https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.272



塔里木克拉通经历过格林威尔造山运动吗? 来自碎 屑锆石年代学的证据

易子渊1,魏国齐2,郭召杰1*

1. 北京大学地球与空间科学学院,北京 100871

2. 中国石油勘探开发研究院,北京100083

摘 要:近年来,有学者认为塔里木克拉通经历过格林威尔期造山运动,但相关的岩浆、变质证据比较缺乏.造山事件会为附近的盆地提供大量碎屑物质,因此也会在碎屑锆石记录中有所反映.对塔西南铁克里克地区和塔东北库鲁克塔格地区新元古界的7件砂岩样品进行了碎屑锆石U-Pb定年,获得了1135组碎屑锆石年龄数据.塔西南南华系的波龙组和雨塘组均发育有冰碛岩,通过碎屑锆石记录得到其最大沉积年龄分别为693.2±3.3 Ma和642.7±4.4 Ma,由此推测波龙组形成于Sturtian冰期,而雨塘组形成于Marinoan冰期.此外,结合前人发表的数据,整理得到完整的塔里木克拉通新元古界碎屑锆石U-Pb年龄数据库.数据分析显示:碎屑锆石年龄主要分布在700~900 Ma和1800~2100 Ma两个区间内,与典型的格林威尔期造山活动的时间980~1250 Ma不符;阿克苏、库鲁克塔格和铁克里克3个露头区新元古界碎屑岩的物源区存在显著差异,表明在南华纪一震旦纪不存在全盆统一的物源,这与当时克拉通内发育大型造山带的假设不符.综上所述,通过对碎屑锆石记录的分析,认为格林威尔期的陆一陆碰撞型造山运动在塔里木克拉通的影响不显著.

关键词: 塔里木克拉通;碎屑锆石;新元古界;格林威尔期造山带;构造地质学.

中图分类号: P542 **文章编号:** 1000-2383(2023)04-1405-16

Did Grenvillian Orogeny ever Happen in Tarim Craton? Evidence from Detrital Zircon Chronology

收稿日期:2022-05-30

Yi Ziyuan¹, Wei Guoqi², Guo Zhaojie^{1*}

School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China
 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China

Abstract: In recent years, it has been suggested that a Grenvillian orogenic belt developed in the Tarim Craton. However, associated magmatic and metamorphic evidence is absence. An orogeny provides massive detritus for the nearby basin, and hence would be reflected in the detrital zircon records. In this study, seven Neoproterozoic sandstone samples were obtained in the Tieklik area (Southwest Tarim) and the Quruqtagh area (Northeast Tarim), and studied through detrital zircon U-Pb dating. A total of 1 135 detrital zircon age data were obtained. In the Nanhua System, there are tillites in the Bolong Formation and Yutang Formation in the Southwest Tarim. The maximum depositional ages constrained by the detrital zircon records are 693.2±3.3 Ma

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2019YFC0605501).

作者简介:易子渊(1995-),男,博士生,主要从事盆地分析与盆地动力学研究.ORCID:0000-0002-5091-9029. E-mail: yiziyuan@pku.edu.cn * 通讯作者:郭召杰,ORCID:0000-0002-4981-8183. E-mail: zjguo@pku.edu.cn

引用格式:易子渊,魏国齐,郭召杰,2023. 塔里木克拉通经历过格林威尔造山运动吗?来自碎屑锆石年代学的证据.地球科学,48(4): 1405-1420.

Citation: Yi Ziyuan, Wei Guoqi, Guo Zhaojie, 2023. Did Grenvillian Orogeny ever Happen in Tarim Craton? Evidence from Detrital Zircon Chronology. *Earth Science*, 48(4): 1405–1420.

and 642.7 ± 4.4 Ma, respectively. Therefore, the Bolong tillite and the Yutang tillite can be correlated with the Sturtian glaciation and the Marinoan glaciation, respectively. Besides, previously published data were integrated to form a complete detrital zircon U-Pb age database of the Neoproterozoic in the Tarim craton. It shows that the detrital zircon ages are mainly distributed in the ranges of 700-900 Ma and $1\ 800-2\ 100$ Ma, which is inconsistent with the age range of $980-1\ 250$ Ma for the Grenvillian orogeny. Besides, the provenances of the Neoproterozoic clastic rocks in the three outcrop areas, i.e., the Aksu, Quruqtagh and Tieklik areas, are significantly different. It indicates that there were more than one source regions during the Nanhua-Sinian periods, which contradicts the hypothesis of a large-scale orogen across the craton. In brief, this study concludes from the detrital zircon records that no Grenvillian collisional orogen developed in the Tarim craton.

Key words: Tarim craton; detrital zircon; Neoproterozoic; Grenvillian orogen; structural geology.

0 引言

Rodinia超大陆形成于中元古代末至新元古代 初,是得到地质学家公认的超大陆之一(Li et al., 2008).大规模陆一陆碰撞形成的格林威尔造山带是 其聚合过程的标志性地质记录,具有重要的研究意 义.塔里木克拉通是中国主要的克拉通之一,它在 Rodinia超大陆中的位置和中一新元古代的演化过 程近年来一直是研究热点(Ge et al., 2014; Wen et al., 2018; Zhao et al., 2021; Zhou et al., 2021; Wu et al., 2022),其中一个重要的问题就是塔里木克拉 通是否经历过格林威尔期造山运动.

现今塔里木盆地中部存在一条贯穿整个盆地 的东西向航磁正异常条带,其成因也受到了学界的 广泛关注.郭召杰等(1998)结合阿尔金北缘红柳 沟一拉配泉蛇绿混杂岩带中辉长岩 829±60 Ma的 Sm-Nd等时线年龄,首次提出塔里木克拉通可能由 南塔里木与北塔里木两个地体在新元古代拼合而 成,而上述磁异常条带代表二者的缝合带,即"塔里 木中央造山带",随后在该带内发现的约790~ 750 Ma的闪长岩也被认为与此事件有关(Guo et al., 2005). 虽然后续研究发现该蛇绿混杂岩带侵 位的年龄更可能是早古生代(Ye et al., 2018),但塔 里木克拉通由两个地体在新元古代拼合而成的猜 想却引起了学术界的重视 .Xu et al.(2013a)对盆内 钻井中的基底岩石年龄进行了分析,发现北塔里木 (包括敦煌地块)的基底年龄是2.7~2.5 Ga, 而南塔 里木(包括东昆仑、西昆仑造山带)的基底年龄则是 2.4~2.3 Ga,且两个块体记录了不同的热事件,为这 一猜想提供了重要证据.此外,古地磁证据表明在 900~870 Ma期间,南塔里木和北塔里木仍处于分 离状态,二者的拼合应该发生在870~820 Ma之间 (Zhao et al., 2021).这一次拼合相关的造山事件很 可能代表了Rodinia超大陆最终的聚合(Wen et al.,

2018).

造山带的直接证据之一是造山相关的花岗岩 或高级变质岩,但这样的地质记录在塔里木克拉通 内较为缺乏.然而,碰撞造山往往伴随有同期的中 酸性为主的岩浆活动,从而产生大量的结晶锆石, 并为周围盆地提供直接的物源,因此碰撞造山事件 通常能在碎屑锆石记录中留下显著的年龄峰 (Hawkesworth *et al.*,2009).源汇分析研究表明,距 北美 Grenville造山带3000 km外的盆地中都发现 了来自该造山带的碎屑锆石(Rainbird *et al.*,2012). 塔里木克拉通在新元古代南华纪一震旦纪发育有 较连续的沉积岩层,为从沉积盆地的角度探寻塔里 木克拉通内是否存在格林威尔期的造山带提供了 一个合适的研究对象.

本文聚焦塔里木克拉通新元古界的碎屑锆石 记录,着力于挖掘其中的大地构造信息.本次研究 对塔西南和塔东北的新元古界碎屑岩系统地进行 了采样,获得了一批新的碎屑锆石LA-ICP-MS U-Pb年龄数据,为厘清塔西南新元古界冰碛岩的 沉积年代提供了可靠的年代学约束.此外,笔者结 合前人发表的数据,整理出了较为完整的塔里木克 拉通新元古界碎屑锆石U-Pb年龄数据库.在此基 础上,结合定性与定量分析方法,作者发现无论碎 屑锆石的年龄分布,还是其反映的构造背景,均显 示格林威尔期造山活动对塔里木克拉通的影响非 常有限.

1 地质背景

塔里木克拉通是我国3个主要克拉通之一,周 缘被西昆仑山、阿尔金山以及天山等山脉所环绕 (图1).其大部分面积如今被塔克拉玛干沙漠所覆 盖,但在盆地周缘邻近造山带的区域出露了种类丰 富的新元古代岩石,既有沉积岩,也有年龄、种类各



图 1 塔里木克拉通及周边地质简图(据 Xu et al., 2013a 修改) Fig. 1 Simplified map of the Tarim craton and adjacent area (modified from Xu et al., 2013a)

异的一系列岩浆岩.一般认为这些岩石与当时的裂谷活动紧密相关,然而裂谷活动的具体机制和所处的大地构造位置还有争议(Xu et al., 2013b;Ge et al., 2014).

新元古代地层露头主要分布在盆地周边邻近 造山带的3个构造隆起,分别是塔东北的库鲁克塔 格地区,塔西北的阿克苏地区,以及塔西南的铁克 里克地区(图1),这3个地区的沉积层序总体上相 似,可以互相对比,但也都有一些各自的特征,前人 的研究中已经有非常清晰细致的描述(Wu et al., 2017; Chen et al., 2019). 新元古界整体以陆源碎屑 岩为主,到上震旦统变为碳酸盐岩沉积,总体呈现 为一个向上变细的序列(Chen et al., 2019). 三地均 发育多层混杂堆积砾岩,是进行地层对比的重要标 志.其中库鲁克塔格地区的贝义西组、特瑞艾肯组、 汉格尔乔克组,阿克苏地区的尤尔美纳克组和铁克 里克地区的波龙组(图2)、雨塘组均发现有比较典 型的冰川成因构造(Xiao et al., 2004; 童勤龙等, 2013; He et al., 2014a; Vandyk et al., 2019; Chen et al., 2019),其他的混杂砾岩是否为冰川成因则需 要进一步的研究.

支持"塔里木中央造山带"存在的学者倾向于 将阿尔金山地区也划为古造山带的一部分,并将该 地区新元古代初期的变质事件解释为对此次造山 的响应(Xu et al., 2013a; Zhao et al., 2021). 但阿尔 金山地区在新元古代是否为塔里木克拉通的一部 分仍有争议(陈红杰等,2018),仍需要进一步研究 才能确定这些地质记录能否反映塔里木克拉通的 构造活动历史.此外,李曰俊等(2003)对位于"塔里 木中央造山带"的塔参1井内的花岗闪长岩进行 ightarrow
ightarr6.8 Ma和892.2±32.7 Ma.这一结果也被用于佐证 造山活动,但考虑到前寒武纪样品K-Ar体系的封 闭性可能被破坏,这一年龄也需要进一步研究的检 验.另外,塔里木克拉通北缘在新元古代中期发育 高压变质岩(Xia et al., 2019; He et al., 2012), 最近 的研究认为其代表了该时期塔里木克拉通北缘与 中天山-伊犁地块间的碰撞造山(Wu et al., 2022). 然而其活动时间被限定为约830~790 Ma,晚于经 典的格林威尔造山带(见5.2节),更可能是一起 Rodinia超大陆向Gondwana超大陆过渡期间的构造 事件.



图 2 铁克里克地区波龙组野外照片 Fig. 2 Field pictures of the Bolong Formation 图 a 缺少层理,图 b 和图 c 可见坠石、冻裂纹等指示冰川成因的构造

2 样品采集与研究方法

在塔里木克拉通的3个新元古界露头区中,阿 克苏地区的碎屑锆石年龄数据已经非常丰富(Zhu et al.,2011;He et al.,2014b;Ding et al.,2015;Wu et al.,2018,2019;Vandyk et al.,2019),而库鲁克塔 格地区(He et al.,2014a;Ren et al.,2020)和铁克里 克地区(Wang et al.,2015;Zhang et al.,2016;Wu et al.,2019)的数据则较为有限,因此本次研究选择 对后两个地区的南华系一震旦系进行针对性的采 样,以获取完整的塔里木克拉通新元古代地层的碎 屑锆石记录.

本次研究总共采集了 8个砂岩样品,其中 3 个 采自库鲁克塔格地区辛格尔剖面,5 个采自铁克里 克地区新藏公路剖面(图 3).在库鲁克塔格地区, QR19-3(87°47′50.0″E,41°25′28.4″N)、QR19-4(87° 47′37.0″E,41°25′35.0″N)均采自南华系阿勒通沟组, QR19-5(87°46′25.2″E,41°25′26.8″N)采自震旦系扎 摩克提组.在铁克里克地区,XZ19-1(77°00′03.2″E, 37°08′00.1″N)、XZ19-2(77°00′38.1″E,37°07′55.0″N) 分别采自波龙组2段和4段,XZ19-4(77°01′12.5″E, 37°07′45.3″N)采自克里西组,XZ19-7(77° 01′33.1″E,37°07′55.7″N)采自雨塘组,XZ19-5(77° 01′41.4″E,37°08′06.7″N)则采自震旦系库尔卡克组.

锆石的分选和制靶在廊坊市宇能岩石矿物分 选技术服务有限公司完成.按照传统流程,将样品 粉碎后先经过重液和磁选技术处理,然后在镜下人 工进行挑选.分选好的锆石用环氧树脂制靶、抛光, 然后拍摄透射、反射以及阴极发光(CL)图像,从而 选择没有裂缝及包裹体的锆石进行年龄测试.锆石 年龄测试在天津地质调查中心完成,测试仪器为配 有 ArF-excimer 激光剥蚀系统(美国 ESI公司)的 Neptune 多接受电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS,美国赛默飞公司).采用单点剥蚀方式,激 光束斑的直径为29 µm.测试中使用合成硅酸盐玻 璃 NIST610 作为元素校正的外标,以标准锆石 91500调试仪器以及校正同位素分馏效应,另一颗 标准锆石 Plesovice 被作为监控盲样.数据的计算和 处理使用了 Isoplot 以及 DetritalPy 两种软件.本次 研究中通过计算在2σ误差内有重叠的最年轻的3 个或以上锆石年龄的均值来约束地层的最大沉积 年龄(Dickinson and Gehrels, 2009).

3 分析结果

本次研究总共获得1192个年龄数据(图4),舍 去其中不谐和度大于5%或2σ误差大于5%的数据,有效数据合计1135个(图5).大多数锆石的Th/ U比值都大于0.4,新元古代的锆石总体上Th/U比 值更高.此外,CL图像显示锆石内常发育环带结构. 由此可知,所测试锆石主要为岩浆成因锆石.



Fig.3 Simplified map of sample area a.塔西南铁克里克地区(Wang et al., 2015修改);b.塔东北库鲁克塔格地区(据He et al., 2014a修改)

3.1 铁克里克地区样品碎屑锆石年龄分布

波龙组二段的样品 XZ19-1中碎屑锆石年龄主 要分布在 686~876 Ma,其中最年轻的 3颗锆石平均 值为 693.2±3.3 Ma,指示了地层的最大沉积年龄. 另有少量锆石年龄分散在 1 507~3 035 Ma之间,在 1 785 Ma和 2 578 Ma形成 2个小峰值.波龙组四段 的样品 XZ19-2碎屑锆石年龄更加集中,约 80% 的 锆石都分布在 680~808 Ma这一区间,峰值为 746 Ma.其中最年轻的 5颗锆石平均值为 689.7± 2.7 Ma,在误差范围内与二段的样品一致.也有少 量锆石年龄分布在 1 751~2 528 Ma之间.

克里西组样品 XZ19-4,以及雨塘组样品 XZ19-7都有与XZ19-2相似的碎屑锆石年龄分布: 多数年龄都分布在700~800 Ma区间内,且主峰年

龄在 750 Ma 左右;少量古元古代年龄,形成一个 2.0 Ga 左右的次峰.两个样品中最年轻的 3 颗的均 值分别为 691.1±3.6 Ma 和 642.7±4.4 Ma.

本次研究首次报道了塔西南震旦系库尔卡克 组的碎屑锆石年龄组成.157个有效数据中有70个 新元古代的年龄,分布在721~898 Ma,峰值为 826 Ma;其余年龄分散在1131~2918 Ma之间,有 49个数据落在1500~2006 Ma的区间,峰值为 1715 Ma;另有8个2187~2324 Ma的年龄,14个 2572~2801 Ma的年龄,形成两个次级年龄峰.

3.2 库鲁克塔格地区样品碎屑锆石年龄分布

样品 QR19-3和 QR19-4 均采自南华系阿勒通沟组,其碎屑锆石年龄主要集中分布在 693~868 Ma,1 716~2 126 Ma,2 270~2 831 Ma,不过



Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of tested samples

QR19-3中处于后两个年龄区间的锆石数量更多, 而QR19-4中新元古代锆石占据主导.通过计算,两 个样品的最大沉积年龄分别是711.9±3.9 Ma和 715.3±6.8 Ma,在误差范围内一致.阿勒通沟组顶 部安山岩的年龄为656±4 Ma(He *et al.*,2014a),下 部地层贝义西组顶部的安山岩年龄则为725± 10 Ma(Xu *et al.*,2009).本次研究得到的最大沉积 年龄介于上下两层火山岩年龄之间,证实了阿勒通 沟组沉积于Sturtian冰期.

扎摩克提组样品 QR19-5的碎屑锆石年龄分布 与QR19-4相似.多数年龄分布在736~896 Ma区 间内,主峰年龄为816 Ma,最年轻的锆石年龄为 671.8±11.5 Ma,但只有这一个数据小于700 Ma.此 外,1799~2073 Ma和2265~2749 Ma年龄区间内 也有少量数据.

4 讨论

4.1 塔西南冰碛岩的形成年代

塔东北库鲁克塔格地区和塔西北阿克苏地区研究程度较高,积累了较多年代学数据,地层年代框架已经比较完善(He et al., 2014b; Wu et al., 2021),但塔西南铁克里克地区的地层年代还有一些争议,其中的一个关键问题就是波龙组、雨塘组的两期冰碛岩与新元古代冰期的对应关系尚未确定.在新元古代"雪球地球"事件中,全球性的大陆冰川在不同的克拉通内留有诸多冰川沉积记录,大量的研究表明可能发育4次大范围的冰期,分别为Kaigas冰期(~740~735 Ma)、Sturtian冰期(~717~660 Ma)、Marinoan冰期(~641~635 Ma)和Gaskier冰期(~584~582 Ma)(Xiao et al., 2004; Xu



Fig. 5 Histograms and kernel density estimate curves of detrital zircon U-Pb ages from the sandstones in the Tieklik and Quruqtagh areas

et al.,2009).其中作为成冰纪建立主要依据的 Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期规模最大,且在不同的克 拉通的作用具有等时的特点(Zhou et al.,2019),可 作为地层对比的重要依据.目前,波龙组和雨塘组 的两期冰碛岩对应的冰期尚存在3种不同的观点. 高林志等(2013)通过综合地层对比和碎屑锆石研 究,认为波龙组与雨塘组的冰碛岩分别形成于 Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期;童勤龙等(2013)基于化 学风化指数(CIA)对比,认为这两期冰碛岩分别形 成于 Marinoan 冰期和 Gaskier 冰期;而 Zhang et al. (2016)则通过碎屑锆石研究,认为这两期冰碛岩应 对应 Kaigas 冰期和 Marinoan 冰期.

本次研究中,波龙组的2个样品(XZ19-1, XZ19-2)的最大沉积年龄约为690 Ma.高林志等 (2013)和Zhang et al.(2016)都对波龙组砂岩进行过 碎屑锆石 U-Pb年龄测试,他们得到的最年轻锆石 年龄均在750 Ma左右,这一年龄与Kaigas冰期以及 Sturtian冰期都较为接近.但是,高林志等(2013)仅 测试了17颗锆石的年龄,且其中12颗是早于新元 古代的古老锆石; Zhang et al. (2016) 对波龙组的两 个样品进行碎屑锆石研究, 分别取得了 64组和 61 组锆石年龄.测试数量的不足可能导致一些年龄组 分的缺失(Vermeesch, 2004).本次研究的新数据表 明波龙组的沉积显然晚于 Kaigas 冰期, 可能是在 Sturtian 冰期可划分为两个阶段, 分别开始于约 717 Ma和约 690 Ma(Zhou et al., 2019), 而波龙组的 冰碛岩应形成于第 2 阶段, 可与华南的古城组对比. 雨塘组样品(XZ19-7) 中最年轻 3 颗锆石的平均年 龄为 642.7±4.4 Ma, 代表了雨塘组冰碛岩的最大沉 积年龄, 与 Marinoan 冰期相符.

由于碎屑锆石年龄只能限定最大沉积年龄,理 论上存在其他对应方案.例如,如果雨塘组形成于 Gaskier冰期,与 642.7 Ma的沉积下限并不矛盾.但 是,库尔卡克组和克孜苏胡木组底部均发现有震旦 纪古生物,包括 Hubeisphaera, Fuschshania, Michystridium, Pseudodiocrodium 等,而下部地层中则没 有发现相关古生物(马世鹏等, 1989),指示雨塘组



图 6 塔里木克拉通不同露头区的新元古界地层柱 Fig. 6 Stratigraphic columns of Neoproterozoic in different areas in the Tarim craton

年龄数据来自:1. He et al.(2014a); 2. Xu et al.(2009); 3. Xu et al.(2013b)

应为南华系(原文中称下震旦统,地质年代表修订 后对应现今的南华系).因此,雨塘组冰碛岩只能限 定为形成于 Marinoan 冰期.相应地,由于波龙组与 雨塘组之间存在非冰期沉积的克里西组,波龙组也 只能限定为形成于更早的 Sturtian 冰期(图6).

4.2 塔里木克拉通是否经历过格林威尔期造山运动?

格林威尔造山带(Grenville Orogen)是地质历 史上规模最大的造山带之一.严格意义上的格林威 尔造山带是指劳伦大陆的南部和东部(现今方位, 下同)在Rodinia大陆聚合过程中与其他陆块发生 陆一陆碰撞形成的大型造山带.在如今北美大陆的 东南部,一条巨型元古代造山带横亘其上,地质学 家在其中识别出多期变质一岩浆事件,代表一系列 呈条带状拼贴于太古代陆核之上的造山带,其中越 靠外侧的越年轻,记录了元古代火山弧拼贴导致的 劳伦大陆的增生(Rivers,2015).最后一期增生型造 山(Elzevirian 造山带,~1.245~1.220 Ga)结束后, 随即又发育3期显著的构造缩短及变质一岩浆事件,分别称为Shawinigan期(1.19~1.14 Ga),Ottawan期(1.09~1.02 Ga)和 Rigolet期(1.00~0.98 Ga),其中Shawingian期是Elzevirian期增生型造山的自然延续,属前碰撞阶段,而以高级变质作用为特征的Ottawan期和Rigolet期构造是劳伦大陆与亚马逊克拉通的陆一陆碰撞的产物,即为严格意义上的格林威尔造山带(Rivers,2015).它主要分布在北美洲,从加拿大拉布拉多地区一直延伸到墨西哥境内.此外,亚马逊克拉通西部的Sunsás造山带和波罗的克拉通的Sveconorwegian造山带也是格林威尔造山带的一部分(Bingen et al.,2008; Santos et al.,2008).

实际使用中,格林威尔造山带的概念常有不同 程度的泛化,在时间与空间尺度均有外延.在此,作 者倡议用"格林威尔期造山带(Grenvillian orogen/ Grenville-age orogen)"来表达这种泛化的含义,以 与严格意义上的"格林威尔造山带"相区分.从最后 一次火山弧拼贴引起的增生型造山到最后的碰撞 型造山,其间的时间间隔很短,尤其是早期定年技 术不够完善时,很难将碰撞造山阶段与前碰撞阶段 区分开.此外,整个过程都受控于一次持续的地壳 俯冲,因此很多时候格林威尔期会将Elzevirian期和 Shawinigan期囊括其中.另一方面,劳伦大陆在 Rodinia超大陆的重建中常被置于核心位置(Li et al., 2008),而形成于Rodinia超大陆聚合过程的格林威 尔造山带也就成为Rodinia超大陆聚合的重要标志, 因此格林威尔期造山带很多时候即指在Rodinia超 大陆聚合过程中形成的造山带.这种意义上的格林 威尔期造山带包括东南极(Fitzsimons,2000)、澳大 利亚(Cawood and Korsch,2008)、华南(Li *et al.*, 2008)等克拉通内被认为与Rodinia超大陆聚合有关 的中一新元古代造山带.由此,格林威尔期造山运 动一词有其大地构造意义,即指示Rodinia超大陆的 聚合过程中的陆一陆碰撞造山运动.

笔者整理了塔里木克拉通新元古界已发表的 碎屑锆石数据,加上本次研究得到的数据,得到56 个样品的5288个碎屑锆石的U-Pb年龄数据(表 1).这些数据覆盖了塔西南、塔西北和塔东北的3个 露头区的南华系和震旦系,可以对塔里木克拉通新 元古界碎屑锆石 U-Pb 年龄分布建立全面的认识. 整体看来,这些数据构成两个年龄峰:700~900 Ma 的主峰,和1800~2100 Ma的次峰(图7).3159个 年龄落在700~900 Ma的区间内,占总体的59.7%; 1091个年龄处于1800~2100 Ma的区间,占总体 的20.6%.其中,古元古代的年龄峰可能反映了塔里 木克拉通对哥伦比亚超大陆聚合的响应(Xu et al., 2013a; 辜平阳等, 2020). 但新元古代的年龄峰, 即主 要的年龄峰,并不能与任何超大陆聚合相关的全球 性造山事件对应,实际上它位于格林威尔期造山事 件与泛非期造山事件之间.同时,几乎没有与格林 威尔期造山同期的,即约1.25~0.98 Ma的碎屑锆石 记录.





Fig. 7 The overall distribution of the detrital zircon U-Pb ages of the Neoproterozoic in the Tarim craton 格林威尔期与泛非期造山带的时间段数据分别来自 Rivers(2015)和 Meert(2003)

塔里木克拉通新元古界整体的碎屑锆石年龄 分布与克拉通内的岩浆记录相吻合(Wu et al., 2022),并且新元古界碎屑岩整体上是一套裂谷环 境下的近源沉积,其沉积物源应该来自克拉通内 部,或者周边相连的其他块体.也就是说,碎屑锆石 的年龄分布可以真实地反映塔里木克拉通本身经 历的热事件.现今地质记录中缺少格林威尔期的岩 浆岩和变质岩,这可能是由于剥蚀或埋藏等地质作 用的改造使得现今的地质记录残缺不全.而当沉积 岩中缺少相关的物源信息时,则可以得出更加确定 的结论,即塔里木克拉通内并没有发生格林威尔期 的热事件.

表1 塔里木克拉通新元古界碎屑锆石 U-Pb 年龄数据汇总

露头区	年代	样品号	地层	测试数量	数据来源	
		10 W 07	苏盖特布拉克组	77	He <i>et al</i> .,2014a	
		10A03	苏盖特布拉克组	87	He <i>et al</i> .,2014a	
	震旦系	10A04	苏盖特布拉克组	74	He <i>et al</i> .,2014a	
		WSL4	苏盖特布拉克组	79	Li <i>et al</i> ., 2015	
		Y37	苏盖特布拉克组	86	Wu et al., 2018	
		07A-33	苏盖特布拉克组	57	Zhu <i>et al</i> .,2011	
		07A-34	苏盖特布拉克组	60	Zhu <i>et al</i> .,2011	
		SA19-5	苏盖特布拉克组	149	Yi et al., 2022	
		SA19-7	苏盖特布拉克组	148	Yi et al., 2022	
		YN19-19	苏盖特布拉克组	146	Yi et al., 2022	
		YN19-16	尤尔美纳克组	146	Yi et al., 2022	
		YN19-21	尤尔美纳克组	126	Yi et al., 2022	
	古化ズ	10 W 06	尤尔美纳克组	76	He <i>et al</i> .,2014a	
	用华杀	13A01	尤尔美纳克组	73	He <i>et al</i> .,2014a	
		Y-YB1	尤尔美纳克组	91	Vandyk et al., 202	
阿克苏地区		YR-1	尤尔美纳克组	80	Ding et al., 2015	
		15A14	冬屋组	61	Lu et al., 2017	
		10W01	冬屋组	70	He <i>et al</i> .,2014a	
		10 W 05	冬屋组	70	He <i>et al</i> .,2014a	
		QE-3	冬屋组	62	Ding et al., 2015	
		YN19-18	冬屋组	116	Yi et al., 2022	
	南华系	10 W 04	牧羊滩组	73	He <i>et al.</i> , 2014a	
		QE-2	牧羊滩组	75	Ding et al., 2015	
		10W03	东巧恩布拉克组	79	He <i>et al.</i> , 2014a	
		YN19-13	东巧恩布拉克组	121	Yi et al., 2022	
		YN19-27	西方山组	110	Yi et al., 2022	
		YN19-9	西方山组	124	Yi et al., 2022	
		YN19-6	西方山组	152	Yi et al., 2022	
		YN19-5	西方山组	164	Yi et al., 2022	
		QE-1	西方山组	46	Ding et al., 2015	
		Q72	西方山组	83	Wu et al., 2018	
		KL-24	水泉组	92	Ren et al., 2020	
F鲁克塔格地区	震旦系	KL-20	育肯沟组	78	Ren et al., 2020	
		KL-37	扎摩克提组	100	Ren et al., 2020	
		QR19-5	扎摩克提组	109	本文	
	南华系	QR19-3	阿勒通沟组	115	本文	
		QR19-4	阿勒通沟组	114	本文	
		11K24	阿勒通沟组	40	He <i>et al</i> .,2014b	
		11K26	阿勒通沟组	77	He <i>et al</i> ., 2014b	

续	表	1

露头区	年代	样品号	地层	测试数量	数据来源
	南华系	10K07	阿勒通沟组	93	He <i>et al.</i> , 2014b
左鱼古 拔 林 时 冈		10K09	阿勒通沟组	73	He <i>et al.</i> , 2014b
开自光石佰地区		11K19	贝义西组	76	He <i>et al.</i> , 2014b
		09DPL25	贝义西组	81	张英利等,2011
	震旦系	XZ19-5	库尔卡克组	157	本文
	南华系	XZ19-7	雨塘组	249	本文
		X5	雨塘组	101	Wu et al., 2019
		2013TR08	克里西组	69	Zhang et al., 2016
		XZ19-4	克里西组	158	本文
		XZ19-1	波龙组	171	本文
铁克里克地区		XZ19-2	波龙组	62	本文
		X3	波龙组	96	Wu et al., 2019
		2015D27	波龙组	64	Zhang et al., 2016
		2015D28	波龙组	61	Zhang et al., 2016
		X1	牙拉古孜组	81	Wu et al., 2019
		10TK-75	恰克马克力克群	96	Wang et al., 2015
		12TK-14	恰克马克力克群	67	Wang et al., 2015

另一方面,在不同克拉通内,Rodinia超大陆聚 合的相关记录具有一定穿时性(Li et al.,2008),那 么塔里木克拉通是否有可能在较晚的时间确实发 生了陆一陆碰撞,甚至代表了Rodinia超大陆的最终 拼合完成呢(Zhao et al.,2021)?可以想象,在塔里木 这样一个小板块内,如果存在一个横亘于克拉通中 央的造山带,它将成为整个克拉通内碎屑沉积的主 要物源,造山带两侧将具有相同的物源.因此,笔者 按露头区(阿克苏地区/库鲁克塔格地区/铁克里克 地区)和沉积年代(南华/震旦)将统计的数据分类 (图8),然后比较了不同露头区同时代地层的碎屑 锆石年龄分布的相似程度,来判断塔里木克拉通在 新元古代是否存在一个大型造山带作为统一的物 源供给.

阿克苏地区南华系中碎屑锆石年龄集中在 800~900 Ma区间,峰值在850 Ma左右,且年龄频 谱沿850 Ma大致对称.库鲁克塔格地区新元古代锆 石年龄整体更为年轻,集中在750~850 Ma之间,峰 值为811 Ma,且其核密度估计曲线呈负偏态.同时, 库鲁克塔格地区南华系中有大量新太古代一古元 古代的年龄,形成了峰值年龄在1967 Ma和 2587 Ma的两个年龄峰.铁克里克地区的南华系碎 屑锆石年龄分布中,新元古代年龄峰进一步向年轻 方向移动,集中在720~840 Ma,峰值年龄762 Ma, 核密度估计曲线呈正偏态.铁克里克地区南华系中 也存在部分新太古代一古元古代的碎屑锆石,占比 介于其他两个区域之间.

阿克苏地区震旦系的碎屑锆石年龄频谱有两 个主要的年龄峰,分别在730~900 Ma和1700~ 2100 Ma;还有两个次要的年龄峰,分别在570~ 730 Ma和2100~3100 Ma.库鲁克塔格地区震旦系 碎屑锆石年龄的分布区间与阿克苏地区的相似,但 更为集中,新元古代锆石主要分布在720~870 Ma 区间内,更老的锆石主要分布在1800~2050 Ma区 间内.铁克里克地区震旦系样品只有本次研究中的 XZ19-5,其分布特征上文已经述及.

Kolmogorov-Smirnov(K-S)是检验两个分布之间相似程度的一种常用方法(Vermeesch,2013),它的先验假设是2个样本(样品)来自同一个概率分布(源区),当p值小于0.05时,则在95%的置信度下先验假设不成立,即所测试的样本(样品)来自不同的概率分布(源区).在此基础上,用多维度定标(Multidimensional Scale,MDS)将样本间的相似程度可视化为二维平面内的距离,距离越短则样本的相似度越高(Vermeesch,2013).

K-S测试的结果显示,3个露头区的南华系碎 屑锆石分布之间p值均远小于0.05,震旦系也是如 此(表2).这也意味着,不同露头区同时代的地层有 不同的物源,这与作者观察到的它们碎屑锆石年龄 的核密度估计曲线以及直方图的差异相符.MDS图 解也表明,不同露头区南华系样品的碎屑锆石分布





n =年龄点数(样品数)

表2 不同地区同时代样品碎屑锆石 U-Pb 年龄分布 K-S 测试结果

Table 2 K-S test for detrital zircon U-Pb age spectra of coeval samples from different areas							
p值 K-S距离	阿克苏南华系	库鲁克塔格南华系	铁克里克南华系	阿克苏震旦系	库鲁克塔格震旦系	铁克里克震旦系	
阿克苏南华系	—	0	0	_	_	_	
库鲁克塔格南华系	0.331 69	_	0	_	_	_	

0.333 00

之间有较为截然的区分,来自同一个地区的样品会组成一个区域,区域内样品距离较短,而区域间样品的距离较长.震旦系样品间的区分没有南华系的显著,但仍然有所区分(图9).

0.503 64

铁克里克南系华

阿克苏震旦系

库鲁克塔格震旦系

铁克里克震旦系

南华系是塔里木克拉通的第1套未变质的盖层,如果在820~870 Ma发生了陆一陆碰撞引起的 大型造山活动(图1; Zhao *et al.*, 2021),将产生大量 的820~870 Ma锆石,并且该造山带会为整个克拉 通的沉积区提供物源.但塔里木克拉通新元古界的 3个主要露头区中只有阿克苏地区的南华系碎屑锆 石年龄集中在800~900 Ma,与前人所提议的碰撞 发生的时间较为相符,而且阿克苏地区并非是距 "塔里木中央造山带"最近的露头区.定性与定量的 对比都显示,不同露头区同时代地层有不同的物 源,尤其是三地南华系的物源,差异显著.因此,作 者认为碎屑锆石记录并不支持塔里木克拉通经历 过以陆一陆碰撞为标志的格林威尔期造山运动这 一假设.

0.000 19

0.190 68

0.129 33

0.260 42

0

0.000 51



Fig. 9 2D-MDS diagrams for detrital zircon U-Pb age spectra of coeval samples from different areas

5 结论

(1)用LA-ICP-MS方法,对库鲁克塔格地区和 铁克里克地区新元古界的7个砂岩样品进行了碎屑 锆石U-Pb定年,获得了1135个碎屑锆石年龄,主 要分布在700~900 Ma和1500~3000 Ma两个区 间内.

(2)通过碎屑锆石年龄得到,塔西南波龙组和 雨塘组冰碛岩的最大沉积年龄分别是~690 Ma和 642 Ma.由此推测,波龙组形成于 Sturtian 冰期,雨 塘组形成于 Marinoan 冰期.

(3)建立了完整的塔里木克拉通新元古界碎屑 锆石年龄数据库,其分布显示出两个年龄峰:一个 700~900 Ma的主峰,该年龄区间介于格林威尔期 与泛非期之间;一个1800~2100 Ma的次峰,可能 是对哥伦比亚超大陆聚合的响应.

(4)塔里木克拉通不同露头区新元古界的物源 区有显著差异,尤其是南华系,这与前人提出的发 育贯穿克拉通的碰撞造山带的假说不吻合.此外, 碎屑锆石中几乎没有格林威尔期年龄,作者认为格 林威尔期造山活动对塔里木克拉通的影响不显著.

致谢:感谢两位审稿人细致的评阅和宝贵的意见.

References

Bingen, B., Andersson, J., Söderlund, U., et al., 2008. The Mesoproterozoic in the Nordic Countries. *Episodes*, 31(1): 29-34. https://doi.org/10.18814/epiiugs/2008/ v31i1/005

- Cawood, P. A., Korsch, R. J., 2008. Assembling Australia: Proterozoic Building of a Continent. *Precambrian Re-search*, 166(1/2/3/4): 1-35. https://doi.org/10.1016/ j.precamres.2008.08.006
- Chen, H., Lin, X., Cheng, X., et al., 2019. The Late Neoproterozoic Sedimentary Sequences in the Yutang Section Southwest Tarim Basin and Their Tectonic Implications and Hydrocarbon Perspective: Insight from Basinology. *Precambrian Research*, 333: 105432. https://doi. org/10.1016/j.precamres.2019.105432
- Chen, H.J., Wu, C.L., Lei, M., et al., 2018. Petrogenesis and Implications for Neoproterozoic Granites in Kekesayi Area, South Altyn Continent. *Earth Science*, 43(4): 1278-1295(in Chinese with English abstract).
- Dickinson, W.R., Gehrels, G.E., 2009. Use of U-Pb Ages of Detrital Zircons to Infer Maximum Depositional Ages of Strata: A Test against a Colorado Plateau Mesozoic Database. *Earth and Planetary Science Letters*, 288(1-2): 115-125. https://doi. org/10.1016/j. epsl.2009.09.013
- Ding, H. F., Ma, D. S., Lin, Q. Z., et al., 2015. Age and Nature of Cryogenian Diamictites at Aksu, Northwest China: Implications for Sturtian Tectonics and Climate. *International Geology Review*, 57(16): 2044-2064. https://doi.org/10.1080/00206814.2015.1050463
- Fitzsimons, I. C. W., 2000. Grenville-Age Basement Provinces in East Antarctica: Evidence for Three Separate Collisional Orogens. *Geology*, 28(10): 879-882. https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28879: gbpiea

>2.0.co;2

- Gao, L.Z, Guo, X.P., Ding, X.Z., et al., 2013. Nanhuan Glaciation Event and Its Stratigraphic Correlation in Tarim Plate, China. Acta Geoscientia Sinica, 34(1): 39-57(in Chinese with English abstract).
- Ge, R. F., Zhu, W. B., Wilde, S. A., et al., 2014. Neoproterozoic to Paleozoic Long-Lived Accretionary Orogeny in the Northern Tarim Craton. *Tectonics*, 33(3): 302– 329. https://doi.org/10.1002/2013tc003501
- Gu, P.Y., Ji, W.H., Chen, R.M., et al., 2020. Petrogenesis of Neoarchean Ananba Quartz Diorite Gneiss in Southeastern Margin of Tarim: Implications for Crustal Evolution. *Earth Science*, 45(9): 3268-3281(in Chinese with English abstract).
- Guo, Z.J., Yin, A., Robinson, A., et al., 2005. Geochronology and Geochemistry of Deep-Drill-Core Samples from the Basement of the Central Tarim Basin. *Journal* of Asian Earth Sciences, 25(1): 45-56. https://doi.org/ 10.1016/j.jseaes.2004.01.016
- Guo, Z. J., Zhang, Z. C., Wang, J. J., 1998. Sm-Nd Isochron Age of Ophiolite Belt in the Northern Margin of Altun Mountain and Its Tectonic Significance. *Chinese Science Bulletin*, 43(18): 1981–1984(in Chinese).
- Hawkesworth, C., Cawood, P., Kemp, T., et al., 2009. A Matter of Preservation. Science, 323(5910): 49-50. https://doi.org/10.1126/science.1168549
- He, J., Zhu, W., Ge, R., 2014a. New Age Constraints on Neoproterozoic Diamicites in Kuruktag, NW China and Precambrian Crustal Evolution of the Tarim Craton. Precambrian Research, 241: 44-60. https://doi. org/ 10.1016/j.precamres.2013.11.005
- He, J., Zhu, W., Ge, R., et al., 2014b.Detrital Zircon U– Pb Ages and Hf Isotopes of Neoproterozoic Strata in the Aksu Area, Northwestern Tarim Craton: Implications for Supercontinent Reconstruction and Crustal Evolution. *Precambrian Research*, 254: 194–209. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2014.08.016
- He, Z.Y, Zhang, Z.M., Zong, K.Q., et al., 2012. Neoproterozoic Granulites from the Northeastern Margin of the Tarim Craton: Petrology, Zircon U-Pb Ages and Implications for the Rodinia Assembly. *Precambrian Research*, 212/213: 21-33. https://doi.org/10.1016/j. precamres.2012.04.01
- Li, Y.J., Sun, L.D., Hu, S.L., et al., 2003. ⁴⁰Ar-³⁹Ar Geochronology of the Granite and Diorite Revealed at the Bottom of Tacan 1, the Deepest Well in China. *Acta Petrologica Sinica*, 19(3): 530-536(in Chinese with English abstract).

- Li, Z. X., Bogdanova, S. V., Collins, A. S., et al., 2008. Assembly, Configuration, and Break-Up History of Rodinia: A Synthesis. *Precambrian Research*, 160(1-2): 179-210.
- Li, Z., Qiu, N.S., Chang, J., et al., 2015. Precambrian Evolution of the Tarim Block and Its Tectonic Affinity to Other Major Continental Blocks in China: New Clues from U-Pb Geochronology and Lu-Hf Isotopes of Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 270: 1–21. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2015.09.011
- Lu, Y.Z., Zhu, W.B., Ge, R.F., et al., 2017. Neoproterozoic Active Continental Margin in the Northwestern Tarim Craton: Clues from Neoproterozoic (Meta) Sedimentary Rocks in the Wushi Area, Northwest China. *Precambrian Research*, 298: 88-106. https://doi.org/ 10.1016/j.precamres.2017.06.002
- Ma, S.P., Wang, Y.Z., Fang, X.L., 1989. The Sinian at North Slope, Western Kunlun Mountains. *Xinjiang Ge*ology, (4): 68-79(in Chinese with English Abstract).
- Meert, J.G., 2003. A Synopsis of Events Related to the Assembly of Eastern Gondwana. *Tectonophysics*, 362(1-4): 1-40. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02) 00629-7
- Rainbird, R., Cawood, P., Gehrels, G., 2012. The Great Grenvillian Sedimentation Episode: Record of Supercontinent Rodinia's Assembly. Tectonics of Sedimentary Basins. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, UK, 583-601. https://doi. org/10.1002/9781444347166. ch29
- Ren, R., Guan, S.W., Zhang, S.C., et al., 2020. How did the Peripheral Subduction Drive the Rodinia Breakup: Constraints from the Neoproterozoic Tectonic Process in the Northern Tarim Craton. *Precambrian Research*, 339: 105612. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2020.105612
- Rivers, T., 2015. Tectonic Setting and Evolution of the Grenville Orogen: An Assessment of Progress over the Last 40 Years. *Geoscience Canada*, 42(1): 77-124. https://doi.org/10.12789/geocanj.2014.41.057
- Santos, J. O. S., Rizzotto, G. J., Potter, P. E., et al., 2008. Age and Autochthonous Evolution of the Sunsás Orogen in West Amazon Craton Based on Mapping and U-Pb Geochronology. *Precambrian Research*, 165(3/4): 120-152. https://doi. org/10.1016/j. precamres.2008.06.009
- Tong, Q.L., Wei, W., Xu, B., 2013. Neoproterozoic Sedimentary Facies and Ice Age Division in the Southwest Margin of Tarim Plate. *Scientia Sinica (Terrae)*, 43(5):

703-715(in Chinese).

- Vandyk, T.M., Wu, G., Davies, B.J., et al., 2019. Temperate Glaciation on a Snowball Earth: Glaciological and Palaeogeographic Insights from the Cryogenian Yuermeinak Formation of NW China. *Precambrian Research*, 331: 105362. https://doi.org/10.1016/j. precamres.2019.105362
- Vermeesch, P., 2004. How Many Grains are Needed for a Provenance Study? *Earth and Planetary Science Letters*, 224(3-4): 441-451. https://doi.org/10.1016/j. epsl.2004.05.037
- Vermeesch, P., 2013. Multi-Sample Comparison of Detrital Age Distributions. *Chemical Geology*, 341: 140-146. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.01.010
- Wang, C., Liu, L., Wang, Y.H., et al., 2015. Recognition and Tectonic Implications of an Extensive Neoproterozoic Volcano-Sedimentary Rift Basin along the Southwestern Margin of the Tarim Craton, Northwestern China. *Precambrian Research*, 257: 65–82. https://doi.org/ 10.1016/j.precamres.2014.11.022
- Wen, B., Evans, D. A. D., Wang, C., et al., 2018. A Positive Test for the Greater Tarim Block at the Heart of Rodinia: Mega-Dextral Suturing of Supercontinent Assembly. *Geology*, 46(8): 687-690. https://doi.org/ 10.1130/g40254.1
- Wu, G. H., Xiao, Y., He, J. Y., et al., 2019. Geochronology and Geochemistry of the Late Neoproterozoic A– Type Granitic Clasts in the Southwestern Tarim Craton: Petrogenesis and Tectonic Implications. *International Geology Review*, 61(3): 280–295. https://doi.org/ 10.1080/00206814.2017.1423521
- Wu, G.H., Xiao, Y., Bonin, B., et al. 2018. Ca. 850 Ma Magmatic Events in the Tarim Craton: Age, Geochemistry and Implications for Assembly of Rodinia Supercontinent. *Precambrian Research*, 305: 489-503. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2017.10.020
- Wu, H. X., Zhang, F., Dilek, Y., et al., 2022. Mid-Neoproterozoic Collision of the Tarim Craton with the Yili-Central Tianshan Block towards the Final Assembly of Supercontinent Rodinia: A New Model. *Earth-Science Reviews*, 228: 103989. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2022.103989
- Wu, L., Guan, S. W., Ren, R., et al., 2017. Sedimentary Evolution of Neoproterozoic Rift Basin in Northern Tarim. *Petroleum Research*, 2(4): 315-323. https:// doi.org/10.1016/j.ptlrs.2017.03.004
- Wu, L., Guan, S. W., Ren, R., et al., 2021. Neoproterozoic Glaciations and Rift Evolution in the Northwest Tarim

Craton, China: New Constraints from Geochronological, Geochemical, and Geophysical Data. *International Geology Review*, 63(1): 1-20. https://doi. org/ 10.1080/00206814.2019.1700399

- Xia, B., Zhang, L. F., Du, Z. X., et al., 2019. Petrology and Age of Precambrian Aksu Blueschist, NW China. *Precambrian Research*, 326: 295-311. https://doi.org/ 10.1016/j.precamres.2017.12.041
- Xiao, S.H., Bao, H.M., Wang, H.F., et al. 2004. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in Eastern Chinese Tianshan: Evidence for a Post-Marinoan Glaciation. *Precambrian Research*, 130(1-4): 1-26. https://doi. org/ 10.1016/j.precamres.2003.10.013
- Xu, B., Xiao, S.H, Zou, H.B., et al., 2009. SHRIMP Zircon U-Pb Age Constraints on Neoproterozoic Quruqtagh Diamictites in NW China. *Precambrian Research*, 168(3/4): 247-258. https://doi.org/10.1016/j. precamres.2008.10.008
- Xu, B., Zou, H.B., Chen, Y., et al. 2013a. The Sugetbrak Basalts from Northwestern Tarim Block of Northwest China: Geochronology, Geochemistry and Implications for Rodinia Breakup and Ice Age in the Late Neoproterozoic. *Precambrian Research*, 236: 214–226. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2013.07.009
- Xu, Z.Q., He, B.Z., Zhang, C.L., et al., 2013b. Tectonic Framework and Crustal Evolution of the Precambrian Basement of the Tarim Block in NW China: New Geochronological Evidence from Deep Drilling Samples. *Precambrian Research*, 235: 150-162. https://doi.org/ 10.1016/j.precamres.2013.06.001
- Ye, X. T., Zhang, C. L., Wang, A. G., et al., 2018. Early Paleozoic Slab Rollback in the North Altun, Northwest China: New Evidence from Mafic Intrusions and High-Mg Andesites. *Lithosphere*, 10(6): 687-707. https:// doi.org/10.1130/I732.1
- Yi, Z. Y., Guo, Z. J., Wei, G. Q., 2022. A Two-Stage Plume-Induced Rifting in the Neoproterozoic North Tarim: Evidence from Detrital Zircon Study and Seismic Interpretation. *Tectonophysics*, 838: 229503. https:// doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229503
- Zhang, C.L., Ye, X.T., Zou, H.B., et al., 2016. Neoproterozoic Sedimentary Basin Evolution in Southwestern Tarim, NW China: New Evidence from Field Observations, Detrital Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Compositions. *Precambrian Research*, 280: 31-45. https:// doi.org/10.1016/j.precamres.2016.04.011
- Zhang, Y.L., Wang, Z.Q., Yan, Z., et al., 2011. Tectonic Setting of Neoproterozoic Beiyixi Formation in

Quruqtagh Area, Xinjiang: Evidence from Geochemistry of Clastic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 27(6): 1785— 1796(in Chinese with English abstract).

- Zhao, P., He, J. Y., Deng, C. L., et al., 2021. Early Neoproterozoic (870-820 Ma) Amalgamation of the Tarim Craton (Northwestern China) and the Final Assembly of Rodinia. *Geology*, 49(11): 1277-1282. https://doi.org/ 10.1130/g48837.1
- Zhou, C. M., Huyskens, M. H., Lang, X. G., et al., 2019. Calibrating the Terminations of Cryogenian Global Glaciations. *Geology*, 47(3): 251-254. https://doi.org/ 10.1130/g45719.1
- Zhou, T., Ge, R. F., Zhu, W. B., et al., 2021. Is There a Grenvillian Orogen in the Southwestern Tarim Craton? *Precambrian Research*, 354: 106053. https://doi.org/ 10.1016/j.precamres.2020.106053
- Zhu, W.B., Zheng, B.H., Shu, L.S., et al., 2011. Neoproterozoic Tectonic Evolution of the Precambrian Aksu Blueschist Terrane, Northwestern Tarim, China: Insights from LA-ICP-MS Zircon U-Pb Ages and Geochemical Data. *Precambrian Research*, 185(3/4): 215– 230. https://doi.org/10.1016/j.precamres.2011.01.012

附中文参考文献

- 陈红杰, 吴才来, 雷敏, 等, 2018. 南阿尔金陆块科克萨依新 元古代花岗岩成因及地质意义. 地球科学, 43(4): 1278-1295.
- 高林志,郭宪璞,丁孝忠,等,2013.中国塔里木板块南华纪 成冰事件及其地层对比.地球学报,34(1):39-57.
- 辜平阳, 计文化, 陈锐明, 等, 2020. 塔里木地块东南缘新太 古代安南坝石英闪长片麻岩的成因及其对地壳演化的 启示.地球科学, 45(9): 3268-3281.
- 郭召杰,张志诚,王建君,1998.阿尔金山北缘蛇绿岩带的 Sm-Nd等时线年龄及其大地构造意义.科学通报,43 (18):1981-1984.
- 李曰俊, 孙龙德, 胡世玲, 等, 2003. 塔里木盆地塔参1井底 部花岗闪长岩的⁴⁰Ar⁻³⁹Ar 年代学研究. 岩石学报, 19 (3): 530-536.
- 马世鹏, 汪玉珍, 方锡廉, 1989. 西昆仑山北坡的震旦系. 新 疆地质, (4): 68-79.
- 童勤龙, 卫魏, 徐备, 2013. 塔里木板块西南缘新元古代沉
 积相和冰期划分.中国科学:地球科学, 43(5):
 703-715.
- 张英利, 王宗起, 闫臻, 等, 2011. 库鲁克塔格地区新元古代 贝义西组的构造环境: 来自碎屑岩地球化学的证据. 岩 石学报, 27(6): 1785-1796.