 平均厚度达 8 km (Xia *et al.*, 2001)。这一沉积序列保存了柴达木盆地及周边地区新生代构造的详细证据, 记录了重要的地质事件, 如印度板块和欧亚板块的碰撞 (Yin and Harrison, 2000; Royden *et al.*, 2008)、青藏高原的形成和隆升 (Harrison *et al.*, 1992; Clark, 2011)、盆地周缘的阿尔金山、南祁连山以及东昆仑山的变形和隆升等 (陈宣华等, 2011; 张涛等, 2012; He *et al.*, 2020; 王嘉琦等, 2023)。自渐新世以来, 阿尔金断裂带的活动 (Yin *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2003) 也与柴达木盆地西北部的数次快速隆升 (强挤压)、沉积几乎同时发生 (Sun *et al.*, 2010; Gao *et al.*, 2011), 这些新生代多期构造隆升事件及其剥蚀过程, 极有可能导致柴达木盆地沉

积物源区组成或供源格局发生显著变化 (Ritts and Biffi, 2001; Zhuang *et al.*, 2011)。因此, 柴达木盆地晚新生代沉积物的物源分析可为认识青藏高原东北缘造山带的岩石组成提供重要证据。

针对柴达木盆地西北部, 前人在沉积学、低温热年代学等方面取得了较大的研究进展, 但是晚新生代以来较为可靠的物源供给区及其转换时限还缺少更进一步的数据支撑。沉积岩中的锆石作为一种重要副矿物, 随着近年来 LA-ICP-MS 微区分析技术迅速发展, 碎屑锆石的 U-Pb 年代学已经广泛应用于沉积地层和物源示踪研究 (Cawood *et al.*, 2013)。此外, 锆石微量元素, 如稀土元素 (REEs), 被认为是化学成分不变, 保留了源岩的特征 (Taylor and McLennan, 1985; McLennan, 2018)。这些微量元素不仅可用于沉积物来源和沉积盆地构造背景的判别 (Bhatia and Crook, 1986),

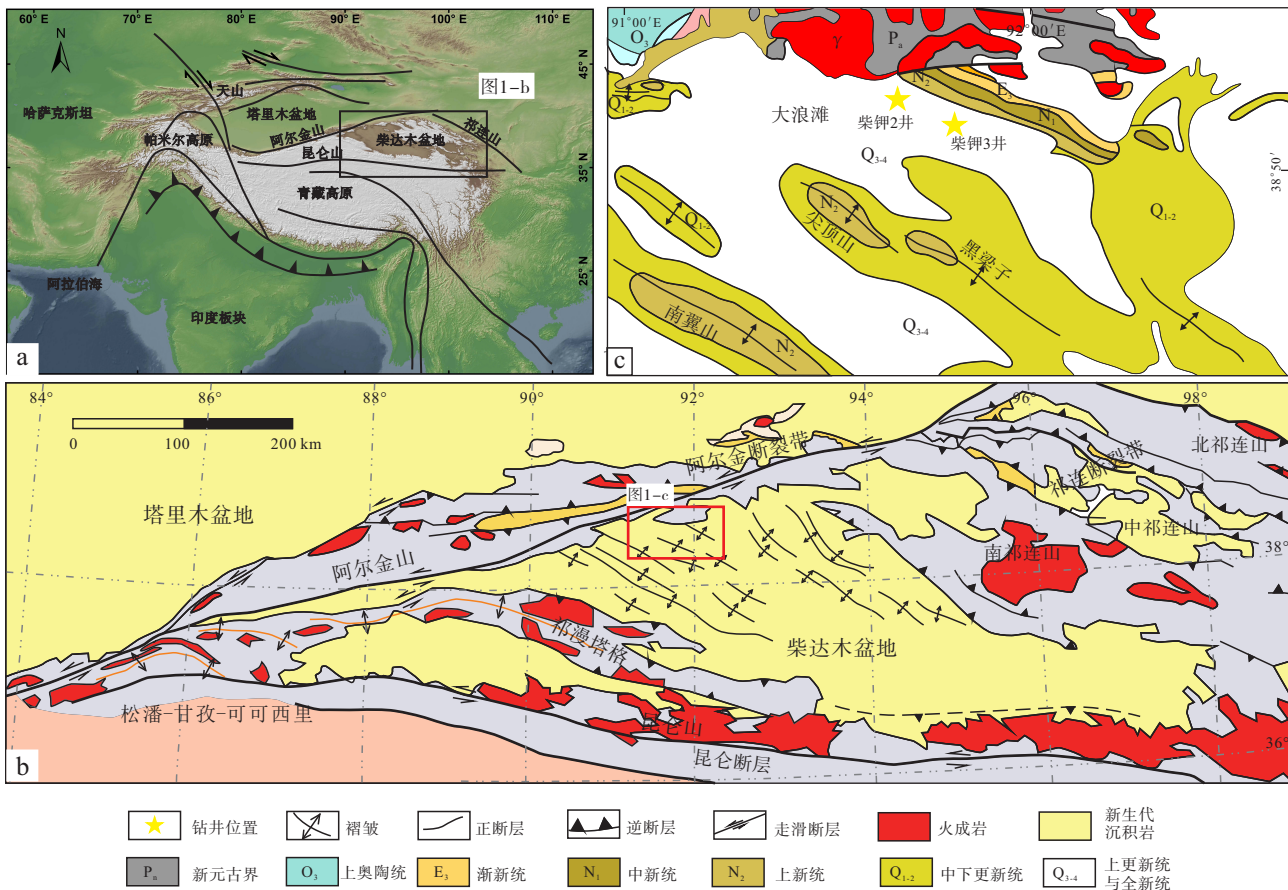
还能识别源区岩石类型 (Hoskin and Ireland, 2000; Grimes *et al.*, 2007), 有效区分 2 个或 2 个以上具相似形成年龄、不同形成背景的物源类型等。

柴达木盆地西北部大浪滩地区发育一套巨厚的新生代砂砾石沉积层系, 为新型“砂砾型”卤水钾盐矿赋存地层, 是柴达木盆地第四纪以来重要的盐类沉积中心。本研究对大浪滩地区柴钾 2 井 100.93 m、199.97 m、401.51 m、501.65 m、1215.47 m 和柴钾 3 井 301.52 m、789.92 m 埋深的 7 个砂岩样品进行了碎屑锆石 U-Pb 年代学、锆石微量元素特征分析与 Lu-Hf 同位素研究, 结合潜在物源区碎屑锆石 U-Pb 年代学资料, 对柴西北大浪滩地区晚新生代沉积物进行综合物源分析。本研究的目的是推断砂砾石层系的物源和沉积过程, 为阿尔金山及青藏高原北缘快速隆升提供可靠的年龄证据, 对探

索大浪滩—黑北凹地“砂砾型”含钾卤水资源提供新的年代制约。

### 1 区域地质背景

柴达木盆地位于青藏高原东北缘 (图 1), 是新生代期间发育起来的大型陆相沉积盆地, 四周被阿尔金山、东昆仑祁漫塔格和祁连山所环绕。在印度板块与欧亚板块持续汇聚的构造背景下, 盆地内部形成了一系列北西—东西走向的逆冲褶皱带, 同时在南、北边缘发育了大规模的逆冲断层。从大地构造单元来看, 柴达木盆地与周缘山脉经历了新元古代早期、早古生代和晚古生代—早中生代多期构造—岩浆活动, 而非一个刚性克拉通 (Yin and Harrison, 2000; Cheng *et al.*, 2017)。这一复杂的地质演化过程, 使周缘的阿尔金山、东昆仑祁漫塔格和祁连山成为盆地沉积物的主要物源区 (Zhuang



a—主要逆冲断裂的青藏高原及其邻区构造 DEM 图 (修改自 Sun *et al.*, 2005); b—青藏高原东北部柴达木盆地及邻区地质图 (修改自 Yin *et al.*, 2002); c—研究区地质图, 显示钻井位置

图 1 柴达木盆地地质图及钻井位置

Fig. 1 Geological map and boreholes location of Qaidam Basin

*et al.*, 2011; Jian *et al.*, 2013)。

柴达木盆地周缘的三大山脉构成了一个完整的物源供给系统。西北侧的阿尔金山在走滑断裂活动和分段隆升过程中不断向盆地提供碎屑物质。阿尔金山基岩组成复杂,发育前寒武纪结晶基底及多期古生代岩浆岩,古元古代(1.6—2.0 Ga)、新元古代(922—928 Ma)、早古生代(517—385 Ma)和二叠纪(260—280 Ma)锆石U-Pb年龄在阿尔金山的火成岩和变质基底中普遍存在(Gehrels *et al.*, 2003a, 2003b; 刘良等, 2015),其年龄组成以954—939 Ma、~ 517 Ma、501—496 Ma、469—435 Ma、424—406 Ma及265 Ma为主(刘良等, 2015; Chen *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2018; 曾旭等, 2024)。贯穿该山的阿尔金山走滑断裂带,其约1600 km的延伸长度和350~400 km的左旋位移量,显著控制了柴达木盆地西北部古近纪沉积物的分散路径(Tapponnier and Molnar, 1977; Yue *et al.*, 2004)。盆地北部的南祁连山以发育古元古界基底上覆中元古界—新元古界盖层为特征,同时大面积出露古生代火山—沉积岩系。其南侧的柴北缘构造带主要指北柴达木早古生代俯冲—碰撞带,以发育早古生代高压—超高压变质岩、蛇绿混杂岩和侵入岩为特征(Yin and Harrison, 2000; Xiao *et al.*, 2009)。欧龙布鲁克地块虽属独立微陆块,但因位于柴达木盆地北缘方向并发育古老结晶基底,本研究将其作为柴北缘方向上的古老基底源区一并讨论。东昆仑祁漫塔格保存了700~1000 Ma基底信息,并广泛发育490—390 Ma和250—240 Ma的岩浆活动,是柴达木盆地南缘重要的供源区(Li *et al.*, 2013; Jian *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2020)。裂变径迹热年代学数据揭示,这些山脉的主要隆升—剥露期发生在新生代(Jolivet *et al.*, 2001; Duvall *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2015; He *et al.*, 2017, 2018; Wu *et al.*, 2021)。这种构造隆升—剥蚀—沉积的耦合过程,最终塑造了柴达木盆地的新生代沉积格架。

大浪滩地区位于阿尔金山前缘的柴达木盆地西北部次级凹陷带,受阿尔金山走滑断裂与基底断裂控制,形成NWW向展布的洼陷—褶皱分区并使沉积中心呈条带化分割。钻遇地层狮子沟组(磁性地层年龄约8.1—2.5 Ma)以陆相碎屑充填为主(Fang *et al.*, 2007),表现为泥岩—砂质泥岩夹砂

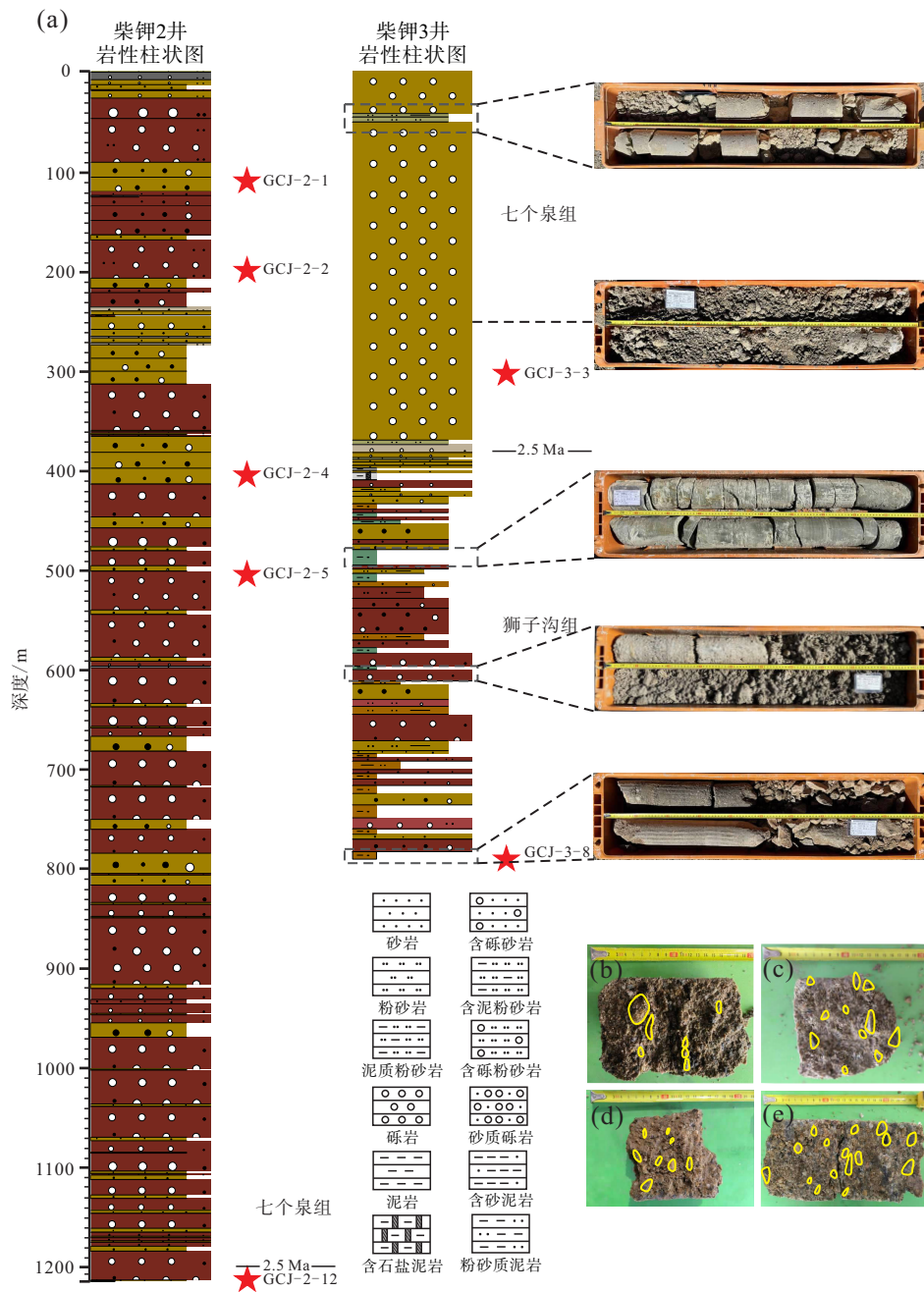
岩至砾岩,含盐类沉积夹层,代表相对较低能的湖相—滨湖相沉积;上覆地层七个泉组(磁性地层底界年龄约2.5 Ma)(Fang *et al.*, 2007),在盆地边缘以巨厚砾石—砂砾石沉积为特征,代表近源高能粗碎屑沉积,向盆地内部逐渐过渡为河流—滨浅湖相的较细粒沉积组合。山前冲洪积扇与河道砂砾层构成高孔渗储卤介质,与断裂带共同约束卤水补给、运移与封存,含钾卤水总体被认为属于溶滤—沉积型(郑绵平等, 2015)。

柴钾2井、柴钾3井位于大浪滩西北部靠近阿尔金山前位置,地层序列发育于冲洪积扇沉积环境。柴钾2井深1216.65 m,整体为一大套砂砾石层,岩性为砾质中粗砂及中粗砂质砾石(图2-a),分选性较差,磨圆度一般,次棱角状—次圆状;砾石呈杂色,主要成分为石英、长石、辉石、角闪石和花岗岩等;含水性、透水性极好,为“砂砾型”含钾卤水储集层段,于1215 m出现1 m厚的泥岩隔水层。柴钾3井深791.98 m,其中0~370.75 m为砂砾石层,分选性较差,磨圆度一般,次棱角状—次圆状,砾石主要成分为石英、长石、辉石、花岗岩等,砾石成层排布(图2-b至2-e),含水性、透水性极好;自370.75 m后出现胶结致密的粉砂岩、泥岩隔水层与砂砾石层互层,呈现出泥岩—粉砂岩—泥岩、泥岩—粉细砂岩—中粗砂层—粉砂层—泥岩等规律的沉积韵律,指示远端扇、扇中亚相及泥坪微相。

## 2 样品采集与测试

本研究共选取大浪滩地区柴钾2井100.93 m、199.97 m、401.51 m、501.65 m、1215.47 m和柴钾3井301.52 m、789.92 m埋深7个砂岩样品(图2),用于碎屑锆石年代学分析。样品岩性以黄褐色砾质中粗砂为主,经破碎和筛分后,采用重液和磁法将重矿物分离,并在双目显微镜下人工挑选较完整的锆石颗粒,每个样品挑选250颗用环氧树脂固定制靶,打磨抛光后,通过反射光及透射光观察,筛除缺陷锆石颗粒,拍摄锆石的阴极发光(CL)图像,确定锆石的内部结构特征。随机选择没有裂缝和包裹体的纯净锆石颗粒进行锆石U-Pb年龄测试。

碎屑锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄测试工作在中国地质科学院自然资源部成矿作用与资源评价重



a—柴钾 2 井、柴钾 3 井岩性柱状图；b-e—岩心，代表性样品手标本，黄色圆圈为砾石分布

图 2 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井岩性柱状图及岩心特征

Fig. 2 Lithologic columns and core characteristics of boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin

点实验室完成，实验采用激光剥蚀电感耦合等离子质谱法 (LA-ICP-MS)，使用德国 Analytik Jena 公司生产的 PlasmaQuant MS Elite 四级杆质谱进行，配套 Resolution S-155 193 nm 激光系统对样品进行消融，信号强度由 Bruker M90 ICP-MS 采集分析。实验中采用氦气和氩气分别作为剥蚀物质的载气和分析过程中的补充气，激光器工作频率为 4 Hz，激

光束斑直径为 30  $\mu\text{m}$ ，能量密度约 4.0  $\text{J}/\text{cm}^2$ 。每个碎屑锆石样品测试 80 颗锆石左右。在 U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中，采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标，分别进行同位素和微量元素分馏校正。实验数据处理采用 ICPMS DataCal 程序 (Liu *et al.*, 2010)，锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图和加权平均计算采用 Isoplot 程

序 (Ludwig, 2003)。采用 Andersen (2002) 提出的普通 Pb 校正方法对所有的年龄数据进行了校正。经普通 Pb 校正后, 对年龄小于 1 Ga 的颗粒, 由于其内部 Pb 含量较低、测定误差相对较大, 采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄作为最终年龄; 而对于年龄大于 1 Ga 的颗粒, 因放射性成因 Pb 更为富集, 则选用  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄作为最终年龄 (Gehrels *et al.*, 2008)。

对锆石开展原位 Lu-Hf 同位素测试, 所用仪器为配备 Newwave UP 213 nm 激光剥蚀系统的 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪 (MC-ICPMS)。在激光剥蚀过程中, 设定斑束尺寸为  $55\ \mu\text{m}$ , 激光频率控制在 8 Hz。实验选取国际锆石标准 GJ-1 作为参考物质, 实测获得的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  加权平均值为  $0.282007 \pm 0.000007$  ( $2\sigma$ ,  $n = 36$ ), 该数值与 Morel 等 (2008) 的参考标准值在误差允许范围内, 验证了本次实验数据的可靠性。在 ( $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>i</sub> 与  $\varepsilon_{\text{Hf}}$  值的计算过程中,  $^{176}\text{Lu}$  衰变常数选用 Scherer 等 (2001) 提出的  $1.865 \times 10^{-11}\ \text{a}^{-1}$ ;  $\varepsilon_{\text{Hf}}$  值计算所采用的球粒陨石 Hf 同位素参数则参考 Bouvier 等 (2008) 的推荐值, 具体参数为  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0.0336$ 、 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.282785$ 。Hf 模式年龄计算过程中, 亏损地幔当前的  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值设定为 0.28325,  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值取 0.0384; 两阶段模式年龄的计算, 则采用 Griffin 等 (2000) 提出的平均地壳参数 ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ )<sub>C</sub> = 0.015 完成, 确保计算结果的科学性与规范性。

### 3 数据分析

#### 3.1 锆石年龄分布

从柴钾 2 井、柴钾 3 井碎屑锆石的代表性样品阴极发光图像 (图 3) 可看出, 样品中碎屑锆石多呈自形一半自形短柱状和长柱状, 部分颗粒边缘可见一定程度的磨蚀, 粒度整体较为均一, 内部结构多发育清晰的振荡环带, 仅少数锆石颗粒不具明显生长环带。锆石颗粒的长度为  $60 \sim 220\ \mu\text{m}$ , 宽度为  $50 \sim 150\ \mu\text{m}$ 。Th/U 值为  $0.02 \sim 1.26$ , 且大多数锆石颗粒的 Th/U 值大于 0.4, 呈现出岩浆成因特征 (图 4), 与 CL 图像显示的锆石表面结构一致。全部样品中有 7.03% 的锆石颗粒 Th/U 值小于 0.1, 鉴于低 Th/U 值并非变质锆石的唯一判据, 且该部

分颗粒在 CL 图像中总体仍保留振荡环带, 因此本研究保留其年龄信息, 并在后续解释中结合微量元素特征讨论其成因意义。

从 7 个样品的 U-Pb 谐和图 (图 5; 图 6) 可以看出, 绝大多数数据点都落在谐和线上或者附近位置。样品的锆石年龄整体介于 213.9 ~ 3307.8 Ma 之间, 大致可划分为 4 个年龄区间, 分别为 200 ~ 300 Ma、330 ~ 510 Ma、740 ~ 990 Ma、1.1 ~ 3.3 Ga。

柴钾 2 井共测试 5 件样品, 其中七个泉组 4 件、狮子沟组 1 件。七个泉组样品 (GCJ-2-1、GCJ-2-2、GCJ-2-4 和 GCJ-2-5) 有效数据点为 187 个, 碎屑锆石年龄集中于 239.8 ~ 1580.6 Ma 之间, 主峰较为稳定, 主要分布在  $250.8 \pm 3.9 \sim 262.9 \pm 3.4$  Ma, 反映出明显的印支期年龄组分; 次峰范围为  $300.0 \pm 3.2 \sim 401.2 \pm 2.3$  Ma, 显示晚古生代年龄组分亦较为发育。相比之下, 狮子沟组样品 GCJ-2-12 有效数据点为 47 个, 年龄分布范围明显扩大 (213.9 ~ 2387.3 Ma), 主峰和次峰分别为  $267.0 \pm 3.5$  Ma 和  $452.4 \pm 5.4$  Ma, 表明其年龄组成较七个泉组更为复杂, 并具有较明显的早古生代特征。

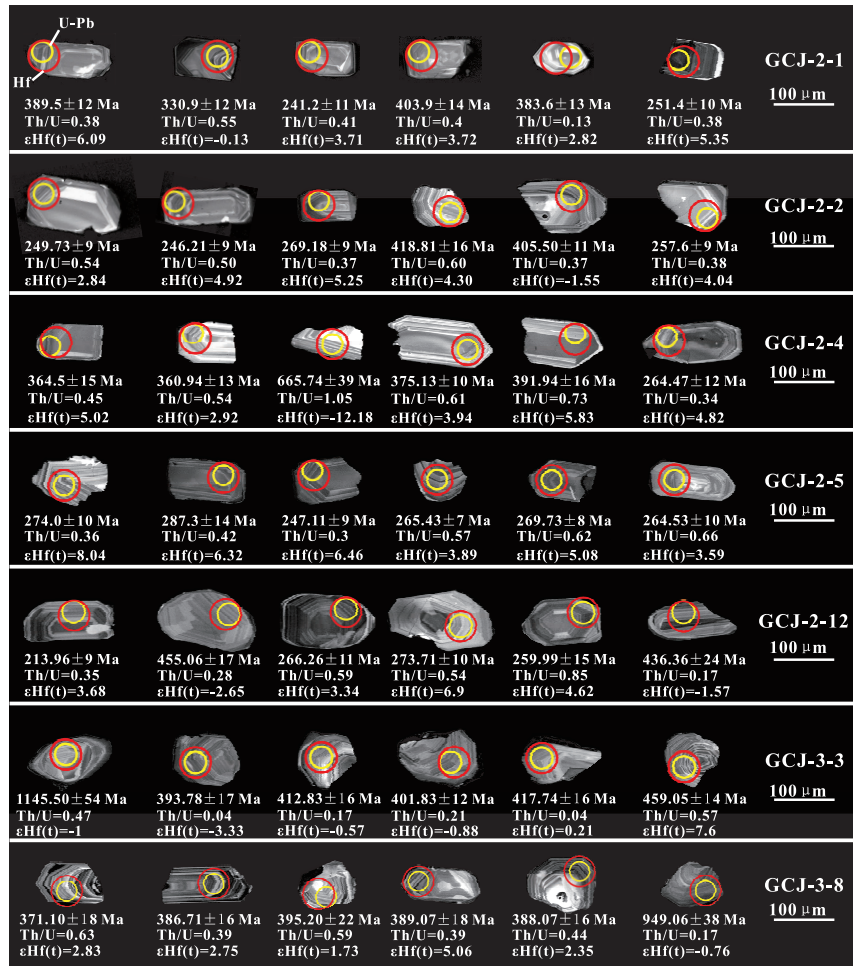
柴钾 3 井共测试 2 件样品, 分别来自七个泉组和狮子沟组。七个泉组样品 GCJ-3-3 获得 33 个有效数据点, 年龄范围为 390.3 ~ 3307.8 Ma, 主峰和次峰分别为  $409.3 \pm 2.9$  Ma 和  $465.6 \pm 3.7$  Ma, 均以早古生代年龄组分为主。狮子沟组样品 GCJ-3-8 获得 61 个有效数据点, 年龄范围为 371.1 ~ 1912.2 Ma, 主峰为  $386.6 \pm 5.1$  Ma, 次峰为  $942.9 \pm 7.7$  Ma, 显示除古生代年龄组分外, 还发育明显的中元古代年龄信息。

总体来看, 柴钾 2 井七个泉组样品以 250 ~ 263 Ma 峰值为主, 而柴钾 3 井样品则以 386 ~ 466 Ma 峰值更为突出, 反映出不同钻孔及层位之间的碎屑锆石年龄组成存在一定差异。

#### 3.2 Hf 同位素特征

每个样品选取目标年龄的锆石颗粒各 30 个左右进行 Hf 同位素测试 (图 7), 且每个碎屑锆石颗粒的 Hf 分析点圈定基本与 U-Pb 分析点重合, 但由于部分点位已被激光打穿, 因此稍稍偏移 U-Pb 分析中心点来保证实验数据的完整性。

锆石 Hf 同位素特征变化较大, 绝大多数样品



黄色圆圈为年龄测点，红色圆圈为 Hf 同位素测点

图 3 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井样品代表性碎屑锆石阴极发光照片

Fig. 3 CL images of representative detrital zircon samples from boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin

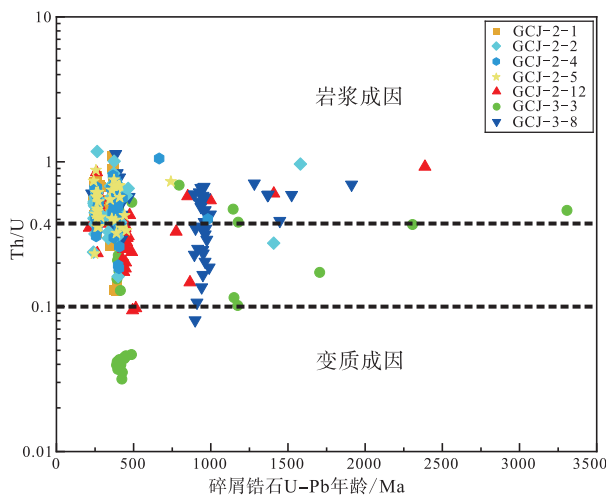


图 4 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井碎屑锆石 Th/U 值分布

Fig. 4 Th/U ratio from boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin

在亏损地幔和 0.2 Ga 地壳演化线之间，锆石  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值介于 0.000104 ~ 0.003772 之间，其中约 92.3% 的分析点小于 0.002，显示放射性成因的 Hf 同位素富集程度较低（钟海仁等，2020）； $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  值为 0.282005 ~ 0.282946，均值为 0.282612。所有分析点  $\epsilon_{Hf}(t)$  值变化范围为 -9.60 ~ 12.26（图 7），整体均值为 2.97，其中正  $\epsilon_{Hf}(t)$  值占 75.7%，负  $\epsilon_{Hf}(t)$  值占 24.3%，显示研究区碎屑锆石总体以新生地壳物质贡献为主，但同时混有一定比例古老地壳再循环组分。锆石两阶段 Hf 模式年龄  $T_{DMc}$  为 0.53 ~ 2.04 Ga，主要集中于 0.80 ~ 1.50 Ga，并在 1.0 ~ 1.1 Ga 附近形成明显峰值，指示物源区所记录的地壳增生事件主要集中于中元古代晚期—新元古代早期，局部保留有更古老基底的信息。

结合 U-Pb 年龄及对应的 Hf 同位素特征，研究

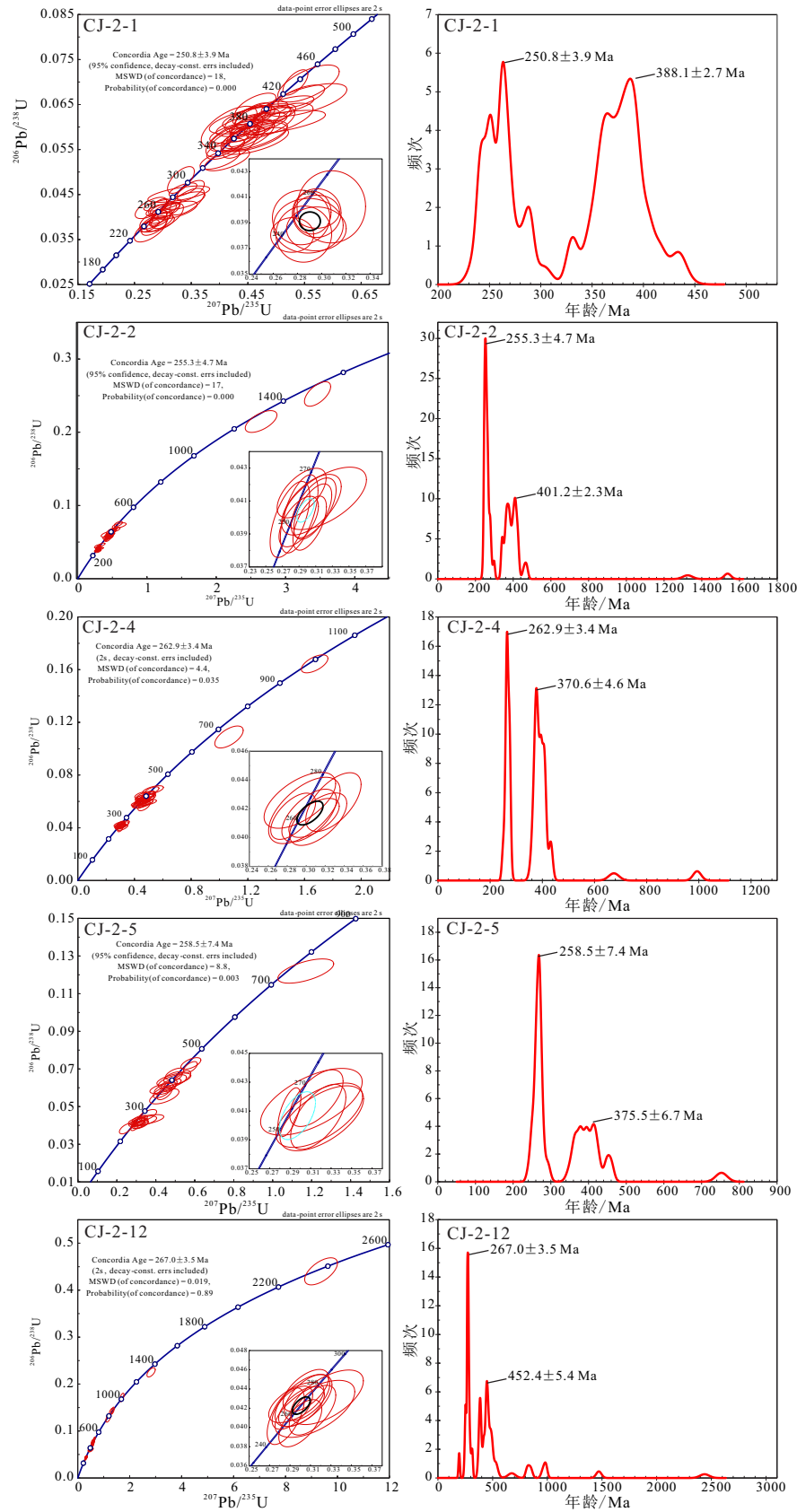


图 5 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图和年龄分布直方图

Fig. 5 Detrital zircon U-Pb concordia diagrams and histograms from samples of borehole CJ-2 in Dalangtan area, Qaidam Basin

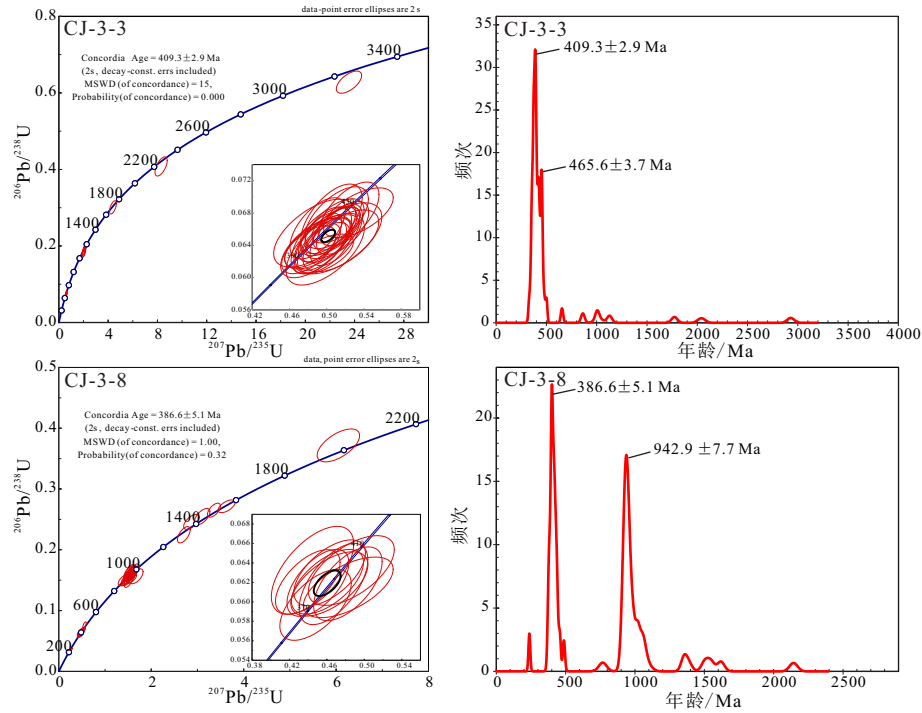


图 6 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 3 井样品碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图和年龄分布直方图

Fig. 6 Detrital zircon U-Pb concordia diagrams and histograms from samples of borehole CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin

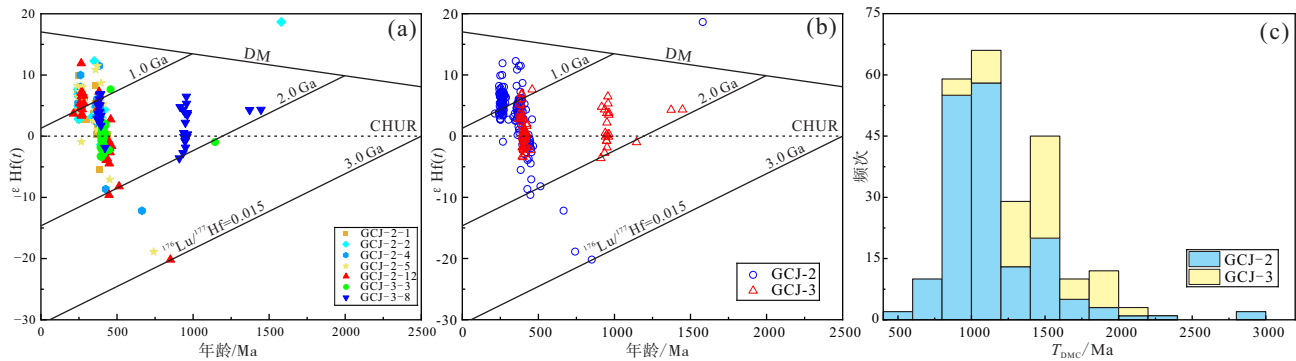


图 7 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井碎屑锆石 Hf 同位素组成 (a, b) 及模式年龄直方图 (c)

Fig. 7 Diagram of  $\epsilon_{Hf}(t)$  vs. U-Pb age (a, b) and Hf model age histogram of detrital zircon samples from boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin

区碎屑锆石可划分为 4 个年龄区间。214~304 Ma 年龄段锆石共 77 颗，为一套典型的年轻组分，其  $\epsilon_{Hf}(t)$  值介于 -0.92~11.91 之间，平均值为 5.57，其中 76 颗为正值，正值比例高达 98.7%， $T_{DMc}$  年龄为 0.53~1.35 Ga，表明该年龄段锆石主要反映了明显的幔源或年轻壳源物质加入，是研究区新生地壳物质贡献最为显著的年龄组。335~514 Ma 年龄段锆石共 137 颗，为全部测试点中最主要的年龄组分， $\epsilon_{Hf}(t)$  值变化范围最大，为 -9.60~12.26，平均值为 1.72，其中正值 89 颗、负值 48 颗，正值占比 65.0%，对应  $T_{DMc}$  年龄为 0.57~2.04 Ga，

显示这一时期锆石来源最为复杂，既包含一定比例的新生地壳输入，也混入了较多古老地壳重熔或再循环物质。911~964 Ma 年龄段锆石共 18 颗， $\epsilon_{Hf}(t)$  值为 -3.60~6.47，平均值为 1.40，正值比例为 61.1%， $T_{DMc}$  年龄为 1.41~2.01 Ga，表明该组锆石记录了新元古代地壳增生与古老基底改造并存的特征。1146~1447 Ma 年龄段锆石仅 3 颗， $\epsilon_{Hf}(t)$  值介于 -1.00~4.34 之间， $T_{DMc}$  年龄为 1.87~2.02 Ga，数量虽少，但说明研究区物源体系中仍存在少量中元古代基底物质的输入。

### 3.3 碎屑锆石微量元素特征

本研究选取谐和度较高的锆石颗粒进行微量元素分析,所有样品的锆石颗粒均呈现重稀土元素相对于轻稀土元素富集的特征,在稀土元素球粒陨石标准化的图解(图 8;图 9)上显示出左低右高的图谱特点,重稀土元素从 Gd 开始向右逐步增长,所有锆石颗粒均显示出明显的 Eu 负异常和 Ce 正异常,具备岩浆成因锆石特征(Hoskin and Ireland, 2000; Hoskin and Schaltegger, 2003)。需要指出的是,少量低 Th/U 值锆石颗粒虽可能具有特殊成因意义,但其 CL 图像仍以振荡环带为主,稀土元素配分模式也未显示典型变质锆石特征。因此,本研究保留其年龄信息参与总体年龄谱分析,但不将其单独作为特定变质源区的判别依据。碎屑锆石 Y-U、 $\Delta\text{Ce}-\delta\text{Eu}$ 、Y-Yb/Sm、Y-Nb-Ta、Y- $\delta\text{Ce}$ 、Nb-Ta 等微量元素岩性判别图解(图 10)显示,多数数据点集中分布于花岗岩类区域,部分位于基性岩与花岗岩的过渡范围,另有少量点落入伟晶岩区,因此可以推断出研究区碎屑锆石母岩主要为基性和酸性岩浆岩。碎屑锆石 U/Yb-Hf、Th/Yb-Hf、U/Yb-Y 和 Th/Yb-Y 判别图解(图 11)显示,绝大多数锆石颗粒投点于陆壳成因锆石区域,显示其来源于陆壳花岗质岩石。Nb/Hf-Th/U 和 Hf/Th-Th/Nb 双变量图解(图 12)表明,大部分锆石颗粒形成于岩浆弧/造山带环境。

## 4 讨论

沉积物从源区风化剥蚀开始,经历了不同地表动力机制的搬运、沉积、水动力改造以及后期成岩作用等影响。而锆石作为一种抗物理风化和化学风化能力较强的矿物,可以在不同的风化和水动力搬运条件下仍然保持着最初的物源信息,因此广泛应用于物源分析(钟海仁等, 2020)。在分析碎屑锆石物源时,可以根据各个样品年龄峰值的分布情况、Hf 同位素及微量元素特征的综合对比寻找相应的潜在物源区,并结合其他区域地质资料来判断碎屑物质的潜在源区和搬运路径。少量低 Th/U 值锆石颗粒虽然在成因上值得关注,但由于其未显示典型变质锆石的 CL 结构特征,且未形成独立年龄峰,本研究暂不将其单独作为特定变质源区的判别标志,而主要将其视为总体年龄谱中的辅助信息。

### 4.1 潜在物源区特征

研究区位于大浪滩地区西北部靠近阿尔金山前位置,周缘存在 4 个潜在物源区,分别是阿尔金山、东昆仑祁漫塔格、南祁连山及柴北缘构造带,均可能为大浪滩地区提供物源(Zhao *et al.*, 2020a, 2020b)。

#### 4.1.1 阿尔金山

阿尔金山位于研究区西北侧,是柴达木盆地西北部重要的近邻源区之一。其构造-岩浆演化具有明显的阶段性,古生代花岗质岩浆活动可划分为 503—497 Ma、483—458 Ma、456—432 Ma、424—385 Ma、352—338 Ma 和 265—264 Ma 共 6 期,其中 469 Ma、462 Ma、448—444 Ma、444—435 Ma、406 Ma 和 265 Ma 等年龄最具代表性,分别对应俯冲、碰撞后部分熔融、伸展调整及晚期再活动过程(Cowgill *et al.*, 2003; 陈正乐等, 2006; 吴才来等, 2014a; Wu *et al.*, 2018)。此外,阿尔金山内部还保存 954 Ma 和 939 Ma 的新元古代花岗质岩浆活动,并可提供 1.8 ~ 2.5 Ga 的古老锆石组分(Chen *et al.*, 2018; 曾旭等, 2024)。

Hf 同位素和岩石地球化学资料显示,阿尔金山源区中较年轻地壳物质和古老陆壳物质均有参与。南阿尔金不同时期花岗岩锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  以正值为主,但局部可出现负值,说明其源区以较年轻地壳物质为主,同时存在古老陆壳成分(Wu *et al.*, 2018);花岗岩锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 -8.64 ~ +5.30,两阶段模式年龄为 1.59 ~ 2.35 Ga,表明新元古代花岗岩主要与古老地壳重熔有关(Chen *et al.*, 2018)。地球化学方面,阿尔金山相关花岗质岩石普遍表现为轻稀土元素富集、Nb-Ta-Ti 亏损和不同程度的 Eu 负异常(Chen *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2018)。总体上,阿尔金山锆石年龄特征可以概括为:以 430 ~ 470 Ma 为主、同时存在 265 Ma 和 939 ~ 954 Ma, Hf 同位素以正值占优势但负值亦可出现。

#### 4.1.2 东昆仑祁漫塔格

东昆仑祁漫塔格位于柴达木盆地南缘,是研究区重要的南侧潜在源区。该区保存了较明显的新元古代基底年龄信息,并广泛发育早古生代和三叠纪岩浆活动,年龄主要集中于 700 ~ 1000 Ma、390 ~ 490 Ma 和 240 ~ 250 Ma。其中,700 ~ 1000 Ma 年龄反映新元古代基底演化,峰值多集中于约 800 Ma

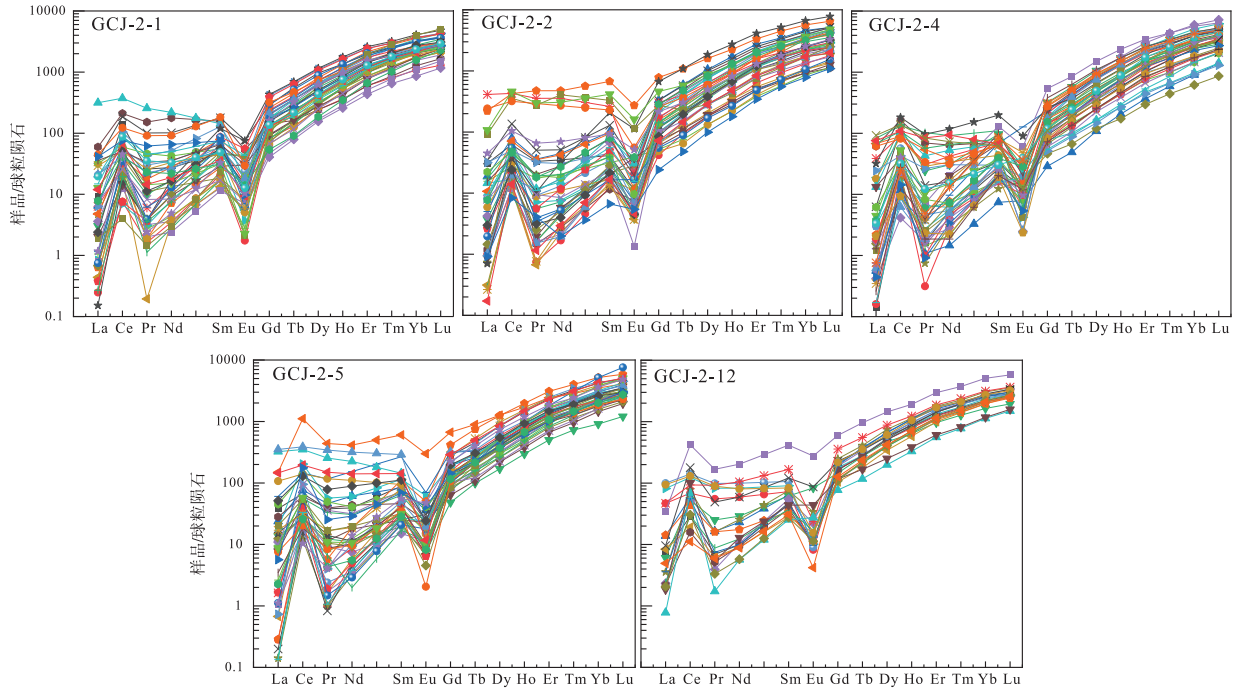


图 8 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井碎屑锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式

Fig. 8 Distribution pattern of rare earth elements of detrital zircons from borehole CJ-2 in Dalangtan area, Qaidam Basin

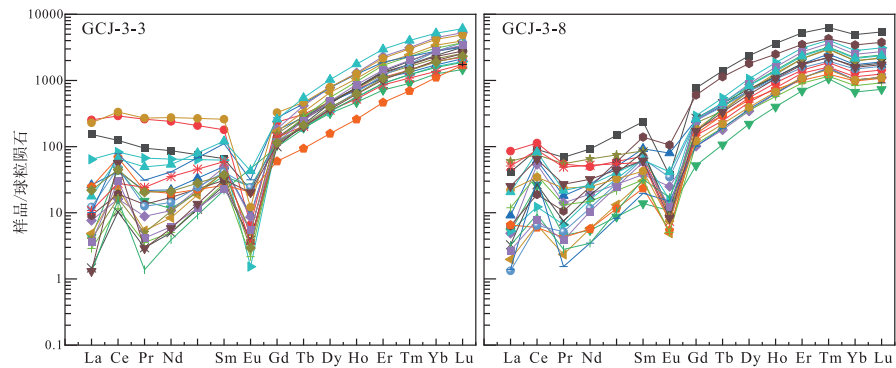


图 9 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 3 井碎屑锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式

Fig. 9 Distribution pattern of rare earth elements of detrital zircons from borehole CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin

和 920 Ma; 390 ~ 490 Ma 年龄对应早古生代俯冲、增生和碰撞过程; 244 ~ 246 Ma 左右的花岗岩和石英闪长岩则代表古特提斯北向俯冲背景下的三叠纪岩浆活动 (陈国超等, 2013; 赵菲菲等, 2017; Jian *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2020)。

东昆仑祁漫塔格不同年龄组的 Hf 同位素和微量元素特征较为清楚。700 ~ 1000 Ma 年龄段碎屑锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 -10 ~ +5, 说明新元古代基底既记录了新生地壳加入, 也保存了古老地壳再造过程 (Jian *et al.*, 2020); 洪水河 244 ~ 246 Ma 岩体锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 -4.0 ~ +1.7, 表明其主要来自中元古代基性下

地壳熔融, 并伴有一定幔源物质加入 (Song *et al.*, 2020)。地球化学方面, 东昆仑祁漫塔格花岗质岩石普遍表现为轻稀土富集、Nb-Ta-Ti 亏损和 Eu 负异常, 反映活动大陆边缘环境下的花岗质岩浆作用 (Song *et al.*, 2020)。总体上, 东昆仑祁漫塔格物源区特征可概括为: 锆石年龄以 240 ~ 250 Ma、390 ~ 490 Ma 和 700 ~ 1000 Ma 为主, Hf 同位素多为弱负值至正值。

#### 4.1.3 南祁连山

南祁连山位于柴达木盆地北缘, 是研究区另一重要邻近源区。该区以早古生代岩浆活动最为突

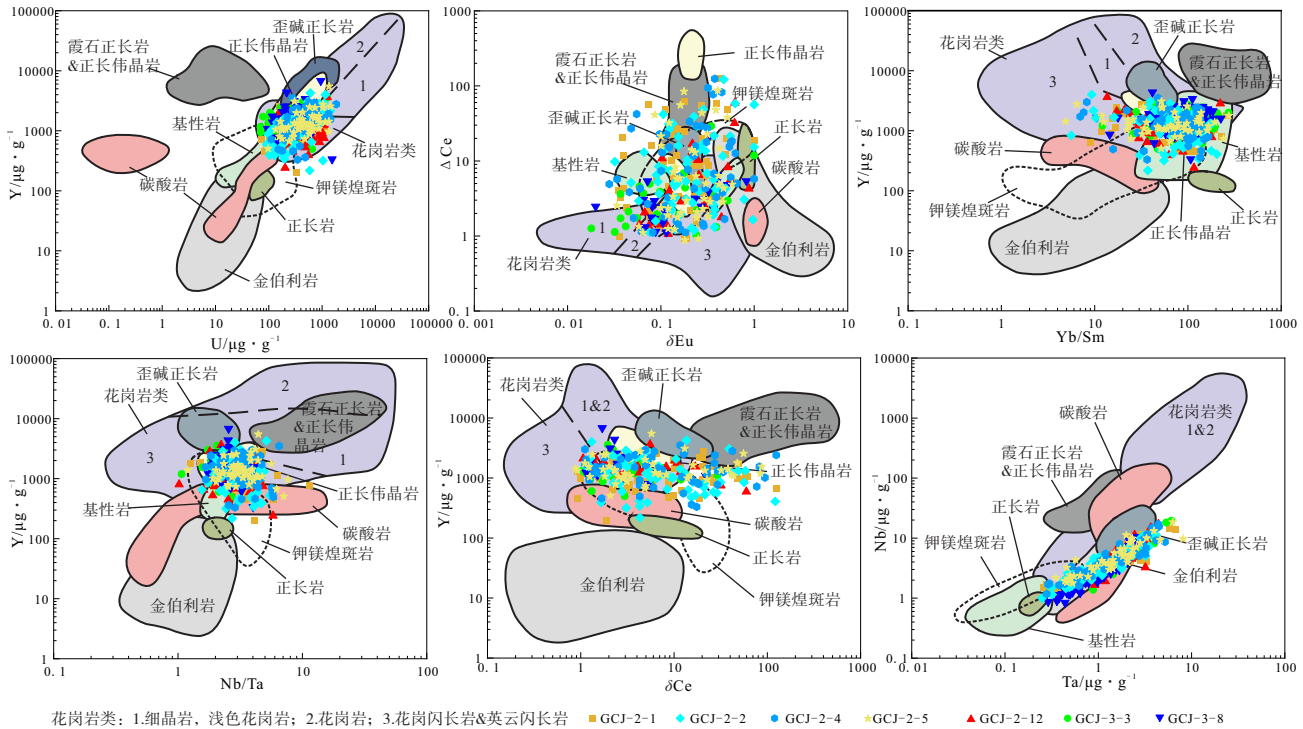


图 10 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井碎屑锆石微量元素岩性判别图解  
(底图据 Belousova *et al.*, 2002; 有修改)

Fig. 10 Trace element lithological identification diagram of detrital zircons from boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin (base map modified from Belousova *et al.*, 2002)

出，同时保存新元古代和古元古代基底年龄。祁连山地区在 517—359 Ma 期间形成了大量侵入岩，其中南祁连在 452—444 Ma 和 431 Ma 广泛发育碰撞花岗岩，在 440—425 Ma 形成后碰撞伸展环境下的高镁中性侵入岩、埃达克质岩和 A 型花岗岩，至泥盆纪又出现 409—402 Ma 和 386 Ma 左右的岩浆活动 (Lu *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2020; 李平等, 2023)。此外，807 ~ 923 Ma、1854 Ma 和 2370 Ma 等年龄可反映其较老基底组成。已有邻区沉积物研究表明，与南祁连源区对应的碎屑锆石年龄组分通常以 ~441 Ma 为主峰，并伴随 ~248 Ma、~277 Ma、~807 Ma、~923 Ma、~1854 Ma 和 ~2370 Ma 等次峰 (钱涛等, 2025)，这些年龄组成可作为本研究识别南祁连源区贡献的对比依据。

南祁连山的 Hf 同位素和微量元素特征同样能够为物源判别提供约束。祁连山寒武纪—奥陶纪侵入岩  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  和  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  变化范围较大，表明其源区中既有古老地壳重熔，也有较年轻地壳物质加入；其中碰撞阶段花岗岩以强过铝质 S 型花岗岩为主，后碰撞阶段则出现具有正  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 、正  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  特征

的埃达克质岩和 A 型花岗岩 (李平等, 2023)。地球化学方面，南祁连早古生代侵入岩普遍表现为高钾钙碱性、过铝质、轻稀土富集及 Nb-Ta-Ti 亏损，反映弧岩浆和碰撞花岗岩的共同特征；泥盆纪以后岩浆活动明显减弱，仅零星发育中性—基性岩脉和少量晚期花岗岩 (李平等, 2023)。与此同时，红崖子盆地和柴北缘东段新生代沉积研究显示，南祁连山在中中新世以来能够持续向盆地北缘提供碎屑物质 (谢皓, 2024; 钱涛等, 2025)。总体上，南祁连山物源区特征可概括为：以 400~452 Ma 为主，并伴随 800~1000 Ma 和 1.8~2.5 Ga 年龄；Hf 同位素正负共存，但古老地壳再造特征较为明显。

#### 4.1.4 柴北缘构造带

柴北缘构造带位于柴达木地块与南祁连之间，是研究区北侧重要的邻近源区。该区经历了新元古代 Rodinia 聚合与裂解，以及早古生代俯冲、碰撞和后碰撞伸展等多阶段构造演化 (Niu *et al.*, 2021)，其岩浆活动归纳为前寒武纪、早古生代—泥盆纪和中晚二叠纪—三叠纪 3 个阶段。前寒武纪年龄主要记录欧龙布鲁克地块基底的形成与演化，

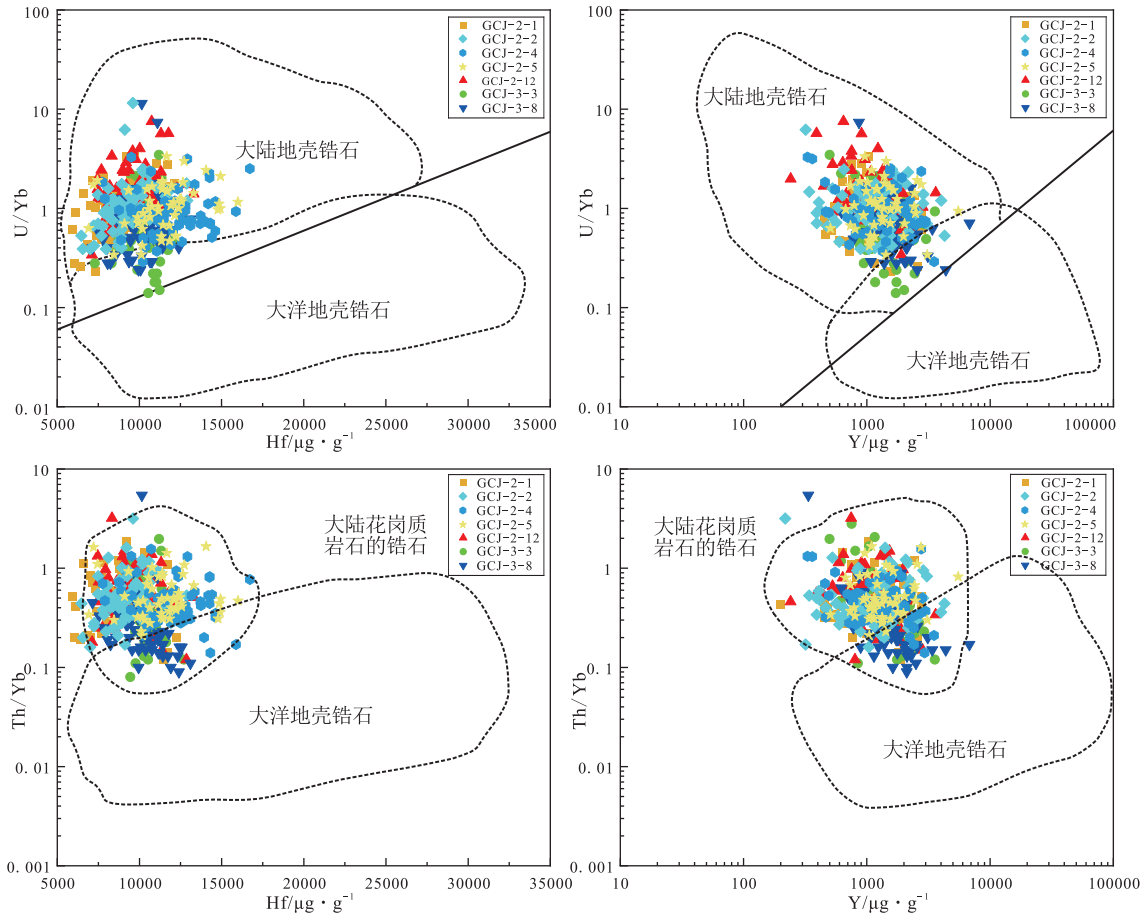


图 11 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井碎屑锆石微量元素 U/Yb-Hf、U/Yb-Y、Th/Yb-Hf 和 Th/Yb-Y 判别图解  
(底图据 Grimes *et al.*, 2007; 有修改)

Fig. 11 Trace element discrimination diagrams of U/Yb-Hf, U/Yb-Y, Th/Yb-Hf and Th/Yb-Y for detrital zircons from boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin (base map modified from Grimes *et al.*, 2007)

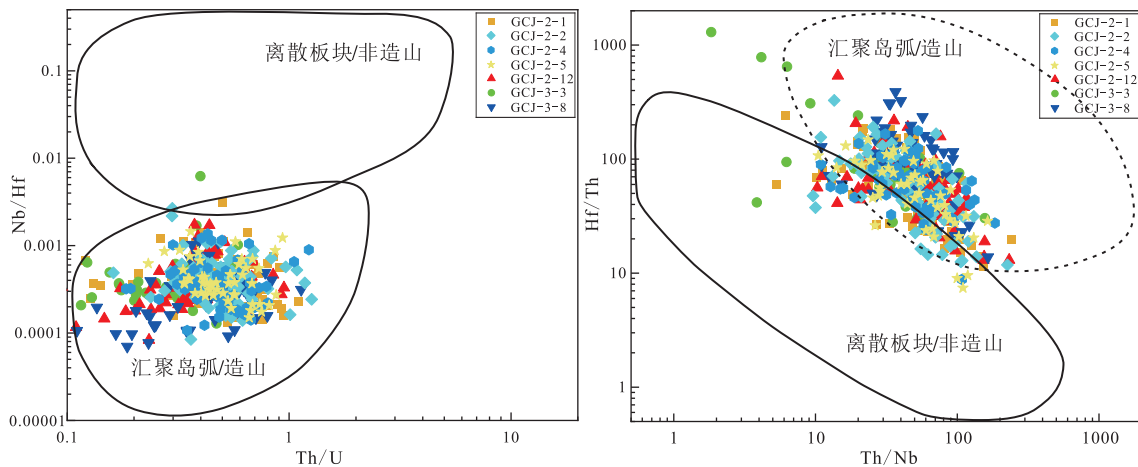


图 12 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井碎屑锆石微量元素 Nb/Hf-Th/U (a) 和 Hf/Th-Th/Nb (b) 双变量图解  
(底图据 Yang *et al.*, 2012; 有修改)

Fig. 12 Trace element discrimination diagrams of Nb/Hf-Th/U (a) and Hf/Th-Th/Nb (b) for detrital zircons from boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin (base map modified from Yang *et al.*, 2012)

常见 2.0 ~ 2.6 Ga、1.8 ~ 1.9 Ga、1.2 ~ 1.6 Ga 和 0.9 ~ 1.0 Ga 年龄组成 (赵文涛等, 2020)。早古生代—泥盆纪年龄则反映柴北缘地区由洋壳俯冲、碰撞—碰撞伸展的演化过程, 其中与本研究的样品对比关系较为密切的年龄主要集中于 400 ~ 430 Ma 和 ~357 Ma; 中晚二叠世—三叠纪年龄则与宗务隆洋南向俯冲背景下的弧岩浆作用有关, 与本研究样品中 252 ~ 273 Ma 年龄组分具有较好的对应关系 (吴才来等, 2008; Xiong *et al.*, 2012; 董增产等, 2015; 徐旭明等, 2017; 庄玉军等, 2020; 彭璇等, 2022)。

柴北缘构造带的 Hf 同位素和微量元素特征变化较大, 这也是其物源判别的重要依据。小赛什腾山  $422.1 \pm 1.6$  Ma 片麻状花岗岩为高硅、高钾钙碱性、过铝质岩石, 富集 Rb、亏损 Nb 和 Ti, 轻稀土富集并具有弱负 Eu 异常, 锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $-6.47 \sim -12.85$ , 表明其主要来源于古老地壳重熔 (彭璇等, 2022)。与之相比, 429.9 Ma 英云闪长岩锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $+9.3 \sim +11.9$ , 而 428.0 Ma 细粒闪长岩锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为  $-31.4 \sim -9.9$ , 表明同一时期不同岩浆体可分别代表较年轻地壳物质和古老陆壳物质 2 类来源 (李治华等, 2021)。357 ± 4 Ma 辉长岩脉锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  为 9.25 ~ 15.11, 显示地幔物质参与较强 (庄玉军等, 2019); 晚古生代盐场北山花岗岩则普遍具有大离子亲石元素富集、Nb-Ta-Ti 亏损和  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  正值为主的特征 (董增产等, 2015)。

## 4.2 物源区示踪

本研究获得下更新统七个泉组和上新统狮子沟组碎屑锆石年龄 (图 13; 图 14), 结合潜在物源区碎屑锆石 U-Pb 年代学资料, 对柴西北大浪滩地区七个泉组和狮子沟组物源进行分析。

### 4.2.1 七个泉组物源特征

柴钾 2 井七个泉组 4 件样品在不同深度均稳定发育 250 ~ 263 Ma 主峰, 并伴有 300 ~ 401 Ma 次峰, 整体年龄结构较为一致 (图 14)。与周缘沉积源区对比, 这组样品与东昆仑祁漫塔格的对应关系最为清楚 (图 15)。东昆仑祁漫塔格北缘广泛发育 244 ~ 246 Ma 的大陆弧岩浆活动和 390 ~ 490 Ma 早古生代岩浆活动, 而柴钾 2 井七个泉组样品在 214 ~ 304 Ma 年龄段锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  以正值为主, 也与东昆仑祁漫塔格三叠纪花岗质岩浆岩整体表现出的弱负

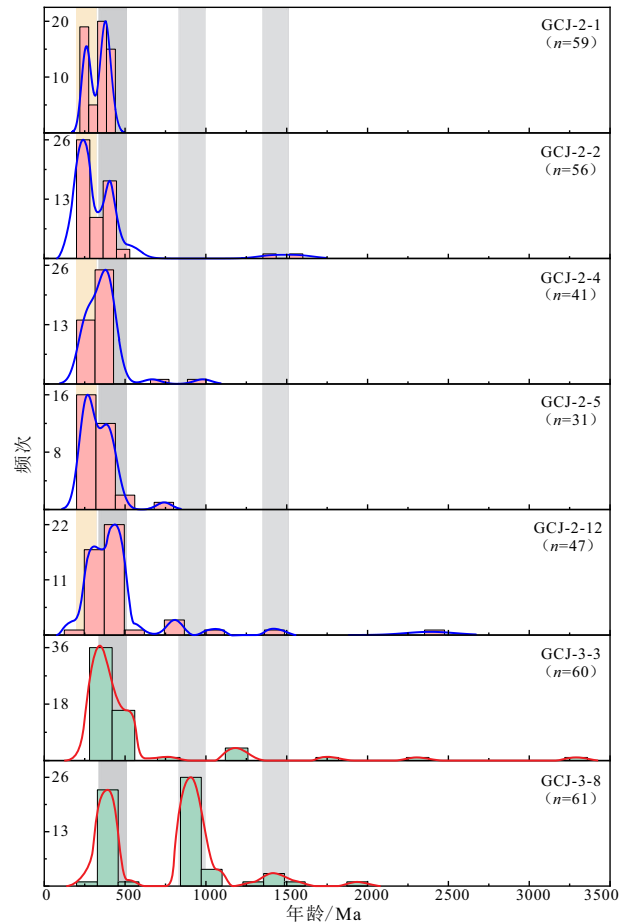
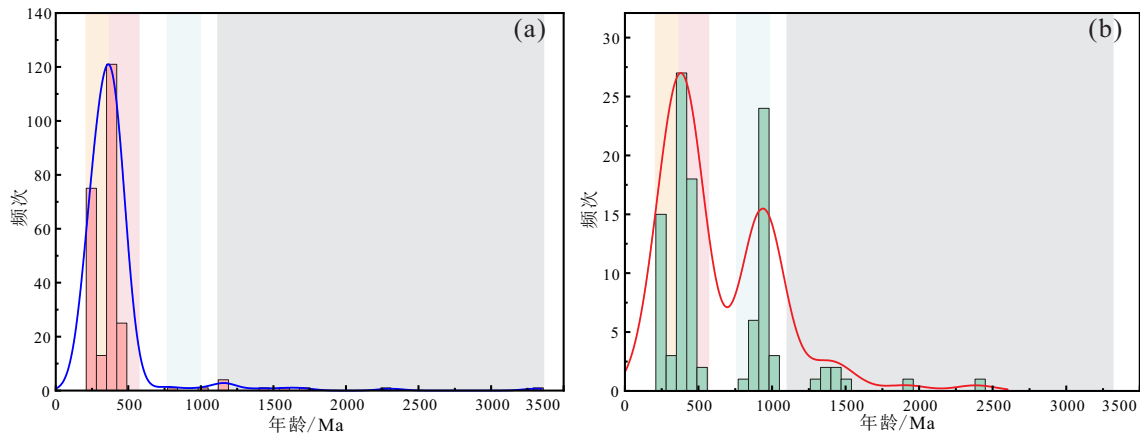


图 13 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井碎屑锆石 U-Pb 年龄分布

Fig. 13 Detrital zircon U-Pb age spectrum from boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin

值至正值特征一致 (Li *et al.*, 2013; Song *et al.*, 2020)。相比之下, 南祁连山虽然也出现了 248 ~ 277 Ma 次峰年龄, 但其更常见的是约 441 Ma 主峰, 并伴有 807 ~ 923 Ma 和 1854 ~ 2370 Ma 等组成; 阿尔金山则以 435 ~ 469 Ma 和 939 ~ 954 Ma 为主; 柴北缘除 252 ~ 273 Ma 外, 通常还应伴随更明显的 420 ~ 430 Ma 及 0.9 ~ 1.0 Ga、1.8 ~ 1.9 Ga 年龄组成, 而这些特征在柴钾 2 井七个泉组样品中均不突出 (Wu *et al.*, 2018; 彭璇等, 2022; 钱涛等, 2025)。因此, 柴钾 2 井七个泉组样品应以东昆仑祁漫塔格相关物质来源为主, 柴北缘可能有少量补充, 南祁连山和阿尔金山贡献较小。

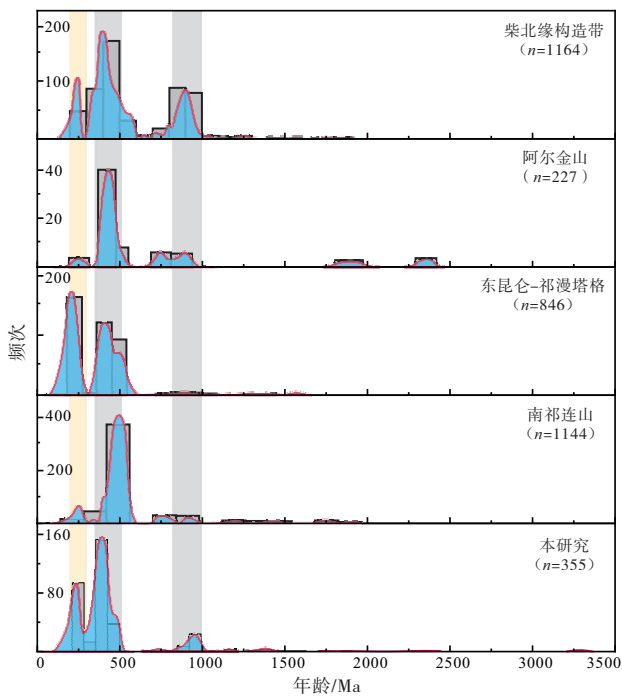
柴钾 3 井七个泉组样品 G CJ-3-3 则表现出完全不同的年龄结构, 其主峰为  $409.3 \pm 2.9$  Ma, 次峰为  $465.6 \pm 3.7$  Ma, 不含印支期年龄, 说明其物



a—七个泉组碎屑锆石 U-Pb 年龄图谱；b—狮子沟组碎屑锆石 U-Pb 年龄图谱。从左到右：黄色底图代表年龄区间 303—213 Ma；粉色底图年龄区间 513—330 Ma；蓝色底图年龄区间 997—741 Ma；灰色底图年龄区间 3307—1145 Ma

图 14 柴达木盆地大浪滩地区七个泉组与狮子沟组碎屑锆石 U-Pb 年龄对比图

Fig. 14 U-Pb age comparison diagram of detrital zircon between the Qigequan Formation and Shizigou Formation in Dalangtan area, Qaidam Basin



潜在物源区碎屑锆石数据参考自杨明慧和宋建军, 2002; 史仁灯等, 2003; Tung *et al.*, 2007; 吴才来等, 2007, 2008, 2014b; 齐瑞荣, 2012; Song *et al.*, 2012; 祁生胜等, 2013; 朱小辉等, 2014; 董增产等, 2014, 2015; 张照伟等, 2015; 彭渊等, 2016a, 2016b; 祁晓鹏等, 2016; 王嘉琦等, 2023

图 15 柴达木盆地大浪滩地区柴钾 2 井、柴钾 3 井与潜在物源区碎屑锆石 U-Pb 年龄谱图

Fig. 15 Detrital zircon U-Pb age spectrum from boreholes CJ-2 and CJ-3 in Dalangtan area, Qaidam Basin and its potential source areas

源组成明显不同于柴钾 2 井。该样品与阿尔金山、柴北缘和南祁连山均存在一定对应关系：阿尔金山发育 469—435 Ma 和 424—406 Ma 岩浆活动，柴北缘可见 422 ~ 429 Ma 和 400 ~ 409 Ma 年龄，南祁连山则发育 452—431 Ma、440—425 Ma、409—402 Ma 和 386 Ma 岩浆活动 (Wu *et al.*, 2018; 李平等, 2023)。GCJ-3-3 在 335 ~ 514 Ma 年龄段 Hf 同位素正负并存，整体接近中性至弱负，表明其来源中既有较年轻地壳物质，也有古老陆壳重熔成分，这与柴北缘和南祁连山早古生代侵入岩 Hf 同位素变化幅度较大、正负共存的特征更为接近，也与阿尔金早古生代花岗岩以正值为主、局部可见负值的特征相符 (Wu *et al.*, 2018; 李治华等, 2021; 李平等, 2023)。然而 GCJ-3-3 并不明显发育南祁连山常见的 807 ~ 923 Ma 和 1.8 ~ 2.5 Ga 年龄，也未出现柴北缘典型的 252 ~ 273 Ma 组成，因此南祁连山和柴北缘均不宜单独作为其唯一来源。综合判断，GCJ-3-3 主要反映阿尔金山与柴北缘共同供源，南祁连山可能有一定参与，但并非主导来源。

2 口钻井七个泉组物源的差异，反映了同一沉积阶段内研究区冲洪积扇相的横向分异。柴钾 2 井七个泉组 4 个样品指示其持续接受较稳定的南侧东昆仑祁漫塔格方向物源补给；而柴钾 3 井七个泉组样品表明其主要记录了阿尔金山和柴北缘方向的碎屑供给。由此可见，七个泉组沉积时期研究区内部不同井位所对应的扇体展布、碎屑输送方向和近源

补给范围已出现明显差异。晚上新世—早更新世阿尔金断裂活动增强、柴西北内部抬升并伴随沉积中心迁移,区域挤压作用进一步增强,促使山前冲洪积扇沉积体系重组 (Chang *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2022), 此外, 大浪滩—黑北凹地区逆断层发育, 山前地层抬升、相邻钻孔间岩性与储层差异明显, 表明区域断裂进一步强化了沉积充填和物源记录上的横向差异 (侯献华等, 2021), 最终形成柴钾 2 井以东昆仑祁漫塔格为主、柴钾 3 井以阿尔金山和柴北缘共同供源为主的分区供源格局。这一认识也与晚新生代柴达木盆地碎屑锆石年龄谱具有明显时空分异的研究结果 (Jian *et al.*, 2024) 相一致。

#### 4.2.2 狮子沟组物源特征

与七个泉组相比, 狮子沟组样品年龄分布范围明显变宽, 且较老锆石数量增加, 指示其物源组成更为复杂。柴钾 2 井狮子沟组样品 GCJ-2-12 的主峰为  $267.0 \pm 3.5$  Ma, 次峰为  $452.4 \pm 5.4$  Ma, 年龄范围可延伸至 2387.3 Ma (图 14)。这一年龄组合说明其来源不能由单一源区解释。267 Ma 可与东昆仑祁漫塔格 246—244 Ma 岩浆活动对应, 也可与柴北缘 273—252 Ma 岩浆活动及南祁连 248—277 Ma 次峰年龄对应 (图 15); 452 Ma 则可与南祁连 452—444 Ma 花岗岩、阿尔金 469—435 Ma 岩浆活动以及柴北缘早古生代侵入岩相联系 (董增平等, 2015; Wu *et al.*, 2018; Song *et al.*, 2020; 李平等, 2023)。样品中还出现 2387 Ma 等较老年龄, 与南祁连常见的 1854~2370 Ma 组成、阿尔金的 1.8~2.5 Ga 组分以及柴北缘欧龙布鲁克地块的古老基底均可对应 (赵文涛等, 2020; 曾旭等, 2024; 钱涛等, 2025)。GCJ-2-12 的  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  变化范围在全部样品中较宽, 正值和负值同时出现, 表明其来源中既包含较年轻地壳物质, 也包含古老陆壳物质。综合判断, GCJ-2-12 应解释为东昆仑祁漫塔格、柴北缘、南祁连山和阿尔金山共同供给的混合来源, 其中 267 Ma 主要反映二叠纪岩浆物质输入, 452 Ma 和 2387 Ma 等组成则反映北侧—西北侧奥陶纪及古老基底物质的加入。

柴钾 3 井狮子沟组样品 GCJ-3-8 的主峰为  $386.6 \pm 5.1$  Ma, 次峰为  $942.9 \pm 7.7$  Ma, 年龄上限可达 1912.2 Ma。这一组合与 4 个潜在源区均存在一定对应, 但约束关系比 GCJ-2-12 更清楚。

386 Ma 可与南祁连泥盆纪 386 Ma 及 409—402 Ma 岩浆活动对应, 也与东昆仑 490—390 Ma 早古生代岩浆活动吻合; 942.9 Ma 则与阿尔金山 939~954 Ma、东昆仑约 920 Ma 和南祁连 807~923 Ma 组成较为接近 (Chen *et al.*, 2018; Jian *et al.*, 2020; 李平等, 2023)。GCJ-3-8 整体以正  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  为主, 但变化幅度较小, 说明其来源中较年轻地壳物质加入较多, 同时存在一定古老陆壳物质。考虑到该样品缺少 250 Ma 左右主峰, 不宜解释为东昆仑三叠纪物源主导, 更合理的解释是东昆仑祁漫塔格的早古生代—新元古代物源, 与南祁连及阿尔金山物源的共同输入。其中, 东昆仑祁漫塔格在 386 Ma 组分上仍具有较强解释力, 而 943 Ma 和 1912 Ma 等年龄则反映南祁连、阿尔金及柴北缘古老地体的参与。

与七个泉组相比, 狮子沟组在 2 口钻井中均表现出更明显的多源混合特征, 说明该阶段研究区沉积体系对周缘山系碎屑的汇聚范围更广。柴钾 2 井狮子沟组样品反映东昆仑祁漫塔格与北侧—西北侧柴北缘、南祁连山及阿尔金山物质的共同加入; 柴钾 3 井狮子沟组样品显示其在接受东昆仑祁漫塔格物源的同时, 也混入了南祁连、阿尔金及柴北缘古老地体的碎屑。整体上, 狮子沟组沉积时期研究区处于以多源混合为主的盆地沉积格局, 而至七个泉组沉积时期, 随着阿尔金山前构造活动及柴西北抬升—挤压作用增强, 山前粗碎屑沉积体系明显前推, 原先较为宽泛的多源混合格局进一步演化为不同井位之间更清楚的分区供源格局 (Chang *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2022)。这一变化与晚新生代柴达木盆地碎屑物源由广泛混合向局部分异增强的总体趋势 (Jian *et al.*, 2024) 相吻合。

## 5 结论

1) 综合柴达木盆地柴钾 2 井和柴钾 3 井碎屑锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素研究, 结合周缘山系主要锆石 U-Pb 年龄, 明确了盆地西北部大浪滩地区狮子沟组和七个泉组的物源组成特征。研究区碎屑锆石 U-Pb 年龄总体介于 213~3307 Ma 之间, 主要包括 200~300 Ma, 330~510 Ma, 740~990 Ma, 1.1~3.3 Ga 共 4 组年龄。其中, 柴钾 2 井七个泉组样品主要峰值年龄集中在 250~263 Ma 和 300~

401 Ma, 柴钾3井七个泉组样品主要峰值年龄集中于409~466 Ma; 狮子沟组样品年龄分布范围更宽, 除267 Ma、386 Ma、452 Ma和943 Ma等峰值外, 还出现1912 Ma和2387 Ma等较老年龄。

2) 柴达木盆地西北部大浪滩地区不同井位和不同层位的碎屑锆石年龄谱及Hf同位素特征存在明显差异, 表明其物源组成具有分区性和混合性。七个泉组沉积时期, 柴钾2井物源以东昆仑祁漫塔格为主, 柴北缘可能有少量参与; 柴钾3井则主要反映阿尔金山和柴北缘共同供源, 南祁连山可能有一定参与。狮子沟组较七个泉组表现出更为复杂的多源混合特征, 其中柴钾2井狮子沟组为东昆仑祁漫塔格、柴北缘、南祁连山和阿尔金山共同供源, 柴钾3井狮子沟组则以东昆仑祁漫塔格和南祁连山相关物质占较高比例, 同时接受阿尔金山和柴北缘的部分输入。2口钻井之间的物源差异反映了山前冲洪积扇沉积体系的横向分异特征, 并受到晚新生代区域构造活动增强及断层的共同控制。

**后记:** 值恩师冯增昭先生百年诞辰之际, 谨于本文致以崇高敬意与深切缅怀。冯增昭先生毕生从事沉积学与岩相古地理学的教学和研究, 在碳酸盐岩沉积学、岩相古地理学及相关方法体系建设等方面作出了卓越贡献, 对中国沉积地质学与古地理学的发展产生了深远影响。先生治学严谨, 求实创新, 奖掖后学, 诲人不倦, 其学术造诣与师者风范, 为学界所敬仰。

作为学生, 笔者在长期学术研究与教学实践中, 始终深受先生学术思想与精神风范的启迪。值此百年之际, 谨以此文追念恩师, 表达由衷敬意与诚挚感念。冯增昭先生的学术思想、治学精神与师者风范, 必将薪火相传, 长久垂范后学, 并继续激励后来者在沉积学与古地理学研究道路上守正创新、砥砺前行!

(通讯作者张永生为冯增昭先生的1992级博士研究生)

### 参考文献 (References)

陈国超, 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 裴磊, 刘战庆, 陈有旻, 刘成军, 高景民, 魏方辉. 2013. 东昆仑洪水川地区科鄂阿龙岩体锆石U-Pb年代学、地球化学及其地质意义. 地质学报, 87(2): 178-196. [Chen G C, Pei X Z, Li R B, Li Z C, Pei L, Liu Z Q, Chen Y X, Liu C J, Gao J M, Wei F H. 2013. Zircon U-Pb geochronology, geochem-

ical characteristics and geological significance of cocoe A'Long quartz diorites body from the Hongshuichuan area in east Kunlun. Acta Geologica Sinica, 87(2): 178-196]

- 陈宣华, Michael W. McRivette, 李丽, 尹安, 蒋荣宝, 万景林, 李会军. 2011. 东昆仑造山带多期隆升历史的地质热年代学证据. 地质通报, 30(11): 1647-1660. [Chen X H, McRivette W M, Li L, Yin A, Jiang R B, Wan J L, Li H J. 2011. Thermochronological evidence for multi-phase uplifting of the East Kunlun Mountains, northern Tibetan Plateau. Geological Bulletin of China, 30(11): 1647-1660]
- 陈正乐, 宫红良, 李丽, 王小凤, 陈柏林, 陈宣华. 2006. 阿尔金山脉新生代隆升一剥露过程. 地质前缘, 13(4): 91-102. [Chen Z L, Gong H L, Li L, Wang X F, Chen B L, Chen X H. 2006. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh Mountains. Earth Science Frontiers, 13(4): 91-102]
- 董增产, 辜平阳, 焦和, 查显锋, 陈锐明, 张海迪. 2014. 柴北缘西端盐湖盐场北山辉长岩地球化学及年代学研究. 地质科学, 49(4): 1132-1149. [Dong Z C, Gu P Y, Jiao H, Zha X F, Chen R M, Zhang H D. 2014. Geochemistry and chronology of Yanchangbeishan gabbro in Lenghu area at the west segment of the north margin of Qaidam. Chinese Journal of Geology, 49(4): 1132-1149]
- 董增产, 辜平阳, 陈锐明, 查显锋, 张海迪. 2015. 柴北缘西端盐场北山二长花岗岩年代学、地球化学及其Hf同位素特征. 地球科学, 40(1): 130-144. [Dong Z C, Gu P Y, Chen R M, Zha X F, Zhang H D. 2015. Geochronology, geochemistry, and Hf isotope of Yanchangbeishan adamellite of Lenghu area in Qinghai. Earth Science, 40(1): 130-144]
- 侯献华, 王伟, 郑绵平, 樊馥, 李洪普, 高雪峰. 2021. 柴达木盆地西部黑北凹地一大浪滩深层卤水钾盐储卤层地震响应特征研究. 地质前缘, 28(6): 134-145. [Hou X H, Wang W, Zheng M P, Fan F, Li H P, Gao X F. 2021. Seismic response characteristics of the Heibei Concave-Dalangtan potassium-rich deep brine reservoir in western Qaidam Basin. Earth Science Frontiers, 28(6): 134-145]
- 李平, 高晓峰, 吕鹏瑞, 朱小辉, 陈隽璐. 2023. 祁连山—柴北缘地区岩浆活动的时空分布、成因演变及构造岩浆演化. 西北地质, 56(4): 283-317. [Li P, Gao X F, Lü P R, Zhu X H, Chen J L. 2023. Spatial-temporal distribution, petrogenetic evolution and tectono-magmatic evolution in Qilian Mountains and northern margin of Qaidam. Northwestern Geology, 56(4): 283-317]
- 李治华, 李碧乐, 王斌, 陈苏龙, 李鹏, 廖宇斌, 于润涛. 2021. 柴北缘苦水泉金矿英云闪长岩和细粒闪长岩年代学、地球化学和Hf同位素及地质意义. 岩石学报, 37(6): 1653-1673. [Li Z H, Li B L, Wang B, Chen S L, Li P, Liao Y B, Yu R T. 2021. Geochronology, geochemistry, Hf isotope, and their geological significance of the tonalite and fine-grained diorite from Kushuiquan gold deposit, North Qaidam. Acta Petrologica Sinica, 37(6): 1653-1673]
- 刘良, 康磊, 曹玉亭, 杨文强. 2015. 南阿尔金早古生代俯冲碰撞过程中的花岗质岩浆作用. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1126-1137. [Liu L, Kang L, Cao Y T, Yang W Q. 2015. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China. Scientia Sinica (Terrae), 45(8): 1126-1137]

- 彭璇,庄玉军,辜平阳,时超,何世平,曹佰迪. 2022. 柴北缘小赛什腾山片麻状花岗岩的成因: 来自地球化学、锆石U-Pb年代学及Hf同位素约束. 西北地质, 55(4): 221-239. [Peng X, Zhuang Y J, Gu P Y, Shi C, He S P, Cao B D. 2022. Petrogenesis of the gneissic granite in Xiaosaishteng Mountain, northern Qaidam: constraint from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. *Northwestern Geology*, 55(4): 221-239]
- 彭渊,马寅生,刘成林,李宗星,孙娇鹏,邵鹏程. 2016a. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗闪长岩地质特征及其构造意义. 地学前缘, 23(2): 206-221. [Peng Y, Ma Y S, Liu C L, Li Z X, Sun J P, Shao P C. 2016a. Geological characteristics and tectonic significance of the Indosinian granodiorites from the Zongwulong tectonic belt in North Qaidam. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 206-221]
- 彭渊,马寅生,刘成林,孙娇鹏,胡忠亚,牟宏良,郑策. 2016b. 东昆仑大干沟火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 地质通报, 35(S1): 356-363. [Peng Y, Ma Y S, Liu C L, Sun J P, Hu Z Y, (Mou/Mu) H L, Zheng C. 2016b. SHRIMP zircon ages of the Dagangou volcanic rocks in the eastern Kunlun orogenic belt and their implications. *Geological Bulletin of China*, 35(S1): 356-363]
- 齐瑞荣. 2012. 中祁连山西段巴嘎德基岩体 LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄及地质意义. 沉积与特提斯地质, 32(4): 86-93. [Qi R R. 2012. LA-ICP-MS zircon U-Pb ages and geological implications for the Bagadeerji granitic plutons in the central Qilian Mountains, Gansu. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 32(4): 86-93]
- 祁生胜,邓晋福,叶占福,刘荣,王国良. 2013. 青海祁漫塔格地区晚泥盆世辉绿岩墙群 LA-ICP-MS 锆石U-Pb年龄及其构造意义. 地质通报, 32(9): 1385-1393. [Qi S S, Deng J F, Ye Z F, Liu R, Wang G L. 2013. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Late Devonian diabase dike swarms in Qimantag area. *Geological Bulletin of China*, 32(9): 1385-1393]
- 祁晓鹏,杨杰,范显刚,崔建堂,蔡振锋,曾献文,魏伟,屈小相,翟黎明. 2016. 东昆仑东段东昆中构造混杂岩带长石山蛇绿岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 中国地质, 43(3): 797-816. [Qi X P, Yang J, Fan X G, Cui J T, Cai Z F, Zeng X W, Wei W, Qu X X, Zhai L M. 2016. Age, geochemical characteristics and tectonic significance of Changshishan ophiolite in central East Kunlun tectonic mélangé belt along the east section of East Kunlun Mountains. *Geology in China*, 43(3): 797-816]
- 钱涛,李王鹏,高万里,何玮东,江万,郭迎春,盛美. 2025. 柴北缘东段新生代沉积记录的南祁连构造隆升. 地球学报, 46(6): 1067-1081. [Qian T, Li W P, Gao W L, He W D, Jiang W, Guo Y C, Sheng M. 2025. South Qilian tectonic uplift in the eastern segment of the northern Qaidam Basin recorded by the Cenozoic sediments. *Acta Geoscientia Sinica*, 46(6): 1067-1081]
- 史仁灯,杨经绥,吴才来. 2003. 柴北缘早古生代岛弧火山岩中埃达克质英安岩的发现及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 22(3): 229-236. [Shi R D, Yang J S, Wu C L. 2003. The discovery of adakitic dacite in Early Paleozoic island arc volcanic rocks on the northern margin of Qaidam Basin and its geological significance. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(3): 229-236]
- 王嘉琦,施炜,李宗星,钟畅. 2023. 柴达木盆地东北缘晚新生代构造隆升: 来自碎屑锆石U-Pb年代学证据. 地质论评, 69(6): 2391-2406. [Wang J Q, Shi W, Li Z X, Zhong C. 2023. Late Cenozoic tectonic uplift in the northeastern margin of the Qaidam Basin: evidence from detrital zircon U-Pb chronology. *Geological Review*, 69(6): 2391-2406]
- 吴才来,部源红,吴锁平,陈其龙,Joseph L. Wooden, Frank K. MAZAD-AB, Chris MATTINSON. 2007. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年. 岩石学报, 23(8): 1861-1875. [Wu C L, Gao Y H, Wu S P, Chen Q L, Wooden J, Mazadab F, Mattinson C. 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1861-1875]
- 吴才来,部源红,吴锁平,陈其龙,Joseph L. Wooden, Frank K. Mazadab, Chris Mattinson. 2008. 柴北缘西段花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb定年及其岩石地球化学特征. 中国科学 D 辑, 38(8): 930-949. [Wu C L, Gao Y H, Wu S P, Chen Q L, Lwooden J, Kmazadab F, Mattinson C. 2008. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites in the western part of northern Qaidam Basin and its petrogeochemical characteristics. *Science in China(Series D)*, 38(8): 930-949]
- 吴才来,部源红,雷敏,秦海鹏,刘春花,李名则, B Ronald Frost, Joseph L. Wooden. 2014a. 南阿尔金山麓地区花岗岩类锆石 SHRIMP-U-Pb 定年、Lu-Hf 同位素特征及岩石成因. 岩石学报, 30(8): 2297-2323. [Wu C L, Gao Y H, Lei M, Qin H P, Liu C H, Li M Z, Frost B R, Wooden J L. 2014a. Zircon SHRIMP U-Pb dating, Lu-Hf isotopic characteristics and petrogenesis of the Palaeozoic granites in Mangya area, southern Altun, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 30(8): 2297-2323]
- 吴才来,部源红,李兆丽,雷敏,秦海鹏,李名则,刘春花, Ronald B Frost, Paul T. Robinson. 2014b. 都兰花岗岩锆石 SHRIMP 定年及柴北缘超高压带花岗岩年代学格架. 中国科学(地球科学), 44(10): 2142-2159. [Wu C L, Gao Y H, Li Z L, Lei M, Qin H P, Li M Z, Liu C H, Frost R, Robinson P. 2014b. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from Dulan and the chronological framework of the North Qaidam UHP belt, NW China. *Scientia Sinica(Terrae)*, 44(10): 2142-2159]
- 谢皓. 2024. 祁连山西段红崖子盆地新生代沉积演化及其构造意义. 中国地震局地质研究所博士学位论文. [Xie H. 2024. The Cenozoic sedimentary evolution and tectonic significance of the Hongyazi Basin in the western Qilian Mountains. Doctoral dissertation of Institute of Geology, China Earthquake Administration]
- 徐旭明,刘广,梁国庆. 2017. 赛什腾山一带火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb年龄及其地球化学特征. 新疆地质, 35(3): 250-254. [Xu X M, Liu G, Liang G Q. 2017. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and geochemical characteristics of the volcanic rocks in the area of Saishiteng Mountain. *Xinjiang Geology*, 35(3): 250-254]
- 杨明慧,宋建军. 2002. 柴达木盆地冷湖花岗岩体岩石学初步研究. 西北地质, 35(3): 94-98. [Yang M H, Song J J. 2002. Petrology of the Lenghu granite mass, northwestern Qaidam basin, China. *Northwestern Geology*, 35(3): 94-98]
- 曾旭,付锁堂,王波,龙国徽,吴志雄,崔海栋,王琛茜. 2024. 柴达木盆地古近系下干柴沟组上段碎屑锆石 U-Pb 测年及盆山耦合探讨. 地质学报, 98(1): 79-105. [Zeng X, Fu S T, Wang B, Long G H, Wu Z X, Cui H D, Wang C X. 2024. Detrital zircon U-Pb dating

- of the Paleogene Lower Ganchaigou Formation in the Qaidam Basin and discussion of basin-mountain coupling. *Acta Geologica Sinica*, 98(1): 79-105]
- 张涛, 宋春晖, 王亚东, 郑海军, 张志高, 吴松, 孟庆泉, 方小敏. 2012. 柴达木盆地西部地区晚新生代构造变形及其意义. *地质学前沿*, 19(5): 312-321. [Zhang T, Song C H, Wang Y D, Zheng H J, Zhang Z G, Wu S, Meng Q Q, Fang X M. 2012. The Late Cenozoic tectonic deformation in the Western Qaidam Basin and its implications. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 312-321]
- 张照伟, 李文渊, 王亚磊, 高永宝. 2015. 南祁连化隆地区下什堂含铜镍矿基性—超基性岩体成因研究: 锆石年代学、地球化学和 Sr-Nd 同位素约束. *岩石学报*, 31(9): 2539-2548. [Zhang Z W, Li W Y, Wang Y L, Gao Y B. 2015. The genesis study on Xiashentang basic-ultrabasic intrusion associated with Ni-Cu mineralization in Hualong, southern Qilian Mountains: zircon geochronology, geochemistry and Sr-Nd isotopic constraints. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2539-2548]
- 赵菲菲, 孙丰月, 刘金龙. 2017. 东昆仑马尼特地区片麻状花岗闪长岩锆石U-Pb年代学、地球化学及其构造背景. *地球科学*, 42(6): 927-940, 1044. [Zhao F F, Sun F Y, Liu J L. 2017. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of the gneissic granodiorite in Manite area from East Kunlun, with implications for geodynamic setting. *Earth Science*, 42(6): 927-940, 1044]
- 赵文涛, 刘少峰, 陈敏. 2020. 柴北缘乌兰北部地区滩间山群碎屑锆石年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. *中国矿业*, 29(S1): 279-283. [Zhao W T, Liu S F, Chen M. 2020. Detrital zircons chronology, Hf isotopes and its geological significance from Tanjianshan group in the north Wulan terrane, north Qaidam. *China Mining Magazine*, 29(S1): 279-283]
- 郑绵平, 侯献华, 于常青, 李洪普, 尹宏伟, 张震, 邓小林, 张永生, 郭廷峰, 韦钊, 王绪本, 安莲英, 卞贞, 谭筱虹, 张雪飞, 牛新生. 2015. 成盐理论引领我国找钾取得重要进展. *地球学报*, 36(2): 129-139. [Zheng M P, Hou X H, Yu C Q, Li H P, Yin H W, Zhang Z, Deng X L, Zhang Y S, Guo T F, Wei Z, Wang X B, An L Y, Nie Z, Tan X H, Zhang X F, Niu X S. 2015. The leading role of salt formation theory in the breakthrough and important progress in potash deposit prospecting. *Acta Geoscientica Sinica*, 36(2): 129-139]
- 钟海仁, 孙艳, 赵芝, 王成辉. 2020. 重庆南川铝土矿物源分析: 碎屑锆石U-Pb定年、Hf 同位素和锆石微量元素示踪. *地质学报*, 94(5): 1505-1524. [Zhong H R, Sun Y, Zhao Z, Wang C H. 2020. Provenance of bauxite deposits in the Nanchuan district, Chongqing: evidence from U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in detrital zircons. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1505-1524]
- 朱小辉, 陈丹玲, 刘良, 赵姣, 张乐. 2014. 柴北缘绿梁山地区早古生代弧后盆地型蛇绿岩的年代学、地球化学及大地构造意义. *岩石学报*, 30(3): 822-834. [Zhu X H, Chen D L, Liu L, Zhao J, Zhang L. 2014. Geochronology, geochemistry and significance of the Early Paleozoic back-arc type ophiolite in Lvliangshan area, North Qaidam. *Acta Petrologica Sinica*, 30(3): 822-834]
- 庄玉军, 辜平阳, 李培庆, 何世平, 陈锐明, 查显锋. 2019. 柴北缘构造带欧龙布鲁克地块西北缘辉长岩脉地球化学、年代学及 Hf 同位素特征. *地质通报*, 38(11): 1801-1812. [Zhuang Y J, Gu P Y, Li P Q, He S P, Chen R M, Zha X F. 2019. Geochemistry, geochronology and Hf isotopic compositions of metagabbro dykes on the northwestern margin of Oulongbuluke micro-block on the northern margin of Qaidam Basin. *Geological Bulletin of China*, 38(11): 1801-1812]
- 庄玉军, 辜平阳, 高永伟, 彭璇, 何世平, 李普涛. 2020. 柴北缘赛什腾中二叠世辉长岩成因及其对宗务隆洋盆俯冲时限的制约. *岩石矿物学杂志*, 39(6): 718-734. [Zhuang Y J, Gu P Y, Gao Y W, Peng X, He S P, Li P T. 2020. Petrogenesis of Middle Permian gabbro in Saishiteng Mountain of the northern Qaidam Basin and its constraint to the time of Zongwulong Ocean subduction. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 39(6): 718-734]
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ . *Chemical Geology*, 192: 59-79.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, Fisher N. 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602-622.
- Bhatia M R, Crook K A W. 1986. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92(2): 181-193.
- Bouvier A, Vervoort J D, Patchett P J. 2008. The Lu-Hf and Sm-Nd isotopic composition of CHUR: constraints from unequilibrated chondrites and implications for the bulk composition of terrestrial planets. *Earth and Planetary Science Letters*, 273: 48-57.
- Cao J, Hu K, Wang K, Bian L Z, Liu Y T, Yang S Y, Wang L Q, Chen Y. 2008. Possible origin of 25-norhopanes in Jurassic organic-poor mudstones from the northern Qaidam Basin (NW China). *Organic Geochemistry*, 39(8): 1058-1065.
- Cawood P A, Wang Y J, Xu Y J, Zhao G C. 2013. Locating South China in Rodinia and Gondwana: a fragment of greater India lithosphere. *Geology*, 41: 903-906.
- Chang H, Ao H, An Z S, Fang X M, Song Y G, Qiang X K. 2012. Magnetostratigraphy of the Suerkuli Basin indicates Pliocene (3.2 Ma) activity of the middle Altyn Tagh Fault, northern Tibetan Plateau. *Journal of Asian Earth Sciences*, 44: 169-175.
- Chen A D, Zheng M P, Shi L F, Wang H L, Xu J M. 2017. Magnetostratigraphy of deep drilling core 15YZK01 in the northwestern Qaidam Basin (NE Tibetan Plateau): tectonic movement, salt deposits and their link to Quaternary glaciation. *Quaternary International*, 436: 201-211.
- Chen H J, Wang N, Wu C L, Lei M, Zheng K, Zhang X, Gao D. 2018. Geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotopic characteristics of Neoproterozoic granitoids in the Yaganbuyang area, Altyn Tagh, NW China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 92(4): 1366-1383.
- Cheng F, Jolivet M, Hallot E, Zhang D W, Zhang C H, Guo Z J. 2017. Tectono-magmatic rejuvenation of the Qaidam craton, northern Tibet. *Gondwana Research*, 49: 248-263.
- Clark M K. 2011. Early Tibetan Plateau uplift history eludes. *Geology*, 39(10): 991-992.

- Cowgill E, Yin A, Harrison T M, Wang X F. 2003. Reconstruction of the Altyn Tagh fault based on U-Pb geochronology: role of back thrusts, mantle sutures, and heterogeneous crustal strength in forming the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108: 2002JB002080.
- Duvall A R, Clark M K, Kirby E, Farley K A, Craddock W H, Li C Y, Yuan D Y. 2013. Low-temperature thermochronometry along the Kunlun and Haiyuan Faults, NE Tibetan Plateau: evidence for kinematic change during late-stage orogenesis. *Tectonics*, 32(5): 1190–1211.
- Fang X M, Zhang W L, Meng Q Q, Gao J P, Wang X M, King J, Song C H, Dai S, Miao Y F. 2007. High-resolution magnetostratigraphy of the Neogene Huaitoutala section in the eastern Qaidam Basin on the NE Tibetan Plateau, Qinghai Province, China and its implication on tectonic uplift of the NE Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 258(1–2): 293–306.
- Gao J, Fang X, Song C, Li S, Xue J. 2011. Tectonic-thermo events of northern Tibetan Plateau: evidence from detrital apatite fission-track data in western Qaidam Basin. *Journal of Jilin University*, 41(5): 1466–1475.
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F. 2003a. Detrital-zircon geochronology of the northeastern Tibetan Plateau. *Geological Society of America Bulletin*, 115: 881–896.
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F. 2003b. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108: 2002JB001876.
- Gehrels G E, Valencia V A, Ruiz J. 2008. Enhanced precision, accuracy, efficiency, and spatial resolution of U-Pb ages by laser ablation: multicollector-inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 9: 2007GC001805.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Achenbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(1): 133–147.
- Grimes C B, John B E, Kelemen P B, Mazdab F K, Wooden J L, Cheadle M J, Hanghøj K, Schwartz J J. 2007. Trace element chemistry of zircons from oceanic crust: a method for distinguishing detrital zircon provenance. *Geology*, 35(7): 643–646.
- Hanson A D, Ritts B D, Zinniker D, Moldowan J M, Biffi U. 2001. Upper Oligocene lacustrine source rocks and petroleum systems of the northern Qaidam Basin, northwest China. *AAPG Bulletin*, 85(4): 601–619.
- Harrison T M, Copeland P, Kidd W, Yin A. 1992. Raising Tibet. *Science*, 255: 1663–1670.
- He P J, Song C H, Wang Y D, Chen L H, Chang P F, Wang Q Q, Ren B. 2017. Cenozoic exhumation in the Qilian Shan, northeastern Tibetan Plateau: evidence from detrital fission track thermochronology in the Jiuquan Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(8): 6910–6927.
- He P J, Song C H, Wang Y D, Meng Q Q, Chen L H, Yao L J, Huang R H, Feng W, Chen S. 2018. Cenozoic deformation history of the Qilian Shan (northeastern Tibetan Plateau) constrained by detrital apatite fission-track thermochronology in the northeastern Qaidam Basin. *Tectonophysics*, 749: 1–11.
- He P J, Song C H, Wang Y D, Meng Q Q, Wang D C, Feng Y, Chen L H, Feng W. 2020. Early Cenozoic exhumation in the Qilian Shan, northeastern margin of the Tibetan Plateau: insights from detrital apatite fission track thermochronology. *Terra Nova*, 32(6): 415–424.
- Hoskin P W, Ireland T R. 2000. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator. *Geology*, 28(7): 627–630.
- Hoskin P W, Schaltegger U. 2003. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 27–62.
- Jian X, Guan P, Zhang W, Feng F. 2013. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau: implications for provenance and weathering. *Chemical Geology*, 360: 74–88.
- Jian X, Weislogel A, Pullen A, Shang F. 2020. Formation and evolution of the Eastern Kunlun Range, northern Tibet: evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. *Gondwana Research*, 83: 63–79.
- Jian X, Guan P, Fu L, Zhang W, Shen X T, Fu H J, Wang L. 2024. Detrital zircon geochronology and provenance of Cenozoic deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau: an overview with new data, implications and perspectives. *Marine and Petroleum Geology*, 159: 106566.
- Jolivet M, Brunel M, Seward D, Xu Z, Yang J, Roger F, Tapponnier P, Malavieille J, Arnaud N, Wu C. 2001. Mesozoic and Cenozoic tectonics of the northern edge of the Tibetan Plateau: fission-track constraints. *Tectonophysics*, 343(1–2): 111–134.
- Li W, Neubauer F, Liu Y J, Genser J, Ren S M, Han G Q, Liang C Y. 2013. Paleozoic evolution of the Qimantagh magmatic arcs, Eastern Kunlun Mountains: constraints from zircon dating of granitoids and modern river sands. *Journal of Asian Earth Sciences*, 77: 183–202.
- Liu Y J, Genser J, Ge X H, Neubauer F, Friedl G, Chang L H, Ren S M, Handler R. 2003.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age evidence for Altyn fault tectonic activities in western China. *Chinese Science Bulletin*, 48(18): 2024–2030.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1–2): 537–571.
- Lu H J, Ye J C, Guo L C, Pan J W, Xiong S F, Li H B. 2019. Towards a clarification of the provenance of Cenozoic sediments in the northern Qaidam Basin. *Lithosphere*, 11(2): 252–272.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley, California: Berkeley Geochronology Center Special Publication 4: 71.
- McLennan S M. 2018. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. In: *Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements*. De Gruyter: 169–200.
- Morel M, Nebel O, Nebel-Jacobsen Y J, Miller J S, Vroon P Z. 2008. Hafnium isotope characterization of the GJ-1 zircon reference material

- by solution and laser-ablation MC-ICPMS. *Chemical Geology*, 255(1-2): 231-235.
- Niu M L, Cai Q R, Li X C, Yakymchuk C, Wu Q, Yuan X Y, Sun Y. 2021. Early Paleozoic tectonic transition from oceanic to continental subduction in the North Qaidam tectonic belt: constraints from geochronology and geochemistry of syncollisional magmatic rocks. *Gondwana Research*, 91: 58-80.
- Ritts B D, Biffi U. 2001. Mesozoic northeast Qaidam Basin: response to contractional reactivation of the Qilian Shan, and implications for the extent of Mesozoic intracontinental deformation in central Asia. *Paleozoic and Mesozoic Tectonic Evolution of Central and Eastern Asia: From Continental Assembly to Intracontinental Deformation*. Geological Society of America Memoir, 194: 293-316.
- Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. 2008. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 321: 1054-1058.
- Scherer E, Münker C, Mezger K. 2001. Calibration of the lutetium-hafnium clock. *Science*, 293: 683-687.
- Song K, Ding Q F, Zhang Q, Cheng L, Han Y, Liu F. 2020. Zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, and whole-rock geochemistry of Hongshuihe Early to Middle Triassic quartz diorites and granites in the Eastern Kunlun Orogen, NW China: implication for petrogenesis and geodynamics. *Geological Journal*, 55: 1507-1528.
- Song S G, Su L, Li X H, Niu Y L, Zhang L F. 2012. Grenville-age orogenesis in the Qaidam-Qilian block: the link between South China and Tarim. *Precambrian Research*, 220: 9-22.
- Sun G J, Zhang J J, Long S, Liu X W, Yang X, Liu Y H. 2010. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution in northwestern Qaidam Basin. *Natural Gas Geoscience*, 21(2): 212-217.
- Sun J M, Zhu R X, An Z S. 2005. Tectonic uplift in the northern Tibetan Plateau since 13.7 Ma ago inferred from molasse deposits along the Altyn Tagh Fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 235: 641-653.
- Tapponnier P, Molnar P. 1977. Active faulting and tectonics in China. *Journal of Geophysical Research*, 82(20): 2905-2930.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. *The continental crust: its composition and evolution*. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- Tung K, Yang H J, Yang H Y, Liu D Y, Zhang J X, Wan Y S, Tseng C Y. 2007. SHRIMP U-Pb geochronology of the zircons from the Precambrian basement of the Qilian Block and its geological significances. *Chinese Science Bulletin*, 52(19): 2687-2701.
- Wang L, MacLennan S A, Cheng F. 2020. From a proximal-deposition-dominated basin sink to a significant sediment source to the Chinese Loess Plateau: insight from the quantitative provenance analysis on the Cenozoic sediments in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 556: 109883.
- Wang Y D, Zheng J J, Zheng Y W, Liu X W, Sun G Q. 2015. Paleocene-Early Eocene uplift of the Altyn Tagh Mountain: evidence from detrital zircon fission track analysis and seismic sections in the northwestern Qaidam Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120: 8534-8550.
- Wu C, Li J, Ding L. 2021. Low-temperature thermochronology constraints on the evolution of the Eastern Kunlun Range, northern Tibetan Plateau. *Geosphere*, 17(4): 1193-1213.
- Wu C L, Chen H J, Wu D, Ernst W G. 2018. Paleozoic granitic magmatism and tectonic evolution of the South Altun block, NW China: constraints from zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotope geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 168-199.
- Xia W C, Zhang N, Yuan X P, Fan L S, Zhang B S. 2001. Cenozoic Qaidam Basin, China: a stronger tectonic inverted, extensional rifted basin. *AAPG Bulletin*, 85: 715-736.
- Xiao W J, Windley B F, Yong Y, Yan Z, Yuan C, Liu C Z, Li J L. 2009. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 323-333.
- Xiong Q, Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y, Pearson N J. 2012. Decoupling of U-Pb and Lu-Hf isotopes and trace elements in zircon from the UHP North Qaidam orogen, NE Tibet (China): tracing the deep subduction of continental blocks. *Lithos*, 155: 125-145.
- Yang J H, Cawood P A, Du Y S, Huang H, Hu L S. 2012. Detrital record of Indosinian mountain building in SW China: provenance of the Middle Triassic turbidites in the Youjiang Basin. *Tectonophysics*, 574: 105-117.
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211-280.
- Yin A, Rumelhart P E, Butler R, Cowgill E, Harrison T M, Foster D A, Ingersoll R V, Zhang Q, Zhou X Q, Wang X F, Hanson A, Raza A. 2002. Tectonic history of the Altyn Tagh fault system in northern Tibet inferred from Cenozoic sedimentation. *Geological Society of America Bulletin*, 114(10): 1257-1295.
- Yue Y, Ritts B D, Graham S A, Wooden J L, Gehrels G E, Zhang Z. 2004. Slowing extrusion tectonics: lowered estimate of post-Early Miocene slip rate for the Altyn Tagh fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 217(1-2): 111-122.
- Zhang W, Li B, Yan M. 2022. Anisotropy of magnetic susceptibility reveals Late Cenozoic tectonic processes in the western Qaidam Basin, NE Tibetan Plateau. *Frontiers in Earth Science*, 10: 845924.
- Zhao J, Zeng X, Tian J, Hu C, Wang D, Yan Z, Wang K, Zhao X. 2020a. Provenance and paleogeography of the Jurassic northwestern Qaidam Basin (NW China): evidence from sedimentary records and detrital zircon geochronology. *Journal of Asian Earth Sciences*, 190: 104060.
- Zhao X, Zhao J, Zeng X, Tian J, Guo Z, Wang C, Wang D, Hu C. 2020b. Early-Middle Jurassic paleogeography reconstruction in the western Qaidam Basin: insights from sedimentology and detrital zircon geochronology. *Marine and Petroleum Geology*, 118: 104445.
- Zhuang G, Hourigan J K, Ritts B D, Kent-Corson M L. 2011. Cenozoic multiple-phase tectonic evolution of the northern Tibetan Plateau: constraints from sedimentary records from Qaidam Basin, Hexi Corridor, and Subei Basin, northwest China. *American Journal of Science*, 311(2): 116-152.

(责任编辑 张西娟)