



引文格式: 何磊, 韩小锋, 杨怀宇, 等. 北祁连西段昌马地区晚奥陶世弧前沉积-构造演化[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 128-138. DOI: 10.12401/j.nwg.2024037

Citation: HE Lei, HAN Xiaofeng, YANG Huaiyu, et al. Late Ordovician Tectono-Sedimentary Evolution of the Changma Area, Forearc Basin in the Western North Qilian Orogen[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 128-138. DOI: 10.12401/j.nwg.2024037

## 北祁连西段昌马地区晚奥陶世弧前沉积-构造演化

何磊<sup>1</sup>, 韩小锋<sup>2,\*</sup>, 杨怀宇<sup>3</sup>, 宋博<sup>2</sup>, 许伟<sup>2</sup>, 许海红<sup>2</sup>, 史冀忠<sup>2</sup>, 孙娇鹏<sup>1</sup>, 张慧元<sup>2</sup>

(1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119;  
3. 中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东 东营 257015)

**摘要:** 北祁连早古生代多岛洋盆的古地理格局和构造演化一直存在争议。位于北祁连南、北蛇绿岩之间的昌马地区广泛出露了一套早古生代深水火山-碎屑建造。早期填图工作普遍认为其形成于寒武纪至早奥陶世。本次研究对昌马西部的鹰嘴山和车路沟山南侧剖面开展系统的野外地质调查。并对采集到的浊积岩和火山岩样品开展了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年工作。研究结果表明, 原填为寒武系 a 岩组的鹰嘴山剖面所采集的砂岩样品 2307NQL-13 最年轻的锆石给出了 (456±4) Ma 的加权平均年龄; 车路沟山南侧, 原划归为下奥陶统阴沟群的安山岩样品 2307NQL-06 给出了 (450±4) Ma 的加权平均年龄, 证明研究区大面积存在晚奥陶世沉积地层, 现有年代地层方案需要重新审视。砂岩样品中的碎屑锆石以寒武纪—奥陶纪年龄为主, 主要源于岩浆弧的剥蚀; 32 颗新元古代和古元古代碎屑锆石揭示古老基底物质的大量加入, 表明晚奥陶世昌马地区沉积了大量来自中祁连的碎屑物质。来自中祁连基底的碎屑物质暗示北祁连洋的南分支已经闭合; 碎屑物质形成于俯冲相关构造环境暗示北祁连洋的北分支俯冲仍在继续。本次研究给出的新数据将为昌马地区进一步的地层和沉积演化提供可靠的同位素年代约束, 也为探讨北祁连洋早古生代复杂的俯冲、闭合过程提供重要依据。

**关键词:** LA-ICP-MS U-Pb 年代学; 晚奥陶世; 弧前盆地; 北祁连洋; 昌马地区

中图分类号: P544

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0128-11

### Late Ordovician Tectono-Sedimentary Evolution of the Changma Area, Forearc Basin in the Western North Qilian Orogen

HE Lei<sup>1</sup>, HAN Xiaofeng<sup>2,\*</sup>, YANG Huaiyu<sup>3</sup>, SONG Bo<sup>2</sup>, XU Wei<sup>2</sup>, XU Haihong<sup>2</sup>, SHI Jizhong<sup>2</sup>,  
SUN Jiaopeng<sup>1</sup>, ZHANG Huiyuan<sup>2</sup>

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China; 2. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying 257015, Shandong, China)

收稿日期: 2023-12-26; 修回日期: 2024-01-30; 责任编辑: 曹佰迪

基金项目: 中国地质调查局项目“河西走廊盆地群油气地质调查评价”(DD20242183), 国家自然科学基金面上基金项目“东昆仑祁漫塔格早古生代弧后洋盆闭合过程的沉积大地构造学约束”(42372253), “鄂尔多斯西缘、南缘奥陶纪盆地演化对北秦岭、中祁连与华北初始碰撞约束”(42072260)联合资助。

作者简介: 何磊(1997-), 男, 硕士研究生, 从事沉积大地构造研究。E-mail: hl19971010@163.com。

\* 通讯作者: 韩小锋(1982-), 男, 高级工程师, 长期从事资源勘查工作。E-mail: hxiaofeng@mail.cgs.gov.cn。

**Abstract:** The paleogeography and tectonic evolution history of the Early Paleozoic archipelago-type North Qilian Ocean remain controversial. A set of Early Paleozoic deep-water clastic-volcanic succession are well exposed in the Changma Area between the north and south ophiolitic belt of the North Qilian Orogen. Previous geologic mappings generally assigned a Cambrian to Early Ordovician stratigraphic age for these strata. In this study, we conducted systemic field-based investigations on outcrops in the Yingzuishan and Chelugou Section in the western Changma, and conducted zircon LA-ICP-MS U-Pb datings on collected turbidites and volcanics. Geochronologic results indicate that the sandstone sample 2307NQL-13 from the previously termed Cambrian Number a unit of the Yingzuishan Section yielded a well-defined weighted mean age of (456±4) Ma for the youngest detrital zircons. An andesite sample 2307NQL-06 from the previously termed Early Ordovician Yingou Formation yielded a well-defined weighted mean age of (450±4) Ma. These new data solidly demonstrated the existence of Late Ordovician sedimentary strata in the Changma Area, requiring further consideration of previous mapping proposals. Detrital zircons from sandstones are mostly of Cambrian-Ordovician ages, indicating major sedimentary derivations form newly-formed magmatic arcs. Appearance of 32 Neo- to Paleoproterozoic aged zircons imply additional supply form metamorphic basement complexes, revealing depositor of detritus from the Central Qilian. This clue hints at that the southern branch of the North Qilian Ocean should have been closed in Late Ordovician to allow sedimentary materials from the Central Qilian to be transported to and deposited in the Changma Area. The subduction-related depositional setting indicates that ongoing subduction of the oceanic crust of the northern branch should sustain until then. These clues provide new geochronologic data and related observations on stratigraphy and sedimentary evolution history of the Changma Area, and yield further constraints on the composite Early Paleozoic subduction-closure history of the North Qilian Ocean.

**Keywords:** LA-ICP-MS U-Pb dating; late Ordovician; forearc basin; north Qilian Ocean; Changma area

中央造山带是分隔中国南北大陆的重要地质和地理界限,其演化过程一直是地学界的关注热点(张国伟等, 2001; 董云鹏等, 2019; 吴福元等, 2020)。中央造山带西段的祁连-东昆仑构造域包含了诸多起源不同的微小陆块(图 1a),其构造格架的形成记录了这些微小陆块的多旋回离散、增生和拼贴历史,显示出复杂的地质组成和演化过程(Xiao et al., 2009; Song et al., 2013; 张建新等, 2015; Dong et al., 2018, 2021; 宋述光等, 2019; Yan et al., 2019; 任海东等, 2023; 熊万宇康等, 2023)。相较于对东段的秦岭-大别造山带,由于更为复杂的地质组成和多旋回板块演化过程,中央造山带西段的大地构造演化存在较多争议(夏林圻等, 1996; Yin et al., 2000; Song et al., 2013; Dong et al., 2021; Yan et al., 2021)。

作为特提斯构造域的北界,北祁连增生造山带内大面积出露早古生代增生杂岩、蛇绿岩、高压-超高压变质岩、岩浆岩以及弧前-前陆盆地沉积等(图 1b),记录了早古生代北祁连洋的消减、闭合,华北板块西部(阿拉善)与中祁连岛弧拼合的一系列演化过程,一直是大地构造学研究的热点,也是探讨特提斯构造域最北段古生代板块拼贴、古地理演化过程的重要窗口

(肖序常等, 1978; 夏林圻等, 1991, 1995; 许志琴等, 1994; 冯益民等, 1995; 张建新等, 1997; 杜远生等, 2002; Song et al., 2013; 徐亚军等, 2013)。

昌马地区位于北祁连造山带西段,属于北祁连蛇绿/增生混杂岩的重要组成部分,保存了丰富的早古生代北祁连洋俯冲、闭合,直至碰撞后的沉积地层记录。然而,现有研究对该套火山-碎屑沉积建造的认识主要还是基于早期的 1:20 000 区域地质调查填图,根据相似的岩石组合将其笼统地划归为寒武系—奥陶系。随着对北祁连中、东段(Xiao et al., 2009; Dong et al., 2021)的研究深入,越来越多岩性迥异、年代不同的岩石单元被肢解出来,在证明了这套火山-碎屑建造复杂地质组成的同时,有必要进一步地对其沉积过程和大地构造环境开展研究。

笔者对昌马地区开展了详细的野外地质调查,在原划归为寒武系、下奥陶统阴沟群的两个剖面中分别采集了砂岩和火山岩样品,根据锆石 U-Pb 年代测试结果,对这两个剖面的下古生界地层年代进行重新厘定。同时,依据沉积环境分析,微量元素地球化学,以及砂岩碎屑矿物组合、碎屑锆石 U-Pb 年龄的物源分析,约束了其物源区以及早古生代沉积大地构造环境,

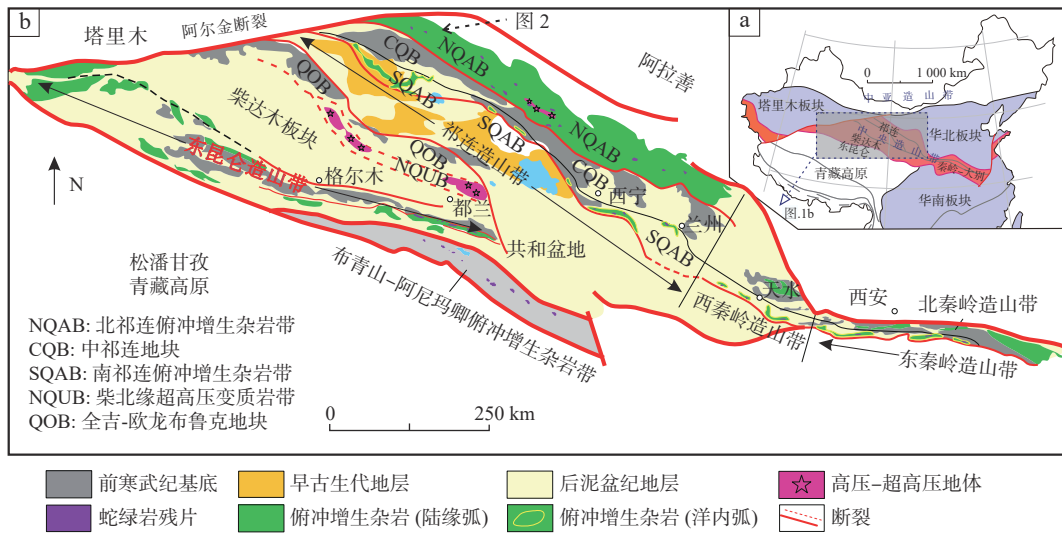


图1 中央造山带及邻区构造单元(a)和祁连造山带及邻区地质简图(b)(据宋述光等, 2019)

Fig. 1 (a) Central orogenic belt and adjacent tectonic units and (b) geological map of the Qilian Orogen and adjacent areas

最终探讨北祁连洋早古生代的构造演化过程。

### 1 区域地质背景

研究区位于北祁连造山带西部, 构造单元上位于北祁连俯冲增生杂岩带最西端、毗邻阿尔金断裂东侧(图2), 其南侧为中祁连地块, 北侧为阿拉善地块。北祁连俯冲增生杂岩带以早古生代火山-碎屑沉积建造发育为主要特点, 出露大量的寒武纪—奥陶纪的蛇绿混杂岩、岛弧火山岩、高压-超高压变质岩, 并伴随着广泛的岩体侵入, 早期研究将其解释为寒武纪—奥陶纪裂陷槽背景下的裂谷-海沟-火山弧构造体制产物(左国朝等, 1999), 现有研究一般将其解释为北祁连新元古代—早古生代多岛洋的闭合产物(Xiao et al.,

2009; Song et al., 2013; 宋述光等, 2019; Dong et al., 2021)。北祁连俯冲增生杂岩带内可进一步识别出大盆达坂弧前蛇绿岩-玻安岩地体(517~487 Ma)以及其南侧的托勒山洋中脊型蛇绿岩带(蛇绿岩形成年代为550~495 Ma)、其北侧的走廊南山SSZ型(蛇绿岩形成年代为490~445 Ma)蛇绿岩带(宋述光等, 2019; Dong et al., 2021)。研究区寒武系—奥陶系以浅变质的深水盆地相沉积发育为主要特点(黄增保等, 2001), 地层出露连续性差, 普遍经历了低绿片岩相变质。其上为志留系深水复理石沉积; 石炭系和二叠系出露较为局限, 角度不整合覆盖在下古生界深水建造之上; 中生代露头以陆内河湖相砂砾岩、泥岩发育为主要特征(杜远生等, 2002), 广泛地分布在昌马盆地腹地。笔者选取昌马镇以西的鹰嘴山和车路沟山南侧

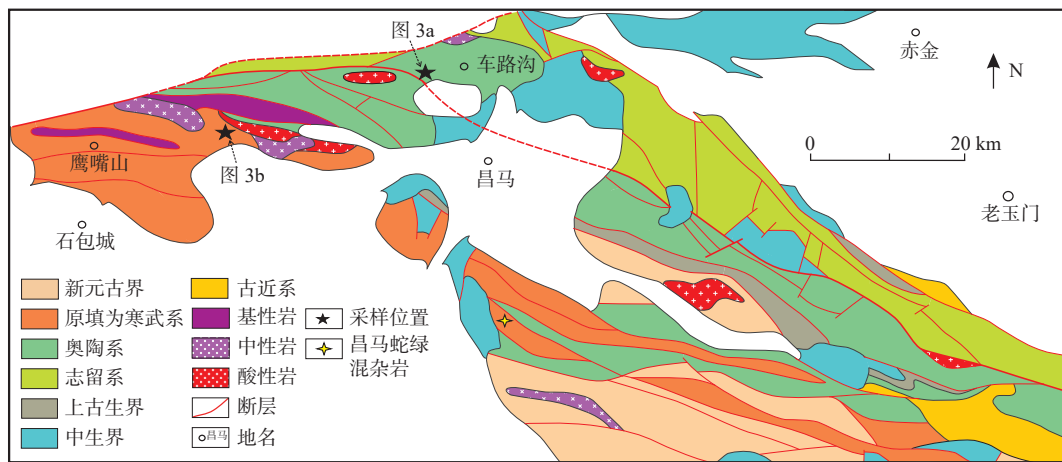


图2 北祁连西段昌马地区地质图

Fig. 2 The geological map of Changma area in the western section of North Qilian

两个剖面开展研究(图2)。这两个剖面出露的地层以深水盆地泥页岩、硅质岩、浊积岩与中酸性火山岩、火山碎屑岩互层为主要特点(图3a、图3b)。车路沟山南侧剖面在1:20 000地质图上被划归为阴沟群、属早奥陶世沉积(甘肃省地质调查局, 1972)。该岩组的岩石粒度较细, 以黑色泥页岩为主(图3c), 局部夹薄-中层的粉砂岩和硅质岩(图3d、图3e)以及厚层安山岩(图3f)。该岩石组合指示深海平原相沉积特征。鹰嘴山剖面在早期地调填图中将其划为寒武系, 野外观察发现其岩石组合以砾岩、砂岩夹泥岩发育为主要特征, 碎屑岩的韵律性较好(图3h); 粗碎屑单元呈现中厚层砾岩-砂岩的正粒序叠置的特征、伴随着砾岩对下伏砂岩的明显底冲刷(图3i), 可解释为深水浊积扇的沟道沉积(Sun et al., 2023); 岩性相对较细的部分砂岩成层性较好、砂岩间分隔明显, 无明显底冲刷(图3g), 可解释为沟道间的浊积朵页体沉积(Sun et al., 2020), 局部可见砂岩的岩块(图3j)。

## 2 采样信息和分析测试方法

样品 2307NQL-06, 采自车路沟南剖面(GPS: E 96.3977766°, N 39.86566068°)。岩性为安山岩, 主要组成矿物为长石、辉石、角闪石、黑云母。镜下呈斑状结构, 斑晶主要为斜长石斑晶, 发育聚片双晶(图4a), 碱性长石斑晶次之, 发育卡式双晶, 可见紫苏辉石斑晶。斑晶表面受溶蚀严重。基质为微晶斜长石呈定向或半定向排列, 呈玻基交织结构充填于斑晶之间(图4b)。

样品 2307NQL-13, 采自鹰嘴山剖面(GPS: E 96.66182399°, N 39.95443316°)。岩性为石英岩屑砂岩, 颗粒支撑, 分选性较差, 磨圆性较差。碎屑矿物主要成分为岩屑、石英和斜长石。石英占39%, 其中单晶石英38%, 多晶石英1%。斜长石含量较少, 约占5%, 常呈粒状分布于其他矿物中间, 见聚片双晶。岩屑占56%, 类型多样, 可见碳酸盐岩岩屑(17%)、砂岩岩屑(15%)、酸性喷出岩岩屑(13%)、安山岩岩屑(8%)、凝灰岩岩屑(2%)、玄武岩岩屑(2%)等(图4c、图4d)。石英以单晶石英为主, 多呈次圆状, 可见石英增生边。

用于锆石 U-Pb 年代学测定的样品, 在微著地化(廊坊)科技有限公司利用标准技术对锆石进行了分选。然后, 锆石粘贴在环氧树脂表面, 抛光后进行锆石阴极发光照相, 以观察锆石的内部结构。锆石微区

原位 U-Pb 定年及微量元素含量测试采用廊坊地质服务有限公司的 LA-ICP-MS 分析系统完成。激光剥蚀(LA)使用的是美国 NewWave 公司生产的 NewWave UP-213 Nd: YAG 固体激光器, 质谱仪(ICP-MS)为美国安捷伦公司生产的 Agilent 7900 型四极杆等离子体质谱仪。激光剥蚀过程中采用 He 为载气、Ar 为补偿气调节灵敏度, 二者通过一个三通接头混合通入 ICP-MS。激光条件为: 束斑直径为 30  $\mu\text{m}$ , 能量密度为 10 J/cm<sup>2</sup>, 剥蚀频率为 10 Hz。在正式的剥蚀样品之前先使用国际标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器的最优化, 使仪器达到较高的灵敏度、较低的背景值与氧化物以及最稳定的信号。测试流程为先采集 20 s 的背景值, 之后进行 40 s 的样品剥蚀, 最后进行 30 s 的样品吹扫。采用跳峰的方式进行数据采集, 对于不同同位素的采集时间, <sup>202</sup>Hg 和 <sup>232</sup>Th 为 10 ms, <sup>204</sup>Pb 和 <sup>206</sup>Pb 为 20 ms, <sup>207</sup>Pb 为 30 ms, <sup>208</sup>Pb 和 <sup>238</sup>U 为 15 ms, 其余元素为 6 ms。数据处理使用标准锆石 91500 作为外标进行同位素比值校正(Wiedenbeck et al., 1995), 标准锆石 Plesovice (337 Ma)为监控盲样(Sláma et al., 2008)。使用国际标样 NIST SRM610 为外标进行微量元素含量的校正。用 GLITTER4.0 软件进行同位素比值及元素含量的计算。谐和年龄及加权平均图绘制均采用 Isoplot(3.0)(Ludwig, 2003)。

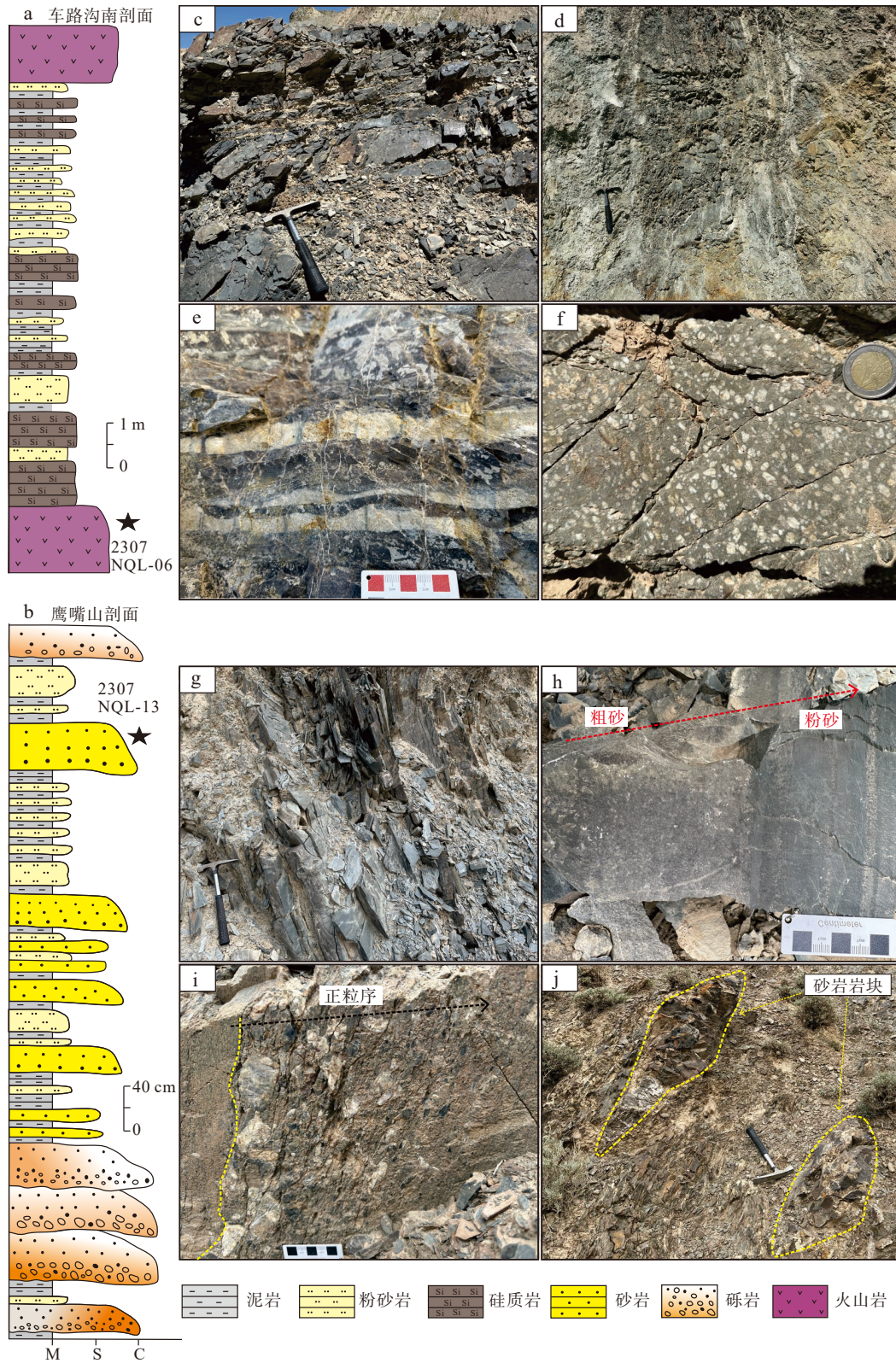
## 3 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及微量元素

### 3.1 安山岩样品 2307NQL-06

安山岩样品 2307NQL-06 中的锆石自形程度较好、颗粒棱角清晰、无任何沉积搬运改造的痕迹(图5a); 颗粒较大、粒径多大于 100  $\mu\text{m}$ , 长宽比约 3:1~1:1。几乎全部锆石颗粒的阴极发光图像均呈现出清晰的振荡环带, 少量呈现出扇状分区特征; Th/U 为 0.17~0.48, 均大于 0.1; 展现出明显的岩浆成因锆石的特征(Belousova et al., 2002)。共对 30 个锆石颗粒开展了定年研究, 所获得的 30 个年龄数据的不谐和度均小于 10%, 所给出的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄分布在(434±11) Ma 至(469±11) Ma 之间, 加权平均年龄为(450±4) Ma (MSWD=0.51)(图6a、图6b)。

### 3.2 砂岩样品 2307NQL-13

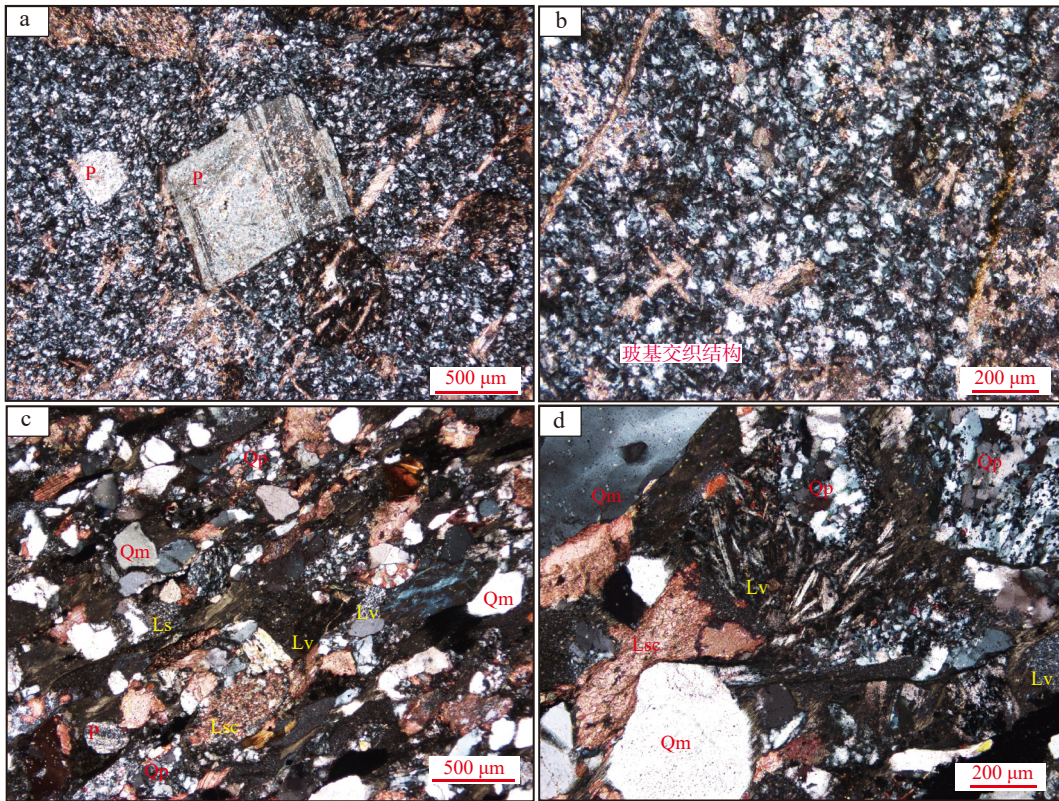
砂岩样品 2307NQL-13 中的锆石颗粒大部分无明显沉积改造痕迹, 少量具有明显磨蚀轮廓锆石(颗粒 28, 67 等), 指示长距离搬运或者锆石的再旋回(图5b)。



a.车路沟南剖面沉积柱状图及 2307NQL-06 采样层位; b.鹰嘴山剖面沉积柱状图及 2307NQL-13 采样层位; c.砂泥岩互层; d.硅质岩与泥岩互层; e.硅质岩夹粉砂岩薄层; f.安山岩; g.粉砂岩夹薄层泥岩; h.砂岩发育正粒序层理, 由粗砂渐变到粉砂; i.砾岩发育正粒序层理, 底部有冲刷; j.粉砂岩和泥岩中的砂岩岩块

图3 野外实测剖面及典型沉积特征照片

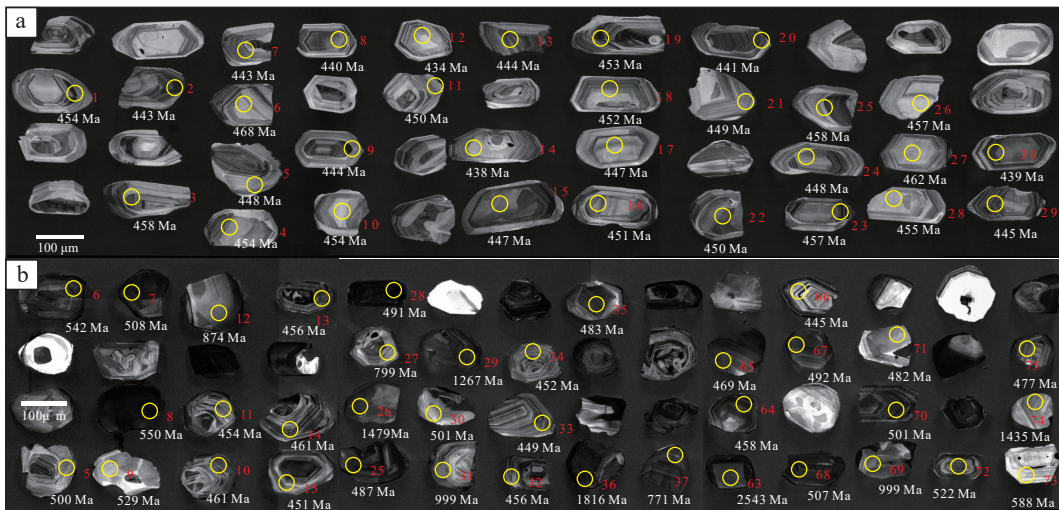
Fig. 3 Field-measured profiles and typical sedimentary feature photographs



a.安山岩斜长石斑晶, 正交偏光, 5×; b.安山岩玻基交织结构, 正交偏光, 10×; c.石英岩屑砂岩, 正交偏光, 5×; d.石英岩屑砂岩, 正交偏光, 10×; 矿物缩写: P.斜长石; Qp.多晶石英; Qm.单晶石英; Ls.沉积岩岩屑; Lsc.碳酸盐岩岩屑; Lv.火山岩岩屑

图4 测年样品显微照片

Fig. 4 Photomicrographs of dated samples



a.安山岩样品 2307NQL-06; b.砂岩样品 2307NQL-13

图5 典型锆石阴极发光图像

Fig. 5 Typical zircon cathodoluminescence images

大部分锆石的阴极发光图像具有清晰的振荡环带, 部分锆石也具有扇形分区特征; Th/U 值相对较高, 介于 0.14~2.05; 这意味着这些锆石绝大多数为岩浆成因

锆石 (Belousova et al., 2002)。除了 5 个年龄的谐和度低于 90% 之外, 其余 95 个年龄均为谐和年龄, 介于 444~2 701 Ma。绝大多数年龄分布在寒武纪、奥陶纪;

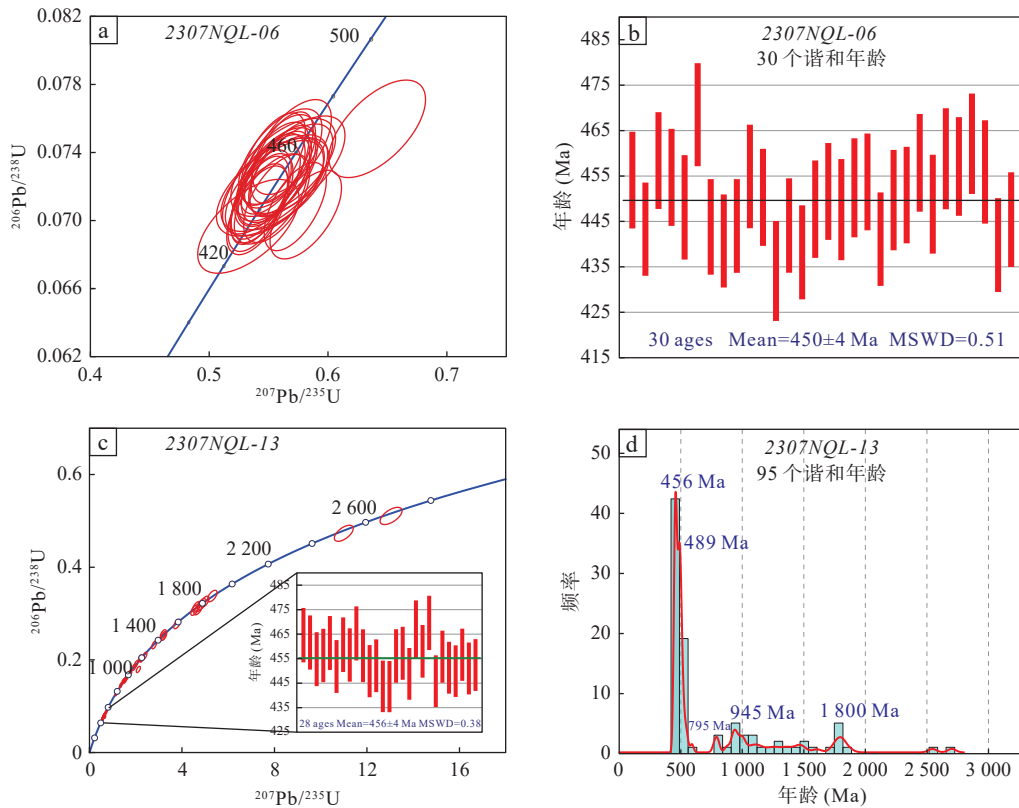


图6 测试样品锆石 U-Pb 年龄谐和图、加权平均年龄图和直方图

Fig. 6 Concordia plot, weighted mean age diagram, and histogram for zircon U-Pb age of two samples

最年轻的 28 个年龄为 444~470 Ma, 给出了  $(456 \pm 4)$  Ma 的加权平均年龄(图 6c); 34 个点的年龄为 474~589 Ma, 峰值年龄为 489 Ma。另外可见 795 Ma 和 945 Ma 的新元古代次峰, 以及 1800 Ma 的古元古代晚期峰值(图 6d)。

### 3.3 寒武纪和奥陶纪锆石微量元素特征

砂岩样品中 540~440 Ma 的锆石的 Th/U 值介于 0.14~1.73, Nb/Hf 值介于 0.000 05~0.001 3, Th/Nb 值介于 35.8~668.8, Hf/Th 值介于 11.2~425.9。火山岩样品的锆石, Th/U 值介于 0.17~0.48, Nb/Hf 值介于 0.000 04~0.000 2, Th/Nb 值介于 11.6~57.9, Hf/Th 值介于 93.8~2 372.7。在基于锆石稀土元素的构造环境判别图中, 大部分数据落在岩浆弧相关的构造环境(图 7a、图 7b)。

锆石微量元素分析结果表明, 两个样品中年轻(540~440 Ma)锆石的 Sm 含量为  $0.377 \times 10^{-6} \sim 18.4 \times 10^{-6}$ , Eu 含量为  $0.175 \times 10^{-6} \sim 5.58 \times 10^{-6}$ , Gd 含量为  $1.888 \times 10^{-6} \sim 69.78 \times 10^{-6}$ (表 3)。球粒陨石标准化后, 计算出的 Eu/Eu\* 值为 0.036~0.776。根据地壳厚度计算公式(Tang et al., 2021), 地壳厚度  $z = (84.2 \pm 9.2) \times \text{Eu}/\text{Eu}^*_{\text{zircon}} + (24.5 \pm 3.3)$ , 计算得到的平均地壳厚度在 50~70 km 之

间(图 7c)。

## 4 讨论

### 4.1 昌马地区下古生界地层沉积年龄的重新审视

受控于复杂物质组成以及强烈的构造改造, 北祁连山带早古生代与北祁连洋俯冲、闭合相关的沉积建造年龄一直存在争议。尤其在早期的 1:200 000 地质填图中, 缺失可靠的年龄约束, 区域性的地层对比和填图往往根据少量实测剖面的古生物年代学资料。前人根据采集到的中寒武世的三叶虫化石和早奥陶世三叶虫、腕足类和头足类等生物化石, 结合区域上岩性组合对比, 将昌马地区浅变质的火山沉积建造笼统的划归为寒武系和奥陶系阴沟群(甘肃省地质调查局, 1972)。然而, 根据野外地质调查, 笔者发现昌马地区分布面积最为广泛的阴沟群和寒武系岩性组合较为接近, 都以灰绿色泥岩、石英砂岩、安山玢岩、中酸性熔凝灰岩夹结晶灰岩为主要特征, 局部含板岩和硅质岩。因此, 现有基于岩性地层填图为基础、辅之少量古生物年代地层结论的填图方案存在不确定性。

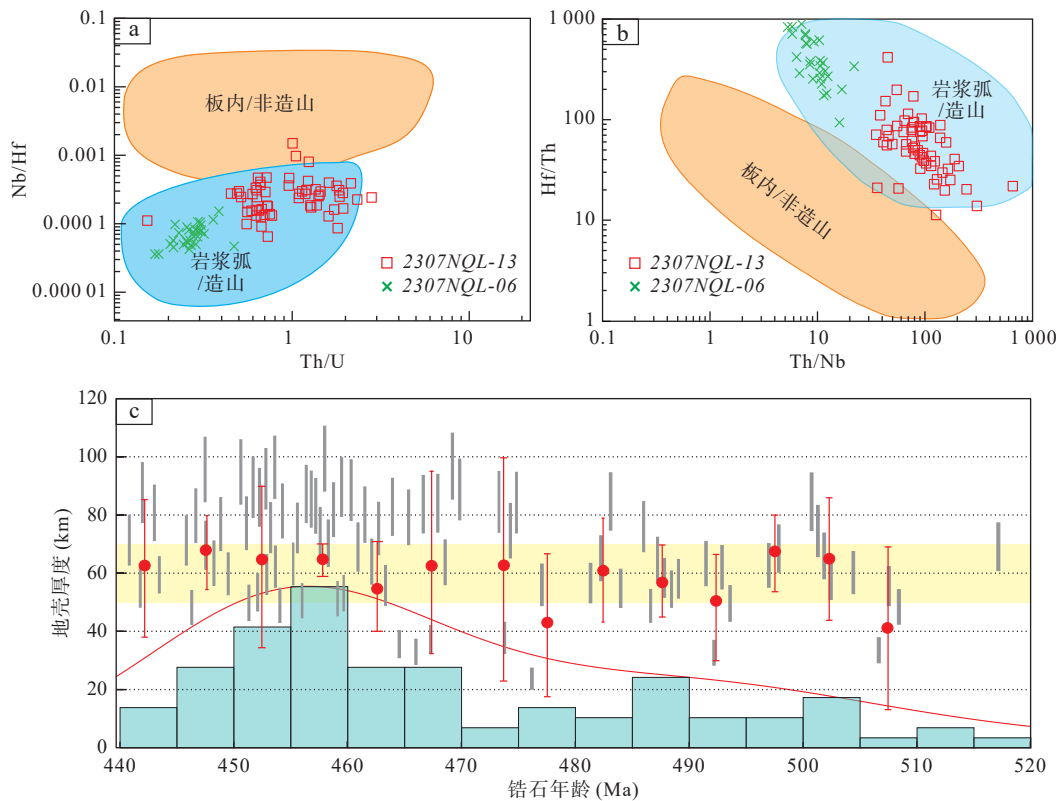


图7 锆石微量元素 Th/U-Nb/Hf 判别图解(a)、锆石微量元素 Th/ Nb-Hf/Th 判别图解(b) (据 Yang et al., 2012)、研究区地壳厚度随锆石年龄的变化图(c)

Fig. 7 (a) Zircon trace element Th/U vs. Nb/Hf diagram, (b) zircon trace element Th/ Nb-Hf/Th diagram, (c) diagram of crustal thickness variation with zircon age in the study area

笔者从原 1 : 200 000 图中填为寒武系 a 岩组的鹰嘴山剖面采集的砂岩样品 2307NQL-13 中获得了 (456±4) Ma (MSWD=0.38) 加权平均年龄, 约束了该样品的最大沉积时限。在车路沟山南侧、原划归为阴沟群第二岩组的层系中采集到的安山岩样品 2307NQL-06 获得了 (450±4) Ma (MSWD=0.51) 加权平均年龄。两个样品获得的年龄在误差范围内一致, 这意味着, 在昌马西段广泛分布的含火山岩的深水沉积建造, 可能有很大一部分属于晚奥陶世, 而不是传统认为的寒武纪至早奥陶世。而对该区相关层段的研究, 需要慎重对待现有的填图资料的地层年龄及划分, 亟需开展独立的同位素或化石年代地层研究。

#### 4.2 昌马地区晚奥陶世物源及沉积大地构造背景

砂岩薄片鉴定结果表明, 晚奥陶世砂岩样品成分成熟度较低, 暗示短距离搬运。复杂的岩屑组成, 包含不同岩性的火山岩岩屑、沉积岩岩屑, 暗示物源区较为复杂。其中, 中酸性火山岩岩屑和玄武岩岩屑的出现指示岩浆弧火山物质的注入。碎屑锆石年龄以寒武纪和奥陶纪为主, 约占 65%, 这些与沉积年龄接

近的碎屑锆石的出现暗示物源区是与俯冲相关的构造环境, 以弧火山岩剥蚀为主, 同时前寒武纪的古老碎屑锆石的存在, 指示岩浆弧基底物质的剥蚀 (Cawood et al., 2012)。因此, 笔者认为昌马地区晚奥陶世砂岩物源主要来源于大陆岩浆弧, 包括前寒武纪的陆壳基底和寒武纪—奥陶纪的侵入岩与喷出岩, 而沉积岩岩屑的大量存在暗示增生杂岩沉积物的再旋回。

考虑到该阶段 (约 450 Ma), 北祁连洋北分支依旧存在, 其北侧的阿拉善陆块不能为其提供碎屑物质。而紧邻研究区的阿拉善南缘北大山一带, 其前寒武纪基底以古元古代和太古代变质岩为主 (张建新与宫江华, 2018), 缺少新元古代罗迪尼亚期岩浆活动, 这与样品中约 945 Ma 的碎屑锆石年龄峰值不一致 (图 6d)。大盆达坂洋内弧形成于古生代, 缺少古老基底物质 (Song et al., 2013), 也无法为研究区提供古老基底物质。所以, 笔者认为晚奥陶世砂岩样品 2307NQL-13 的物质主要来源于南侧的中祁连地块 (图 8)。中祁连地块的前寒武基底同时包含了该样品中出现的古元古代至新元古代锆石年龄 (Dong et al., 2021), 并且广



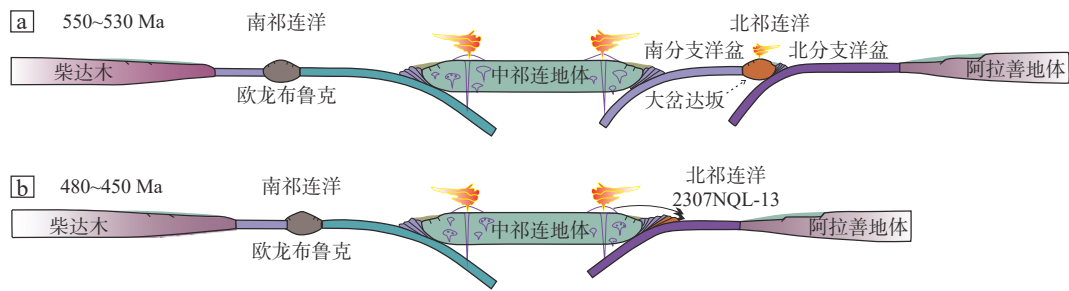


图8 早古生代北祁连洋构造演化模式图(据 Dong et al., 2021 修)

Fig. 8 Early Paleozoic North Qilian Ocean tectonic evolution model diagram

泛发育的早古生代俯冲相关岩浆活动也可以作为峰值(约 456 Ma)碎屑锆石的物源。同时,早期的弧前沉积物、增生杂岩,作为再旋回物源,也可以成为沉积岩岩屑以及部分磨圆度较好锆石的物源。综上所述,本次研究认为晚奥陶世昌马地区浊积岩的物源以中祁连基底为主,也存在来自于增生杂岩和洋内弧的碎屑物质注入。

#### 4.3 对北祁连洋寒武纪—奥陶纪构造演化的约束

现有研究揭示北祁连洋的形成不晚于 550 Ma,以最老的玉石沟蛇绿岩为代表(史仁灯等, 2004)。北祁连洋被认为是一个多岛洋,洋盆内存在多个微陆块或者大洋岛弧(Xiao et al., 2009),以大盆达坂洋内弧为界,可识别出南和北两个分支洋盆(Dong et al., 2021),分别被看作主洋盆和弧后洋盆(Song et al., 2013; 宋述光等, 2019)。南侧洋盆形成和演化时限较早,主要为洋中脊型蛇绿岩带,蛇绿岩形成年代为 550~495 Ma,北侧的洋盆形成和闭合相对较晚,且呈现出 SSZ 型蛇绿岩特征,形成年代为 490~445 Ma(Song et al., 2013; 宋述光等, 2019)。研究区昌马位于南、北两个洋盆之间(图 1b)。

本次野外地质调查揭示,晚奥陶世地层中普遍发现安山岩,这意味着当时洋壳的俯冲尚未完全结束,安山岩所给出的(450±4) Ma 的年龄将俯冲时间下限约束到了晚奥陶世。此外,样品 2307NQL-13 中大量出现新元古代和古元古代的古老基底年龄,这些来自于中祁连的碎屑物质暗示北祁连洋南分支已经闭合。这与前人提出的北祁连洋构造演化的模型一致(Dong et al., 2021),也与区域上广泛分布的晚奥陶世俯冲相关岩浆活动一致(Song et al., 2013)。黄增保等(2001)在研究区发现了昌马蛇绿混杂岩(图 2),认为其形成于俯冲相关构造环境。金霞(2004)对阴沟群火山岩进行了岩石学和地球化学特征分析,认为阴沟群火山岩形成于洋壳俯冲相关的构造环境。锆石微量元素

特征指示碎屑岩沉积期的碎屑锆石形成于俯冲相关构造环境(图 7a、图 7b),以及大量同沉积期碎屑锆石的普遍存在,共同揭示俯冲相关沉积环境。此外,锆石微量元素计算结果表明,约 540~440 Ma 的岩浆弧平均地壳厚度为 50~70 km(图 7c),暗示岩浆弧自寒武纪初期开始已经演化至成熟岩浆弧阶段。

## 5 结论

(1) 原地质填图为寒武系 a 岩组的鹰嘴山剖面所采集的砂岩最年轻的碎屑锆石给出了(456±4) Ma (N=28)的加权平均年龄,车路沟山南侧、原划归为阴沟群的安山岩样品 2307NQL-06 给出了(450±4) Ma (N=30)的加权平均年龄,证明研究区大面积存在晚奥陶世沉积地层,现有年代地层方案需要重新审视。

(2) 砂岩中的碎屑锆石年龄以寒武纪—奥陶纪为主,推测其物源主要来源于岩浆弧; 32 颗新元古代和古元古代碎屑锆石揭示物源区古老基底物质的普遍存在,证实晚奥陶世昌马地区的碎屑岩存在大量来自中祁连的碎屑物质。

(3) 来自中祁连基底的碎屑物质暗示北祁连洋的南分支已经闭合; 碎屑物质形成于俯冲相关构造环境暗示北祁连洋的北分支俯冲仍在继续。

致谢: 感谢贵刊审稿专家的宝贵意见, 感谢何玮东、齐毓琨、李宗霖同学在野外和室内薄片鉴定方面的大力帮助。

## 参考文献(References):

- 董云鹏, 张国伟, 孙圣思, 等. 中国大陆“十字构造”形成演化及其大陆动力学意义[J]. 地质力学学报, 2019, 25(05): 769-797.
- DONG Yunpeng, ZHANG Guowei, SUN Shengsi, et al. The “Cross-Tectonics” in China Continent: formation, Evolution, and its

- Significance for Continental Dynamics[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(05): 769–797.
- 杜远生, 张哲, 周道华, 等. 北祁连-河西走廊志留纪和泥盆纪古地理及其对同造山过程的沉积响应[J]. *古地理学报*, 2002, 04(04): 1–8.
- DU Yuansheng, ZHANG Zhe, ZHOU Daohua, et al. Silurian and Devonian Palaeogeography of Northern Qilian-Hexi Corridor and its Sedimentary Response to Synorogenesis of North Qilian Orogenic Belt[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2002, 04(04): 1–8.
- 冯益民, 何世平. 祁连山及其邻区大地构造基本特征-兼论早古生代海相火山岩的成因环境[J]. *西北地质科学*, 1995, 16(01): 92–103.
- FENG Yimin, HE Shiping. Basic Characteristics of Tectonics in the Qilian Mountains and its Neighbourings, and Genetic Environments of Early Paleozoic Marine Volcanics[J]. *Northwest Geoscience*, 1995, 16(01): 92–103.
- 甘肃省区调报告昌马幅 1: 20 万 [R]. 兰州: 甘肃省地质调查局, 1972.
- 黄增保, 许荣科, 张彦杰, 等. 甘肃玉门昌马地区蛇绿混杂岩地质特征[J]. *甘肃地质学报*, 2001, 10(02): 12–22.
- HUANG Zengbao, XU Rongke, ZHANG Yanjie, et al. Geological Characteristics of Ophiolitic Mixite in Changma Region, Yumen, Gansu[J]. *Acta Geologica Gansu*, 2001, 10(02): 12–22.
- 金霞, 黄增保. 甘肃昌马地区阴沟群火山岩地质特征及构造环境探讨[J]. *甘肃地质学报*, 2004, 13(01): 46–53.
- JIN Xia, HUANG Zengbao. Discussion on the geological characteristics and its tectonic setting of volcanic rocks of Yingou group in Changma area, Gansu[J]. *Acta Geologica Gansu*, 2004, 13(01): 46–53.
- 史仁灯, 杨经绥, 吴才来, 等. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世的 SHRIMP 年龄证据[J]. *地质学报*, 2004, 78(05): 649–657.
- SHI Rendeng, YANG Jingsui, WU Cailai, et al. First SHRIMP Dating for the Formation of the Late Sinian Yushigou Ophiolite, North Qilian Mountains[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2004, 78(05): 649–657.
- 任海东, 王涛, 潘彤, 等. 东昆仑东段三叠纪岩浆岩 Nd-Hf 同位素组分特征、物源演变规律及其构造背景[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 95–112.
- REN Haidong, WANG Tao, PAN Tong, et al. Nd-Hf Isotopic Characteristics, Evolution Trend and Tectonic Setting of Triassic Magmatic Rocks in the Eastern Segment of East Kunlun Orogeny[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 95–112.
- 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.
- 吴福元, 万博, 赵亮, 等. 特提斯地球动力学[J]. *岩石学报*, 2020, 36(06): 1627–1674.
- WU Fuyuan, WAN Bo, ZHAO Liang, et al. Tethyan Geodynamics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(06): 1627–1674.
- 夏林圻, 夏祖春, 彭礼贵, 等. 北祁连山石灰沟奥陶纪岛弧火山岩系岩浆性质的确定[J]. *岩石矿物学杂志*, 1991, 10(01): 1–10.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, PENG Ligui, et al. Determination of Magmatic Nature of Ordovician Island Arc Volcanic Series in The Shihuigou Area in the Northern Qilian Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 1991, 10(01): 1–10.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学[J]. *西北地质科学*, 1995, 16(01): 1–28.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi. Dynamics of Tectono-Volcanic Magmatic Evolution from North Qilian Mountains, China[J]. *Northwest Geoscience*, 1995, 16(01): 1–28.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 南秦岭中~晚元古代火山岩性质与前寒武纪大陆裂解[J]. *中国科学 (D 辑: 地球科学)*, 1996, 26(03): 237–243.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi. Properties of Middle to Late Proterozoic Volcanic Rocks in South Qinling and Precambrian Continental Cracking[J]. *Science in China (Earth Sciences)*, 1996, 26(03): 237–243.
- 熊万宇康, 赵梦琪, 于森, 等. 造山带洋陆转换过程与岩浆作用: 以东昆仑都兰地区古生代花岗岩为例[J]. *西北地质*, 2023, 56(6): 113–139.
- XIONG Wanyukang, ZHAO Mengqi, YU Miao, et al. Ocean-Continent Transition Process and Magmatism in Orogenic Belts: A Case Study of Paleozoic Granites in the Dulan Area of East Kunlun[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(6): 113–139.
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩带的地质构造意义[J]. *地质学报*, 1978(04): 281–295+338.
- XIAO Xuchang, CHEN Guoming, ZHU Zhizhi. A Preliminary Study on the Tectonics of Ancient Ophiolites in the Qilian Mountain, Northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1978(04): 281–295+338.
- 徐亚军, 杜远生, 杨江海. 北祁连造山带晚奥陶世-泥盆纪构造演化: 碎屑锆石年代学证据[J]. *地球科学*, 2013, 38(05): 934–946.
- XU Yajun, DU Yuansheng, YANG Jianghai. Tectonic Evolution of the North Qilian Orogenic Belt from the Late Ordovician to Devonian: Evidence from Detrital Zircon geochronology[J]. *Earth Sciences*, 2013, 38(05): 934–946.
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新, 等. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学[J]. *地质学报*, 1994, 68(01): 1–15.
- XU Zhiqin, XU Huifeng, ZHANG Jianxin, et al. The Zhoulangnanshan Caledonian Subductive Complex in the Northern Qilian

- Mountains and its Dynamics[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(01): 1–15.
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 造山带与造山作用及其研究的新起点[J]. *西北地质*, 2001, 34(01): 1–9.
- ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, YAO Anping. Review on the Development of Studies on the Tectonic and Orogen Process of Orogenic Belt, and Discussing on Some New Key Problems[J]. *Northwestern Geology*, 2001, 34(01): 1–9.
- 张建新, 宫江华. 阿拉善地块性质和归属的再认识[J]. *岩石学报*, 2018, 34(4): 940–962.
- ZHANG Jianxin, GONG Jianghua. Revisiting the Nature and Affinity of the Alxa Block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2018, 34(4): 940–962.
- 张建新, 许志琴, 李海兵, 等. 北祁连加里东造山带从挤压到伸展造山机制的转换[J]. *长春地质学院学报*, 1997, 27(03): 38–44.
- ZHANG Jianxin, XU Zhiqin, LI Haibing, et al. The Transition of Orogenic Mechanism from Compression to Extension in Northern Qilian Orogenic Belt[J]. *Journal of Changchun University of Earth Sciences*, 1997, 27(03): 38–44.
- 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 Shenyao, LI Yunshuai, et al. Subduction, Accretion and Closure of Proto-Tethyan Ocean: Early Paleozoic Accretion or Collision Orogeny in the Altun-Qilian-North Qaidam Orogenic System[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(12): 3531–3554.
- 左国朝, 吴茂炳, 毛景文, 等. 北祁连西段早古生代构造演化史[J]. *甘肃地质学报*, 1999, 8(01): 7–14.
- ZUO Guochao, WU Maobing, MAO Jingwen, et al. Structural Evolution of Early Paleozoic Tectonic Belt in the West Section of Northern Qilian Area[J]. *Acta Geologica Gansu*, 1999, 8(01): 7–14.
- Belousova E A, 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(5): 602–622.
- Cawood P A, Hawkesworth C J, Dhuime B. Detrital zircon record and tectonic setting[J]. *Geology*, 2012, 40(10): 875–878.
- Dong Y P, He D F, Sun S S, et al. Subduction and accretionary tectonics of the East Kunlun orogen, western segment of the Central China Orogenic System[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 186: 231–261.
- Dong Y P, Sun S S, Santosh M, et al. Central China Orogenic Belt and amalgamation of East Asian continents[J]. *Gondwana Research*, 2021, 100(05): 131–194.
- Ludwig K R. A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Isoplot*, 2003, 3: 1–70.
- Sláma J, Košler J, Condon D J, et al. Plešovice zircon—a new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis[J]. *Chemical Geology*, 2008, 249(1–2): 1–35.
- Song S G, Niu Y L, Li S, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1378–1401.
- Sun J P, Dong Y P. Ordovician tectonic shift in the western North China Craton constrained by stratigraphic and geochronological analyses[J]. *Basin Research*, 2020, 32(6): 1413–1440.
- Sun J P, Dong Y P, Chen Q, et al. Ordovician tectonic transition from passive margin into peripheral foreland in the southern Ordos: A diagnostic insight into the closure of Erlangping Ocean between the North Qinling Arc and North China Block[J]. *Basin Research*, 2023, 35(1): 336–362.
- Tang M, Ji W Q, Chu X, et al. Reconstructing crustal thickness evolution from europium anomalies in detrital zircons[J]. *Geology*, 2021, 49(1): 76–80.
- Wiedenbeck M A P, Corfu F Y, 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 J, Windley B F Y Y, et al. Early Paleozoic to Devonian multiple-accretionary model for the Qilian Shan, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 35(3–4): 323–333.
- Yan Z, Fu C L, Aitchison J C, et al. Retro-foreland Basin Development in Response to Proto-Tethyan Ocean Closure, NE Tibet Plateau[J]. *Tectonics*, 2019, 38(12): 4229–4248.
- Yan Z, Xiao W J, Aitchison J C, et al. Age and origin of accreted ocean plate stratigraphy in the North Qilian belt, NE Tibet Plateau: evidence from microfossils and geochemistry of cherts and siltstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 2021, 178(6): jgs2020–231.
- Yang J H, Cawood P A, Du Y S, et al. Large Igneous Province and magmatic arc sourced Permian–Triassic volcanogenic sediments in China[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 261: 120–131.
- Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2000, 28(1): 211–280.