



引文格式: 黎秋月, 邓小华, 杜静国, 等. 西准噶尔库吉尔台组物源分析: 来自碎屑锆石的证据[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 182–193. DOI: 10.12401/j.nwg.2025163

Citation: LI Qiuyue, DENG Xiaohua, DU Jingguo, et al. Provenance of the Kujiertai Formation in Western Junggar: Evidence from Detrital Zircon LA-ICPMS U-Pb Geochronology[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 182–193. DOI: 10.12401/j.nwg.2025163

西准噶尔库吉尔台组物源分析: 来自碎屑锆石的证据

黎秋月¹, 邓小华^{1,2,*}, 杜静国¹, 何西恒¹, 牛澳斌¹, 邸贤栋¹, 李永军¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 2. 新疆维吾尔自治区地质研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 西准噶尔地区作为中亚造山带西南缘的关键构造单元, 为理清晚古生代库吉尔台组的物源体系与构造背景, 笔者研究选取库吉尔台组碎屑岩为研究对象, 系统开展了 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 定年与微量元素分析, 建立了该组高精度碎屑锆石年龄谱系及配套地球化学数据库, 结合碎屑锆石 Eu 异常重建地壳厚度方法, 为揭示其物源特征及构造演化背景提供了重要制约。结果显示, 库吉尔台组碎屑锆石的 Th/U 值为 0.81~4.03 (均大于 0.4), 指示其为典型的岩浆成因锆石。锆石 U-Pb 年龄谱显示, 主要年龄集中在 510~290 Ma 范围内, 并呈现出 5 个显著的峰值区间, 分别为 430~390 Ma、380~365 Ma、365~340 Ma、340~320 Ma 及 320~290 Ma。其中, 最年轻的锆石年龄为 298 Ma, 这一数据为该套地层的沉积时代提供了关键年代学约束, 表明其沉积作用不早于早二叠世。地球化学特征显示物源组成以酸性花岗岩 (约占 68%) 和铁镁质玄武岩 (约占 30%) 为主, 反映其物源区具有显著的岩浆岩特征。综合区域地质背景, 笔者认为库吉尔台组的物源体系主要受博什库尔-成吉斯岩弧、扎尔玛-萨吾尔岩弧及达尔布特蛇绿岩带的多期构造-岩浆活动共同控制。通过系统分析锆石 Eu 异常特征, 结合区域岩浆活动时间, 重建了研究区古生代期间的地壳厚度变化序列, 这一结果为厘清西准噶尔地区在古生代经历的“增生-转换-扰动调整”这一复杂构造演化过程提供了独立的地球化学证据。

关键词: 库吉尔台组; 碎屑锆石 U-Pb 定年; 物源分析; 地壳厚度; 西准噶尔

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0182-12

Provenance of the Kujiertai Formation in Western Junggar: Evidence from Detrital Zircon LA-ICPMS U-Pb Geochronology

LI Qiuyue¹, DENG Xiaohua^{1,2,*}, DU Jingguo¹, HE Xiheng¹, NIU Aobin¹, DI Xiandong¹, LI Yongjun¹

(1. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 2. Xinjiang Uygur Autonomous Region Institute of Geology, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: As a key tectonic unit in the southwestern margin of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB), the West Junggar region is critical for clarifying the provenance system and tectonic setting of the Late Paleozoic

收稿日期: 2025-11-20; 修回日期: 2026-01-20; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目“新疆古亚洲成矿域造山型金矿成矿规律研究和大型金矿床找矿预测”(2023B03015-1)和新疆维吾尔自治区“天池英才”引进计划联合资助。

作者简介: 黎秋月 (2001-), 女, 硕士研究生, 矿床学专业。E-mail: 2024127037@chd.edu.cn。

* 通讯作者: 邓小华 (1984-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事矿床学研究。E-mail: dxh198411@126.com。

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

Kujiertai Formation. In this study, clastic rocks of the Kujiertai Formation were selected as the research object, and systematic LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb dating and trace element analysis were carried out. A high-precision detrital zircon age spectrum and a supporting geochemical database of the formation were established. Combined with the method for reconstructing crustal thickness using zircon Eu anomalies, these data provide important constraints for revealing the provenance characteristics and tectonic evolution background. The results show that the Th/U ratios of detrital zircons from the Kujiertai Formation range from 0.81 to 4.03 (all greater than 0.4), indicating a typical magmatic origin. The zircon U-Pb age spectrum shows that the main ages are concentrated in the range of 510–290 Ma, with five distinct peak intervals: 430–390 Ma, 380–365 Ma, 365–340 Ma, 340–320 Ma and 320–290 Ma. Among them, the youngest zircon age is 298 Ma, which provides key chronological constraints on the sedimentary age of this stratigraphic sequence, suggesting that the sedimentation occurred no earlier than the Early Permian. Geochemical characteristics reveal that the provenance is dominated by acid granite (accounting for approximately 68%) and mafic basalt (accounting for approximately 30%), reflecting prominent magmatic rock features in the provenance area. Integrating with the regional geological background, this study holds that the provenance system of the Kujiertai Formation is mainly controlled by the multi-stage tectono-magmatic activities of the Boshkul-Junggar Magmatic Arc, the Zarma-Sawuer Magmatic Arc and the Darbut Ophiolite Belt. Through systematic analysis of zircon Eu anomaly characteristics and combined with the timing of regional magmatic activities, the Paleozoic crustal thickness variation sequence of the study area was reconstructed. This result provides independent geochemical evidence for clarifying the complex tectonic evolution process of "accretion-transformation-disturbance adjustment" experienced by the West Junggar region during the Paleozoic Era.

Keywords: Kujiertai Formation; detrital zircon U-Pb dating; provenance analysis; crustal thickness; Western Junggar

西准噶尔地区位于哈萨克斯坦、塔里木与西伯利亚三大板块的交汇地带,是中亚增生造山带西南缘的关键构造单元(图1;全孝勤等,2024;杨高等,2024)。该区域以构造现象复杂、岩浆活动强烈而著称,记录了古亚洲洋消亡与地体拼贴的完整过程(张蕊等,2024)。晚古生代(特别是石炭纪—二叠纪)是西准噶尔构造属性转换的关键时期,经历了从残余洋盆消减、弧陆碰撞到陆内造山的复杂演化,形成了丰富的火山—沉积记录。其中,上二叠统库吉尔台组作为该时期典型的磨拉石建造,直接响应了造山后期的隆升—剥蚀过程,是解密区域构造变革的重要载体。前人对西准噶尔地区晚古生代地层碎屑锆石年代学、物源及构造背景已开展系统性研究(辜平阳等,2009;郭丽爽等,2010;孙羽等,2014;张雷等,2015;廖婉琳等,2015;罗鑫等,2019;罗鑫,2020;Liu et al., 2023;李嘉伟等,2023)。然而,针对库吉尔台组的物源属性与构造背景研究相对薄弱,仅初步推测其物源与邻区地层相似,制约了西准噶尔地区晚古生代整体研究进展。尽管库吉尔台组露头规模小于石炭系与泥盆系,但其典型的磨拉石建造是恢复晚古生代地质过程的重要载体,深化研究对古地理重建具显著意义(Cawood et al.,

2007, 2012; Hawkesworth et al., 2010; Barham et al., 2022; Zutterkirch et al., 2022)。

本研究系统采集西准噶尔东南缘库吉尔台组样品,开展碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及微量元素分析,构建该组高精度锆石年龄谱系。与西准噶尔地区已有晚古生代地层物源研究多集中于北部或西部不同,本次工作重点针对东南缘关键地段,首次系统获取库吉尔台组的碎屑锆石年龄与微量元素组成,填补了该区域物源体系的空白,为精确限定南、北向物源贡献比例及构造单元亲缘性提供了关键数据。这一成果对于理清中亚造山带西南缘晚古生代构造演化的关键争议“该时期是持续洋壳俯冲还是已进入碰撞后伸展阶段”具有重要意义,也为深入理解区域成矿作用奠定了坚实基础。本研究揭示的构造—岩浆事件期次与空间格局,可为区域铜、金等矿床的成因类型划分、成矿物质来源追溯及成矿时代界定提供关键背景支撑。

1 区域地质背景

西准噶尔夹持于天山与阿尔泰山之间,发育了复

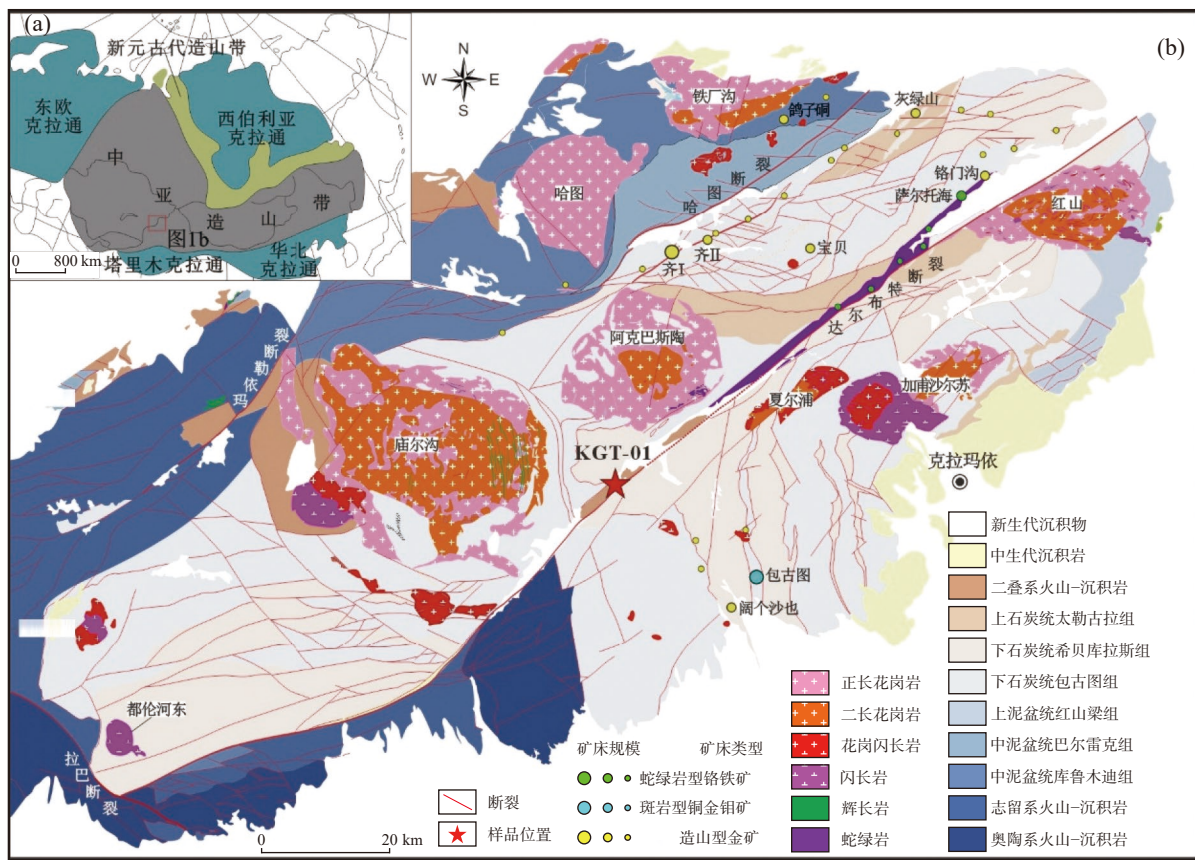


图1 中亚造山带构造简图(a)和西准噶尔区域地质及矿产分布图(b)(底图据宋永等, 2023 修改)

Fig. 1 (a) Tectonic sketch map of the Central Asian Orogenic Belt and (b) regional geology map of western Junggar

杂且长期演化的沟-弧-盆构造体系,经历了多期次拼贴增生(全孝勤等, 2024; 杨高等, 2024)。地区构造极为发育,包括达尔布特、玛依勒等区域性大断裂及其次级断裂,控制了区域岩体和矿床的分布。达尔布特断裂呈 NE 55°~60°走向,被认为是西准噶尔洋盆闭合的缝合线(陈衍景, 1995);玛依勒断裂沿库鲁木迪山麓呈近似 EW 向延伸,水平断距约为 10 km(陈宣华等, 2011)。安齐断裂、哈图断裂均呈 NE 走向,前者控矿且走滑方向有变化,后者为逆冲断层(陈宣华等, 2011)。

西准噶尔地区古生界地层分布广泛,出露有奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系和二叠系(图 1; 宋永等, 2023)。奥陶系出露于研究区西南部,主要岩性为变质碎屑岩,志留系跨断裂岩性有差异,达尔布特断裂以南为沉积岩,哈图断裂以北为火山岩。泥盆系库鲁木迪组与巴尔雷克组出露于哈图断裂以北,以陆源及火山源混合的碎屑岩为主(图 2; 刘希军等, 2009; 李俊建等, 2015; 宋永等, 2023);石炭系包古图组、希贝库拉斯组及太勒古拉组(近期被解体为成吉思汗山组)则集中出露于研究区核部,为一套从细碎屑岩到粗碎

屑岩再到凝灰岩的连续沉积(图 2; 王磊等, 2013; 向坤鹏等, 2013; 宁文涛, 2019; 李永军等, 2024)。此外,研究区北部以及达尔布特断裂中发育少量二叠系。其中,库吉尔台组以粗碎屑沉积岩为主,岩石类型主要包括砾岩、含砾砂岩及粗砂岩,具明显的磨拉石建造特征。砾石成分复杂,包括花岗岩、粉砂岩、硅质岩等,砾石大小不一,砾径为 1~40 cm,磨圆较好,多呈次棱角状-次圆状(宋永等, 2023)。

区域中酸性岩浆岩广泛发育,包括庙尔沟、铁厂沟、阿克巴斯陶等大岩基和小岩脉(韩宝福等, 2006),成矿岩体多为小岩脉包括包古图、黄梁子、别鲁阿嘎希等,岩性以石英闪长玢岩、花岗闪长斑岩、花岗斑岩等为主(申萍等, 2011, 2015; 曹明坚等, 2012)。值得注意的是,准噶尔-巴尔喀什洋的闭合时限问题存在显著争议,白建科等(2015)基于西准噶尔南部玛依勒蛇绿混杂岩被中泥盆统陆相地层不整合覆盖的证据,认为相关的古洋盆在中泥盆世(约 400 Ma)前就已闭合。然而,近年来更多的研究支持晚古生代闭合,但具体时限仍有不同认识:部分研究根据晚石炭世—早二叠世区域性角度不整合及后碰撞岩浆活动认为洋盆主

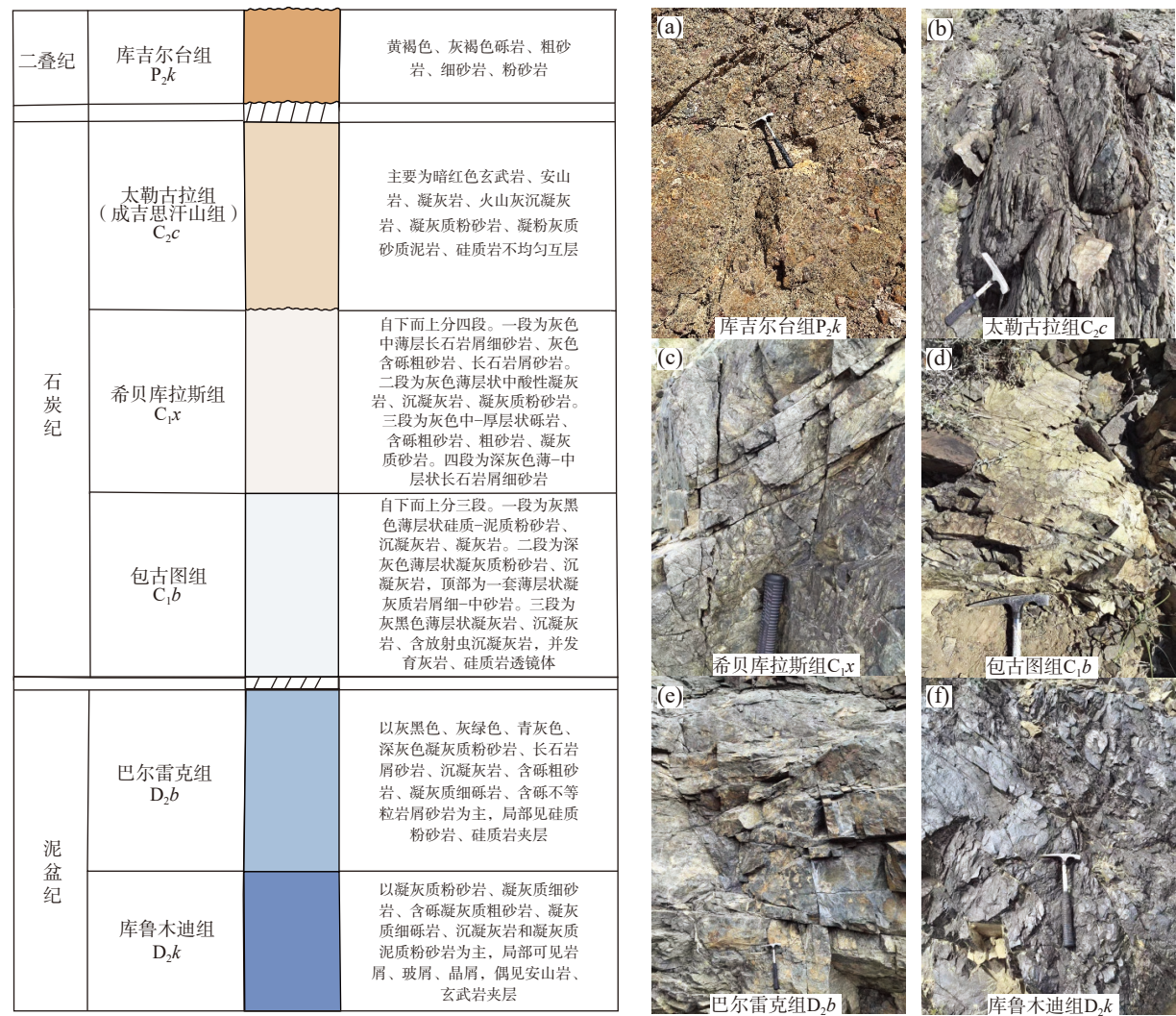


图2 西准噶尔晚古生代地层柱状图及野外照片(据宋永等, 2023 修改)及野外照片
Fig. 2 Late Paleozoic stratigraphic column and photographs of western Junggar

体在早二叠世(约 290 Ma)通过碰撞造山最终闭合(李嘉伟, 2023)以及区域大地构造与多类岩体研究表明, 准噶尔地区直至早二叠世早期(约 290 Ma)仍可能存在残余洋盆及相关的俯冲活动(尹继元等, 2011, 2013a, 2013b, 2016); 另一部分研究则通过 286~283 Ma 的早二叠世弧火山岩记录, 主张洋盆的俯冲作用至少持续至早二叠世晚期, 其闭合可能晚于此时间(Duan et al., 2023)。此外, 最新的沉积与物源综合研究提出, 洋盆可能在石炭纪发生闭合, 并在早二叠世进入陆内裂陷阶段(Zhi et al., 2024)。这些有争议的研究成果反映了该区多阶段、穿时闭合的复杂构造演化过程。岩浆峰期作为构造活动的直接产物, 是反演区域构造演化历史的重要依据。本研究从碎屑铅石记录的多期岩浆峰值结合 Eu 异常演化的独特视角, 为厘清西准噶尔洋盆闭合时限这一长期争议提供了新

的地球化学制约。

2 样品与分析方法

本次研究样品采自于西准噶尔地区核部的库吉尔台组, 样品坐标为 N 45°34', E 84°12'(图 1)。该组地层受区域构造运动影响, 以断块状产出, 赋存于小型山间盆地内, 整体呈 NE-SW 向长条状沿达尔布特断裂带展布(图 1), 其西北侧被第四系残坡积物覆盖, 东南侧则与希贝库拉斯组呈断层接触(图 2)。库吉尔台组岩石以砾岩为主, 砾石主要由青灰色粉砂岩、含砾砂岩、红色硅质岩及暗紫色-灰褐色闪长岩(图 2)。砾石粒径差异显著(1~5 cm), 磨圆度总体良好, 多数呈次圆状(其中花岗岩砾石可呈球状), 少量为棱角-次棱角状; 分选性差, 砾石含量约 80%, 呈定向

排列特征。胶结物为粗砂质,岩层呈块状构造(图 2)。

锆石样品的挑样、制靶及阴极发光(CL)图像等工作由廊坊市尚艺岩矿检测技术服务有限公司完成,从约 5 kg 砂岩样品中分离出重矿物,在双目镜下随机挑选晶形完好、无明显裂隙的锆石颗粒,与标准锆石颗粒一同制靶、抛光并进行 CL 图像采集,以识别锆石内部结构并指导分析点位选择。激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)分析在地质过程与成矿预测国家重点实验室使用配备 Geolas HD 193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统的 Agilent 7900 型 ICP-MS 完成。锆石 U-Pb 定年的激光束斑直径设定为 25 μm , 6 Hz 频率及 $\sim 5.5 \text{ J/cm}^2$ 能量密度(对应激光能量为 80 mJ)。在 U-Pb 同位素定年分析中,使用标准锆石 91 500 为外标,每测 10 个样品点穿插分析 Plešovice 和 GJ-1 监控数据质量;微量元素含量以 NIST SRM 610 为内标计算,并使用其他相应标样进行过程监控,确保测试结果的准确性与可靠性。原始数据经 ICPMSDataCal 软件处理(含背景扣除、同位素比值计算及 ^{204}Pb 法普通铅校正),年龄谱和图与直方图由 Isoplot 4.15 生成(Ludwig et al., 2003),仅采纳置信度 $\geq 90\%$ 的分析点进行地质解释。详细的实验步骤与数据处理流程,可参考已发表的相关文献(Lu et al., 2021; Ye et al., 2021)。

3 研究结果

锆石阴极发光图像(图 3)显示,①锆石晶体形态多样,粒径范围变化大,主要集中在 40~100 μm 。颗粒多呈次棱角至次圆状,既保留部分原始晶棱迹象,又显示后期搬运改造导致的圆化特征,体现物源搬运等地质过程影响;②多数锆石发育清晰的震荡环带,

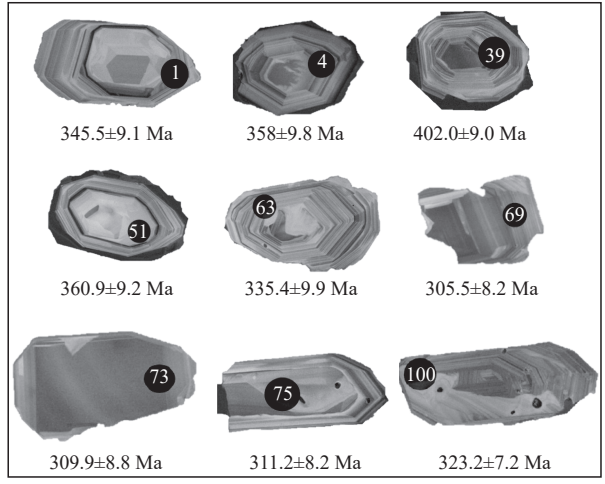


图3 库吉尔台组砾岩代表性碎屑锆石 CL 图及表面年龄
Fig. 3 Representative CL images and ages of detrital zircons from conglomerates of the Kujiertai Formation

表现为明暗交替具有规则韵律生长环带,记录了岩浆结晶过程中元素浓度的周期性波动;③部分颗粒具有较大长宽比,少数颗粒可见机械破裂痕迹,反映了地质历史中经历的应力作用。

库吉尔台组砾岩的碎屑锆石 Th/U 值为 0.81~4.03,全部 >0.4 ,指示其为岩浆成因(吴元保等, 2004; Wang et al., 2024)。碎屑锆石 U-Pb 年龄分布于 290~510 Ma, 仅有一颗年龄为 560 Ma, 整体呈多峰分布特征,主要集中在 430~390 Ma、380~365 Ma、365~340 Ma、340~320 Ma 及 320~290 Ma 5 个区间(图 4、图 5)。碎屑锆石的稀土总量介于 $363 \times 10^{-6} \sim 3\,244 \times 10^{-6}$, 均值达 927×10^{-6} ;其中,Ce 含量为 $4.81 \times 10^{-6} \sim 90.1 \times 10^{-6}$ (平均值为 26.9×10^{-6}),而 Eu 含量为 $1.10 \times 10^{-6} \sim 84.4 \times 10^{-6}$ (平均值为 14.4×10^{-6})。在锆石球粒陨石标准化稀土配分模式图上呈现轻稀土亏损、重稀土富集,显示 Ce

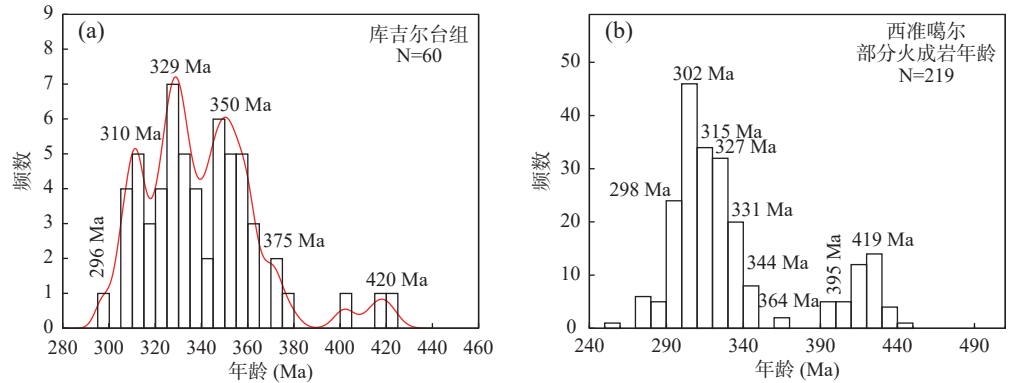
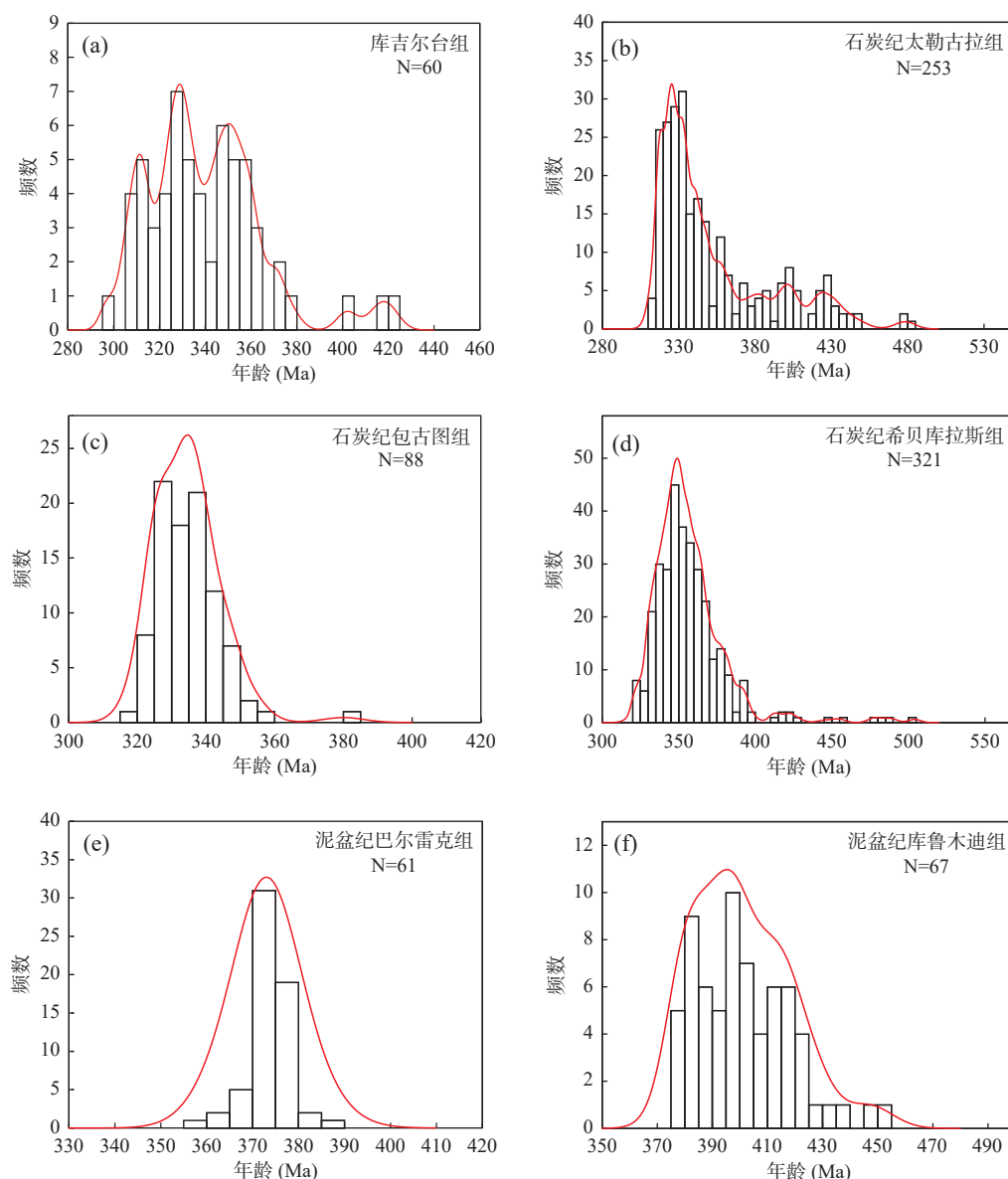


图4 库吉尔台组砾岩碎屑锆石年龄频谱图(a)和西准噶尔部分火成岩年龄直方图(b)火成岩数据源自张攀(2020)

Fig. 4 (a) Detrital zircon ages spectrum of conglomerates from the Kujiertai Formation and (b) age histogram of igneous rocks in western Junggar



碎屑锆石数据来源: 太勒古拉组源自张雷等(2015)、张攀(2020)和李嘉伟等(2023); 希贝库拉斯组源自孙羽等(2014)、张雷等(2015)和张攀(2020); 包古图组源自张攀(2020); 巴尔雷克组和库鲁木迪组源自罗鑫(2020)

图5 西准噶尔地区晚古生代地层碎屑锆石年龄谱图

Fig. 5 Detrital zircon age spectra of the Late Paleozoic strata in the West Junggar region

正异常与 Eu 负异常特征(图 6), 与岩浆成因锆石一致 (Hoskin et al., 2003; 韦恒叶等, 2024)。

4 讨论

4.1 碎屑锆石源岩性质

锆石微量元素丰度及比值, 正是判别物源区母岩组成与性质的有效指标(Heaman et al., 1990)。基于递归分区技术, Belousova et al.(2002)建立分类回归树(CART)分析方法(图 7a), 可通过关联源岩类型与锆

石微量元素, 弥补传统判别图解不足, 提升碎屑锆石源岩判别准确率。

本次研究利用 CART 方法对 KGT-01 样品中的 60 颗有效碎屑锆石进行了源岩判别(图 7a、图 7b), 结果显示花岗岩(68%)、粗粒玄武岩(30%)及正长岩/二长岩(2%)是主要源岩类型(图 7c)。其中, 4 个时间范围都有玄武岩供给, 花岗岩主要集中在 310~390 Ma, 二长岩则仅存在于 310~340 Ma, 其中最年轻锆石颗粒的年龄为 298 Ma, 在 95% 置信度下的误差范围为 +5.5~-7.9 Ma, 该年龄可限定地层沉积时代不早于

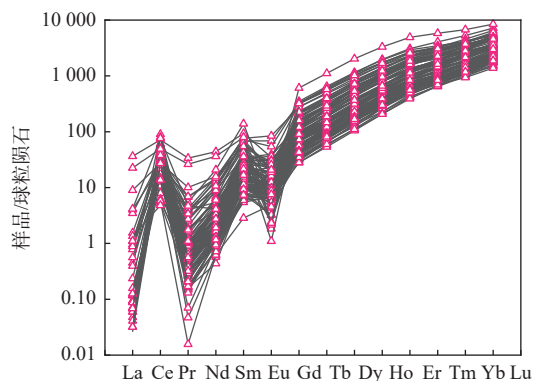


图6 西准噶尔地区库吉尔台组碎屑锆石球粒陨石标准化稀土元素配分模式图

Fig. 6 Chondrite-normalized rare earth element (REE) distribution patterns of detrital zircons from the Kujiertai Formation

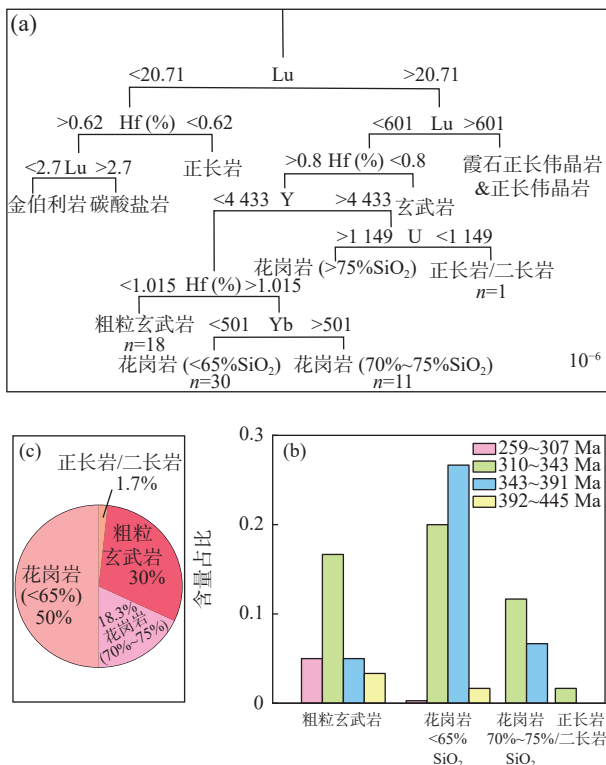


图7 锆石源岩恢复 CART 分类树(a)(据 Belousova et al., 2002 修改)、分年龄段恢复结果(b)和源岩类型分布饼状图(c)(主要源岩为花岗岩、粗粒玄武岩和正长岩/二长岩)

Fig. 7 (a) CART classification tree for zircon source rock restoration, (b) restoration results by age groups, and (c) pie chart of source rock type distribution

早二叠纪, 推测该地区岩体分布物源可能主要为达尔布特断裂带蛇绿岩及同期岩浆岩。

4.2 碎屑锆石物源分析

根据年龄频谱图可知, 库吉尔台组碎屑锆石的物

源年代集中分布于 430~390 Ma、380~365 Ma、365~340 Ma、340~320 Ma 及 320~290 Ma 5 个区间(图 4、图 5), 且锆石年龄峰值与该地区岩浆岩年龄峰值相似。基于前述锆石年龄谱系与 CART 源岩判别结果, 结合区域构造演化阶段, 可系统重建库吉尔台组物源体系随动力学背景转换而发生的演变过程。①晚志留世—中泥盆世(430~390 Ma), 锆石年龄峰值(~413 Ma) 与以玄武岩—花岗岩为主的源岩组合, 精确对应了达尔布特蛇绿岩(弧后盆地环境)的侵位期与博什库尔—成吉斯岩浆弧的初始活动(辜平等, 2009; 杨高等, 2013), 物源贡献约 23%, 反映了古亚洲洋向南持续俯冲的早期格局。②晚泥盆世(380~365 Ma), 持续的玄武岩与花岗岩物源(贡献约 15%)分别与继承性的蛇绿岩供给及谢米斯台山地区延续的弧岩浆活动(如 363 Ma 火山岩)(向坤鹏等, 2013)相关联, 表明大洋俯冲体制的延续。西准噶尔包古图地区晚泥盆世放射虫硅质岩及大量蛇绿岩的发现, 证实研究区南部在整个泥盆纪期间持续处于大洋环境(高翔等, 2014; 罗鑫, 2020)。③晚泥盆世—早石炭世(365~340 Ma)是物源体系发生根本性转换的关键期, 此阶段锆石贡献量最大(约 45%)。早期(~365 Ma)物源仍继承前序特征, 但向~340 Ma 过渡时, 库吉尔台组碎屑锆石源岩属性(玄武岩+花岗岩+二长岩)中, 花岗岩占比显著提高, 且增加了二长岩组分, 这与扎尔玛—萨吾尔岩浆弧主体钙碱性火山岩(安山岩、英安岩)及 I 型花岗岩(花岗闪长岩、二长花岗岩)高度匹配(杨高等, 2013)。这标志着随着洋壳闭合与弧—陆碰撞, 扎尔玛—萨吾尔碰撞型岩浆弧迅速隆升并成为主导物源, 而达尔布特蛇绿岩的贡献在此阶段后期急剧减弱, 指示其可能已被碰撞造山体掩覆。④早石炭世晚期—早二叠世(340~290 Ma), 物源进一步演化为以花岗质岩石为主导。最年轻的年龄峰值(296±5.5/-7.9 Ma)及其对应的玄武岩则与哈拉阿拉特组底部~306 Ma 的富斑玄武岩揭示的后碰撞伸展背景下新生弧—盆体系岩浆活动直接对应(李永军等, 2024), 表明区域构造体制已从碰撞挤压转换为伸展。新疆乌尔禾之北哈拉阿拉特组底部的富斑玄武岩锆石 U-Pb 年龄为(306±2) Ma, 揭示晚石炭世晚期已开启新生弧—盆构造体系(李永军等, 2024)。结合区域地质背景, 推测其物质来源直接受控于新生弧—盆体系内的玄武岩岩浆活动。

已有研究表明, 西准噶尔岩浆作用峰期为 510 Ma、410 Ma、310 Ma(韩宝福等, 2006; 苏玉平等, 2006; 尹

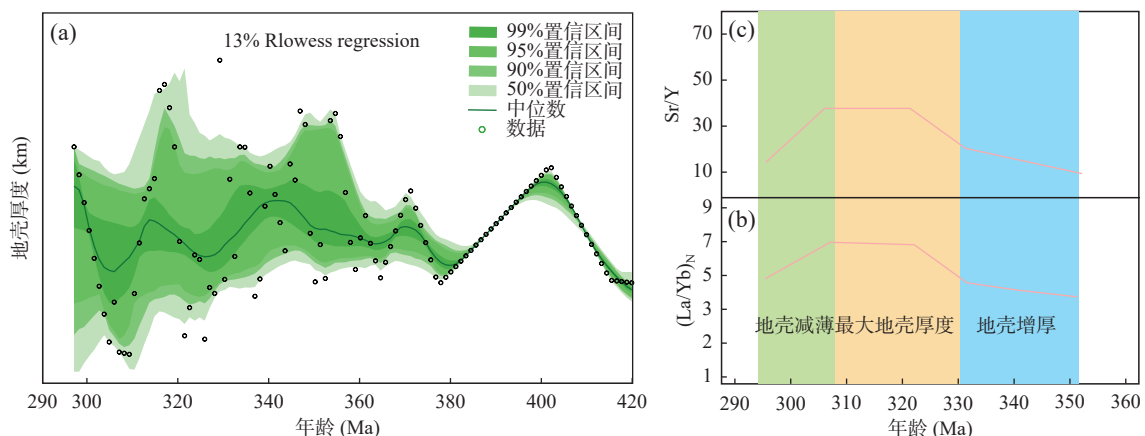
继元等, 2011, 2013a; 李永军等, 2012, 2024; 高睿等, 2013; 靳松, 2016; Yang et al., 2022; 张蕊等, 2024), 本研究中揭示的锆石年龄连续峰值与区域岩浆活动期次高度吻合(图 4), 而最年轻的 ~ 296 Ma 峰值(李永军等, 2024)显著晚于希贝库拉斯组已报道的主要年龄区间(359 $\sim$ 322 Ma; 孙羽等, 2014; 张雷等, 2015), 该差异主要受控于地层沉积时限、采样位置及研究方法: 库吉尔台组为典型的磨拉石构造, 沉积时限更晚, 且其剖面位置更靠近碰撞后伸展区, 故能有效捕获伸展期玄武岩及碰撞期二长岩的物源信号。这一差异为将库吉尔台组主体沉积时代约束至早二叠世提供了关键年代学证据, 并表明其沉积作用持续至区域构造伸展阶段。

4.3 地壳演化分析

地壳厚度可在一定程度上反映早期地球大陆演化动力的变迁(Cheng et al., 2024; Tang et al., 2024a, 2024b)。球粒陨石归一化锆石 Eu 异常(Eu/Eu^*)能够用于重建地壳减薄与增厚的趋势(Brudner et al., 2021; Hu et al., 2024)。鉴于锆石 Eu/Eu^* 与花岗岩全岩 La/Yb 无显著关联(当 P 含量 $>750 \times 10^{-6}$ 时), 且高 La 浓度($>1 \times 10^{-6}$)可能受矿物包裹体及后期蚀变作用影响, 同时 $\text{Th}/\text{U}<0.1$ 的锆石常与变质过度生长或强烈分异环境相关, 易干扰 Eu 异常的地质解释(Rubatto et al., 2000; Tang et al., 2021), 为确保基于 Eu 异常反演地壳厚度结果的可靠性以及为了排除年龄横向误差导致的趋势异常(图 8), 本次分析对所有碎屑锆石微量元

素数据进行了系统筛选, 剔除了同时满足(P 含量 $>750 \times 10^{-6}$ 、 $\text{La}>1 \times 10^{-6}$ 、 $\text{Th}/\text{U}<0.1$ 、年龄误差 >10)条件的异常数据点, 最终共获取 60 个有效数据。本研究采用 Tang et al.(2021)提出的方程: $\text{dm}=(84.2 \pm 9.2) \times [\text{Eu}/\text{Eu}^*]_{\text{锆石}}+(24.5 \pm 3.3)$ 对不同时期地壳厚度开展计算, 式中 $\text{dm}(\text{km})$ 代表地壳厚度, 并借助 Acycle 软件实施数据处理及拟合(Li et al., 2019)。

根据本次基于碎屑锆石 Eu/Eu^* 反演的结果(图 8), 西准噶尔地区晚古生代地壳厚度演化呈现三阶段趋势, 与区域构造动力学转换高度耦合。第一阶段(早—中泥盆世)的减薄趋势, 主要受控于古亚洲洋向南俯冲引发的弧后伸展作用(辜平阳等, 2009), 该伸展背景下的构造剥蚀与地壳拉张共同主导了此过程。第二阶段(晚泥盆世—早石炭世早期)的急剧增厚趋势, 其直接驱动力是西伯利亚板块与准噶尔地块沿达尔布特带发生的弧—陆碰撞事件(李永军等, 2024), 强烈的水平挤压与同碰撞花岗质岩浆的大规模侵入(杨高学等, 2013)共同驱动了地壳快速增厚。第三阶段(早石炭世晚期—早二叠世)的震荡与缓慢增厚趋势, 反映了碰撞后复杂的构造调整, 包括应力场在伸展与挤压之间的频繁交替(李永军等, 2024)及最终转入陆内挤压—走滑阶段。值得指出的是, 尽管本研究基于锆石 Eu/Eu^* 的反演结果在总体增厚趋势上与 An et al.(2022)基于晚古生代中性火成岩 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 和 Sr/Y 值所揭示的区域地壳厚度变化曲线相一致(图 8)。



下标 N 表示采用 Sun et al.(1989) 年提出的球粒陨石标准值进行归一化; b、c 图中的曲线为计算得出的地壳厚度随时间的变化曲线

图8 碎屑锆石 Eu/Eu^* 重建不同地质时期的地壳厚度变化(a)和晚古生代中性火成岩中 Sr/Y 随时间的变化曲线($(\text{La}/\text{Yb})_N$ (b、c))

Fig. 8 (a) Crustal thickness variations reconstructed by detrital zircon Eu/Eu^* through different geological periods and (b, c) temporal variation curves of Sr/Y and $(\text{La}/\text{Yb})_N$ in Late Paleozoic intermediate igneous rocks

5 结论

(1)库吉尔台组碎屑锆石均显示岩浆成因,其年龄谱系集中于 290~510 Ma,可识别出 5 组峰值,指示物源主要来自博什库尔-成吉斯弧、扎尔玛-萨吾尔弧及达尔布特蛇绿岩带。其中最年轻锆石年龄(~290 Ma)限定该组沉积时代不早于早二叠世。

(2)基于锆石 Eu/Eu^* 重建的地壳厚度演变显示出西准噶尔地区地壳厚度演化与板块构造运动高度耦合,呈“早泥盆世剥蚀减薄、中晚泥盆世碰撞增厚、早石炭世晚期伸展后再增厚、石炭纪末多板块汇聚持续增厚”的阶段特征,板块相互作用与区域性构造运动是其核心驱动因素,由此推断准噶尔-巴尔喀什洋应在晚石炭世—早二叠世闭合。

致谢:研究工作得到了北京大学陈衍景院士的指导,野外工作得到了西部黄金克拉玛依哈图金矿有限责任公司卡哈尔·克尤木、刘波、张树恒等同行的帮助,北京大学韩申博士、贾霄宇、长安大学赵艳芳、沙依古丽·白谢哈德参与了部分工作,特致谢意。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

- 白建科,陈隽璐,闫臻,等.西准噶尔南部玛依勒洋盆开启、闭合时限:来自中泥盆统与下伏地质体之间角度不整合关系的证据[J].岩石学报,2015,31(1):133-142.
- BAI Jianke, CHEN Junlu, YAN Zhen, et al. The timing of opening and closure of the Mayile oceanic basin: Evidence from the angular unconformity between the Middle Devonian and its underlying geological body in the southern West Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(1): 133-142.
- 曹明坚,李光明,秦克章.包古图还原性斑岩铜矿:来自岩石学、矿物学、矿物化学及流体特征的证据[J].矿床地质,2012,31(S1):255-256.
- CAO Mingjian, LI Guangming, QIN Kezhang. The Baogutu reduced porphyry copper deposit: Evidence from petrology, mineralogy, mineral chemistry and fluid characteristics[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(S1): 255-256.
- 陈宣华,杨农,叶宝莹,等.中亚成矿域多核成矿系统西准噶尔成矿带构造体系特征及其对成矿作用的控制[J].大地构造与成矿学,2011,35(3):325-338.
- CHEN Xuanhua, YANG Nong, YE Baoying, et al. Tectonic system characteristics of the West Junggar metallogenic belt in the multicore metallogenic system of the central Asian metallogenic domain and its control on Mineralization[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(3): 325-338.
- 陈衍景,富士谷,吴德华,等.新疆北部金矿化与碰撞造山作用的耦合及金等矿床的分布规律[J].黄金地质,1995(3):9-17.
- CHEN Yanjing, FU Shigu, WU Dehua, et al. Coupling between gold mineralization and collisional orogeny in northern Xinjiang, and the distribution pattern of gold and other ore deposits[J]. *Gold Geology*, 1995(3): 9-17.
- 高睿,肖龙,王国灿,等.西准噶尔晚古生代岩浆活动和构造背景[J].岩石学报,2013,29(10):3413-3434.
- GAO Rui, XIAO Long, WANG Guocan, et al. Paleozoic magmatism and tectonic setting in West Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(10): 3413-3434.
- 高翔,魏俊浩,付乐兵,等.西准噶尔托里地区卡拉岗组火山岩地球化学特征及其构造意义[J].地质科技情报,2014,33(5):16-24.
- GAO Xiang, WEI Junhao, FU Lebing, et al. Geochemical characteristics and tectonic significance of volcanic rocks in the Kalagang Formation, Tuoli area, West Junggar[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(5): 16-24.
- 辜平阳,李永军,张兵,等.西准噶尔达尔布特蛇绿岩中辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年[J].岩石学报,2009,25(6):1364-1372.
- GU Pingyang, LI Yongjun, ZHANG Bing, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Darbut ophiolite, western Junggar, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1364-1372.
- 郭丽爽,刘玉琳,王政华,等.西准噶尔包古图地区地层火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究[J].岩石学报,2010,26(2):471-477.
- GUO Lishuang, LIU Yulin, WANG Zhenghua, et al. The zircon U-Pb LA-ICP-MS geochronology of volcanic rocks in Baogutu areas, western Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 26(2): 471-477.
- 韩宝福,季建清,宋彪,等.新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长(I)——后碰撞深成岩浆活动的时限[J].岩石学报,2006(5):1077-1086.
- HAN Baofu, JI Jianqing, SONG Biao, et al. Late Paleozoic vertical growth of continental crust around the Junggar Basin, Xinjiang, China (Part I): Timing of post-collisional plutonism[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1077-1086.

- 靳松. 新疆西准噶尔地区古生代岩浆活动的年代学和地球化学研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2016.
- JIN Song. Study on geochronology and geochemistry of Paleozoic magmatism in West Junggar area, Xinjiang[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2016.
- 李嘉伟, 刘博, 韩宝福, 等. 西准噶尔加依尔山晚石炭世角度不整合的厘定及其对准噶尔-巴尔喀什洋闭合时限的制约[J]. 大地构造与成矿学, 2023, 47(2): 284–307.
- LI Jiawei, LIU Bo, HAN Baofu, et al. Identification of the Late Carboniferous angular unconformity in the Jiayi'er mountain, West Junggar, and its constraint on the closure timing of the Junggar-Balkhash Ocean[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2023, 47(2): 284–307.
- 李俊建, 张锋, 任军平, 等. 中蒙边界地区构造单元划分[J]. 地质通报, 2015, 34(4): 636–662.
- LI Junjian, ZHANG Feng, REN Junping, et al. Tectonic units in China-Mongolia border area and their fundamental characteristics[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(4): 636–662.
- 李永军, 李伟, 王绪龙, 等. 西准噶尔构造带包古图组的岩石组合及其时限[J]. 地质学报, 2024, 98(7): 2053–2063.
- LI Yongjun, LI Wei, WANG Xulong, et al. Age and lithology of Baogutu Formation in West Junggar tectonic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(7): 2053–2063.
- 李永军, 王冉, 李卫东, 等. 西准噶尔达尔布特南构造-岩浆岩带斑岩型铜-钼矿新发现及找矿思路[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2009–2014.
- LI Yongjun, WANG Ran, LI Weidong, et al. Discovery of the porphyry copper-molybdenum deposits and prospecting reflections in southern Darbut tectonic magmatic belts, West Junggar, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2009–2014.
- 廖婉琳, 肖龙, 张雷, 等. 新疆西准噶尔早石炭世沉积地层的物源及构造环境[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(3): 485–503.
- LIAO Wanlin, XIAO Long, ZHANG Lei, et al. Provenance and tectonic settings of early Carboniferous sedimentary strata in western Junggar, Xinjiang[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2015, 40(3): 485–503.
- 刘希军, 许继峰, 王树庆, 等. 新疆西准噶尔达拉布特蛇绿岩 E-MORB 型镁铁质岩的地球化学、年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(6): 1373–1389.
- LIU Xijun, XU Jifeng, WANG Shuqing, et al. Geochemistry and dating of E-MORB type mafic rocks from Dalabute ophiolite in West Junggar, Xinjiang and geological implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(6): 1373–1389.
- 罗鑫, 李宇航, 王伟宁, 等. 新疆西准噶尔哈图山一带巴尔雷克组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究[J]. 世界有色金属, 2019(23): 244–246.
- LUO Xin, LI Yuhang, WANG Weining, et al. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of zircons from the Barrek Formation in the Hatushan area of western Junggar, Xinjiang[J]. *World Nonferrous Metals*, 2019(23): 244–246.
- 罗鑫. 新疆西准噶尔哈图山一带泥盆系沉积特征及环境演化[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- LUO Xin. Sedimentary characteristics and environmental evolution of Devonian system in Hatu mountain area of western Junggar, Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- 宁文涛. 新疆东、西准噶尔下石炭统典型剖面对比研究[D]. 西安: 长安大学, 2019.
- NING Wentao. The comparative study of standard stratotype-section in Lower Carboniferous at East and West of Junggar, Xinjiang[D]. Xi'an: Chang'an University, 2019.
- 申萍, 沈远超, 刘铁兵. 隐伏矿体定位预测的地球物理-地质找矿模型: 以地质与 EH4 双源大地电磁测深技术结合为例[J]. 地学前缘, 2011, 18(3): 284–292.
- SHEN Ping, SHEN Yuanchao, LIU Tiebing. Geophysical-geological prospecting models for positioning prognosis of hidden metal deposits[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3): 284–292.
- 全孝勤, 张文璟, 常昊, 等. 新疆西准噶尔木哈塔依沉积变质型碳酸锰矿的发现、地质特征和成因研究[J]. 西北地质, 2024, 57(4): 170–181.
- QUAN Xiaoqin, ZHANG Wenjing, CHANG Hao, et al. Discovery, Geological Characteristics and Genesis of Sedimentary Metamorphic Manganese Carbonate Deposit in Muhatayi, Western Junggar, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(4): 170–181.
- 申萍, 周涛发, 袁峰, 等. 环巴尔喀什-西准噶尔成矿省矿床类型、成矿系统和跨境成矿带对接[J]. 岩石学报, 2015, 31(2): 285–303.
- SHEN Ping, ZHOU Taofa, YUAN Feng, et al. Main deposit types, mineral systems, and metallogenic belt connections in the Circum-Balkhash-West Junggar metallogenic province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(2): 285–303.
- 宋永, 李永军, 毛新军, 等. 新疆准噶尔盆地西北缘地质图及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2023.
- 苏玉平, 唐红峰, 侯广顺, 等. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质 A 型花岗岩的地球化学研究[J]. 地球化学, 2006, 35(1): 55–67.
- SU Yuping, TANG Hongfeng, HOU Guangshun, et al. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in West Junggar, Xinjiang[J]. *Geochimica*, 2006, 35(1): 55–67.
- 孙羽, 赵春环, 李永军, 等. 西准噶尔包古图地区石炭系希贝库拉斯组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地层学杂志, 2014, 38(1): 42–50.
- SUN Yu, ZHAO Chunhuan, LI Yongjun, et al. Detrital zircon LA-ICP MS U-Pb dating of the Carboniferous Xibeikulasi Formation sandstone in the Baogutu area, western Junggar, and its

- geological significance[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2014, 38(1): 42–50.
- 王磊, 朱永峰. 西准噶尔 III 金矿矿床地质和地球化学研究[J]. *新疆地质*, 2013, 31(4): 295–305.
- WANG Lei, ZHU Yongfeng. Ore geology and geochemistry of the Qi-III gold deposit in West Junggar, Xinjiang[J]. *Xinjiang Geology*, 2013, 31(4): 295–305.
- 韦恒叶, 张淦, 张璇, 等. 中上扬子区上二叠统大隆组硅质岩沉积终结年龄[J]. *沉积学报*, 2024, 42(6): 2135–2143.
- WEI Hengye, ZHANG Gan, ZHANG Xuan, et al. Depositional termination age of siliceous rocks in the upper Permian Dalong Formation, Middle-Upper Yangtze Region[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(6): 2135–2143.
- 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Mineralogical study on zircon genesis and its constraint on U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1604.
- 向坤鹏, 李永军, 徐磊, 等. 新疆西准噶尔白碱滩一带成吉思汗山组的建立及地质意义[J]. *西北地质*, 2013, 46(2): 63–68.
- XIANG Kunpeng, LI Yongjun, XU Lei, et al. The definition of Chengjisihanshan Formation and its significances in Baijiantan region, West Junggar, Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2013, 46(2): 63–68.
- 杨高学, 李永军, 杨宝凯, 等. 西准噶尔达尔布特蛇绿混杂岩中碱性玄武岩的成因: 晚泥盆世地幔柱的产物?[J]. *地质前缘*, 2013, 20(3): 192–203.
- YANG Gaoxue, LI Yongjun, YANG Baokai, et al. Petrogenesis of alkaline basalt from the Darbut ophiolitic mélange in West Junggar: The product of a Late Devonian mantle plume?[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(3): 192–203.
- 尹继元, 袁超, 王毓婧, 等. 新疆西准噶尔晚古生代大地构造演化的岩浆活动记录[J]. *大地构造与成矿学*, 2011, 35(2): 278–291.
- YIN Jiyuan, YUAN Chao, WANG Yujing, et al. Magmatic activity records of Late Paleozoic tectonic evolution in West Junggar, Xinjiang[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2011, 35(2): 278–291.
- 杨高学, 刘晓宇, 朱钊, 等. 中亚造山带西准噶尔地区达尔布特蛇绿岩研究进展与展望[J]. *西北地质*, 2024, 57(3): 1–10.
- YANG Gaoxue, LIU Xiaoyu, ZHU Zhao, et al. Progress and Prospect of the Darbut Ophiolite in West Junggar, Central Asian Orogenic Belt[J]. *Northwestern Geology*, 2024, 57(3): 1–10.
- 尹继元, 陈文, 袁超, 等. 新疆西准噶尔晚古生代侵入岩的年龄和构造意义: 来自锆石 LA-ICP MS 定年的证据[J]. *地球化学*, 2013a, 42(5): 414–429.
- YIN Jiyuan, CHEN Wen, YUAN Chao, et al. Ages and tectonic implication of Late Paleozoic plutons in the West Junggar, North Xinjiang: Evidence from LA-ICPMS zircon geochronology[J]. *Geochimica*, 2013a, 42(5): 414–429.
- 尹继元, 陈文, 龙晓平, 等. 西准噶尔白杨河地区早二叠世闪长岩的年代学和地球化学: 岩石成因和构造意义[J]. *地球化学*, 2013b, 42(4): 361–372.
- YIN Jiyuan, CHEN Wen, LONG Xiaoping, et al. Chronology and Geochemistry of Early Permian Diorites in the Baiyanghe Area, Western Junggar: Petrogenesis and Tectonic Implications[J]. *Geochimica*, 2013b, 42(4): 361–372.
- 尹继元, 陈文, 喻顺, 等. 西准噶尔北部早二叠世石英正长斑岩的地球化学特征及意义[J]. *地质学报*, 2016, 90(9): 2355–2364.
- YIN Jiyuan, CHEN Wen, YU Shun, et al. Geochemical Characteristics and Significance of Early Permian Quartz Syenite Porphyry in Northern Western Junggar[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(9): 2355–2364.
- 张雷, 王国灿, 高睿, 等. 新疆西准噶尔石炭系碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(4): 704–717.
- ZHANG Lei, WANG Guocan, GAO Rui, et al. U-Pb geochronology of detrital zircons from the Carboniferous system in the West Junggar area, Xinjiang, and its geological significance[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(4): 704–717.
- 张蕊, 尹继元, 邱亮, 等. 新疆西准噶尔造山带北部晚石炭世 I 型花岗岩的岩石地球化学和锆石 Hf-O 同位素特征: 对其岩石成因与构造过程的启示[J]. *地质学报*, 2024, 98(4): 1146–1163.
- ZHANG Rui, YIN Jiyuan, QIU Liang, et al. Geochemistry and zircon Hf-O isotopic characteristics of Late Carboniferous I-type granite in northern West Junggar orogenic belt: Insights into petrogenesis and tectonic processes[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(4): 1146–1163.
- 张攀. 西准噶尔中部晚古生代构造体制转变及古洋盆性质[D]. 中国地质大学, 2020.
- ZHANG Pan. Late Paleozoic Tectonic Transition and Evolution of Paleo-oceanic Basin in Central West Junggar[D]. China University of Geosciences, 2020.
- AN Fang, ZHU Yongfeng, WEI Shaoni, et al. Variation of crustal thickness in central west Junggar orogenic belt: insight into its Late Palaeozoic tectonic evolution[J]. *International Geology Review*, 2022, 64(13): 1799–1816.
- Barham M, Kirkland C L, Handoko A D. Understanding ancient tectonic settings through detrital zircon analysis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 583: 117425.
- Belousova E, Griffin W, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602–622.

- Brudner A, Jiang H H, Chu X, et al. Crustal thickness of the Grenville orogen: A Mesoproterozoic Tibet? [J]. *Geology*, 2021, 50: 402–406.
- Cawood A P, Buchan C. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly [J]. *Earth Science Reviews*, 2007, 82(3): 217–256.
- Cawood P, Hawkesworth C, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting [J]. *Geology*, 2012, 40(10): 875–878.
- Cheng C, Li S, Xie X, et al. Crustal thickness variation of the Dabie orogenic belt: Insights from detrital zircon evidence and geological significance [J]. *Gondwana Research*, 2024, 129: 355–366.
- Duan F H, Zhi Q, Xiao W J, et al. Late Palaeozoic final subduction records of the southwestern Paleo-Asian Ocean revealed by ca. 286–283 Ma basaltic rocks in the West Junggar, NW China [J]. *International Geology Review*, 2023, 65(20): 3128–3145.
- Hawkesworth C J, Dhuime B, Pietranik A B, et al. The generation and evolution of the continental crust [J]. *Journal of the Geological Society*, 2010, 167(2): 229–248.
- Heaman L M, Bowins R, Crockett J H. The chemical composition of igneous zircon suites; Implications for geochemical tracer studies [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(6): 1597–1607.
- Hoskin O W P, Schaltegger U. The Composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 27–62.
- Hu P Y, Zhai Q G, Cawood P A, et al. Detrital zircon REE and tectonic settings [J]. *Lithos*, 2024, 480–481: 107661.
- Li M, Hinnov L, Kump L. Acycle: Time-series analysis software for paleoclimate research and education [J]. *Computers and Geosciences*, 2019, 127: 12–22.
- Liu B, Hou X L, Xu Y, et al. Zircon U-Pb-Hf Isotopes and whole-rock geochemistry of the “Kulumudi Formation” from the Laofengkou area (West Junggar): Implications of the construction of a juvenile arc in the Junggar-Balkhash Ocean [J]. *Minerals*, 2023, 14(1): 14.
- Lu T Y, He Z Y, Klemd R. Identifying crystal accumulation and melt extraction during Formation of high-silica granite [J]. *Geology*, 2021, 50(2): 216–221.
- Ludwig K R. ISOPLOT 3.0: A geochronological toolkit for microsoft excel [CP]. Berkeley: University of California, 2003.
- Rubatto D, Gebauer D. Use of Cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe some examples from the Western Alps [M]. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implication for mantle composition and process [J]. *Geological Society*, 1989, 42(1): 313–345.
- Tang M, Chen H, Song S G, et al. Zircon Eu/Eu* in Archean TTGs with implications for the role of endogenic oxidation in Archean crustal differentiation [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2024a, 378: 259–269.
- Tang M, Chu X, Hao J H, et al. Orogenic quiescence in Earth's Middle age [J]. *Science*, 2021, 371(6530): 728–731.
- Tang M, Guo Z Y, Cao W R, et al. Revisiting zircon Eu anomaly as a proxy for crustal thickness: A case study of the Sierra Nevada Batholith [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2024b, 643: 118897.
- Wang C, Cui H Q, Chiang C S, et al. Regional detrital zircon record of the drainage sediments surrounding the South China Sea: Provenance signature and tectonic implications [J]. *Earth-Science Reviews*, 2024, 258: 104953.
- Yang Y Q, Zhao L, Zhang J, et al. An Ordovician ophiolitic complex in West Junggar, NW China: Implications for subduction initiation and oceanic arc evolution of the Paleo-Asian Ocean [J]. *Gondwana Research*, 2022, 111: 122–141.
- Ye L N, Sun F Y, Wang L, et al. Petrological, whole-rock geochemical, geochronological, and Lu-Hf isotope constraints on the regional tectonic evolution of the Laoling Group in northeastern Jiao-Liao-Ji belt, North China Craton [J]. *Precambrian Research*, 2021, 365: 106407.
- Zhi D, Gong D, Liu M, et al. Evolution of Paleozoic West Junggar Basin, NW China: Seismic data, detrital zircon evidence from Earth's oldest alkali lake deposit [J]. *Geoscience Frontiers*, 2024, 15(6): 101887.
- Zutterkirch I C, Kirkland C L, Barham M, et al. Thin-section detrital zircon geochronology mitigates bias in provenance investigations [J]. *Journal of the Geological Society*, 2022, 179(2): 1–12.