



引文格式: 王旭东, 姚金龙, 赵喜军, 等. 北阿尔金早古生代弧-盆体系重建: 来自沉积记录的约束[J]. 西北地质, 2026, 59(3): 296-313. DOI: 10.12401/j.nwg.2025030

Citation: WANG Xudong, YAO Jinlong, ZHAO Xijun, et al. Delineating Early Paleozoic Trench-Arc-Basin System in the Northern Altyn Tagh Belt: Constraints from Sedimentary Records[J]. Northwestern Geology, 2026, 59(3): 296-313. DOI: 10.12401/j.nwg.2025030

北阿尔金早古生代弧-盆体系重建: 来自沉积记录的约束

王旭东, 姚金龙*, 赵喜军, 陈龙

(西北大学地质学系, 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 陕西 西安 710069)

摘要: 北阿尔金蛇绿混杂岩带及其邻区中阿尔金地块发育完整的早古生代沉积地层, 记录了北阿尔金洋的俯冲-消亡过程。该混杂岩带中发育一套寒武纪—奥陶纪凝灰质砂岩夹火山岩、碳酸盐岩地层, 蛇绿岩残片呈构造残块产出于其中, 上段凝灰质砂岩碎屑锆石 U-Pb 定年显示其年龄谱集中在奥陶纪 (520~440 Ma, 峰值为 470 Ma), 且其最大沉积年龄 (YPP) 为 456 Ma。此外, 这些碎屑物多源自新生地壳物质 ($7.4 > \varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$)。与此相反, 位于其南侧中阿尔金地块北缘的同时代额兰塔格组展示寒武纪—早奥陶世 (524~468 Ma, 峰值为 480~475 Ma) 的碎屑锆石年龄峰, 最大沉积年龄 (YPP) 为 446 Ma, 但锆石 Hf 同位素特征 (-1.8~-8.4) 指示其源区以地壳再循环为主。锆石微量元素特征显示二者源区均以花岗质岩为主, 且形成于大陆弧构造背景。野外地质、碎屑锆石年龄分布特征、同位素和地球化学成分均指示北阿尔金和中阿尔金北缘的奥陶纪地层沉积于活动板块边缘。结合区域地质和前人研究工作, 笔者认为额兰塔格组沉积于弧后前陆盆地, 其源区为中阿尔金地块北缘的寒武纪—奥陶纪大陆边缘弧; 而北阿尔金蛇绿混杂岩带的奥陶纪地层则可能形成于经历了北阿尔金洋壳俯冲回撤、陆块伸展之后较晚期的弧前盆地沉积。活动陆缘盆地沉积物的年龄表明北阿尔金洋在寒武纪—奥陶纪存在持续俯冲, 可能直至晚奥陶世北阿尔金洋才最终闭合。

关键词: 阿尔金造山带; 北阿尔金洋; 碎屑锆石; 早古生代; 弧前盆地; 弧后前陆盆地

中图分类号: P58; P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2026)03-0296-18

Delineating Early Paleozoic Trench-Arc-Basin System in the Northern Altyn Tagh Belt: Constraints from Sedimentary Records

WANG Xudong, YAO Jinlong*, ZHAO Xijun, CHEN Long

(State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China)

Abstract: Early Paleozoic stratigraphic sequences are well exposed in the North Altyn ophiolitic mélangé zone

收稿日期: 2024-12-08; 修回日期: 2024-12-23; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42322208) 资助。

作者简介: 王旭东 (1999-) 男, 硕士研究生, 地质学专业。E-mail: 775109838@qq.com。

* 通讯作者: 姚金龙 (1987-) 男, 教授, 从事板块构造、超大陆聚散及其环境效应研究。E-mail: yaojinlong@nwu.edu.cn。

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

and its adjacent Central Altyn block, which documented the subduction and collision of the North Altyn Ocean. The Ordovician sequence within the North Altyn ophiolitic mélange zone is composed of clastic rocks, volcanic rocks and carbonates. Detrital zircon grains from the volcanoclastic sandstone samples determine a single age population at 420~440 Ma (peak at 470 Ma), with a maximum depositional age (YPP) of 456 Ma. Moreover, the detrital grains were predominantly derived from a juvenile crustal source ($7.4 > \epsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$). Coeval Ordovician Elantage Formation exposed in the northern margin of the Central Altyn block also displays a single age population, but at 510~450 Ma (peak at 470~465 Ma), with a YPP of 446 Ma. However, their Hf isotopes ($-1.8 \sim -8.4$) indicate a source region dominated by crustal recycling. The zircon trace element signatures of both units argue for derivation from a granitic source. Field geology, detrital zircon age distribution patterns, along with zircon isotopic and geochemical compositions, suggest deposition in an active plate margin setting. This, together with regional geology and previous studies, favors the Elantage Formation as deposited in an Early Ordovician retro-continental arc basin related to the south directed subduction of the North Altyn Ocean, with detritus derived from the Cambrian-Ordovician continental margin arc type granitoids in the northern Central Altyn block. In contrast, the Ordovician sequence within the North Altyn ophiolitic mélange zone may have been deposited in a younger fore-arc basin, subsequent to retreat of oceanic subduction and the extension of the continental central Altyn block. The identified Ordovician continental arc margin basins argue for continuous subduction of the North Altyn Ocean from the Cambrian to the Ordovician period, which closed in late Ordovician.

Keywords: Altyn Orogenic Belt; north Altyn Ocean; detrital zircon; early Paleozoic; fore-arc basin; retro-arc foreland basin

位于冈瓦纳(Gondwana)大陆北缘的原特提斯洋是新元古代罗迪尼亚(Rodinia)超大陆裂解过程中形成的古大洋(Ding et al., 1996; Xiao et al., 2002, 2003, 2005; Zhang et al., 2004; Jia et al., 2013; 李三忠等, 2016; Zhao et al., 2018; 宋述光等, 2019; Yao et al., 2021; 姚金龙等, 2021)。伴随着原特提斯洋的关闭, 东亚陆块群(如塔里木、华北、华南、塔里木、柴达木、中祁连等)最终拼合到冈瓦纳大陆(Dong et al., 2016; Zhao et al., 2018; Wang et al., 2019; Liu et al., 2021; Yao et al., 2021), 成为冈瓦纳大陆的一部分。这一事件在区域上形成了广泛分布的早古生代蛇绿岩带和高压-超高压变质岩带(刘良等, 1999, 2002; 张建新等, 2007, 2015; 裴先治等, 2007, 2018; 马拓, 2022)。但是, 原特提斯洋的洋-陆格局及其时空演化一直研究不足, 存在诸多争议(郭福祥, 2001; 肖序常等, 2003; 刘函等, 2012; 王令全等, 2024; Xu et al., 2024), 特别是原特提斯洋俯冲起始时间和最终闭合时间, 及其产物(陈宣华等, 2003; 陆松年等, 2003; 吴才来等, 2005; 杨经绥等, 2008; 盖永升等, 2015; 陈柏林等, 2016; 孟令通等, 2016; Li et al., 2018; 吴玉等, 2019; Yao et al., 2021)。

阿尔金造山带记录了塔里木克拉通、柴达木地块向冈瓦纳大陆拼合的过程, 其北部的北阿尔金蛇绿混

杂岩带(又称红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带)是原特提斯洋阿尔金段俯冲消减的产物, 也是原特提斯洋的重要组成部分, 其东西向延伸约 600 km(图 1; Sobel et al., 1999; Gehrels et al., 2003; Zhang et al., 2005, 2014; Han et al., 2012; Wang et al., 2013; Yu et al., 2013)。带内及其南侧的中阿尔金地块均发育完整的寒武系—奥陶系沉积岩系(中国地质调查局西安地质调查中心, 2012; Liu et al., 2021, 2024), 记录了北阿尔金洋的构造演化过程(修群业等, 2007; 杨经绥等, 2008; 张建新等, 2015)。但是, 原特提斯洋阿尔金段的洋-陆格局、闭合方式和时空演化等存在较大争议(张建新等, 2015; Zhang et al., 2017; Liu et al., 2021)。有学者认为中阿尔金地块属于岛弧地体, 红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带位于弧后盆地, 北阿尔金洋俯冲极性为向北俯冲(杨子江, 2012)。也有部分学者认为北阿尔金洋的闭合方式为双向俯冲(刘函, 2011)。但区域上主流观点认为北阿尔金洋的俯冲极性与早古生代原特提斯洋中的其余小洋盆(如北祁连洋、南祁连洋、昆仑洋、宽坪洋等)具有相同的向南的俯冲极性, 并且均广泛存在弧岩杂岩、新生地壳物质、俯冲-增生杂岩, 并发育山弯构造(李三忠等, 2016)。由于前人研究主要集中在花岗质岩浆活动与变质作用等方面(刘良等, 1999,

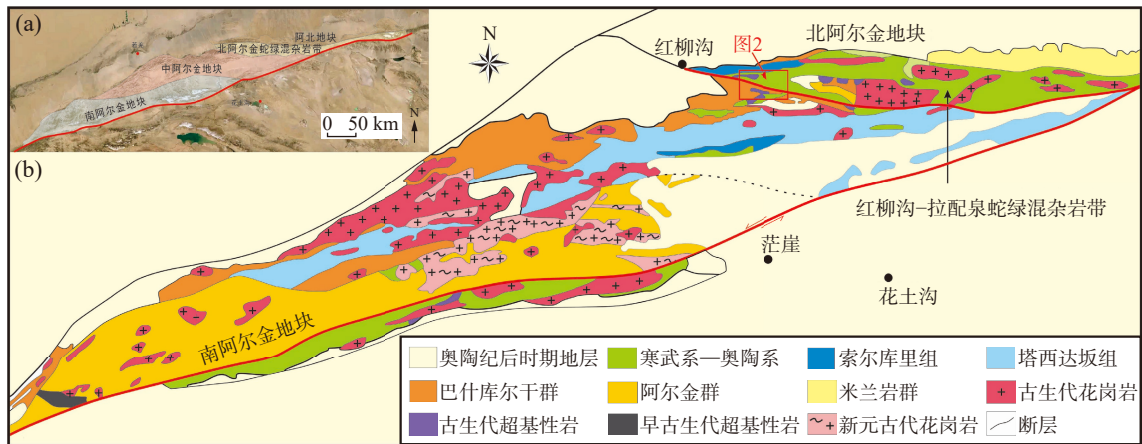


图 1a 卫星影像来源于奥维数据库；图 1b 据 Liu et al.(2018)和 Yao et al.(2021)修改

图1 阿尔金造山带大地构造略图

Fig. 1 Geological schematic map of the Altyn Belt

2002; 陈宣华等, 2003; 陆松年等, 2003; Qi et al., 2005; 吴才来等, 2005; 刘函等, 2012; Wang et al., 2014; 张建新等, 2015; 盖永升等, 2015; Liu et al., 2015, 2023; 陈柏林等, 2016; 孟令通等, 2016; 吴玉等, 2016, 2019, 2021; 彭银彪等, 2018; Li et al., 2023; Zhou et al., 2024), 对北阿尔金地区早古生代沟弧盆体系一直缺乏系统性研究, 制约了对该地区构造演化过程的准确厘定。

笔者以北阿尔金红柳沟-拉配泉及邻区的中阿尔金北缘-北阿尔金俯冲带中的早古生代沉积岩系为主要研究对象, 开展了野外地质以及碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成研究, 查明了沉积岩的碎屑物源, 厘定了中阿尔金北缘-北阿尔金蛇绿混杂岩带中的早古生代沉积地层记录的活动大陆边缘盆地沉积, 进一步建立研究区早古生代的活动大陆边缘弧-盆体系, 为准确限定北阿尔金地区早古生代活动陆缘盆地类型和时限提供了地质证据。

1 区域地质背景

阿尔金造山带夹于塔里木克拉通、祁连造山带、柴达木地块和东昆仑造山带之间, 呈现 NE-SW 走向 (图 1; 段星星等, 2023)。阿尔金造山带可进一步划分为 5 个构造单元, 从东北向西南依次为阿北地块、北阿尔金蛇绿混杂岩带 (又名红柳沟-拉配泉早古生代俯冲碰撞混杂岩带)、中阿尔金地块 (即米兰河-金雁山地块)、南阿尔金地块和南阿尔金蛇绿构造混杂岩带 (Xu et al., 1999; Zhang et al., 2001; Hu et al., 2010; 吴玉等, 2016; Liu et al., 2018, 2021; Yao et al., 2021; 陈宁

等, 2023; Gai et al., 2024)。阿北地块主要由太古代—古元古代的变质基底—米兰岩群组成, 为一套变质程度较高的表壳岩和深成岩组合, 以及部分变质变形程度较弱的古元古代侵入岩 (陆松年等, 2003; Lu et al., 2008; 辛后田等, 2011, 2013; Li et al., 2023; Liu et al., 2024; 葛荣峰等, 2024)。中阿尔金地块前寒武纪地层广泛发育, 包括原划中元古界长城系的巴什库尔干岩群, 蓟县系的塔西达坂群和新元古界青白口系的索尔库里群 (Hu et al., 2010; Liu et al., 2024), 这些前寒武纪地层在区域内分布不连续, 并被广泛发育的古生代岩浆岩侵入 (王令全等, 2024)。南阿尔金地块位于阿尔金左行走滑断裂北侧, 主要由古元古代阿尔金岩群组成, 为一套英云闪长质—花岗质片麻岩、副片麻岩、片岩、大理岩、角闪岩和呈透镜体状分布于其中的榴辉岩、石榴斜长角闪岩和基性—超基性岩石组成 (新疆维吾尔自治区地质矿产局, 1993; 王永和等, 2002; Gehrel et al., 2003; Wang et al., 2013; Yu et al., 2013; Liu et al., 2015; Hao et al., 2022)。南阿尔金蛇绿构造混杂岩带与北阿尔金蛇绿混杂岩带相比, 南阿尔金蛇绿岩出露较为分散, 早古生代超高压变质岩广泛发育是其典型特点, 由长英质、镁质和泥质麻粒岩、石榴子石橄榄岩和泥质麻粒岩组成, 地幔橄榄岩和玄武岩较少, 伴生早古生代碎屑岩和碳酸盐岩 (Liu et al., 2015, 2021, 2023; Niu et al., 2020; Hao et al., 2022)。

北阿尔金俯冲碰撞混杂岩带西起若羌, 东至肃北, 呈 EW 走向, 由早古生代蛇绿岩、岩浆岩及海相沉积岩组成, 并以岩片的形式混杂堆积在一起 (图 2)。蛇绿混杂岩主要由辉长岩、基性—超基性岩块、枕状玄

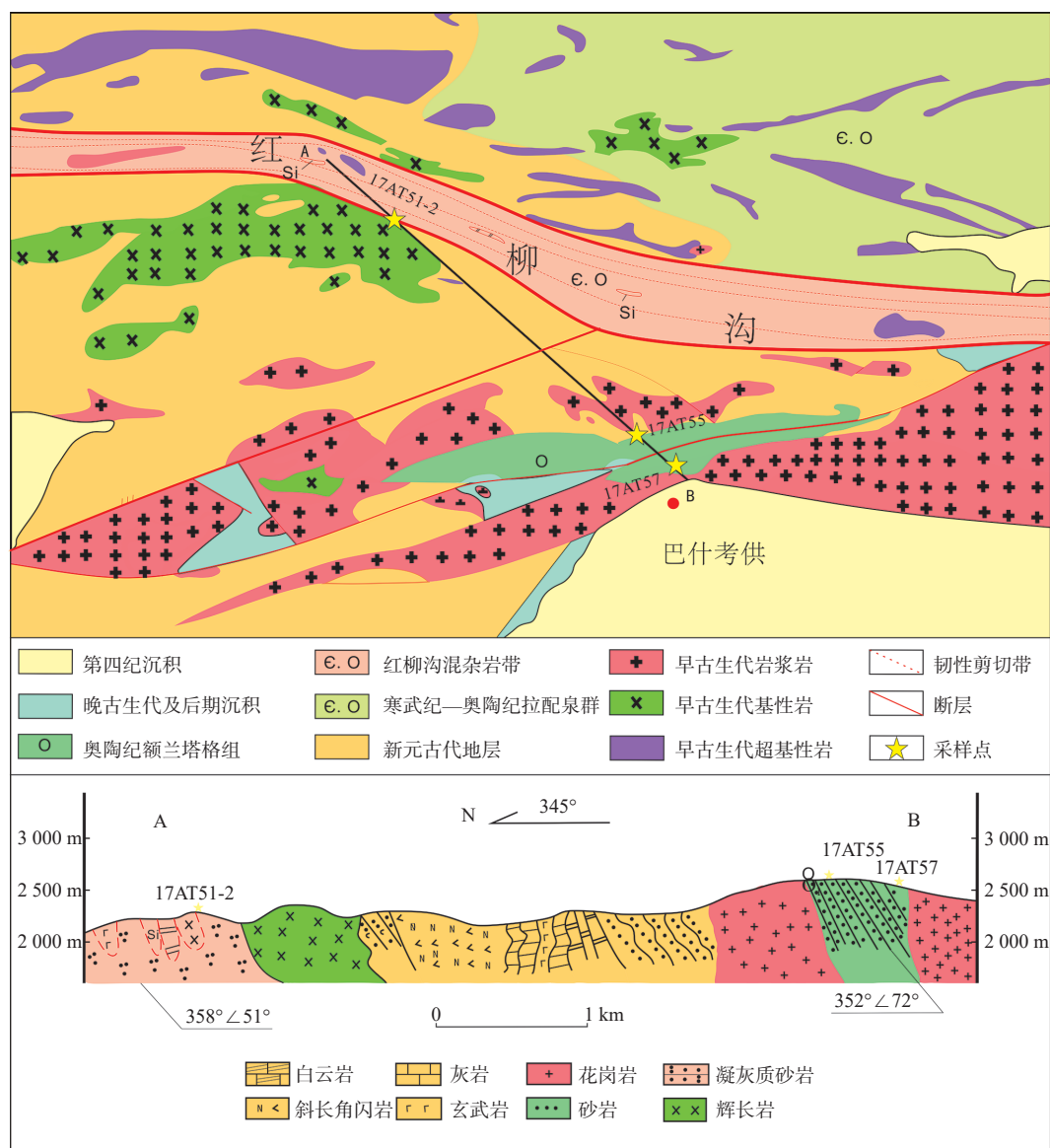


图2 研究区地质图及采样点地质图(据新疆地质局第一区域地质调查大队, 1981 修改)

Fig. 2 Geological map of the study area and sampling locations

武岩、细碧岩以及硅质岩、凝灰岩等组成,多呈透镜状构造岩片产出,并具有过渡型洋脊玄武岩(MORB)及洋岛玄武岩(OIB)的性质(吴峻等, 2002; 杨经绥等, 2008; Gao et al., 2011; 盖永升等, 2015)。混杂岩带内早古生代岩浆岩广泛分布,定年结果显示其年龄为520~390 Ma,按岩性和年龄可分为寒武纪—奥陶纪花岗岩、辉长岩、闪长岩和奥陶纪—早泥盆世花岗岩(陈宣华等, 2003; 郝杰等, 2006; 张建新等, 2015; 彭银彪等, 2018; Liu et al., 2021)。区域内高压低温变质作用广泛发育,主要由年龄为512~497 Ma的蓝片岩、榴辉岩以及片岩组成,与相邻蛇绿混杂岩呈断层接触(张建新等, 2007; 马拓, 2022)。该俯冲碰撞混杂岩带

内的早古生代沉积岩系主要包括奥陶系额兰塔格组砂岩,中奥陶统环形山组泥灰岩夹粉砂岩,寒武纪—奥陶纪拉配泉群碳酸盐岩、火山凝灰岩、碎屑岩(中国地质调查局西安地质调查中心, 2012),但这些早古生代地层尚缺乏更精确的年龄限定。研究区位于北阿尔金巴什考供地区,区内出露大面积分布的早古生代花岗岩和早古生代沉积岩系。其中,沉积地层主要有寒武系、奥陶系、晚古生代及后期地层,以奥陶系为主。

1.1 北阿尔金及邻区早古生代沉积序列

俯冲带中的地层呈条带状分布于北阿尔金蛇绿混杂岩带西段的红柳沟地区,由大小不同的各种构造

块体和凝灰质砂岩基质组成。其中构造块体包括硅质岩、辉长岩、蛇纹岩、灰岩透镜体、大理岩、玄武岩等。拉配泉群分布于北阿尔金地区,在东段拉配泉地区已被证实其时代属晚奥陶世,而分布在西段红柳沟地区的拉配泉群则被认为其所属时代包括了寒武纪—奥陶纪(中国地质调查局西安地质调查中心,2012)。按照岩性,北阿尔金东部的拉配泉群划分为碎屑岩组、火山岩组、碎屑岩—碳酸盐岩组 3 个部分,各组之间均为整合接触(新疆地质局第一区域地质调查大队,1983)。

额兰塔格组为一套滨浅海沉积的碎屑岩—碳酸盐岩建造(新疆地质局第一区域地质调查大队,1981),时代为奥陶纪,呈条带状分布在巴什考供北侧和环形山南部分区域,呈现近 EW 向。额兰塔格组主要为杂砂岩、凝灰质砂岩和细砂岩组合,其上部被石炭系—二叠系不整合覆盖,有的区域未见顶。中奥陶统环形山组是一套夹有碎屑岩的滨浅海相碳酸盐岩建造(新疆地质局第一区域地质调查大队,1981),区域地质调查发现该组仅分布在环形山向斜核部,呈 EW 向延伸,与下伏环形山地区额兰塔格组呈整合接触,地层沉积厚度不大。

在北阿尔金西部区域地质调查中并未发现有志留纪地层出露,但有学者在红柳沟巴什考供西北部测得一套最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄约为 426 Ma 的石英砂岩地层(Liu et al., 2021)。区内泥盆系出露甚少,主要分布在巴什考供北缘木孜布拉克以西,呈 NE-SW 向带状展布,主要是一套灰黑色碳质、泥质粉砂岩,含微古植物化石(邹义声等,1992)。

1.2 北阿尔金及邻区早古生代岩浆岩

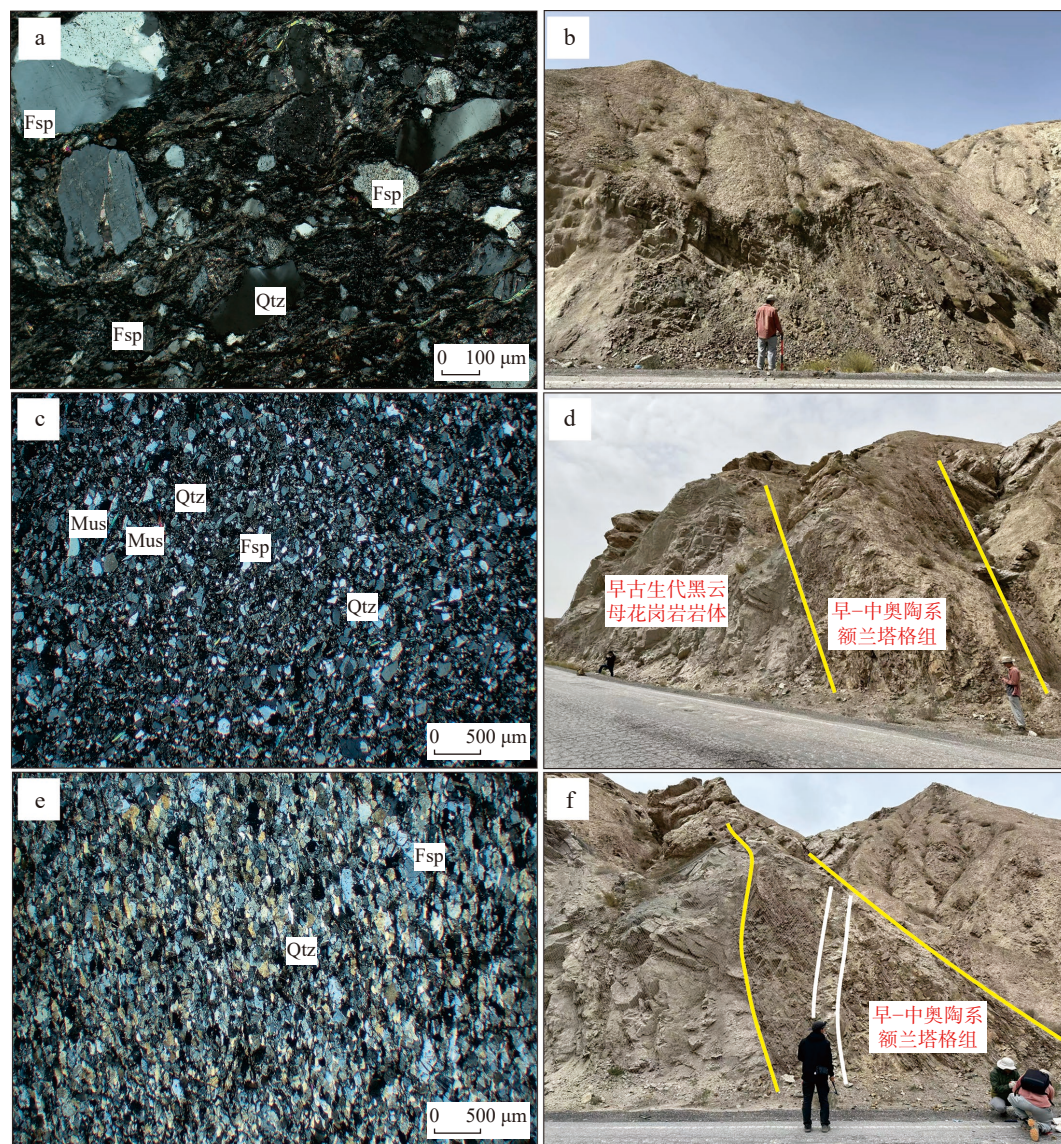
北阿尔金及邻区出露大量中酸性岩浆岩,西段巴什考供区域发育有多期岩浆岩,其中巴什考供北部红柳沟蛇绿混杂岩中的辉长岩年龄为 (479 ± 8) Ma(杨经绥等,2008)。巴什考供盆地出露的斜长花岗岩年龄为 (518.5 ± 4.1) Ma(盖永升等,2015)。巴什考供盆地南北两侧还分布有年龄约为 430 Ma 的代表同碰撞环境的 S 型花岗岩和低 Mg 高 Mg 两种类型的埃达克质花岗岩,两者形成时代分别为 439 Ma 和 425 Ma。东段喀腊大湾地区发育许多与俯冲有关的具有活动大陆边缘属性的火山岩,前人研究测得其年龄为 517~482 Ma(陈柏林等,2016)。整个北阿尔金地区也广泛出露早古生代与俯冲有关的弧花岗岩,前人对这些花岗岩的年代学研究将其时间范围限定在 514~460 Ma(吴才来等,2005,2007;郝杰等,2006;康磊等,2011;韩凤彬等,2012;孟令通等,2016;彭银彪等,2018)。

2 样品采集及分析测试方法

笔者以北阿尔金巴什考供地区早古生代沉积地层为研究对象,采集了原先划分为寒武系—奥陶系中的碎屑岩样品。样品 17AT51-2(E 90°09'41.4746", N 39°05'52.8111")采自北阿尔金混杂岩带(图 2),样品 17AT55(E 90°12'36.8126", N 39°03'53.2835")和 17AT57(E 90°13'40.4131", N 39°03'33.1336")采自阿尔金北缘的额兰塔格组(图 2)。样品在采集和测试过程中尽量避免脉体、蚀变和风化的干扰。野外观察到额兰塔格组为中薄层砂岩—杂砂岩,发育有小断层,附近发育有安山岩、花岗岩。北阿尔金混杂岩带内的地层普遍发育节理和片理,粒度较粗,呈现下细上粗,且有部分层位含玄武岩夹层。北阿尔金混杂岩带样品 17AT51-2 为基质中的凝灰质砂岩,新鲜面呈青灰色,风华后为灰绿色,中粒砂状结构,碎屑颗粒分选性好、磨圆度高,由石英和长石组成,主要由砂岩、泥岩、燧石、火山碎屑组成(图 3)。额兰塔格组样品 17AT55 和 17AT57 为石英砂岩,呈风化的紫红色石英砂岩,新鲜面呈灰色,矿物成分较为单一,石英占 70%,长石占 20%,岩屑颗粒占 10%,碎屑分选性差、磨圆度低。

锆石的晶体透射光反射光和阴极发光(CL)图像拍摄由重庆宇劲科技有限公司完成,采用传统重液和磁分离技术,在显微镜下随机选取矿物晶体形状较为完整的锆石颗粒,用环氧树脂固定,表面抛光,并拍摄锆石晶体的透反射照片及 CL 图像。在对锆石颗粒形貌和内部结构进行测定后,根据锆石晶体特征,排除少量存在明显缺陷的点位,随机选择 106 个点位进行碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年。

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年在南京聚谱检测科技有限公司完成。193 nm ArF 准分子激光剥蚀系统由澳大利亚科学仪器公司制造,型号 RESolution LR。四极杆型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)由安捷伦科技制造,型号为 Agilent 7700x。在测试过程中,采用 91500 (1 062 Ma)锆石作为外标(Wiedenbeck et al., 1995),校正仪器质量歧视与元素分馏;以标物锆石 GJ-1(600 Ma)、TANZ(566 Ma)或 Plešovice(337 Ma)为盲样(通常会从其中任选 2 个当质控),对 U-Pb 定年数据进行质量检验;以 NIST SRM 610 为外标、Si 为内标,标定锆石中的微量元素含量。测试激光 33 μ m,剥蚀频率 6 Hz 赫兹,剥蚀 40s。原始的测试数据经过 ICP



a. 混杂岩带样品 17AT51-2 凝灰质砂岩镜下照片; b. 混杂岩带凝灰质砂岩野外照片; c. 额兰塔格组样品 17AT55 石英砂岩镜下照片; d. 额兰塔格组野外照片; e. 额兰塔格组 17AT57 镜下照片; f. 额兰塔格组野外照片; Qtz. 石英; Bt. 黑云母; Mus. 白云母; Fsp. 长石

图3 样品采集点野外照片与样品对应的正交偏光照片

Fig. 3 Field photos of sampling sites and corresponding orthogonal polarized light micrographs

MS DataCal 软件离线处理完成(Liu et al., 2010)。对于年龄小于 1 000 Ma 的锆石, 选取 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄; 由于年龄大于 1 000 Ma 的锆石常常会发生 Pb 丢失, 笔者使用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄 (Sircombe., 1999)。谐和度超过误差允许范围 $\pm 10\%$ 的锆石被排除。

3 测试结果

3.1 碎屑锆石阴极发光图像(CL)和 Th/U 值

碎屑锆石颗粒大多为 100~150 μm , 呈短柱状, 长

宽比约为 1.5 : 1。锆石 CL 图像具有明显震荡环带和扇形分区(图 4), 并且锆石中 Th、U 的放射性元素和 Th/U(>0.4)值较高(图 5), 呈现明显的自形锆石, 表明这些早古生代的碎屑锆石为岩浆成因锆石, 剔除谐和度小于 90% 的数据和离群点后得到了 87 个碎屑锆石 U-Pb 年龄。

3.2 碎屑锆石 U-Pb 年龄

采集自巴什考供地区的 3 个碎屑岩样品显示出相似的碎屑锆石年龄峰特征, 最大沉积年龄限定在早奥陶世末至晚奥陶世。北阿尔金混杂岩带中的凝灰

质砂岩样品 17AT51-2 共获得 24 组年龄数据, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 531.1~432.5 Ma, 最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 432.5 Ma, 代表最年轻的 3 个锆石图像 U-Pb 年龄峰值为 456 Ma, 代表了最大沉积年龄(图 6)。额兰塔格组砂岩样品 17AT55 共获得 50 组年龄数据, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 618.0~423.1 Ma, 最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 423.1 Ma, 计算获得的最大沉积年龄为 446 Ma(图 6)。砂岩样品 17AT57 剔除谐和度小于 90% 的数据和离群点数据后得到年龄数据 13 组, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 510.0~467.5 Ma, 最年轻的碎屑锆石 U-Pb 年龄为 467.5 Ma(图 6)。2 个样品共 63 颗锆石的年龄为 510~450 Ma, 显示单一的年龄峰值。

3.3 锆石 Hf 同位素

Chen et al.(2026)对北阿尔金混杂岩层和额兰塔格组共 35 颗碎屑锆石进行了 Hf 同位素的测试。锆石

的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.002 745 3~0.000 509 534, 绝大多数锆石颗粒的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值小于 0.002, 表明所挑选的锆石在形成后基本没有放射性成因 Hf 的积累, 所测定的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值可以确定其形成时的同位素组成(吴福元等, 2007)。所测试的 15 颗来自混杂岩带晚奥陶世凝灰质砂岩的碎屑锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 706~0.282 336, 大部分锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大于 0(0~+7.4), 只有极个别锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 < 0(图 7), 对应二阶段模式年龄为 959~1 800 Ma, 均值为 1 158 Ma, 表明源区存在大量新生地壳。所测试的 20 颗来自早—中奥陶世额兰塔格组的锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282 440~0.282 258, 对应的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -1.8~-8.4(图 7), 对应二阶段模式年龄为 1 553~1 957 Ma, 均值为 1 659 Ma, 显示其母岩浆来自地壳物质再循环。

碎屑锆石微量元素分析结果显示, 锆石的稀土元



图4 样品锆石阴极发光图像

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images of zircon from the samples

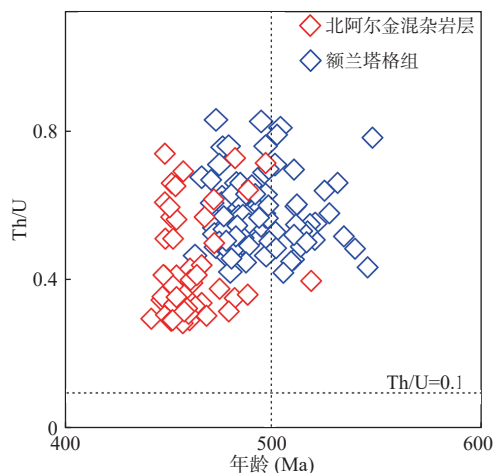


图5 北阿尔金碎屑锆石 Th/U 值

Fig. 5 Th/U ratios of detrital zircons in the North Altyn

素(REE)分布模式基本相似,大部分碎屑锆石颗粒具有典型花岗质岩锆石的稀土元素特征,具有明显的Eu负异常和Ce正异常,并且重稀土元素相对轻稀土元素较富集,具有左倾的稀土元素配分模式。碎屑锆石的微量元素特征(Belousova et al., 2002)显示绝大多数锆石来源于花岗质岩石(图8)。

4 讨论

4.1 地层沉积时代

沉积地层的精确时代限定一直是地质学研究中的难点,而且地层中最年轻的碎屑锆石只能限定地层最大沉积年龄(Rainbird et al., 2001)。近年来, Tucker et al.(2013)重新评估了确定最大沉积年龄方法的可靠度,提出了最年轻图像碎屑锆石 U-Pb 年龄(YPP)是衡量地层最大沉积年龄的可靠标准之一。值得强调的是,如果盆地内的沉积碎屑物质来自区域上持续的岩浆活动产物,则最大沉积年龄可以近似沉积年龄(Cawood et al., 2012)。因此,本研究结合前人工作、野外接触关系与碎屑锆石年龄共同约束额兰塔格组和北阿尔金蛇绿混杂岩带中基质的最大沉积时代。

区域地质将本研究所涉及的地层均划为寒武纪—奥陶纪(中国地质调查局西安地质调查中心, 2012),这与碎屑锆石 U-Pb 测年结果相吻合。笔者获得的额兰塔格组砂岩样品 17AT55 和 17AT57 的最大沉积年龄为 446 Ma 和 471 Ma,显示额兰塔格组沉积上限可能在 471~446 Ma 之间。这与人用该套地层最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄约束的最大沉积年龄(465~426 Ma)

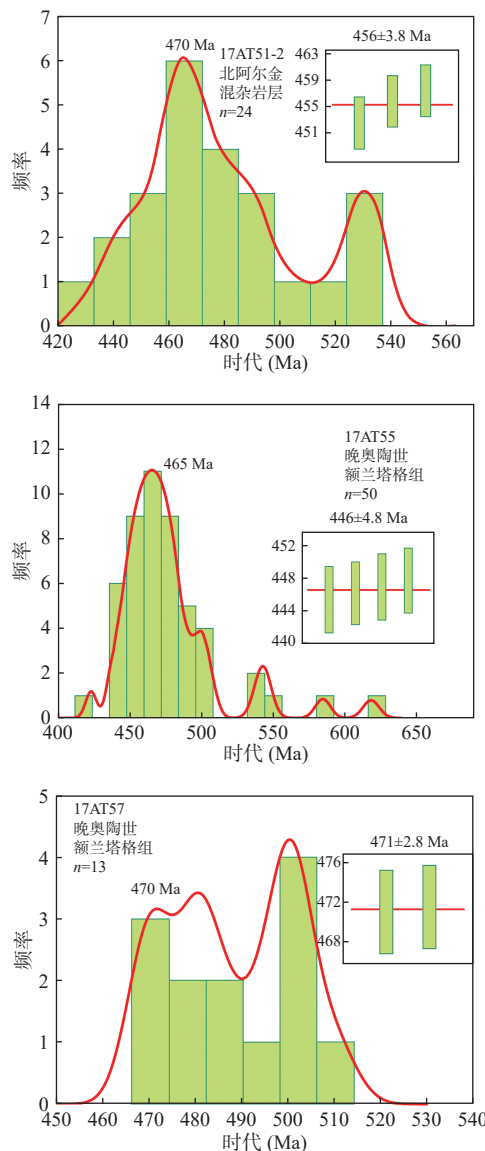


图6 碎屑锆石 U-Pb 年龄谱和图与年龄频谱图

Fig. 6 Detrital zircon U-Pb age frequency distribution

接近(Liu et al., 2021)。野外观察到巴什考供北山额兰塔格组砂岩地层直接覆盖在 500~505 Ma 的花岗岩体之上(未发表数据)。前人地质填图发现三叶虫化石以及角石,结合对比邻区地层,额兰塔格组被归为下奥陶统(Liu et al., 2021),然而根据碎屑锆石最大沉积年龄(455.7±3.8 Ma),额兰塔格组应为晚奥陶世地层。此外,笔者还获得了北阿尔金混杂岩带中的凝灰质砂岩(17AT52-1)的最大沉积年龄为 455.7 Ma,代表了北阿尔金蛇绿混杂岩西段拉配泉群碎屑岩段的沉积上限。因此,额兰塔格组和北阿尔金蛇绿混杂岩的基质可能均属于晚奥陶世地层。

北阿尔金混杂岩带中基质地层(拉配泉群)在北

吴玉等, 2016)。

本研究通过碎屑锆石 U-Pb 定年获得了研究区沉积地层非常特殊的年龄分布规律, 晚奥陶世额兰塔格组和北阿尔金混杂岩带基质均展示单一的碎屑锆石年龄峰值, 分别为 520~440 Ma 和 510~450 Ma (图 6)。但是, 两套地层有截然不同的 Hf 同位素特征 (图 9; Chen et al., 2026)。晚奥陶世额兰塔格组的碎屑锆石 Hf 同位素特征多指示为源区大陆地壳再造, 而晚奥陶世混杂岩带中的基质凝灰质砂岩样品大部分锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值, 仅有零星点位锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值, 这指示混杂岩带中的基质地层的碎屑物多源自新生地壳物质。这表明中阿尔金地块北缘从早奥陶世到晚奥陶世沉积物源区发生了重大转换。

额兰塔格组碎屑物特征与中阿尔金地块北缘大量发育的 I 型弧花岗岩 (>474 Ma) 完全相似 (吴才来等, 2007; 康磊等, 2011, 陈柏林等, 2016, 郑坤等, 2019), 二者具有相同的同位素和年龄特征, 多为大陆地壳再循环的产物。例如, 早—中奥陶世额兰塔格组两个砂岩样品的碎屑锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值与中阿尔金地块北缘木孜萨依等区域分布的花岗质岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值特征范围一致 (图 9)。因此这些中阿尔金地块北缘的弧花岗岩可能是额兰塔格组沉积物的主要源区。晚奥陶世混杂岩带基质凝灰质砂岩样品新生锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为正值, 仅有零星点位锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值, 这指示北阿尔金混杂岩带中基质地层的碎屑物多源自新生地壳物质。区域数据对比显示, 其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大部分和北阿尔金弧花岗岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值特征范围一致 (图 9)。而北阿尔金混杂岩带及其以北的区域出露的大面积花岗岩时代多晚于 474 Ma 之后, 且多以 S 型花岗岩和埃达克质花岗岩为主, 仅有少量 I 型花岗岩产出 (图 10; 陈宣华等, 2003; 吴才来等, 2005; 孟令通等, 2016)。

综合区域地质、碎屑锆石年龄图谱以及与研究区同时代岩浆岩的锆石 Hf 同位素特征对比显示, 北阿尔金地区早—中奥陶世地层和晚奥陶世地层沉积物的物源有所不同, 额兰塔格组物源主要来自中阿尔金地块北缘 474 Ma 以前的地壳再循环的弧花岗岩 (郝杰等, 2006); 而北阿尔金混杂岩带基质凝灰质砂岩地层和拉配泉群物源主要来自北阿尔金 474 Ma 以后新生地壳花岗岩类。

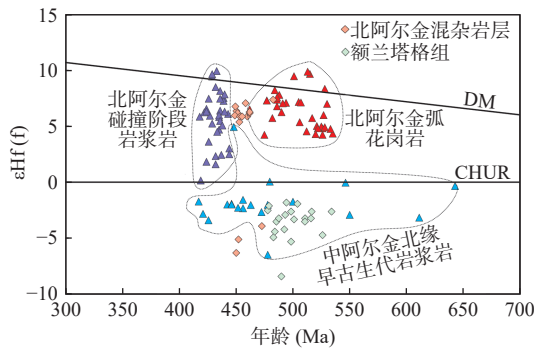
4.3 北阿尔金奥陶纪活动陆缘弧前盆地

北阿尔金造山带早古生代的洋-陆格局、闭合方式和时空演化等一直存在较大争议, 存在北阿尔金洋

俯冲极性为“北向俯冲”“双向俯冲”“山弯构造”等多个差异巨大的观点 (刘函, 2011; 杨子江, 2012; 张建新等, 2015; 李三忠等, 2016; Zhang et al., 2017; Liu et al., 2021)。而且前人研究工作主要集中在花岗岩和变质岩, 较少从沉积学的角度探讨北阿尔金的构造演化过程。本研究查明了北阿尔金蛇绿混杂岩带两侧早古生代地层的沉积物特征, 结合区域岩浆岩、蛇绿岩分布规律, 试图重建北阿尔金沟弧盆体系的时空演化过程。

北阿尔金地区额兰塔格组和混杂岩带基质中的凝灰质砂岩地层均展示单一的年龄峰值, 而且碎屑物结晶年龄接近沉积年龄 (图 11), 与汇聚板块边界沉积物相一致 (Cawood et al. 2013)。这与大陆弧特征的碎屑锆石微量元素特征一致 (图 12)。沉积学特征也得到了北阿尔金蛇绿岩形成年龄的支持 (524~448 Ma) (修群业等, 2007; 杨经绥等, 2008)。此外, 而且中阿尔金地块北缘发育大量 514~440 Ma 的具有典型弧岩浆岩特征的花岗岩类组合 (陈宣华等, 2003; 郝杰等, 2006; 吴玉等, 2016, 2021)。北阿尔金地区还报道了 512 Ma 榴辉岩和 497 Ma 蓝片岩, 反映区域上存在洋壳冷俯冲产物 (张建新等, 2007, 2015)。因此, 北阿尔金地区奥陶纪混杂岩带中的盆地沉积与研究区岩浆岩、变质岩和蛇绿岩分布规律相吻合, 指示北阿尔金洋俯冲在中阿尔金地块北缘形成的岩浆弧性质为陆缘弧 (图 12), 并且发育活动陆缘盆地沉积。此外, 近年来有学者提出用结晶年龄与沉积年龄相差较小的沉积物碎屑锆石中的铀异常与轻重稀土元素相关系数 (rDz) 之间的相关系数区分构造环境 (Hu et al., 2024)。Chen et al. (2026) 按照此方法计算后得到两个来自中阿尔金地块北缘额兰塔格组砂岩地层的样品 rDz 值为 0.36, 属于有地幔柱活动下的汇聚构造环境, 表明在早奥陶世北阿尔金及邻区中阿尔金北缘的碎屑锆石主要来自地球内部与弧构造相关的岩浆, 这也得到了额兰塔格组砂岩样品负的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的支持。而来自混杂岩带基质中的晚奥陶世凝灰质砂岩地层样品 rDz 值为 0.57, 属于标准的汇聚构造环境, 早奥陶世地层和晚奥陶世地层碎屑锆石的 rDz 值的不同可能是由于北阿尔金洋的俯冲经历了从低角度俯冲到高角度俯冲的转变, 这一认识得到前人岩浆岩研究的支持 (Meng et al., 2017)。

北阿尔金及邻区沉积物特征显示, 区域上活动大陆边缘盆地沉积至少持续到 446 Ma, 盆地沉积的上限



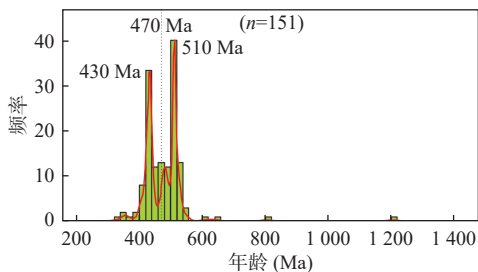
区域弧岩浆岩 Hf 同位素数据源自郝杰等, 2006;
盖永升等, 2015; 吴玉等, 2017, 2021

图9 中-北阿尔金碎屑锆石和区域上同时期弧岩浆岩 Hf 同位素对比图

Fig. 9 Comparison of $\epsilon Hf(t)$ of detrital zircons from Central-North Altyn and coeval arc magmatic rocks in the region

根据大规模碰撞-后碰撞花岗岩限定在 440 Ma 左右。例如, 区域上发育大量 440~427 Ma 碰撞造山和地壳加厚有关的花岗岩体, 如喀拉大湾、木孜萨依、沟口泉一带的同碰撞花岗岩、冰沟岩体、白尖山东二长花岗岩体。这些花岗岩来源于新生地壳物质部分熔融。这些与碰撞造山和地壳加厚有关的花岗岩体年代学资料证明 440 Ma 前后北阿尔金洋主体已经完成闭合 (Sobel et al., 1999; 陈宣华等, 2003; 吴才来等, 2005, 2007; 郝杰等, 2006; 杨经绥等, 2008; 盖永升等, 2015; 孟令通等, 2016; 吴玉等, 2016, 2021)。

结合北阿尔金地区沉积物特征和前人研究工作, 本次研究提出了一个新的北阿尔金洋俯冲消减模型 (图 13)。寒武纪晚期至晚奥陶世 (510~446 Ma), 北阿尔金洋在寒武纪—奥陶纪时期向南俯冲至中阿尔金地块之下, 形成了由弧后沉积物-弧岩浆岩-弧前



区域弧岩浆岩年龄数据源自陈宣华等, 2003; 郝杰等, 2006;
Gao et al., 2011; 盖永升等, 2015; 陈柏林等, 2016;
孟令通等, 2016; 吴玉等, 2017, 2021

图10 北阿尔金蛇绿岩混杂岩带及邻区弧花岗岩年龄统计
Fig. 10 Age frequency diagram of arc granitoids in North Altyn ophiolitic mélange belt and adjacent areas

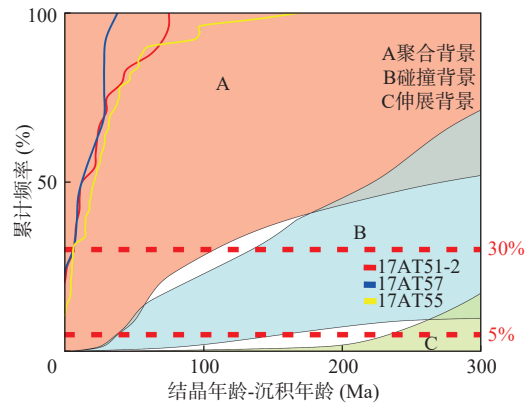


图11 碎屑锆石年龄 (结晶年龄与沉积年龄之差) 累积概率图 (底图据 Cawood et al., 2012)

Fig. 11 Discrimination plot of cumulative proportions versus CA-DA of analyzed detrital zircons

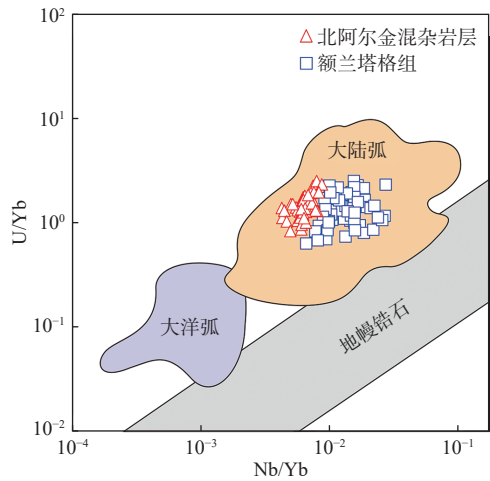


图12 碎屑锆石微量元素判别图解
(底图据 Grimes et al., 2015)

Fig. 12 Trace elements discrimination diagram of detrital zircons

沉积物-蛇绿岩套组成的增生杂岩体系。在寒武纪中期—奥陶纪早期, 北阿尔金洋持续俯冲过程中, 形成了区域上规模巨大的花岗质岩浆岩带, 早期花岗岩来源于大陆地壳再循环。额兰塔格组先沉积在弧后位置, 该地层的碎屑物来源于区域上早期俯冲形成的大陆地壳再造花岗岩类。奥陶纪晚期随着洋壳俯冲的进行, 北阿尔金洋洋壳回撤和中阿尔金陆地伸展, 洋壳板片从低角度俯冲转向高角度俯冲, 诱发软流圈地幔上涌, 促使新生地壳物质发生部分熔融, 进而使岩浆弧物质成分发生了变化, 奥陶纪晚期形成的花岗岩来源于新生地壳物质部分熔融, 北阿尔金蛇绿岩带的凝灰质砂岩地层沉积于弧前盆地中, 并且该地层碎屑

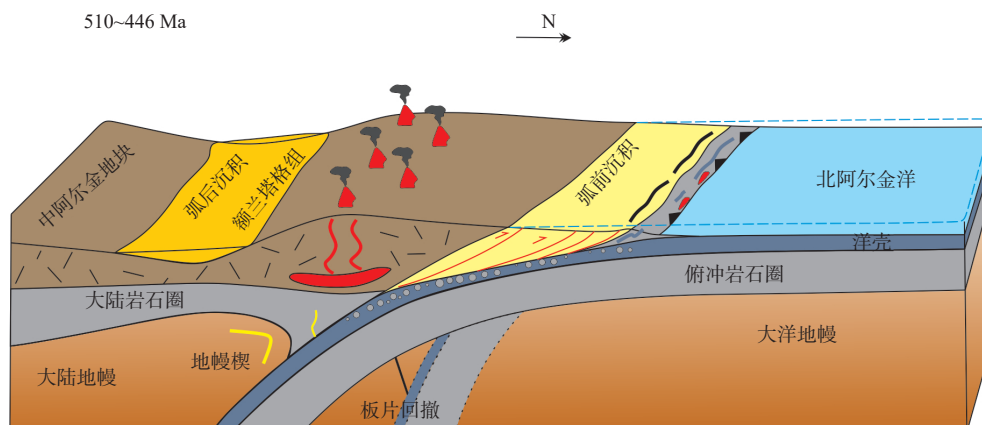


图13 北阿尔金地区早古生代洋-陆构造格架

Fig. 13 Early Paleozoic Ocean Continental Tectonic Framework of the North Altyn area

物来自区域上晚期俯冲形成的来源于新生地壳物质部分熔融的花岗岩类。在志留纪, 洋-陆俯冲作用转变为陆-陆碰撞造山作用, 此时北阿尔金俯冲体系随着北阿尔金洋的闭合而消亡, 凝灰质砂岩地层则作为混杂岩带中的基质分布在北阿尔金蛇绿混杂岩带内。因此, 北阿尔金地区巴什考供盆地在 510~446 Ma 为全球冈瓦纳大陆聚合背景下北阿尔金洋向南俯冲形成的弧后盆地-大陆弧-弧前盆地, 形成典型的沟-弧-盆体系。

5 结论

(1) 中阿尔金地块北缘-北阿尔金地块地区之间出露的早古生代地层砂岩 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 测年及其最大沉积年龄分析结果显示: 中阿尔金地块北缘分布的晚奥陶世额兰塔格组砂岩最大沉积年龄为 471~446 Ma; 在红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带西段的前人未精确定年的寒武-奥陶纪混杂岩带基质中的凝灰质砂岩最大沉积年龄为 446 Ma。

(2) 沉积物特征显示, 晚奥陶世额兰塔格组砂岩, 北阿尔金混杂岩带凝灰质砂岩碎屑锆石均来源于花岗岩物源区, 中寒武世-奥陶纪中阿尔金地块北缘的早古生代岩浆岩可能是该地区奥陶纪沉积物的重要物源。

(3) 中阿尔金地块北缘-北阿尔金蛇绿混杂岩带在 524~446 Ma 期间形成了活动大陆边缘沟-弧-盆体系。额兰塔格组沉积在弧后位置而混杂岩带凝灰质砂岩组沉积在北阿尔金洋向南俯冲形成的弧前盆地中。

致谢: 感谢韩以贵和刘潜教授, 何艳红、张东海和李阳副教授, 以及邵东博士、杨航博士、李炜博士等在论文成文过程中给予诸多指导并提出了宝贵的意见, 在此一并致以诚挚的感谢。

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):

- 陈柏林, 李松彬, 蒋荣宝, 等. 阿尔金喀腊大湾地区中酸性火山岩 SHRIMP 年龄及其构造环境[J]. 地质学报, 2016, 90(4): 708-727.
- CHEN Bolin, LI Songbin, JIANG Rongbao, et al. Zircon SHRIMP U-Pb Dating of Intermediate Felsic Volcanic Rocks from the Kaladawan Area, Altun Mountains and Its Tectonic Environment[J]. Acta Geologica Sinica, 2016, 90(4): 708-727.
- 陈宁, 曾忠诚, 赵端昌, 等. 阿尔金造山带南缘晚奥陶世碱性辉长岩成因及其大地构造意义[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 91-102.
- CHEN Ning, ZENG Zhongcheng, ZHAO Duanchang, et al. Petrogenesis and Tectonic Implications of Late Ordovician Alkaline Gabbro in the South Altyn Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 91-102.
- 陈宣华, Gehrels G, 王小凤, 等. 阿尔金山北缘花岗岩的形成时代及其构造环境探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(4): 294-298.
- CHEN Xuanhua, Gehrels G, WANG Xiaofeng, et al. Granite from North Altyn Tagh, NW China: U-Pb Geochronology and Tec-

- tonic Setting[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(4): 294–298.
- 段星星, 张越, 袁彦伟, 等. 阿尔金南缘清水泉堆晶岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 103–115.
- DUAN Xingxing, ZHANG Yue, YUAN Yanwei, et al. Geochronology, Geochemistry and Geological Significance of Cumulates in Qingshuiquan Region, South Altyn Tagh[J]. Northwestern Geology, 2023, 56(4): 103–115.
- 盖永升, 刘良, 康磊, 等. 北阿尔金蛇绿混杂岩带中斜长花岗岩的成因及其地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(9): 2549–2565.
- GAI Yongsheng, LIU Liang, KANG Lei, et al. The origin and geological significance of plagiogranite in ophiolite belt at North Altyn Tagh[J]. Acta Petrologica Sinica, 2015, 31(9): 2549–2565.
- 葛荣峰, 朱文斌, 周腾, 等. 塔里木克拉通太古宙大陆起源: 进展与问题[J]. 西北地质, 2024, 57(6): 1–24.
- GE Rongfeng, ZHU Wenbin, ZHOU Teng, et al. Origin of Archean Continental Crust in the Tarim Craton: Progresses and Issues[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 1–24.
- 郭福祥. 新疆古生代构造-生物古地理[J]. 新疆地质, 2001, 19(1): 20–26.
- GUO Fuxiang. Paleozoictectono-paleobiogeography of Xinjiang, China[J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(1): 20–26.
- 韩凤彬, 陈柏林, 崔玲玲, 等. 阿尔金山喀腊大湾地区中酸性侵入岩 SHRIMP 年龄及其意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(7): 2277–2291.
- HAN Fengbin, CHEN Bolin, CUI Lingling, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of intermediate-acid intrusive rocks in Kaladawan area, eastern Altun Mountains, NW China, and its implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(7): 2277–2291.
- 郝杰, 王二七, 刘小汉, 等. 阿尔金山脉中金雁山早古生代碰撞造山带: 弧岩浆岩的确定与岩体锆石 U-Pb 和蛇绿混杂岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究的证据[J]. 岩石学报, 2006, 22(11): 2743–2752.
- HAO Jie, WANG Erqi, LIU Xiaohan, et al. Jinyanshan collisional orogenic belt of the early Paleozoic in the Altun mountains: evidence from single zircon U-Pb and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic dating for the arc magmatite and ophiolitic mélange[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(11): 2743–2752.
- 康磊, 刘良, 曹玉亭, 等. 北阿尔金构造带红柳沟钾长花岗岩地球化学特征, LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素组成[J]. 地质通报, 2011, 30(7): 1066–1076.
- KANG Lei, LIU Liang, CAO Yuting, et al. Geochemical characteristics of Hongliugou potassium feldspar granite in North Algin tectonic Belt, LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and Hf isotopic composition[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(7): 1066–1076.
- 李三忠, 杨朝, 赵淑娟, 等. 全球早古生代造山带 (II): 俯冲-增生型造山[J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2016, 46(4): 968–1004.
- LI Sanzhong, YANG Zhao, ZHAO Shujuan, et al. Global Early Paleozoic Orogens (II): Subduction-Accretionary-Type Orogeny [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2016, 46(4): 968–1004.
- 李三忠, 赵淑娟, 余珊, 等. 东亚原特提斯洋 (II): 早古生代微陆块亲缘性与聚合[J]. 岩石学报, 2016, 32(9): 2628–2644.
- LI Sanzhong, ZHAO Shujuan, YU Shan, et al. Proto-Tehtys Ocean in East Asia (II): Affinity and assembly of Early Paleozoic microcontinental blocks[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 32(9): 2628–2644.
- 刘函, 王国灿, 曹树钊, 等. 北阿尔金南华纪双峰式火山岩的发现及构造意义[J]. 地球科学 (中国地质大学学报), 2012, 37(5): 917–928.
- LIU Han, WANG Guochan, CAO Shuzhao, et al. Discovery of Nanhuaian Bimodal Volcanics in Northern Altyn Tagh and Its Tectonic Significance[J]. Earth Science (Journal of China University of Geosciences), 2012, 37(5): 917–928.
- 刘函. 北阿尔金洋新元古代-早古生代裂拼演化过程——红柳沟-拉配泉蛇绿混杂岩带剖析 [D]. 武汉: 中国地质大学 (武汉), 2011.
- LIU Han. Breakup and Closure Evolution Progress of the North Altyn Ocean from Neoproterozoic to Early Paleozoic-Analyses on Hongliugou-Lapeiquan Ophiolite Tectonic Mixtite Belt[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2011.
- 刘良, 车自成, 王焰, 等. 阿尔金高压变质岩带的特征及其构造意义[J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 57–64.
- LIU Liang, CHE Zicheng, WANG Yan, et al. The petrological characters and geotectonic setting of high-pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1): 57–64.
- 刘良, 孙勇, 肖培喜, 等. 阿尔金发现超高压 (>3.8 GPa) 石榴二辉橄榄岩[J]. 科学通报, 2002, 47(9): 657–662.
- LIU Liang, SUN Yong, XIAO Peixi, et al. Arkin discovered the ultra-high pressure (>3.8 GPa) garnet diopyroperidotite[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(9): 657–662.
- 陆松年, 袁桂邦. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据[J]. 地质学报, 2003, 77(1): 61–68.
- LU Songnian, YUAN Guibang. Geochronology of Early Precambrian Magmatic Activities in Aketashitage, East Altyn Tagh[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(1): 61–68.

- 马拓. 阿尔金南部两条变质岩带的变质作用及其构造成因联系[D]. 西安: 西北大学, 2022.
- MA Tuo. The metamorphism of two metamorphic belts in southern Altyn and their tectonic relationship[D]. Xi'an: Northwest University, 2022.
- 孟令通, 陈柏林, 王永, 等. 北阿尔金早古生代构造体制转换的时限: 来自花岗岩的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 40(2): 295–307.
- MENG Lingtong, CHEN Bolin, WANG Yong, et al. Timing of Early Paleozoic Tectonic Regime Transition in North Altun: Evidence from Granite[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2016, 40(2): 295–307.
- 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代: 来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1550–1561.
- PEI Xianzhi, DING Sanping, LIZuochen, et al. The age of the Huanzi town serpentinite in the northern margin of the Xiqinling orogenic belt: Evidence from zircon U-Pb ages in gabbro by LA-ICP-MS[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1550–1561.
- 裴先治, 李瑞保, 李佐臣, 等. 东昆仑南缘布青山复合增生型构造混杂岩带组成特征及其形成演化过程[J]. 地球科学, 2018, 43(12): 4498–4520.
- PEI Xianzhi, LI Ruibao, LI Zuochen, et al. Compositional characteristics and formation evolution process of the Buqingyuan composite synorogenic metamorphic complex belt on the southern margin of the East Kunlun Mountains[J]. *Earth Science*, 2018, 43(12): 4498–4520.
- 彭银彪, 于胜尧, 张建新, 等. 北阿尔金地区早古生代洋壳俯冲时限: 来自斜长花岗岩和花岗闪长岩的证据[J]. 中国地质, 2018, 45(2): 334–350.
- PENG Yinbiao, YU Shengyao, ZHANG Jianxin, et al. Early Paleozoic oceanic crust subduction time in the northern Altun region: evidence from plagiogranite and granodiorite[J]. *Geology in China*, 2018, 45(2): 334–350.
- 宋述光, 吴珍珠, 杨立明, 等. 祁连山蛇绿岩带和原特提斯洋演化[J]. 岩石学报, 2019, 35(10): 2948–2970.
- SONG Shuguang, WU Zhenzhu, YANG Liming, et al. Ophiolite belts and evolution of the Proto-Tethys Ocean in the Qilian Orogen[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(10): 2948–2970.
- 王令全, 陈丽娟. 阿尔金造山带阿中地块塔什达坂西花岗岩体岩石地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿产勘查, 2024, 15(7): 1125–1139.
- WANG Lingquan, CHEN Lijuan. Geochemical characteristics, zircon U-Pb dating and the geological significance of West Tashdaban granite pluton in the Azhong Block of Altyn Orogen[J]. *Mineral Exploration*, 2024, 15(7): 1125–1139.
- 王永和, 校培喜, 潘长利, 等. “阿尔金群”的解体与阿尔金杂岩特征[J]. 西北地质, 2002, 35(4): 21–29.
- WANG Yonghe, XIAO Peixi, PAN Changli, et al. The first disintegration of Altyn Tagh rock group and the characteristics of Altyn Tagh complexes[J]. *Northwestern Geology*, 2002, 35(4): 21–29.
- 吴才来, 杨经绥, 姚尚志, 等. 北阿尔金巴什考供盆地南缘花岗岩杂岩体特征及锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 846–858.
- WU Cailai, YANG Jingsui, YAO Shangzhi, et al. Characteristics of the granitoid complex and its zircon SHRIMP dating at the south margin of the Bashikaogong Basin, North Altun, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2005, 21(3): 846–858.
- 吴才来, 姚尚志, 曾令森, 等. 北阿尔金巴什考供-斯米尔布拉克花岗岩杂岩特征及锆石 SHRIMP-U-Pb 定年[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2007, 37(1): 10–26.
- WU Cailai, YAO Shangzhi, ZENG Lingsen, et al. Characteristics and zircon SHRIMP-U-Pb dating of the Bashkai-Smirburak granite complex in northern Altun[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 2007, 37(1): 10–26.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185–220.
- WU Fuyuan, LI Xianhua, ZHENG Yongfei, et al. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220.
- 吴峻, 兰朝利, 李继亮, 等. 阿尔金红柳沟蛇绿混杂岩中 MORB 与 OIB 组合的地球化学证据[J]. 岩石矿物学杂志, 2002, 21(1): 24–30.
- WU Jun, LAN Chaoli, LI Jiliang, et al. Geochemical evidence of MORB and OIB combination in Hongliugou ophiolite melanges, Altun fault belt[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2002, 21(1): 24–30.
- 吴玉, 陈正乐, 陈柏林, 等. 阿尔金北缘脆-韧性剪切带内变形闪长岩的年代学、地球化学特征及其对北阿尔金早古生代构造演化的指示[J]. 岩石学报, 2016, 32(2): 555–570.
- WU Yu, CHEN Zhengle, CHEN Bolin, et al. Geochronological and geochemical characteristics of the deformed diorite from the North Altyn brittle-ductile shear zone and its constraint on the Early Paleozoic tectonic evolution of the North Altyn Tagh[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 32(2): 555–570.
- 吴玉, 陈正乐, 陈柏林, 等. 北阿尔金喀腊大湾南段二长花岗岩地球化学、SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其对壳-幔相互作用的指示[J]. 地质学报, 2017, 91(6): 1227–1244.
- WU Yu, CHEN Zhengle, CHEN Bolin, et al. Geochemistry, Zircon SHRIMP U-Pb Dating and Hf Isotopic Compositions of the

- Monzogranite from the Southern Kaladawan of North Altyn and Their Implications for Crust-Mantle Interaction[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(6): 1227-1244.
- 吴玉, 陈正乐, 陈柏林, 等. 北阿尔金恰什坎萨依沟地区早古生代构造变形特征及构造演化启示[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(3): 301-312.
- WU Yu, CHEN Zhengle, CHEN Bolin, et al. Early Paleozoic tectonic deformation in Qiashenkansayigou Area, North Altun, and implication for tectonic evolution[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(3): 301-312.
- 吴玉, 陈正乐, 陈柏林, 等. 北阿尔金早古生代同碰撞花岗岩浆记录及其对增生造山过程的启示[J]. *岩石学报*, 2021, 37(5): 1321-1346.
- WU Yu, CHEN Zhengle, CHEN Bolin, et al. Early Palaeozoic syn-collisional granitic magmatism in the North Altun and its implication for accretionary orogenic processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(5): 1321-1346.
- 吴玉. 北阿尔金早古生代混杂带的组成、构造变形特征与演化[D]. 北京: 中国地质科学院, 2016.
- WU Yu. Compositions, Structural Deformation and Geodynamics of the Early Paleozoic Mélange Belt in North Altyn Tagh[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2016.
- 肖序常, 王军, 苏犁, 等. 再论西昆仑库地蛇绿岩及其构造意义[J]. *地质通报*, 2003, 22(10): 745-750.
- XIAO Xuchang, WANG Jun, SU Li, et al. A further discussion of the Kuda ophiolite, West Kunlun, and its tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(10): 745-750.
- 辛后田, 刘永顺, 罗照华, 等. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区新太古代陆壳增生: 米兰岩群和 TTG 片麻岩的地球化学及年代学约束[J]. *地学前缘*, 2013, 20(1): 240-259.
- XIN Houtian, LIU Yongshun, LUO Zhaohua, et al. Neoproterozoic continental crust accretions in Aktashtag area, southeast margin of Tarim Basin: geochemical and chronological constraints of the Milan Group and TTG gneiss[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(1): 240-259.
- 辛后田, 赵凤清, 罗照华, 等. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区古元古代精细年代格架的建立及其地质意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(12): 1977-1993.
- XIN Houtian, ZHAO Fengqing, LUO Zhaohua, et al. Determination of the Paleoproterozoic Geochronological Framework in Aqtashtagh Area in Southeastern Tarim, China and Its Geological Significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(12): 1977-1993.
- 新疆地质局第一区域地质调查大队. 巴什考供幅 (J-46-VII)1: 20 万区域地质调查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质局第一区域地质调查大队, 1981.
- 新疆地质局第一区域地质调查大队. 鄂博梁幅 (J-46-9)1: 20 万区域地质调查报告[R]. 乌鲁木齐: 新疆地质局第一区域地质调查大队, 1983.
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Geology and Mineral Resources Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- 修群业, 于海峰, 刘永顺, 等. 阿尔金北缘枕状玄武岩的地质特征及其锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质学报*, 2007, 81(6): 787-794.
- XIU Qunye, YU Haifeng, LIU Yongshun, et al. *Geology and Zircon U-Pb Age of Pillow Basalt at Qiashikansoy in Northern Altun Tagh, W China*[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(6): 787-794.
- 姚金龙, 赵国春, 韩以贵, 等. 晚新元古代—早寒武世现代板块构造与现代地球系统的建立. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(6), 1007-1018.
- YAO Jinlong, ZHAO Guochun, HAN Yigui, et al. Establishment of modern plate tectonic regime and modern Earth system in the late Neoproterozoic-early Cambrian. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2021 51(6), 1007-1018.
- 杨经绥, 史仁灯, 吴才来, 等. 北阿尔金地区米兰红柳沟蛇绿岩的岩石学特征和 SHRIMP 定年[J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1567-1584.
- YANG Jingsui, SHI Rendeng, WU Cailai, et al. Petrology and SHRIMP age of the Hongliugou ophiolite at Milan, north Altun, at the northern margin of the Tibetan plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7): 1567-1584.
- 杨子江, 马华东, 王宗秀, 等. 阿尔金山北缘冰沟蛇绿混杂岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(7): 2269-2276.
- YANG Zijiang, MA Huadong, WANG Zongxiu, et al. SHRIMP U-Pb dating of gabbro zircon from Binggou ophiolitic melanomy in the northern margin of Altun Mountain and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2269-2276.
- 杨子江. 新疆阿尔金红柳沟一带早古生代地质构造演化研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2012.
- YANG Zijiang. Early Palaeozoic Tectonic Evolution in Hongliugou, Altyn, Xinjiang[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2012.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 北阿尔金 HP/LT 蓝片岩和榴辉岩的 Ar-Ar 年代学及其区域构造意义[J]. *中国地质*, 2007, 34(4): 558-564.
- ZHANG Jianxin, MENG Fancong, YU Shengyao, et al. 39Ar-40Ar geochronology of high-pressure/low-temperature blueschist and

- eclogite in the North Altyn Tagh and their tectonic implications[J]. *Geology in China*, 2007, 34(4): 558–564.
- 张建新, 于胜尧, 李云帅, 等. 原特提斯洋的俯冲、增生及闭合: 阿尔金-祁连-柴北缘造山系早古生代增生/碰撞造山作用[J]. *岩石学报*, 2015, 31(12): 3531–3554.
- ZHANG Jianxin, YU Shengyao, LI Yunshuai, et al. Subduction, accretion and closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic accretion/collision orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam orogenic system[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3531–3554.
- 中国地质调查局西安地质调查中心. 巴什库尔干幅(J46C001001)1:25万区域地质调查报告[R]. 西安: 中国地质调查局西安地质调查中心, 2012.
- 郑坤, 吴才来, 魏春景, 等. 北阿尔金西段正长花岗岩和闪长岩地球化学, 锆石 U-Pb 定年及 Hf 同位素特征[J]. *岩石学报*, 2019, 35(2): 541–557.
- ZHENG Kun, WU Cailai, WEI Chunjing, et al. Petrology, geochemistry, zircon U-Pb dating and Hf isotope characteristics of the Mesozoic orthoclase-plagioclase granite and diorite in the western segment of North Altyn[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35(2): 541–557.
- 邹义声, 赵治信. 阿尔金山前古生代—古生代地层沉积层序[J]. *新疆石油地质*, 1992, 13(3): 228–239.
- ZOU Yisheng, ZHAO Zhixin. Pre-Paleozoic to Paleozoic sedimentary—stratigraphic sequence in Altun Mountain[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1992, 13(3): 228–239.
- Belousova E, Griffin W L, O'Reilly S Y, et al. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143: 602–622.
- Cawood P A, Hawkesworth C, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. *Geology*, 2012, 40(10): 875–878.
- Cawood P A, Wang Y, Xu Y, et al. Locating South China in Rodinia and Gondwana: A fragment of greater India lithosphere?[J]. *Geology*, 2013, 41(8): 903–906.
- Chen L, Yao J L, Zhao G C, et al. Delineating convergent continental margin basin systems in the North Altyn belt: Implications for diachronous closure of the Proto-Tethys Ocean[J]. *Global and Planetary Change*, 2026, 261: 105402.
- Ding D G, Wang D X, Liu W X, et al. The western Kunlun orogenic belt and basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1996.
- Dong Y P, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 1–40.
- Gai Y S, Ma T, Liu L, et al. Partial melting of HP-UHP felsic gneiss in the South Altyn Tagh reveals the rapid exhumation of a deeply subducted slab[J]. *Lithos*, 2024, 488: 107835.
- Gao X, Xiao P, Guo L, et al. Opening of an early Paleozoic limited oceanic basin in the northern Altyn area: Constraints from plagiogranites in the Hongliugou-Lapeiquan ophiolitic mélange[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(12): 1871–1879.
- Gehrels G E, Yin A, Wang X F. Magmatic history of the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2003, 108(B9): 2423.
- Grimes C, Wooden J, Cheadle M, et al. “Fingerprinting” tectonomagmatic provenance using trace elements in igneous zircon[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2015, 170: 1–26.
- Han F B, Chen B L, Cui L L, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age of intermediate-acid intrusive rocks in Kaladawan area, eastern Altun Mountains, NW China, and its implications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(7): 2277–2291.
- Hao J B, Wang C, Zhang J H, et al. Episodic Neoproterozoic extension-related magmatism in the Altyn Tagh, NW China: implications for extension and breakup processes of Rodinia supercontinent[J]. *International Geology Review*, 2022, 64(10): 1474–1489.
- Hao J B, Wang C, Liu L, et al. Reappraisal of the petrogenetic processes of Neoproterozoic granitoids in the Altyn Tagh, NW China: Implications for reconstruction of the Qaidam block in Rodinia[J]. *Precambrian Research*, 2022, 379: 106782.
- Hu P, Zhai Q, Cawood P A, et al. Detrital zircon REE and tectonic settings[J]. *Lithos*, 2024: 107661.
- Hu Y X, Xiao P X, Gao X F, et al. Division and space-time frame foundation of regional stratum in the western sector of East Kunlun and the Altun Region[J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(4): 152–158.
- Jia R Y, Jiang Y H, Liu Z, et al. Petrogenesis and tectonic implications of early Silurian high-K calc-alkaline granites and their potassic microgranular enclaves, western Kunlun orogen, NW Tibetan Plateau[J]. *International Geology Review*, 2013, 55(8): 958–975.
- Li S, Zhao S, Liu X, et al. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 37–75.
- Li Y, Song S, Yang X, et al. Age and composition of Neoproterozoic diabase dykes in North Altyn Tagh, northwest China: implications for Rodinia break-up[J]. *International Geology Review*, 2023, 65(7): 1000–1016.
- Liu J, Han Y, Yao J, et al. Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes of late Meso-Neoproterozoic metasedimentary rocks in the South Altyn Tagh: Implications for tectonic affinity of microcontinents in

- NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 275: 106298.
- Liu L, Kang L, Cao Y, et al. Early Paleozoic granitic magmatism related to the processes from subduction to collision in South Altyn, NW China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2015, 58: 1513–1522.
- Liu L, Zhang J F, Cao Y T, et al. Evidence of former stishovite in UHP eclogite from the South Altyn Tagh, western China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 484: 353–362.
- Liu Q, Tsunogae T, Zhao G, et al. Early Cambrian high pressure/low temperature metamorphism in the southeastern Tarim craton in response to circum-Gondwana cold subduction[J]. *Geoscience Frontiers*, 2023, 14(4): 101561.
- Liu Q, Tsunogae T, Zhao G, et al. Multiphase ophiolite formation in the Northern Altyn Tagh Orogen, southeastern Tarim[J]. *American Journal of Science*, 2021, 321(6): 788–821.
- Liu Q, Zhao G, Li J, et al. Provenance of early Paleozoic sedimentary rocks in the Altyn Tagh orogen: Insights into the paleoposition of the Tarim craton in northern Gondwana associated with final closure of the Proto-Tethys Ocean[J]. *GSA Bulletin*, 2021, 133(3-4): 505–522.
- Liu Y, Hu Z, Zong K, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- Lu S, Li H, Zhang C, et al. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments[J]. *Precambrian Research*, 2008, 160(1-2): 94–107.
- Meng L T, Chen B L, Zhao N N, et al. The distribution, geochronology and geochemistry of early Paleozoic granitoid plutons in the North Altyn orogenic belt, NW China: Implications for the petrogenesis and tectonic evolution[J]. *Lithos*, 2017, 268: 399–417.
- Niu H, Jiao X, Xie Q, et al. Origin and tectonic implications of granitoids from the eastern segment of the South Altyn Block, Northwestern China: Constraints from petrogeochemistry, zircon U-Pb dating, and Lu-Hf isotope geochemistry[J]. *Geological Journal*, 2020, 55(12): 7613–7637.
- Qi X, Li H, Wu C, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating for Qiashikansayi granodiorite, the northern Altyn Tagh mountains and its geological implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50: 440–445.
- Rainbird R H, Hamilton M A, Young G M. Detrital zircon geochronology and provenance of the Torridonian, NW Scotland [J]. *Journal of the Geological Society*, 2001, 158(1): 15–27.
- Sircombe K N. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124(1-4): 47–67.
- Sobel E R, Arnaud N. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China[J]. *Tectonics*, 1999, 18(1): 64–74.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1989, 42(1): 313–345.
- Tucker R T, Roberts E M, Hu Y, et al. Detrital zircon age constraints for the Winton Formation, Queensland: contextualizing Australia's Late Cretaceous dinosaur faunas[J]. *Gondwana Research*, 2013, 24(2): 767–779.
- Wang C M, Tang H S, Zheng Y, et al. Early Paleozoic magmatism and metallogeny related to Proto-Tethys subduction: Insights from volcanic rocks in the northeastern Altyn Mountains, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2019, 75: 134–153.
- Wang C, Liu L, Xiao P X, et al. Geochemical and geochronologic constraints for Paleozoic magmatism related to the orogenic collapse in the Qimantagh-South Altyn region, northwestern China[J]. *Lithos*, 2014, 202: 1–20.
- Wang C, Liu L, Yang W Q, et al. Provenance and ages of the Altyn Complex in Altyn Tagh: Implications for the early Neoproterozoic evolution of northwestern China[J]. *Precambrian Research*, 2013, 230: 193–208.
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses[J]. *Geo-standards Newsletter*, 1995, 19(1): 1–23.
- Xiao W, Han F, Windley B F, et al. Multiple accretionary orogenesis and episodic growth of continents: Insights from the Western Kunlun Range, central Asia[J]. *International Geology Review*, 2003, 45(4): 303–328.
- Xiao W, Windley B, Hao J, et al. Arc-ophiolite obduction in the Western Kunlun Range (China): implications for the Palaeozoic evolution of central Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 2002, 159(5): 517–528.
- Xiao W, Windley B, Liu D Y, et al. Accretionary tectonics of the Western Kunlun Orogen, China: a Paleozoic-Early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of Southern Eurasia[J]. *The Journal of Geology*, 2005, 113(6): 687–705.
- Xu J, Zhang Z, Wu C, et al. Early Ordovician-Middle Silurian Subduction-Closure of the Proto-Tethys Ocean: Evidence from the Qiaerlong Pluton at the Northwestern Margin of the West Kunlun Orogenic Belt, NW China[J]. *Journal of Earth Science*, 2024, 35(2): 430–448.
- Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X, et al. A Comparison between the Tec-

- tonic Units on the Two Sides of the Altun Sinistral Strike-slip Fault and the Mechanism of Lithospheric Shearing[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1999, 73(3): 193–205.
- Yao J L, Cawood P A, Zhao G, et al. Mariana-type ophiolites constrain the establishment of modern plate tectonic regime during Gondwana assembly[J]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 4189.
- Yu S, Zhang J, Del Real P G, et al. The Grenvillian orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam mountain belts of northern Tibet Plateau: Constraints from geochemical and zircon U-Pb age and Hf isotopic study of magmatic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 73: 372–395.
- Zhang C L, Yu H F, Shen J L, et al. Zircon SHRIMP age determination of the giant-crystal gabbro and basalt in Kuda, west Kunlun: dismembering of the Kuda ophiolite[J]. *Geological Review*, 2004, 50(6): 639–643.
- Zhang J X, Mattinson C G, Yu S, et al. Combined rutile-zircon thermometry and U-Pb geochronology: New constraints on Early Paleozoic HP/UHT granulite in the south Altyn Tagh, north Tibet, China[J]. *Lithos*, 2014, 200: 241–257.
- Zhang J X, Meng F, Yang J. A new HP/LT metamorphic terrane in the northern Altyn Tagh, western China[J]. *International Geology Review*, 2005, 47(4): 371–386.
- Zhang J X, Yu S, Mattinson C G. Early Paleozoic polyphase metamorphism in northern Tibet, China[J]. *Gondwana Research*, 2017, 41: 267–289.
- Zhang J X, Zhang Z, Xu Z, et al. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China[J]. *Lithos*, 2001, 56(2-3): 187–206.
- Zhao G, Wang Y, Huang B, et al. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 262–286.
- Zhou N, Zhao G, Yao J, et al. Middle to Late Ordovician flare-up of granitoids, South Altyn Tagh: Reworking of exhumed continental crust[J]. *Geological Journal*, 2024, 59(8): 2190–2207.