

引用格式: 高万里, 王宗秀, 吴林, 等, 2024. 柴北缘海南山晚志留世—晚泥盆世火山岩浆组合对早古生代造山后伸展时限的约束 [J]. 地质力学学报, 30 (3): 506–518. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023178](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023178)

Citation: GAO W L, WANG Z X, WU L, et al., 2024. Constraints for post-orogenic extension of the northern margin of the Qaidam Basin from the Late Silurian–Late Devonian igneous rocks in the Gahai–Nanshan area [J]. Journal of Geomechanics, 30 (3): 506–518. DOI: [10.12090/j.issn.1006-6616.2023178](https://doi.org/10.12090/j.issn.1006-6616.2023178)

柴北缘海南山晚志留世—晚泥盆世火山岩浆组合对早古生代造山后伸展时限的约束

高万里^{1,2}, 王宗秀¹, 吴林^{1,2}, 江万¹, 钱涛^{1,2}
GAO Wanli^{1,2}, WANG Zongxiu¹, WU Lin^{1,2}, JIANG Wan¹, QIAN Tao^{1,2}

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 自然资源部古地磁与古构造重建重点实验室, 北京 100081

1. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100081, China;*

2. *Key Lab of Paleomagnetism and Tectonic Reconstruction of Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China*

Constraints for post-orogenic extension of the northern margin of the Qaidam Basin from the Late Silurian–Late Devonian igneous rocks in the Gahai–Nanshan area

Abstract: [Objective] The northern margin tectonic zone of the Qaidam Basin underwent a transition from oceanic subduction to continental subduction during the Early Paleozoic, resulting in the formation of the ultrahigh-pressure metamorphic zone known as the northern Qaidam tectonic zone (NQTZ). There has been a longstanding debate regarding the collapse time of the NQTZ. The Maoniushan Formation has long been regarded as a sign of the end of orogeny; however, recent studies show that the Maoniushan Formation has spanned a long time, and it is controversial when the orogenic belt began to collapse. This study aims to determine the age and genetic background of the Maoniushan Formation and to understand the tectonic transition process of the northern Qinghai–Tibet Plateau from the Proto-Tethys to the Paleo-Tethys. [Methods] Deep-earth samples, including volcanic and intrusive rocks, offer valuable insights into the activity of the crust during this period. In order to investigate the volcanoclastic rocks and granites in the Gahai–Nanshan area, located in the eastern section of the NQTZ, zircon LA–ICP–MS U–Pb chronology and Lu–Hf isotope methods were employed to explore the formation age of igneous rocks and the characteristics of source rocks. [Results] The zircon U–Pb chronology reveals that the volcanoclastic rocks of the Maoniushan Formation originated approximately 423 Ma. Furthermore, the intrusive granite was formed at 370 Ma, indicating that the volcanic eruption occurred during the Late Silurian, while the subsequent intrusion and crystallization of the granites occurred during the Late Devonian. The zircon Lu–Hf isotope data reveals that the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the Late Silurian tuffs are concentrated within the range of -11.5 to -8.3 , and the corresponding two-stage Hf model ages are primarily between 1945–2133 Ma. These results indicate that the volcanic rocks predominantly originated from partially melting ancient crustal materials. In contrast, the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the Late Devonian intrusive granites exhibit a distribution within the range of 3.9 – 9.1 , accompanied by two-stage Hf model ages primarily falling within the 792–1118 Ma range. The results suggest that the granites mainly resulted from partially melting Meso-Neoproterozoic crustal materials. Based on a comprehensive analysis of regional geological and petrological data, it is postulated that the Late Silurian–Early Devonian witnessed pronounced orogenesis resulting from continental deep subduction. This event led to substantial crustal thickening in the NQTZ, where the thickened crustal basement of the Oulongbruk experienced partial melting, ultimately giving rise to the volcanic rocks observed during this period. During the Late Devonian, delamination of the thickened crust facilitated the upwelling of the asthenosphere mantle, triggering

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42372179, 41702204)

This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants NO. 42372179 and 41702204).

第一作者: 高万里 (1985–), 男, 博士, 副研究员, 从事区域构造和岩石大地构造研究。Email: gwanli851202@163.com

收稿日期: 2023–11–02; 修回日期: 2024–02–19; 录用日期: 2024–03–11; 网络出版日期: 2024–03–20; 责任编辑: 王婧

regional crustal extension. The interaction between mantle material and crust results in the formation of granitic–volcanic rocks. [Conclusion] The Maoniushan Formation in the region encapsulates a significant period, making it unsuitable to represent the end of orogeny. Late Devonian igneous rocks indicate that the NQTZ entered a period of substantial crustal extension during this time. [Significance] The late Devonian igneous rocks of Maoniushan Formation regionally mark the end of orogeny and the beginning of the Paleo-Tethys tectonic domain.

Keywords: Tibetan Plateau; Late Paleozoic; northern margin of the Qaidam Basin; igneous rocks; tectonic setting

摘要: 柴达木盆地北缘(柴北缘)构造带经历了早古生代的大洋俯冲到大陆俯冲,形成了广为人知的柴北缘超高压变质带。早古生代造山带何时开始垮塌一直存在争论,火山岩和侵入岩作为深地岩石探针能为约束地壳活动提供关键制约。应用锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和 Lu-Hf 同位素方法对柴北缘东段杂海南山地区出露的牦牛山组火山碎屑岩和侵入其中的花岗岩开展研究。锆石 U-Pb 年代学结果显示,牦牛山组火山碎屑岩的形成时代约为 423 Ma,侵入其中的花岗岩的形成时代为 370 Ma,表明火山岩喷发的年龄在晚志留世,后期侵入的花岗岩结晶年龄为晚泥盆世;锆石 Lu-Hf 同位素结果显示,晚志留世熔结凝灰岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 -11.5~-8.3,其两阶段 Hf 模式年龄集中在 1945~2133 Ma,显示火山岩主要源于古老地壳物质熔融;而晚泥盆世侵入的花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在 3.9~9.1,其两阶段的 Hf 模式年龄集中在 792~1118 Ma,显示花岗岩主要源于中—新元古代地壳物质的部分熔融。结合对区域地质、岩石学等资料的综合分析认为,晚志留世—早泥盆世时期,大陆深俯冲导致的强烈造山作用造成柴北缘地壳发生明显加厚,加厚的欧龙布鲁克地壳基底发生部分熔融,形成了该时期的火山岩;晚泥盆世时期,加厚地壳的拆沉作用导致软流圈地幔上涌,引发区域地壳伸展,上涌的软流圈物质与地壳相互作用并发生部分熔融作用。因此区域牦牛山组形成时代跨度较大,不能笼统地用牦牛山组代表造山结束的时限,晚泥盆世岩浆岩的出现才预示着柴北缘地区进入显著的地壳伸展状态。

关键词: 青藏高原;晚古生代;柴达木盆地北缘;火山-侵入岩;构造背景

中图分类号: P574; P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2024) 03-0506-13

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023178

0 引言

青藏高原北部的阿尔金-祁连-柴北缘早古生代造山活动强烈,大量早古生代的蛇绿岩、弧岩浆岩、俯冲-增生杂岩等的厘定基本确定了早古生代时期原特提斯洋从扩张、俯冲到闭合的完整构造演化过程(杨经绥等, 2001; 辛后田等, 2006; 张建新等, 2007a)。从晚古生代开始,青藏高原北缘的地体开始进入古特提斯洋构造域,其中晚泥盆世被认为是构造体制转换的关键时期,祁连、柴北缘、东昆仑等地广泛发育的晚泥盆世陆相磨拉石建造标志着早古生代造山的结束(夏文静等, 2014; 冯乔等, 2015; 寇贵存等, 2017; 李建兵等, 2017)。一些学者指出,用磨拉石建造来限定造山结束的时间需明确其是否属于(周缘)前陆盆地(侯泉林等, 2018),事实上,青藏高原北部地体内晚古生代盆地是否属于(周缘)前陆盆地尚存在争议(李峰等, 2006; 陈守建等, 2007; 李瑞保等, 2012; 夏文静等, 2014; 孙娇鹏等, 2015)。大量的锆石年代学数据揭示,原来被定义为晚泥盆世的牦牛山组磨拉石火山-沉积岩建

造,其时代跨度更大(陆露等, 2010; 张耀玲等, 2010),柴达木盆地南缘东昆仑一带牦牛山组最早的火山喷发时代为晚志留世(陆露等, 2010);柴达木地区牦牛山组火山岩的锆石年代学分析则显示其主要为早—中泥盆世喷发(冯乔等, 2015; 张耀玲等, 2018)。另外,有些学者对牦牛山组内沉积岩的碎屑锆石年代学分析及物源研究揭示了古生代 560~360 Ma 的年龄分布区间,且最年轻的碎屑锆石年龄为 365 Ma,认为牦牛山组的形成时代为晚泥盆世(张春宇等, 2019);而祁连地区老君山砾岩和西秦岭大草滩群也主要沉积在中、晚泥盆世(闫臻等, 2002, 2007)。牦牛山组形成时代的差异造成了对区域上早古生代造山垮塌时间认识上的分歧。一些学者认为,整个柴北缘自 420 Ma 起从挤压转为板内伸展,造山带在该时期已经开始垮塌(张春宇等, 2019);另一部分学者则认为,中—晚泥盆世时期柴北缘才进入显著的地壳伸展状态,造山带于此时才全面垮塌(刘彬等, 2013)。因此,进一步确定牦牛山组的时代及其成因背景对于理解青藏高原北部地体从原特提斯到古特提斯的构造转换过程具有重要意义。

文章针对柴北缘东段地区牦牛山组下部火山岩和侵入其中的花岗岩开展了同位素年代学和 Hf 同位素研究, 结合近年来牦牛山组相关的年代学、地球化学和同位素研究结果, 对牦牛山组的形成时代及其所代表的构造意义进行探讨, 以期能为进一步约束青藏高原北部地体从原特提斯到古特提斯的演化过程提供关键制约。

1 区域地质特征

柴达木盆地位于青藏高原北部, 盆地北缘、南缘、西缘分别被祁连山、东昆仑山和阿尔金山所围限, 是一个巨大的中—新生代含油气盆地。柴达木盆地北缘(柴北缘)地区处在盆山结合部位, 广泛出露前寒武纪至新生代的岩石记录, 一直是研究的重点(图 1)。以柴北缘断裂和宗务隆断裂为界, 柴北缘从北往南可以划分为柴达木地块、柴北缘早古生代蛇绿混杂带、欧龙布鲁克微地块、宗务隆构造带等多个相对独立的构造单元(Song et al., 2014; 高万里等, 2019)。柴达木地块主体被新生代沉积所覆盖, 出露在盆地南缘的金水口群指示柴达木地块形成于中元古代时期(陈宣华等, 2011; 陈有斨等, 2011); 柴北缘早古生代蛇绿混杂带广泛出露蛇绿

混杂岩、岛弧火山岩和超高压变质岩, 代表早古生代俯冲—碰撞带(张建新等, 2007b; Song et al., 2014); 欧龙布鲁克微地块也称全吉地块, 具有新太古代—中元古代结晶基底和新元古代至古生代的盖层沉积(陈能松等, 2007); 宗务隆构造带属于晚古生代发育在祁连和柴达木统一基底上的裂陷槽(裂谷; 彭渊等, 2016, 2018)。柴北缘前寒武系基底岩石分别记录了古元古代哥伦比亚超大陆和新元古代罗迪尼亚超大陆汇聚—裂解阶段的构造—岩浆事件(郝国杰等, 2004; 孟繁聪等, 2005), 早古生代时期柴北缘地区卷入了冈瓦纳大陆北部原特提斯构造域的洋陆转换过程, 形成了一条著名的超高压变质带(王惠初等, 2003; 宋述光等, 2004)。早古生代造山运动结束之后, 柴北缘地区开始转入晚古生代相对的构造稳定时期(刘永江等, 2012; 陈世悦等, 2016), 以牦牛山组为代表的火山—沉积建造普遍以角度不整合覆盖在前泥盆系地层之上(李荣社等, 2007; 张雪亭等, 2007), 祁连和东昆仑地区亦可见到相应的地层沉积特征(夏文静等, 2014)。随后, 经历了古特提斯洋的扩张、俯冲过程, 随着早中生代古特提斯洋的闭合, 柴北缘地区进入晚中生代陆内盆地演化阶段, 至新生代沉积了巨厚的陆缘碎屑, 形成了现今所见的中—新生代盆地。

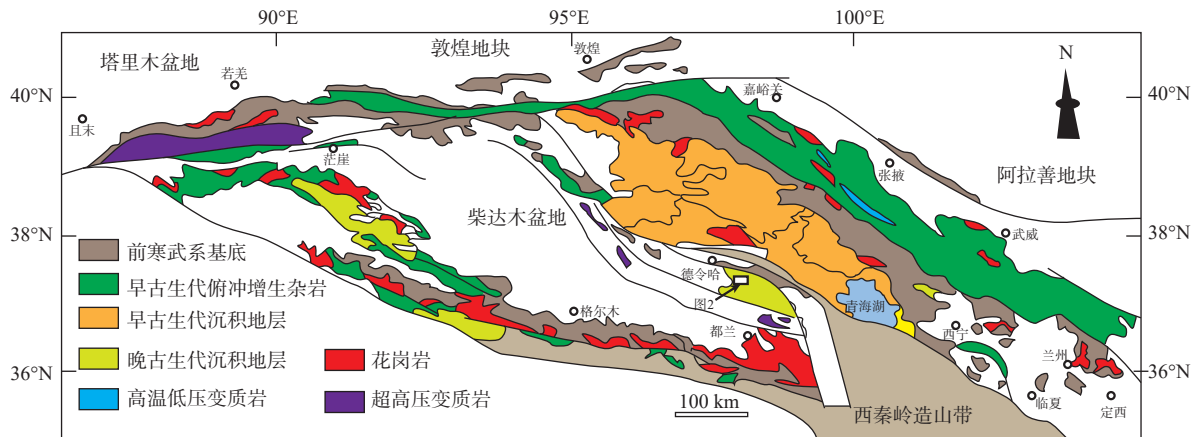


图 1 柴达木盆地北缘大地构造简图(据 Zhang et al., 2017a 修改)

Fig. 1 Simplified tectonic map of the northern margin of the Qaidam Basin (modified after Zhang et al., 2017a)

旺尕秀地区位于柴达木盆地北缘东段, 其构造位置介于欧龙布鲁克微地块和早古生代超高压变质带之间, 该地区出露少量的元古代达肯达坂群片麻岩、斜长角闪岩、大理岩等, 缺失震旦系及下古生界, 主要出露上古生界泥盆系牦牛山组火山—碎屑岩, 石炭系克鲁克组至扎布扎尕秀组海相—海陆交互碳酸盐岩以及少量的侏罗纪—白垩纪的陆缘碎屑岩。牦牛山组向东与乌兰县牦牛山地区

的牦牛山组相连, 其岩石组合特征与牦牛山地区基本一致(张耀玲等, 2018)。下部为一套陆相的粗碎屑岩组合, 上部为一套中酸性火山岩组合, 该套地层创立于 1958 年, 最初指分布在柴北缘东段牦牛山、西段赛什腾山地区的火山—沉积建造(青海省地质矿产局, 1991)。随后, 青海省地质矿产局(1997)将埃姆尼克山一带牦牛山组定义为一套海陆交互沉积岩夹基性—中酸性火山岩组合。在柴达木

盆地南缘, 牦牛山组沉积建造与牦牛山地区相似, 沉积厚度略有差异。目前仅依据柴达木盆地周缘一带的植物化石资料, 将牦牛山组的时代暂定为晚泥盆世(张耀玲等, 2018)。

2 样品特征

文章采集样品位于柴北缘祁连山一带, 大地

构造位置处在欧龙布鲁克微地块之上。该地区牦牛山组下部为紫红色—灰紫色砾岩、砂砾岩夹粉砂岩, 砾石磨圆、分选较差, 砾径大小不一; 上部为灰绿—灰紫色流纹岩、英安岩、流纹质凝灰岩和少量基性火山岩。其中样品采集地位于火山岩段的下部(图 2), 样品 NQC021-1 的岩性为流纹质熔结凝灰岩, 样品 NQC022-1 采集在火山岩附近, 岩性为中细粒二长花岗岩, 野外可见花岗岩侵入火山碎屑岩中

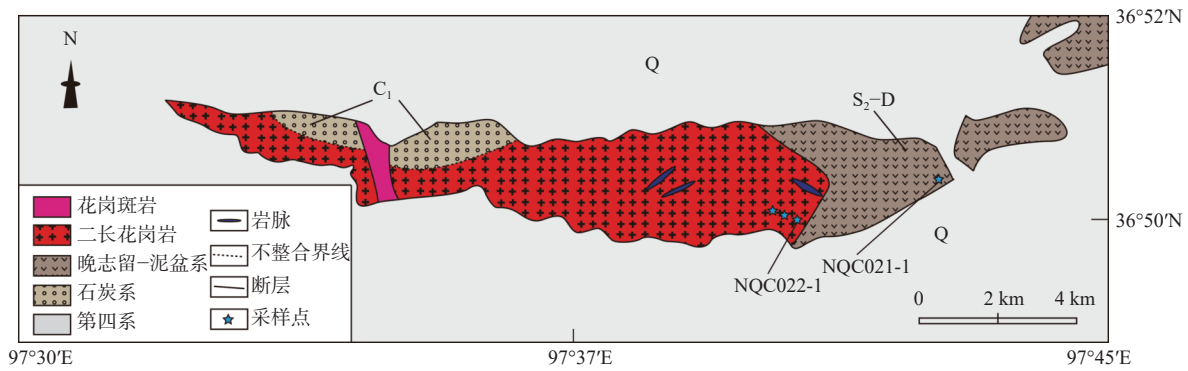
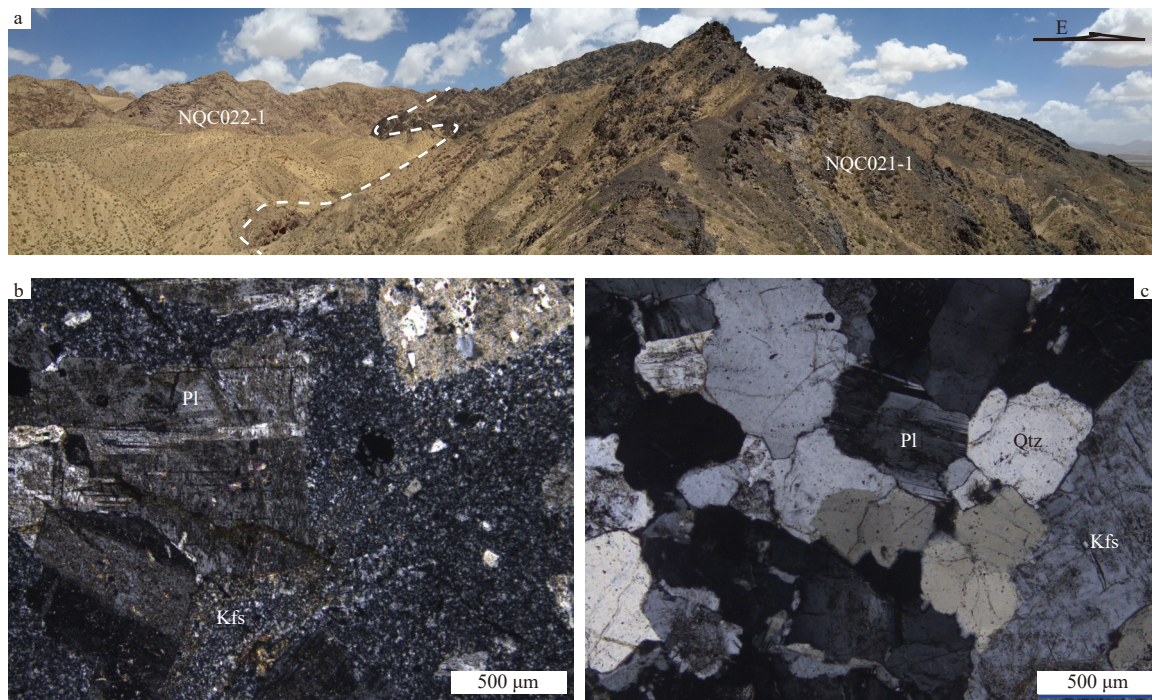


图 2 旺尕秀南牦牛山组火山岩及花岗岩地质略图

Fig. 2 Geological sketch map of the volcanic rocks and granites of the Maoniushan Formation in southern Wanggaxiu



Pl—斜长石; Qtz—石英; Kfs—钾长石

a—野外宏观接触关系; b—火山岩显微镜下特征; c—花岗岩显微镜下特征

图 3 旺尕秀南火山岩及侵入岩野外及镜下照片

Fig. 3 Field and microscopic photos of volcanic rocks and intrusive rocks in southern Wanggaxiunan

(a) Field macroscopic contact relationships of volcanic rocks and granites; (b) Microscopic characteristics of volcanic rocks; (c) Microscopic characteristics of granites

Pl—plagioclase; Qtz—quartz; Kfs—K-feldspar

(图 3a); 流纹质熔结凝灰岩主要由火山角砾和凝灰物组成。火山角砾为棱角状流纹岩和斜长石晶屑, 凝灰物为晶屑、塑性玻屑和岩屑, 晶屑以棱角状斜长石、钾长石为主, 岩屑为棱角状流纹岩(图 3b); 二长花岗岩中钾长石和斜长石含量各占约 35%, 石英含量 25%, 其余为锆石、磷灰石、榍石等副矿物(图 3c)。

3 分析方法

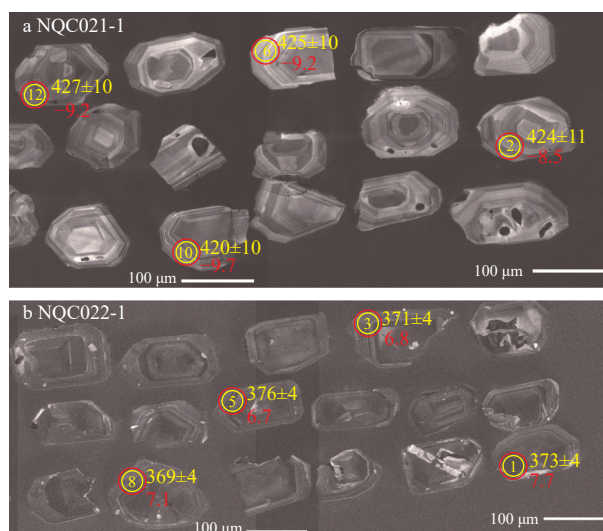
将 2 个样品的锆石颗粒按照常规方法分选, 在双目镜下挑纯并粘在载玻片上制作成样品靶, 对靶上的样品进行透、反射光照相以及阴极发光照相(CL; 图 4)。完成照相的样品在武汉上谱分析科技有限责任公司开展锆石 U、Th 和 Pb 同位素测量及定年。采用的仪器为激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS), ICP-MS 型号为 Agilent 7700e, 激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司的 GeolasPro 激光剥蚀仪, 激光剥蚀过程中采用氦气(He)作载气、氩气(Ar)为补偿气, 激光剥蚀系统配置有信号平滑装置(Hu et al., 2015), 分析中采用的激光束斑和频率分别为 30 μm 和 5 Hz, 具体的仪器参数和详细的分析流程见 Zong et al.(2017)。U-Pb 同位素定年处理中采用锆石标样 91500 和玻璃标样 NIST610 作外标进行同位素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20~30 s 空白信号和 50 s 样品信号。采用软件 ICPMSDataCal 对分析数据进行离线处理(Liu et al., 2008), 锆石年龄计算采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2001)完成。

对已经完成 U-Pb 年龄分析的锆石进行 Hf 同位素分析, 测试分析在自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室完成。分析使用的仪器为 Neptune 多接受等离子质谱仪和 Newwave UP213 紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS)。详细的仪器及分析流程见侯可军等(2007)。实验过程中采用 He 作为剥蚀物质载气, 剥蚀直径 55 μm , 测定时采用锆石标样 CJ1 作为参考物质。分析过程中锆石标样 CJ1 的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 加权平均值为 0.282015 ± 28 (2σ , $n=10$), 与文献报道值在误差范围内完全一致。

4 测试结果

4.1 年代学结果

熔结凝灰岩样品(NQC021-1)中的锆石多为短



黄色圈为锆石 U-Pb 测点, 红色圈为锆石 Hf 测点

a—火山岩 NQC021-1 锆石 CL 图像; b—花岗岩 NQC022-1 锆石 CL 图像

图 4 火山岩和花岗岩的锆石阴极发光图 (CL)

Fig. 4 Zircon cathodoluminescence (CL) images of volcanic rocks and granites

(a) Zircon CL image of volcanic rock sample NQC021-1; (b) Zircon CL image of granite sample NQC022-1

The yellow circles represent zircon U-Pb sites, and the red circles represent zircon Hf sites.

柱状晶体, 长宽比为 1:1 至 1.5:1, 颗粒大小集中在 80~100 μm , Th/U 分布在 0.53~2.40, 锆石的 CL 图像显示典型的振荡环带结构, 表明其为岩浆成因的锆石(图 4)。选取样品中 CL 图像清晰的 30 颗锆石开展 U-Pb 同位素分析, 详细的测试结果见表 1。在年龄谐和曲线上(图 5), 28 个测点全部落在协和曲线或者临近谐和曲线, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分布在 404~464 Ma, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 423 ± 5 Ma (MSWD=1.3), 代表了火山岩形成的年龄。

二长花岗岩样品(NQC022-1)中的锆石也主要为短柱状晶体, 长宽比为 1:1 至 1.2:1, 颗粒大小约为 80~120 μm , 锆石的 Th/U 介于 0.60~1.14, 属于典型的岩浆成因锆石(图 4)。对该岩石样品的 24 颗锆石边部进行了 U-Pb 同位素分析, 测试结果见表 1 和图 5。锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄分布在 333~394 Ma, 其中落在谐和曲线上 18 个测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权平均年龄为 370 ± 2 Ma (MSWD=1.03), 代表岩体的结晶年龄。

4.2 Hf 同位素结果

对已进行锆石 U-Pb 测年的火山岩样品(NQC021-1)的 24 颗锆石和花岗岩样品(NQC022-1)

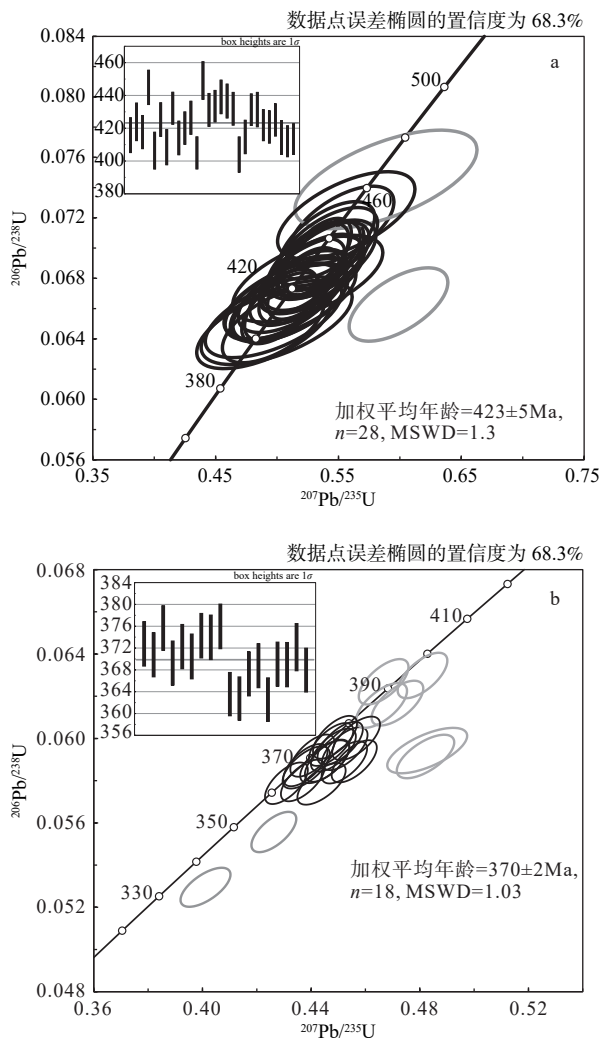
表1 样品锆石U-Pb年代学分析结果

Table 1 U-Pb chronological analysis results of zircon samples

样品点	Th/ $\times 10^{-6}$	U/ $\times 10^{-6}$	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
样品 NQC021-1															
NQC021-1.1	117	104	1.12	0.0555	0.0039	0.5105	0.0355	0.0667	0.0018	434	149	419	24	416	11
NQC021-1.2	71	82	0.86	0.0560	0.0044	0.5251	0.0403	0.0680	0.0019	452	164	429	27	424	11
NQC021-1.3	136	166	0.82	0.0555	0.0031	0.5121	0.0289	0.0670	0.0017	431	122	420	19	418	10
NQC021-1.4	119	147	0.81	0.0561	0.0029	0.5528	0.0280	0.0715	0.0017	455	109	447	18	445	10
NQC021-1.5	66	77	0.85	0.0557	0.0046	0.4997	0.0406	0.0651	0.0018	439	174	412	27	407	11
NQC021-1.6	117	124	0.94	0.0561	0.0030	0.5282	0.0283	0.0682	0.0017	458	116	431	19	425	10
NQC021-1.7	111	145	0.77	0.0551	0.0041	0.4972	0.0367	0.0654	0.0018	416	159	410	25	409	11
NQC021-1.8	158	158	1.00	0.0562	0.0023	0.5374	0.0220	0.0694	0.0016	459	88	437	15	432	10
NQC021-1.9	208	146	1.42	0.0557	0.0034	0.5094	0.0313	0.0664	0.0017	439	132	418	21	414	10
NQC021-1.10	150	140	1.07	0.0557	0.0028	0.5173	0.0261	0.0674	0.0016	440	109	423	17	420	10
NQC021-1.11	70	89	0.78	0.0573	0.0048	0.5887	0.0489	0.0745	0.0022	502	176	470	31	464	13
NQC021-1.12	86	117	0.74	0.0561	0.0028	0.5288	0.0266	0.0684	0.0017	455	108	431	18	427	10
NQC021-1.13	107	133	0.80	0.0556	0.0031	0.4969	0.0273	0.0649	0.0016	435	119	410	19	405	10
NQC021-1.14	90	110	0.81	0.0559	0.0037	0.5564	0.0369	0.0722	0.0019	448	143	449	24	449	11
NQC021-1.15	204	232	0.88	0.0563	0.0026	0.5373	0.0249	0.0692	0.0017	464	100	437	16	431	10
NQC021-1.16	672	279	2.40	0.0556	0.0019	0.5329	0.0182	0.0696	0.0016	434	72	434	12	434	10
NQC021-1.17	109	140	0.78	0.0556	0.0026	0.5408	0.0256	0.0705	0.0017	437	101	439	17	439	10
NQC021-1.18	92	130	0.71	0.0560	0.0028	0.5413	0.0268	0.0701	0.0017	453	106	439	18	437	10
NQC021-1.19	117	112	1.05	0.0556	0.0025	0.5315	0.0240	0.0693	0.0017	437	97	433	16	432	10
NQC021-1.20	69	77	0.90	0.0548	0.0041	0.4891	0.0360	0.0647	0.0018	405	158	404	25	404	11
NQC021-1.21	50	95	0.53	0.0550	0.0033	0.5038	0.0304	0.0665	0.0017	411	129	414	21	415	10
NQC021-1.22	162	184	0.88	0.0555	0.0020	0.5297	0.0190	0.0692	0.0016	432	76	432	13	431	10
NQC021-1.23	107	119	0.90	0.0562	0.0031	0.5364	0.0291	0.0692	0.0017	459	117	436	19	432	10
NQC021-1.24	134	176	0.76	0.0559	0.0020	0.5214	0.0192	0.0677	0.0016	448	78	426	13	422	9
NQC021-1.25	89	122	0.73	0.0560	0.0025	0.5212	0.0237	0.0675	0.0016	454	98	426	16	421	10
NQC021-1.26	82	115	0.72	0.0555	0.0024	0.5212	0.0225	0.0682	0.0016	431	93	426	15	425	10
NQC021-1.27	81	113	0.71	0.0558	0.0034	0.5110	0.0310	0.0664	0.0017	444	130	419	21	415	10
NQC021-1.28	155	132	1.18	0.0656	0.0029	0.5989	0.0265	0.0663	0.0016	792	90	477	17	414	10
NQC021-1.29	89	93	0.96	0.0553	0.0023	0.5032	0.0210	0.0660	0.0016	423	89	414	14	412	9
NQC021-1.30	96	126	0.76	0.0551	0.0021	0.5033	0.0196	0.0663	0.0016	417	83	414	13	414	9
样品 NQC022-1															
NQC022-1.1	600	824	0.73	0.0551	0.0012	0.4523	0.0056	0.0595	0.0007	416	45	379	4	373	4
NQC022-1.2	600	548	1.09	0.0554	0.0012	0.4717	0.0063	0.0617	0.0007	430	47	392	4	386	4
NQC022-1.3	683	971	0.70	0.0539	0.0011	0.4404	0.0054	0.0592	0.0007	368	46	371	4	371	4
NQC022-1.4	420	622	0.67	0.0549	0.0012	0.4659	0.0062	0.0616	0.0007	407	47	388	4	385	4
NQC022-1.5	538	751	0.72	0.0552	0.0012	0.4565	0.0058	0.0600	0.0007	418	46	382	4	376	4
NQC022-1.6	372	579	0.64	0.0554	0.0012	0.4810	0.0060	0.0630	0.0007	427	46	399	4	394	4
NQC022-1.7	329	550	0.60	0.0540	0.0012	0.4667	0.0060	0.0627	0.0007	370	47	389	4	392	4
NQC022-1.8	744	927	0.80	0.0548	0.0011	0.4459	0.0054	0.0590	0.0007	406	46	374	4	369	4
NQC022-1.9	709	986	0.72	0.0547	0.0011	0.4482	0.0055	0.0595	0.0007	398	46	376	4	372	4
NQC022-1.10	790	805	0.98	0.0549	0.0013	0.4010	0.0061	0.0530	0.0006	408	50	342	4	333	4
NQC022-1.11	286	442	0.65	0.0591	0.0013	0.4821	0.0070	0.0592	0.0007	570	48	400	5	371	4
NQC022-1.12	883	1035	0.85	0.0547	0.0011	0.4506	0.0055	0.0598	0.0007	398	46	378	4	374	4
NQC022-1.13	863	983	0.88	0.0543	0.0011	0.4473	0.0054	0.0597	0.0007	383	46	375	4	374	4
NQC022-1.14	1039	1051	0.99	0.0556	0.0012	0.4262	0.0055	0.0556	0.0006	436	46	361	4	349	4
NQC022-1.15	1071	1221	0.88	0.0542	0.0011	0.4487	0.0054	0.0601	0.0007	378	46	376	4	376	4
NQC022-1.16	943	1015	0.93	0.0546	0.0011	0.4369	0.0053	0.0580	0.0007	396	46	368	4	364	4

续表 1

样品点	Th/ $\times 10^{-6}$	U/ $\times 10^{-6}$	Th/U	同位素比值						年龄/Ma					
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
NQC022-1.17	753	1015	0.74	0.0540	0.0011	0.4308	0.0052	0.0579	0.0007	370	46	364	4	363	4
NQC022-1.18	618	736	0.84	0.0542	0.0012	0.4381	0.0057	0.0586	0.0007	378	47	369	4	367	4
NQC022-1.19	710	894	0.79	0.0557	0.0012	0.4522	0.0055	0.0589	0.0007	439	45	379	4	369	4
NQC022-1.20	715	993	0.72	0.0556	0.0012	0.4438	0.0059	0.0579	0.0007	437	47	373	4	363	4
NQC022-1.21	755	992	0.76	0.0561	0.0012	0.4558	0.0055	0.0589	0.0007	455	45	381	4	369	4
NQC022-1.22	649	737	0.88	0.0548	0.0012	0.4449	0.0060	0.0589	0.0007	403	47	374	4	369	4
NQC022-1.23	171	150	1.14	0.0589	0.0016	0.4825	0.0097	0.0594	0.0007	562	56	400	7	372	4
NQC022-1.24	893	870	1.03	0.0540	0.0011	0.4378	0.0054	0.0588	0.0007	373	46	369	4	368	4



a—NQC021-1 熔结凝灰岩样品锆石 U-Pb 谱和曲线；b—NQC022-1 二长花岗岩锆石 U-Pb 谱和曲线

图 5 锆石 U-Pb 谱和曲线

Fig. 5 Concordia plots of zircon U-Pb analysis

(a) Concordia plot of zircon U-Pb analysis for the NQC021-1 welded tuff sample; (b) Concordia plot of zircon U-Pb analysis for the NQC022-1 granite sample

的 23 颗锆石进行了 Lu-Hf 同位素分析, 分析结果见表 2 和图 6。

熔结凝灰岩样品(NQC021-1) Lu-Hf 同位素分析结果显示, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 $-11.5 \sim -8.3$, 平均值为 -9.5 , 其两阶段 Hf 模式年龄值 (T_{DM}^{C}) 集中在 $1945 \sim 2133$ Ma, 显示火山岩样品主要源于古老地壳物质的部分熔融。

二长花岗岩样品(NQC022-1) Lu-Hf 同位素分析结果显示, 锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 $3.9 \sim 9.1$, 平均值为 6.7 , 其两阶段 Hf 模式年龄值 (T_{DM}^{C}) 集中在 $792 \sim 1118$ Ma, 显示二长花岗岩主要源于中一新元古代地壳物质。

5 讨论

5.1 牦牛山组时代

牦牛山组长期以来被视为柴北缘早古生代造山结束的标志, 在柴达木-东昆仑-祁连及西秦岭一带均有相似的沉积组合, 其下段的粗碎屑沉积具有磨拉石沉积特征, 早期主要根据地层接触关系和一些零星的化石资料将其划为上泥盆统(青海省地质矿产局, 1991)。随后, 对该层位下部碎屑岩段和上部火山岩段开展了大量的年代学分析工作, 牦牛山组下部磨拉石建造中的砂岩碎屑锆石峰值分布在 $429 \sim 442$ Ma, 表明锆石主要来自晚奥陶世—中志留世的物源, 其中最年轻锆石年龄为 407.9 Ma(岩浆成因锆石), 限定牦牛山组下部碎屑岩的沉积下限时代应不早于早泥盆世末期(冯乔等, 2015); 钱涛等(2023)对牦牛山组底部碎屑岩夹层中的凝灰岩的分析获得了 396 Ma 的年龄, 显示牦牛山组下段沉积在早泥盆世, 而碎屑锆石年龄谱也揭示牦牛山组主要源于南部的早古生代造山带。寇贵存(2017)对埃姆尼克山地区牦牛山组火山岩的年代学分析表明, 埃

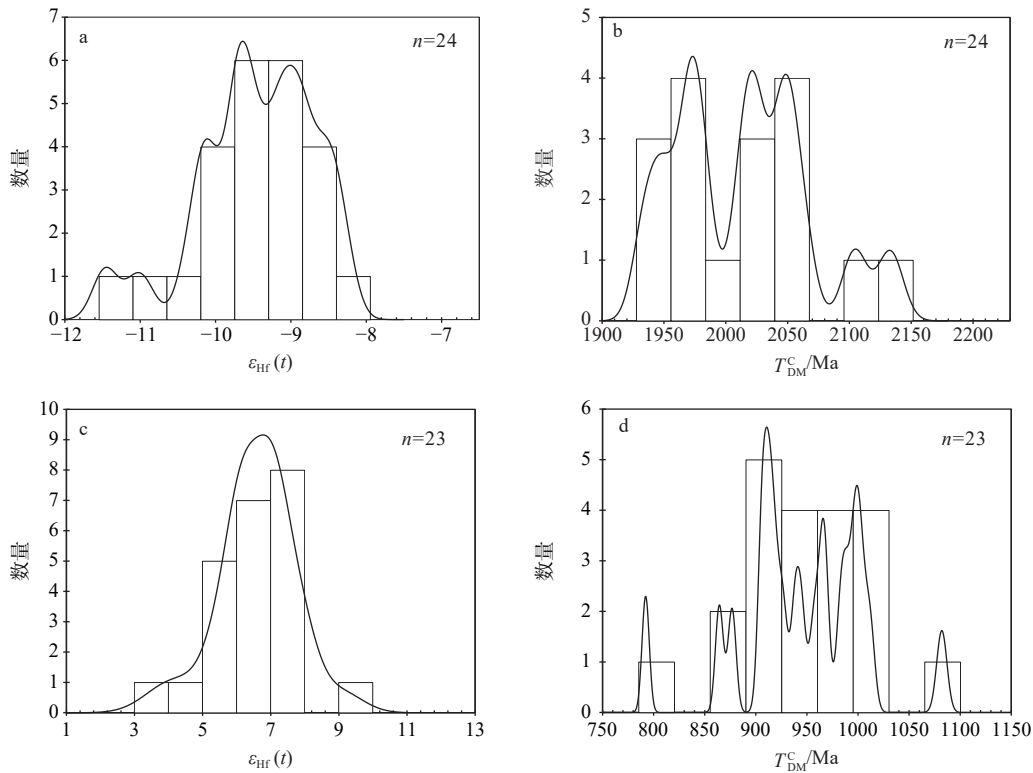
表2 样品锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 2 Lu-Hf isotopic analysis results of zircon samples

样品	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	年龄/Ma	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}/Ma	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	f_s
样品 NQC021-1												
NQC021-1-01	0.034248	0.000594	0.001129	0.000019	0.282194	0.000009	423	0.282185	-11.5	1497	2133	-0.97
NQC021-1-02	0.033994	0.000152	0.001091	0.000004	0.282277	0.000010	423	0.282268	-8.5	1379	1947	-0.97
NQC021-1-03	0.047536	0.000710	0.001466	0.000019	0.282236	0.000010	423	0.282224	-10.1	1451	2045	-0.96
NQC021-1-04	0.027696	0.000124	0.000907	0.000002	0.282247	0.000012	423	0.282240	-9.5	1414	2011	-0.97
NQC021-1-05	0.035441	0.000076	0.001206	0.000005	0.282207	0.000010	423	0.282198	-11.0	1481	2104	-0.96
NQC021-1-06	0.044461	0.000392	0.001440	0.000012	0.282260	0.000010	423	0.282249	-9.2	1415	1991	-0.96
NQC021-1-07	0.029350	0.000523	0.000956	0.000015	0.282277	0.000009	423	0.282270	-8.5	1374	1945	-0.97
NQC021-1-08	0.035990	0.000026	0.001163	0.000002	0.282267	0.000011	423	0.282258	-8.9	1396	1971	-0.96
NQC021-1-09	0.041318	0.000346	0.001328	0.000009	0.282243	0.000010	423	0.282232	-9.8	1436	2028	-0.96
NQC021-1-10	0.050256	0.000847	0.001622	0.000028	0.282247	0.000010	423	0.282234	-9.7	1441	2023	-0.95
NQC021-1-11	0.031623	0.000296	0.001050	0.000008	0.282267	0.000010	423	0.282258	-8.9	1392	1970	-0.97
NQC021-1-12	0.027814	0.000151	0.000923	0.000004	0.282255	0.000010	423	0.282248	-9.2	1403	1993	-0.97
NQC021-1-13	0.041611	0.000395	0.001372	0.000011	0.282266	0.000011	423	0.282255	-9.0	1404	1976	-0.96
NQC021-1-14	0.038453	0.000236	0.001275	0.000009	0.282276	0.000011	423	0.282266	-8.6	1388	1953	-0.96
NQC021-1-15	0.039464	0.000177	0.001343	0.000009	0.282255	0.000011	423	0.282244	-9.4	1420	2001	-0.96
NQC021-1-16	0.062720	0.001202	0.002001	0.000039	0.282275	0.000010	423	0.282259	-8.8	1415	1967	-0.94
NQC021-1-17	0.031225	0.000069	0.001036	0.000005	0.282248	0.000009	423	0.282240	-9.5	1417	2010	-0.97
NQC021-1-18	0.029106	0.000137	0.000965	0.000003	0.282243	0.000009	423	0.282235	-9.7	1422	2022	-0.97
NQC021-1-19	0.031030	0.000302	0.001068	0.000011	0.282283	0.000009	423	0.282275	-8.3	1369	1933	-0.97
NQC021-1-20	0.036392	0.000577	0.001196	0.000016	0.282233	0.000009	423	0.282223	-10.1	1445	2047	-0.96
NQC021-1-21	0.041738	0.000511	0.001393	0.000015	0.282247	0.000009	423	0.282236	-9.6	1432	2018	-0.96
NQC021-1-22	0.038010	0.000197	0.001233	0.000004	0.282226	0.000010	423	0.282216	-10.3	1455	2063	-0.96
NQC021-1-23	0.029763	0.000130	0.000993	0.000006	0.282260	0.000009	423	0.282252	-9.1	1399	1984	-0.97
NQC021-1-24	0.038654	0.000512	0.001306	0.000012	0.282232	0.000009	423	0.282222	-10.2	1450	2051	-0.96
样品 NQC022-1												
NQC022-1-01	0.103309	0.000606	0.003111	0.000014	0.282782	0.000013	370	0.28276	7.7	706	877	-0.91
NQC022-1-02	0.083531	0.000728	0.002551	0.000020	0.282785	0.000013	370	0.28277	8.0	691	861	-0.92
NQC022-1-03	0.115297	0.000260	0.003376	0.000008	0.282756	0.000013	370	0.28273	6.8	750	938	-0.90
NQC022-1-04	0.077607	0.000398	0.002522	0.000009	0.282722	0.000018	370	0.28270	5.7	783	1003	-0.92
NQC022-1-05	0.090154	0.000649	0.002648	0.000010	0.282749	0.000012	370	0.28273	6.7	746	945	-0.92
NQC022-1-06	0.073166	0.000918	0.002312	0.000042	0.282717	0.000016	370	0.28270	5.6	786	1012	-0.93
NQC022-1-07	0.054888	0.000462	0.001788	0.000012	0.282720	0.000013	370	0.28271	5.9	770	996	-0.95
NQC022-1-08	0.129764	0.000560	0.003796	0.000018	0.282767	0.000012	370	0.28274	7.1	742	920	-0.89
NQC022-1-09	0.116006	0.001672	0.003686	0.000060	0.282747	0.000018	370	0.28272	6.3	771	965	-0.89
NQC022-1-10	0.098911	0.000872	0.002868	0.000021	0.282767	0.000012	370	0.28275	7.3	723	906	-0.91
NQC022-1-11	0.090238	0.000438	0.002785	0.000015	0.282766	0.000016	370	0.28275	7.2	723	907	-0.92
NQC022-1-12	0.119983	0.000770	0.003562	0.000028	0.282790	0.000015	370	0.28277	7.9	702	864	-0.89
NQC022-1-13	0.113965	0.000512	0.003316	0.000006	0.282766	0.000013	370	0.28274	7.1	733	915	-0.90
NQC022-1-14	0.084701	0.001645	0.002555	0.000032	0.282731	0.000011	370	0.28271	6.1	770	983	-0.92

续表 2

样品	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	2σ	年龄/Ma	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}/Ma	$T_{\text{DM}}^{\text{C}}/\text{Ma}$	f_s
NQC022-1-15	0.108632	0.000480	0.003333	0.000021	0.282676	0.000021	370	0.28265	3.9	869	1118	-0.90
NQC022-1-16	0.104501	0.000712	0.003021	0.000029	0.282741	0.000012	370	0.28272	6.3	765	968	-0.91
NQC022-1-17	0.107449	0.001432	0.003214	0.000024	0.282760	0.000014	370	0.28274	6.9	740	927	-0.90
NQC022-1-18	0.087261	0.000626	0.002681	0.000011	0.282729	0.000016	370	0.28271	6.0	775	989	-0.92
NQC022-1-19	0.073360	0.001430	0.002150	0.000023	0.282740	0.000013	370	0.28272	6.5	749	957	-0.94
NQC022-1-20	0.088215	0.000424	0.002697	0.000012	0.282725	0.000017	370	0.282706	5.8	782	999	-0.92
NQC022-1-21	0.122924	0.001106	0.003478	0.000041	0.282822	0.000018	370	0.282798	9.1	653	792	-0.90
NQC022-1-22	0.068908	0.000702	0.002339	0.000031	0.282685	0.000023	370	0.282669	4.5	832	1082	-0.93
NQC022-1-23	0.133672	0.001358	0.003873	0.000049	0.282771	0.000013	370	0.282745	7.2	737	912	-0.88



a—NQC021-1 熔结凝灰岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 频度图；b—NQC021-1 熔结凝灰岩锆石 Hf 两阶段模式年龄；c—NQC022-1 二长花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 频度图；d—NQC022-1 二长花岗岩锆石 Hf 两阶段模式年龄

图 6 锆石 Hf 同位素结果

Fig. 6 Zircon Hf isotopic composition of the samples

(a) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ frequency distribution plot of zircons from the NQC021-1 welded tuff sample; (b) Two-stage Hf model ages of zircons from the NQC021-1 welded tuff sample; (c) $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ frequency distribution plot of zircons from the NQC022-1 granodiorite sample; (d) Two-stage Hf model ages of zircons from the NQC022-1 granodiorite sample

姆尼克山地区牦牛山组形成于 374~392 Ma, 属中一晚泥盆世; 李建兵等(2017)也在埃姆尼克山地区获得了相似的结果; 张耀玲等(2018)对牦牛山组上部流纹质熔结凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄分析获得了 393~395 Ma 的年龄, 认为牦牛山组上段形成于早

泥盆世; 张春宇等(2019)等对牦牛山一带碎屑岩的锆石分析获得了最年轻锆石的年龄为 365 Ma, 显示牦牛山组的时代可能为晚泥盆世。另外, 据陆露等(2010)对东昆仑大干沟一带牦牛山组流纹岩夹层的锆石 U-Pb 年代学研究, 获得了 399~423 Ma 的定年

数据, 限定了东昆仑地区牦牛山组地层形成时间为晚志留世—早泥盆世; 张耀玲等(2010)对格尔木南牦牛山组上部火山岩中的英安岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年获得 406 Ma 的定年数据, 认为该区牦牛山组形成时代应为晚志留世—早泥盆世。此次研究在尕海南山地区首次获得了牦牛山组下部火山岩段晚志留世(423 Ma)的年龄, 结合上述牦牛山组的年代学结果, 进一步证实了原定晚泥盆世的牦牛山组具有穿时性, 可能跨越了从晚志留世(423 Ma)到晚泥盆世(365 Ma)的较长时间, 因此柴达木盆地周缘牦牛山组火山喷发可能从晚志留世已经开始活动, 并持续至晚泥盆世。其中火山岩及碎屑岩的物源来源比较复杂, 不能笼统地使用牦牛山组来限定该时期的构造背景。

5.2 构造意义

早古生代时期, 柴北缘地区经历了从大洋俯冲到大陆深俯冲的连续演化, 并形成了广为人知的超高压变质带, 一般认为从晚志留世开始柴北缘地区已经进入了大陆深俯冲阶段, 与大陆深俯冲伴随的超高压变质岩快速发生折返至上地壳, 早—中泥盆世处在造山隆升阶段 (Song et al., 2014; Wu et al., 2019), 区域上早、中泥盆世普遍缺失沉积记录, 晚泥盆世地层与前泥盆纪地层呈角度不整合关系接触。一般认为, 牦牛山组下部的粗碎屑沉积具有山前快速堆积的磨拉石特征 (孙娇鹏, 2015), 指示造山活动的结束, 牦牛山上部的火山岩段具有典型的双峰式火山特征, 是典型的裂谷早期阶段的火山—沉积组合, 这标志着造山带开始伸展垮塌。据上文所述, 区域上牦牛山组的形成时代跨度较大, 特别是牦牛山组内晚志留世—早泥盆世大量火山岩年龄的报道, 能否代表这一时期区域已经进入伸展状态值得怀疑 (Chen et al., 2020)。此次研究获得的牦牛山组上部火山岩层段的锆石 U-Pb 年龄显示其形成于晚志留世(423 Ma), 这与陆露等(2010)在东昆仑牦牛山组下部碎屑岩夹层中的火山岩年龄相同, 火山岩锆石的 Hf 同位素分析结果显示其源于古老陆壳物质, 主体应该源于欧龙布鲁克陆壳基底物质的部分熔融。这表明, 晚志留世—早泥盆世时期, 柴北缘地区仍处在由大陆俯冲诱发的火山活动阶段, 尚未发生岩石圈根全面垮塌; 另外, 侵入牦牛山组的花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 370 Ma, 显示其形成时间为晚泥盆世, 这与柴达木盆地西部的牛鼻子梁地区侵位闪长岩及镁铁质岩 (钱兵等, 2015; 韩建军

等, 2020)、柴北缘中段一系列晚泥盆世中酸性岩浆岩 (吴才来等, 2007)、以及柴北缘东段都兰地区晚泥盆花岗岩侵位时代一致, 均具有造山后岩浆岩的显著特征 (Wang et al., 2014), 这些火成岩均显示高硅、富铝, 具高钾钙碱性岩浆岩的特征, 微量元素及同位素特征显示其岩石源区明显有亏损地幔物质的参与, 结合此次研究的花岗岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 3.9~9.1, 两阶段 Hf 模式年龄集中在中—新元古代等特点, 进一步说明, 晚泥盆世时期, 伴随岩石圈拆沉作用, 造山带岩石圈根已全面垮塌, 上涌的软流圈物质诱发并参与了地壳物质的部分熔融过程, 形成了该阶段广泛而强烈的岩浆活动。因此, 晚泥盆世时期区域才进入普遍的后造山伸展阶段。随着地壳的持续伸展, 在东昆仑、柴达木一带形成了初始裂谷阶段的火山—沉积建造 (牦牛山组上部), 在欧龙布鲁克基底中出现了源于软流圈地幔的早石炭世辉长岩脉 (庄玉军等, 2019), 这与整个区域上古特提斯洋初始扩张是同步的。进入石炭纪, 地壳持续拉张使该区发生明显的海侵作用, 整个柴达木及周缘处于滨浅海或海陆交互环境, 形成了以陆缘碎屑沉积为主的城墙沟组和浅海相沉积的怀头他拉组及海陆交互的克鲁克组 (孙娇鹏等, 2016)。因此, 晚泥盆世, 柴达木地区才进入早古生代造山带的垮塌和地壳的显著拉张阶段。

6 结论

柴北缘构造带东段尕海南山地区原定为泥盆纪的火山岩和侵入其中的花岗岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究结果表明, 原定牦牛山组熔结凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄为 423 Ma, 而侵入其中的花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 370 Ma, 显示火山岩喷发的年龄在晚志留世, 后期侵入的花岗岩结晶年龄在晚泥盆世; 锆石 Lu-Hf 同位素结果表明, 晚志留世熔结凝灰岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值集中在 -11.5 至 -8.3, 其两阶段 Hf 模式年龄集中在 1945~2133 Ma 之间, 表明熔结凝灰岩主要源于古老地壳物质熔融; 而后期侵入的花岗岩的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值分布在 3.9~9.1 之间, 两阶段的 Hf 模式年龄分布在 792~1118 Ma 之间, 显示花岗岩主要源于亏损地幔物质与地壳的混合。结合对区域地质、岩石学等资料的综合分析认为, 晚志留—早泥盆时期, 柴北缘仍处于大陆深俯冲导致的强烈造山作用阶段, 柴北缘地壳发生明显加厚, 晚志留

世火山岩可能与加厚的欧龙布鲁克地壳的熔融有关;晚泥盆世时期,加厚地壳发生拆沉作用,软流圈物质上涌,上涌的地幔物质与地壳物质相互作用并发生部分熔融,因此牦牛山组火山岩成岩时代差异较大,其中晚泥盆世火山-岩浆作用才预示柴北缘地区进入显著的地壳伸展状态。

致谢:感谢审稿专家提出的中肯意见,中国地质科学院矿产资源研究所侯可军研究员帮助进行了锆石 Hf 同位素分析,在此一并致谢。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, 1991. Special geological report of the Ministry of Geology and Mineral Resources of the People's Republic of China, regional geology, No. 24, regional geology of Qinghai Province[M]. Beijing: Geology Press. (in Chinese)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province, 1997. Stratigraphy (lithostratic) of Qinghai province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press. (in Chinese).
- CHEN J J, FU L B, WEI J H, et al, 2020. Proto-Tethys magmatic evolution along northern Gondwana: insights from Late Silurian–Middle Devonian A-type magmatism, East Kunlun Orogen, Northern Tibetan Plateau, China[J]. *Lithos*, 356-357: 105304.
- CHEN N S, WANG Q Y, CHEN Q, et al, 2007. Components and metamorphism of the basements of the Qaidam and Oulongbuluke micro-continental blocks, and a tentative interpretation of paleocontinental evolution in NW-Central China[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 43-55. (in Chinese with English abstract)
- CHEN S J, LI R S, JI W H, et al, 2007. The deposition characteristics and tectono-paleogeographic environment of Kunlun Orogenic belt in late Devonian[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(1): 44-51. (in Chinese with English abstract)
- CHEN S Y, BI M W, SUN J P, et al, 2016. Mixed sedimentary characteristics and controlling factors of Upper Paleozoic Group in Northern Qaidam Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 35(2-3): 282-292. (in Chinese with English abstract)
- CHEN X H, YIN A, GEHRELS G, et al, 2011. Chemical geodynamics of granitic Magmatism in the basement of the eastern Qaidam Basin, Northern Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 157-171. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Y X, PEI X Z, LI R B, et al, 2011. Zircon U-Pb Age of Xiaomiao formation of proterozoic in the eastern section of the East Kunlun Orogenic belt[J]. *Geoscience*, 25(3): 510-521. (in Chinese with English abstract)
- FENG Q, QIN Y, FU S T, et al, 2015. U-Pb age of detrital zircons and its geological significance from Maoniushan Formation in the Wulan County, Northern Margin of Qaidam Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 33(3): 486-499. (in Chinese with English abstract)
- GAO W L, WANG Z X, LI L L, et al, 2019. Discovery of the permian granite in Saishiteng Mountain of the northern Qaidam Basin and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(4): 816-829. (in Chinese with English abstract)
- HAN J J, SONG C Z, HE J, et al, 2020. Zircon U-Pb age, geochemical and geological characteristics of the dioritic-granitic intrusive rocks in the Nibuziliang area, northern Qaidam Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 44(1): 157-170. (in Chinese with English abstract)
- HAO G J, LU S N, WANG H C, et al, 2004. The Pre-Devonian tectonic framework in the northern margin of Qaidam basin and geological evolution of Olongbuluck palaeo-block[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 115-122. (in Chinese with English abstract)
- HOU K J, LI Y H, ZOU T R, et al, 2007. Laser ablation-MC-ICP-MS technique for Hf isotope microanalysis of zircon and its geological applications[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2595-2604. (in Chinese with English abstract)
- HOU Q L, GUO Q Q, FANG A M, 2018. Discussions on some basic problems in the research of orogenic belts concerning on flysch and molasse[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 1885-1896. (in Chinese with English abstract)
- HU Z C, ZHANG W, LIU Y S, et al, 2015. "wave" signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: application to lead isotope analysis[J]. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152-1157.
- KOU G C, FENG J W, LUO B R, et al, 2017. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the volcanic rocks from Mao-niushan Formation in Amunike area, Qinghai Province, and its geological implications[J]. *Geological Bulletin of China*, 36(2-3): 275-284. (in Chinese with English abstract)
- LI F, WU Z L, LI B Z, et al, 2006. Revision of the Tanjianshan group on the northern margin of the Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 39(3): 83-90. (in Chinese with English abstract)
- LI J B, WAN S C, LI Z H, 2017. Geological and geochemistry characteristics of volcanics in the late paleozoic maoniushan formation in amunike area of Northern Qaidam Basin[J]. *Northwestern Geology*, 50(3): 47-53. (in Chinese with English abstract)
- LI R B, PEI X Z, LI Z C, et al, 2012. Geological characteristics of Late Palaeozoic-Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 19(5): 244-254. (in Chinese with English abstract)
- LI R S, JI W H, ZHAO Z M, et al, 2007. Progress in the study of the Early Paleozoic Kunlun orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(4): 373-382. (in Chinese with English abstract)
- LIU B, MA C Q, GUO P, et al, 2013. Discovery of the middle devonian A-type granite from the Eastern Kunlun Orogen and its tectonic implications[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 38(5): 947-962. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, NEUBAUER F, LI W M, et al, 2012. Tectono-thermal events of the northern Qaidam Margin-southern Qilian Area, Western China[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(5): 1317-1329. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y S, HU Z C, GAO S, et al, 2008. *In situ* analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1-2): 34-43.
- LU L, WU Z H, HU D G, et al, 2010. Zircon U-Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1150-1158. (in Chinese with English abstract)
- LUDWIG K R, 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. A geochronological toolkit for Microsoft excel[R]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1-55.
- MENG F C, ZHANG J X, YANG J S, 2005. Tectono - thermal event of post-

- HP/UHP metamorphism in the Xitieshan area of the North Qaidam Mountains, western China: isotopic and geochemical evidence of granite and gneiss[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 45-56. (in Chinese with English abstract)
- PENG Y, MA Y S, LIU C L, et al, 2016. Geological characteristics and tectonic significance of the Indosinian granodiorites from the Zongwulong tectonic belt in North Qaidam[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(2): 206-221. (in Chinese with English abstract)
- PENG Y, ZHANG Y S, SUN J P, et al, 2018. Provenance and tectonic setting of the Zhongwunongshan group from the Zhongwunongshan structural belt and its adjacent areas in North Qaidam, China: evidence from geochemistry and detrital zircon geochronology[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(1): 126-149. (in Chinese with English abstract)
- QIAN B, ZHANG Z W, ZHANG Z B, et al, 2015. Ziron U-Pb geochronology of Niubiziliang mafic-ultramafic intrusion on the northwest margin of Qaidam Basin, Qinghai[J]. *Geology in China*, 42(3): 482-493. (in Chinese with English abstract)
- QIAN T, LI W P, GAO W L, et al, 2023. A preliminary study on post-orogenesis of the North Qaidam tectonic belt during the Early Paleozoic by provenance analysis of the Devonian sediments[J]. *Acta Geologica Sinica*, 97(3): 672-687. (in Chinese with English abstract)
- SONG S G, NIU Y L, SU L, et al, 2014. Continental orogenesis from ocean subduction, continent collision/subduction, to orogen collapse, and orogen recycling: the example of the North Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *Earth-Science Reviews*, 129: 59-84.
- SONG S G, ZHANG L F, NIU Y, et al, 2004. Early Paleozoic plate-tectonic evolution and deep continental subduction on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 23(9-10): 918-925. (in Chinese with English abstract)
- SUN J P, CHEN S Y, PENG Y, et al, 2015. Research on Northern Qaidam tectonic attributes during Devonian[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 39(2): 23-30. (in Chinese with English abstract)
- SUN J P, CHEN S Y, LIU C L, et al, 2016. Tectonic setting of Northeastern Qaidam Basin and its evolution during the Late Paleozoic: evidence from geochemical characteristics of detrital rock[J]. *Earth Science Frontiers*, 23(5): 45-55. (in Chinese with English abstract)
- WANG H C, LU S N, YUAN G B, et al, 2003. Tectonic setting and age of the "Tanjianshan Group" on the northern margin of the Qaidam basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(7): 487-493. (in Chinese with English abstract)
- WANG M J, SONG S G, NIU Y L, et al, 2014. Post-collisional magmatism: consequences of UHPM terrane exhumation and orogen collapse, N. Qaidam UHPM belt, NW China[J]. *Lithos*, 210-211: 181-198.
- WU C L, GAO Y H, WU S P, et al, 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating of granites from the Da Qaidam area in the north margin of Qaidam basin, NW China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(8): 1861-1875. (in Chinese with English abstract)
- WU C L, WU D, MATTINSON C, et al, 2019. Petrogenesis of granitoids in the Wulan area: magmatic activity and tectonic evolution in the North Qaidam, NW China[J]. *Gondwana Research*, 67: 147-171.
- XIA W J, NIU M L, YAN Z, et al, 2014. Sedimentary facies of the Maoniushan Formation in Maoniushan area along the northern margin of Qaidam Terrane[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(5): 943-955. (in Chinese with English abstract)
- XIN H T, WANG H C, ZHOU S J, 2006. Geological events and tectonic evolution of the north margin of the Qaidam Basin[J]. *Geological Survey and Research*, 29(4): 311-320. (in Chinese with English abstract)
- YAN Z, WANG Z Q, WANG T, et al, 2002. Sedimentary environment and tectonic significance of the Dacatou Group of the Western Qinling Mountains[J]. *Geological Bulletin of China*, 21(8-9): 505-515. (in Chinese with English abstract)
- YAN Z, WANG Z Q, WANG T, et al, 2007. Tectonic setting of Devonian sediments in the Qinling orogen: constraints from detrital modes and geochemistry of clastic rocks[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1023-1042. (in Chinese with English abstract)
- YANG J S, SONG S G, XU Z Q, et al, 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam early Paleozoic ultrahigh-high pressure (UHP-HP) metamorphic belt, NW China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 175-179. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG C Y, ZHAO Y, LIU J, et al, 2019. Provenance analysis of the Maoniushan Formation in the North Qaidam basin and its tectonic significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(3): 712-723. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J X, MENG F C, MATTINSON G C, 2007a. Progress, controversies and challenge of studies on South Altyn Tagh-North Qaidam HP/UHP Metamorphic belt[J]. *Geological Journal of China Universities*, 13(3): 526-545. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J X, MENG F C, YU S Y, et al, 2007b. Metamorphic history recorded in high pressure mafic granulites in the Luliangshan Mountains to the north of Qaidam Basin, northwest China: evidence from petrology and zircon SHRIMP geochronology[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 85-97. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG J X, YU S Y, MATTINSON C G, 2017. Early Paleozoic polyphase metamorphism in northern Tibet, China[J]. *Gondwana Research*, 41: 267-289.
- ZHANG X T, YANG S D, YANG Z J, 2007. The regional geology of Qinghai Province: a guide to the geological map of Qinghai Province[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- ZHANG Y L, HU D G, SHI Y R, et al, 2010. SHRIMP zircon U-Pb ages and tectonic significance of Maoniushan Formation volcanic rocks in East Kunlun orogenic belt, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 29(11): 1614-1618. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG Y L, NI J Y, SHEN Y X, et al, 2018. Zircon U-Pb ages and geological significance of volcanic rocks from Maoniushan Formation in the Northern Margin of Qaidam Basin[J]. *Geoscience*, 32(2): 329-334. (in Chinese with English abstract)
- ZHUANG Y J, GU P Y, LI P Q, et al, 2019. Geochemistry, geochronology and Hf isotopic compositions of metagabbro dykes on the northwestern margin of Oulongbuluke micro-block on the northern margin of Qaidam Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 38(11): 1801-1812. (in Chinese with English abstract)
- ZONG K Q, KLEMD R, YUAN Y, et al, 2017. The assembly of Rodinia: the correlation of early Neoproterozoic (ca. 900Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB)[J]. *Precambrian Research*, 290: 32-48.

附中文参考文献

- 陈能松, 王勤燕, 陈强, 等. 2007. 柴达木和欧龙布鲁克陆块基底的组成和变质作用及中国中西部古大陆演化关系初探[J]. *地质前缘*, 14(1): 43-55.

- 陈世悦, 毕明威, 孙娇鹏, 等. 2016. 柴北缘上古生界混合沉积特征及控制因素[J]. 地质通报, 35(2-3): 282-292.
- 陈守建, 李荣社, 计文化, 等. 2007. 昆仑造山带晚泥盆世沉积特征及构造古地理环境[J]. 大地构造与成矿学, 31(1): 44-51.
- 陈宣华, 尹安, GEHRELS G, 等. 2011. 柴达木盆地东部基底花岗岩类岩浆活动的化学地球动力学[J]. 地质学报, 85(2): 157-171.
- 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等. 2011. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石 U-Pb 年龄[J]. 现代地质, 25(3): 510-521.
- 冯乔, 秦宇, 付锁堂, 等. 2015. 柴达木盆地北缘乌兰县牦牛山组碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 沉积学报, 33(3): 486-499.
- 高万里, 王宗秀, 李磊磊, 等. 2019. 柴达木盆地北缘小赛什腾山二叠纪花岗岩的发现及其构造意义[J]. 地质学报, 93(4): 816-829.
- 韩建军, 宋传中, 何俊, 等. 2020. 柴北缘牛鼻子梁地区闪长-花岗质岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 44(1): 157-170.
- 郝国杰, 陆松年, 王惠初, 等. 2004. 柴达木盆地北缘前泥盆纪构造格架及欧龙布鲁克古陆块地质演化[J]. 地学前缘, 11(3): 115-122.
- 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. 2007. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 23(10): 2595-2604.
- 侯泉林, 郭谦谦, 方爱民. 2018. 造山带研究中有关复理石和磨拉石的几个问题[J]. 岩石学报, 34(7): 1885-1896.
- 寇贵存, 冯金炜, 罗保荣, 等. 2017. 青海阿木尼克山地区牦牛山组火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 36(2-3): 275-284.
- 李峰, 吴志亮, 李保珠, 等. 2006. 柴达木盆地北缘滩间山群新厘定[J]. 西北地质, 39(3): 83-90.
- 李建兵, 万世昌, 李镇宏. 2017. 柴北缘阿木尼克地区晚古生代牦牛山组火山岩地质地球化学特征及其地质意义[J]. 西北地质, 50(3): 47-53.
- 李荣社, 计文化, 赵振明, 等. 2007. 昆仑早古生代造山带研究进展[J]. 地质通报, 26(4): 373-382.
- 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 2012. 东昆仑东段晚古生代一中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. 地学前缘, 19(5): 244-254.
- 刘彬, 马昌前, 郭盼, 等. 2013. 东昆仑中泥盆世 A 型花岗岩的确定及其构造意义[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 38(5): 947-962.
- 刘永江, NEUBAUER F, 李伟民, 等. 2012. 柴北缘—南祁连地区构造热事件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 42(5): 1317-1329.
- 陆露, 吴珍汉, 胡道功, 等. 2010. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义[J]. 岩石学报, 26(4): 1150-1158.
- 孟繁聪, 张建新, 杨经绥. 2005. 柴北缘锡铁山早古生代 HP/UHP 变质作用后的构造热事件: 花岗岩和片麻岩的同位素与岩石地球化学证据[J]. 岩石学报, 21(1): 45-56.
- 彭渊, 马寅生, 刘成林, 等. 2016. 柴北缘宗务隆构造带印支期花岗岩闪长岩地质特征及其构造意义[J]. 地学前缘, 23(2): 206-221.
- 彭渊, 张永生, 孙娇鹏, 等. 2018. 柴北缘北部中吾农山构造带及邻区中吾农山群物源和构造环境: 来自地球化学与锆石年代学的证据[J]. 大地构造与成矿学, 42(1): 126-149.
- 钱兵, 张照伟, 张志炳, 等. 2015. 柴达木盆地西北缘牛鼻子梁镁铁-超镁铁质岩体年代学及其地质意义[J]. 中国地质, 42(3): 482-493.
- 钱涛, 李王鹏, 高万里, 等. 2023. 柴达木盆地北缘构造带早古生代造山后作用初探: 泥盆纪沉积物物源示踪[J]. 地质学报, 97(3): 672-687.
- 青海省地质矿产局, 1991. 中华人民共和国地质矿产部地质专报一区域地质第 24 号 青海省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社.
- 青海省地质矿产局, 1997. 青海省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 宋述光, 张立飞, NIU Y, 等. 2004. 青藏高原北缘早古生代板块构造演化和大陆深俯冲[J]. 地质通报, 23(9-10): 918-925.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 彭渊, 等. 2015. 柴北缘构造带泥盆纪构造属性研究[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 39(2): 23-30.
- 孙娇鹏, 陈世悦, 刘成林, 等. 2016. 柴达木盆地东北部晚古生代盆地构造环境: 来自碎屑岩地球化学的证据[J]. 地学前缘, 23(5): 45-55.
- 王惠初, 陆松年, 袁桂邦, 等. 2003. 柴达木盆地北缘滩间山群的构造属性及形成时代[J]. 地质通报, 22(7): 487-493.
- 吴才来, 郜源红, 吴锁平, 等. 2007. 柴达木盆地北缘大柴旦地区古生代花岗岩锆石 SHRIMP 定年[J]. 岩石学报, 23(8): 1861-1875.
- 夏文静, 牛漫兰, 闫臻, 等. 2014. 柴北缘牦牛山地区牦牛山组沉积相组合特征[J]. 地质学报, 88(5): 943-955.
- 辛后田, 王惠初, 周世军. 2006. 柴北缘的大地构造演化及其地质事件群[J]. 地质调查与研究, 29(4): 311-320.
- 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 2002. 西秦岭大草滩群的沉积环境及构造意义[J]. 地质通报, 21(8-9): 505-515.
- 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 2007. 秦岭造山带泥盆系形成构造环境: 来自碎屑岩组成和地球化学方面的约束[J]. 岩石学报, 23(5): 1023-1042.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物: 柯石英[J]. 地质学报, 75(2): 175-179.
- 张春宇, 赵越, 刘金, 等. 2019. 柴达木盆地北缘牦牛山组物源分析及其构造意义[J]. 地质学报, 93(3): 712-723.
- 张建新, 孟繁聪, MATTINSON C G. 2007a. 南阿尔金-柴北缘高压-超高压变质带研究进展、问题及挑战[J]. 高校地质学报, 13(3): 526-545.
- 张建新, 孟繁聪, 于胜尧, 等. 2007b. 柴北缘绿梁山高压基性麻粒岩的变质演化历史: 岩石学及锆石 SHRIMP 年代学证据[J]. 地学前缘, 14(1): 85-97.
- 张雪亭, 杨生德, 杨站君, 2007. 青海省区域地质概论[M]. 北京: 地质出版社.
- 张耀玲, 胡道功, 石玉若, 等. 2010. 东昆仑造山带牦牛山组火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质通报, 29(11): 1614-1618.
- 张耀玲, 倪晋宇, 沈燕绪, 等. 2018. 柴北缘牦牛山组火山岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 现代地质, 32(2): 329-334.
- 庄玉军, 辜平阳, 李培庆, 等. 2019. 柴北缘构造带欧龙布鲁克地块西北缘辉长岩脉地球化学、年代学及 Hf 同位素特征[J]. 地质通报, 38(11): 1801-1812.