第 57 卷 第 6 期 2024 年 (总 238 期)

北地 西 质

NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 57 No. 6 2024(Sum238)



**引文格式:**黄河,王涛,童英,等.中国西天山古生代岩浆岩时空架构、源区特征及构造背景[J].西北地质,2024, 57(6):25-43. DOI: 10.12401/j.nwg.2024098

**Citation:** HUANG He, WANG Tao, TONG Ying, et al. Spatial and Temporal Framework, Evolution of Magma Sources, and Tectonic Settings of Paleozoic Magmatic Rocks in West Tianshan, China[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(6): 25–43. DOI: 10.12401/j.nwg.2024098

## 中国西天山古生代岩浆岩时空架构、 源区特征及构造背景

黄河,王涛,童英,张建军,王朝阳

(中国地质科学院地质研究所,北京 100037)

摘 要:中亚造山带是全球最大、最典型的增生造山带,是全球显生宙陆壳生长最显著的地区之 一。在中亚造山带形成过程中,伴随古亚洲洋的闭合,以及不同性质构造块体的拼贴碰撞,形成 了巨量的岩浆岩。笔者以中亚造山带西段西天山出露的古生代岩浆岩为研究对象,系统总结了 岩浆岩的时空格架、成因类型、源区特征和构造背景等特征。区内岩浆岩主要形成于3个阶段: 寒武纪早期—中泥盆世早期(497~388 Ma)、晚泥盆世—早石炭世(375~323 Ma)、晚石炭世—中 二叠世(322~263 Ma)。第一阶段和第二阶段的侵入岩组合主要为钙碱性I型花岗岩,以及具有 "岛弧"地球化学特征的中、基性岩石,部分岩体具有埃达克质岩石的性质,并发育少量A型花 岗岩。晚石炭世—中二叠世花岗岩等侵入岩以多样性的成分为特征,包括"正常的"钙碱性I 型花岗岩、埃达克质岩石、A型花岗岩,以及局部出露的S型花岗岩,基性岩石中也出现较多具洋 岛玄武岩特征的辉长岩和玄武岩。结合其他地质证据,笔者认为寒武纪早期—中泥盆世早期、晚 泥盆世---早石炭世岩浆岩形成于与古亚洲洋洋分支洋盆俯冲有关的构造环境中,且岩浆活动的 迁移和地球化学成分演化趋势均揭示俯冲过程中发生了多次从前进型、低角度俯冲到后撤型、 高角度俯冲的转化。西天山南北洋盆的最终闭合均发生在晚石炭世。在南侧,古南天山洋的闭 合跟随着大陆板块之间的"硬碰撞"。而在北侧,伊犁地块和中天山地块北缘与一不成熟/新生 岛弧发生了"软碰撞"。就地壳演化的方式而言,基于Hf同位素资料所揭示的长英质岩浆岩源 区物质演化,识别出西天山地区在在古生代交替发生大陆地壳物质再循环(continental reworking) 和大陆生长(continental growth)。在俯冲阶段,大洋板片后撤(回卷)占据了主导性地位,导致了微 陆块中增生造山作用开始之前形成的古老物质大量被同增生阶段形成的新生物质所置换,伊犁 地块、中天山地块等块体是在古生代被显著"再更新(rejuvenation)"的古老微陆块。后碰撞伸 展阶段大范围幔源岩浆底侵进一步造成了显著的地壳生长。整个古生代,西天山及邻区以地壳 生长为主导。

关键词:中亚造山带;西天山;古生代;岩浆岩;地壳生长

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

文章编号:1009-6248(2024)06-0025-19

基金项目:中国地质调查局项目"中生代松辽盆地周缘复合造山带岩浆演化及成矿效应专题地质调查"(DD20230213),国家 重点研发计划课题"增生造山带典型地区三维岩石圈物质架构的示踪方法"(2019YFA0708601)联合资助。

作者简介:黄河(1986-),男,研究员,从事岩浆岩研究。E-mail: huanghecugb@126.com。

收稿日期: 2024-09-21; 修回日期: 2024-11-05; 责任编辑: 曹佰迪

## Spatial and Temporal Framework, Evolution of Magma Sources, and Tectonic Settings of Paleozoic Magmatic Rocks in West Tianshan, China

HUANG He, WANG Tao, TONG Ying, ZHANG Jianjun, WANG Chaoyang

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: The Central Asian Orogenic Belt (CAOB) is Earth's largest and most representative accretionary belt and records the most extensive growth and reworking of the continental crust. Accompanying the closure of the giant Paleo-Asian Ocean and the amalgamation of tectonic blocks in the CAOB regime, with different origins and evolutionary histories, voluminous magmatic rocks were formed. This study focuses on Paleozoic magmatic rocks exposed in West Tianshan and systemically summarizes the spatiotemporal frameworks, genetic types, evolution of their magma sources in space and time, and tectonic settings of these rocks. Paleozoic magmatic rocks in West Tianshan were mainly formed at three stages, i.e., Early Cambrian to Middle Devonian ( $\sim$ 479 to  $\sim$ 388 Ma), Late Devonian to Early Carboniferous ( $\sim$ 375 to  $\sim$ 372 Ma), and Late Carboniferous to Middle Permian ( $\sim$ 322 to  $\sim$ 263 Ma). Magmatic rocks formed at the first and second stages are mainly of calc-alkaline Itype granite and intermediate and mafic rocks with "arc-like" geochemical fingerprints, with a few rocks bearing "adakite-like" features; a few A-type granites are also found. By contrast, Late Carboniferous to Middle Permian magmatic rocks show a diversity in rock types, including calc-alkaline I-type, adakite-like, and A-type felsic rocks, with a few locally exposed S-type granites; OIB-like mafic rocks formed in this period, such as gabbros and basalts, occur locally. In combination with other geological evidence, this study proposes that Early Cambrian to early Middle Devonian and Late Devonian to Early Carboniferous magmatic activities took place in convergent continental margin settings, which were associated with the subduction of branches of the Paleo-Asian Ocean. Besides, both magmatic migration and secular changes in geochemical proxies indicate the transition from advancing low-angle to retreating high-angle subduction. The final closure of oceanic basins plausibly occurred in the Late Carboniferous. Following the closure of the South Tianshan Ocean, a "hard" collision with the arriving Tarim Craton occurred; by contrast, in the north, the northern margin of the Yili-Central Tianshan Block amalgamated with an immature/nascent island arc. In terms of continental evolution, based on Hf isotopic datasets, this study identifies alternating occurrences of growth and reworking. During subduction stages, retreating subduction (slab rollback) played a predominant role, resulting in large-scale replacement of ancient, preaccretionary materials by new-formed, syn-accretionary materials. Therefore, Yili and Central Tianshan blocks, can be viewed as ancient microcontinents that were significantly rejuvenated during accretionary processes. In the post-collisional stage, large-scale underplating of mantle-derived magmas represents another phase of continental growth. During the Paleozoic, West Tianshan and adjacent regions were characterized dominantly by continental growth.

Keywords: Central Asian Orogenic Belt; West Tianshan; Paleozoic; magmatic rock; continental crustal growth

中亚造山带(又称大阿尔泰拼贴体、北方造山带、 天山-兴蒙造山带等)是全球最大、最显著的显生宙增 生造山带,对中亚造山带的演化历史和地壳演化是近 年来研究的焦点之一(图 1a)(Windley et al., 2007; Wilhem et al., 2012; Xiao et al., 2013, 2014, 2020; Zhou et al., 2013;李锦轶等,2013; Kröner et al., 2017; Liu et al., 2021; Wang et al., 2023a)。中亚造山带记录了新元古 代—中生代大洋岩石圈长期复杂的俯冲增生,以及增 生杂岩体、蛇绿混杂岩、洋内弧、洋底高原、陆缘岛弧、 微陆块等不同性质的构造块体的拼合过程(Windley et



岩浆岩年龄数据主要来源自 Huang 等(2020),含部分新测和新搜集样品数据 图1 中亚造山带及相邻克拉通位置略图(a)(据Şengör et al., 2018; Xiao et al., 2015 修改)、 中国西天山主要构造单元岩浆岩图(b)

Fig. 1 (a) Map showing the location of the Central Asian Orogenic Belt, (b) Map showing major tectonic domains and the distribution of magmatic rocks

al., 2007; Wilhem et al., 2012; Xiao et al., 2013).

中亚造山带长期以来被认为是显生宙大陆地壳 生长最显著的地区(Jahn et al., 2000a, 2000b; Wang et al., 2023b),在中亚增生造山过程中,形成和保存了大 量的年轻地壳。然而,也有研究者提出中亚造山带的 地壳生长量被大大高估了(如 Kröner et al., 2014, 2017), 并认为在增生造山过程中,深部岩浆过程以古老物质 再循环为主导,并不代表地壳净生长。显然,回答上 述争议的关键,在于准确认识增生造山过程中新生地 壳生长和古老物质再循环究竟哪个机制占据了主导地 位,以及准确识别控制地壳生长/再循环的构造背景。

伴随着中亚造山带俯冲增生、碰撞造山、后碰撞 伸展和陆内改造的漫长历史,发生了长期、巨量的岩 浆活动,形成了分布广泛的岩浆岩。前人以岩浆岩为 对象,开展了不同尺度的研究,在揭示中亚造山带的 重要区带的构造历史、地壳演化和成矿背景等提供了 重要的资料和视角。近年来,随着分析测试技术的进 步和研究程度的加深,积累了海量高质量的数据资料。 特别值得关注的是,除了传统的、针对少数岩体和样品 的研究工作,通过引入 GIS 空间分析方法,越来越多 的研究者开始基于岩浆岩带的空间分布和迁移规律、 重要同位素和元素地球化学指标的时空演化,开展大 区域尺度的岩石学、地球化学研究,获得许多新的认识突破(如 Hou et al., 2015; Wang et al., 2023a, 2023b)。

中国西天山位于中亚造山带西南缘, 是一个包含 不同性质构造块体的复杂拼合体。在古亚洲洋在中亚 西段俯冲闭合及其后的陆陆碰撞和弧陆拼贴过程中, 形 成了西天山地区分布广泛的岩浆岩(以花岗岩类为主)。 在前期研究的基础上(Huang et al., 2020), bizhe 从大区 域尺度, 系统总结了西天山古生代岩浆岩的时空格架、 各期岩浆岩的岩石学特征、成因类型、源区演化和构造 背景等, 进一步总结了西天山古生代构造演化和大陆生 长/再循环的历史, 提出在西天山增生造山过程中, 地壳 生长占据了主导地位。文中将为进一步揭示西天山古 生代地质演化、大陆地壳形成与保存机制、深部物质架 构等关键科学问题, 提供新的资料和视角。

## 1 区域地质背景

中天山山脉西起乌兹别克斯坦,向东经哈萨克斯 坦、吉尔吉斯斯坦、中国,一直延伸至蒙古国西南部。 在中国境内,参考传统划分(以N88°线或托克逊—库 米什高速公路为界)(李锦轶等,2006;Gao et al.,2009), 将天山进一步划分为西天山和东天山,二者在地形 地貌、岩浆岩、块体组成、盆地发育、演化历史等方面 均存在显著的差异。中国西天山及邻区在大地构造 上自南向北主要包括:塔里木克拉通北缘、南天山造 山带、中国中天山地块、伊犁地块和中国北天山带 (图 1b)。上述块体被由深大断裂、蛇绿混杂岩带、 (超)高压变质岩构成的一系列缝合带所间隔。

塔里木克拉通是中国最古老的克拉通之一。古 老的前寒武纪基底岩石在塔里木克拉通北缘广泛出 露(Carroll et al., 1995; Han et al., 2011)。在塔里木克 拉通东段库鲁克塔格及邻区,出露早古生代岩体。而 在塔里木克拉通北缘的西段和中段,保存有大量早二 叠世岩浆作用的记录(Zhang et al., 2013)。南天山(或 西南天山)在地质组成上,主要包括前寒武纪基底岩 石、早古生代大陆岛弧系列火山岩、晚古生代火山岩-沉积岩序列(Huang et al., 2020)。基底岩石主要分布 在中段阿克苏地区。在南天山造山带以北,是一系列 分布于吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦和中国北疆地区、 具有微陆块属性的构造块体。南天山造山带与这些 微陆块被中-南天山缝合带所间隔。中-南天山缝合 带在组成上,包括 Atbashy-Inylchek-南那拉提-卡瓦布 拉克深大断裂带、高压-超高压变质带、以及沿断裂 带零星分布的蛇绿混杂岩残片。伊犁地块是中国境 内天山中规模最大的构造块体,属于巨型哈萨克斯坦-伊犁大陆的一部分,并且构成了哈萨克斯坦山弯南翼 的 主 体(Hu et al., 2000; Wang et al., 2014a, 2014b; Huang et al., 2020),在中国境内呈三角展布,向东逐渐 尖灭。中国中天山地块是一条狭长的、带状分布的微 陆块,整体呈 EW 向展布,从西天山的巴伦台地区一 直向东延伸到东天山星星峡地区(杨天南等, 2006; 陈 新跃等, 2009; Ma et al., 2015)。北天山带与伊犁地块 和中天山地块以北天山缝合带为界。北天山造山带 的主体由泥盆系凝灰质砂岩、凝灰岩、板岩、千枚岩、 灰岩和中基性火山岩,下石炭统凝灰质粉砂岩,以及 上石炭统碎屑岩和火山碎屑岩组成。上述岩石组合 被认为是增生杂岩的组成部分(徐学义等, 2006; Li et al., 2015a).

# 2 西天山古生代岩浆岩时空演化、岩石组合及地球化学特征

西天山古生代岩浆岩广泛分布,其中大多数是花 岗岩类,零星出露中、基性岩石。总体上,古生代岩石 构成了若干条近平行于缝合带的岩浆岩带。基于前 人发表的大量高精度年代学资料(图 1b)(详见 Huang et al., 2020 及所附参考文献),西天山岩浆岩可分为 3 个主要的形成阶段,即寒武纪早期—中泥盆世早期 (497~388 Ma)、晚泥盆世—早石炭世(375~323 Ma)、 晚石炭世—早二叠世(322~263 Ma)。

为便于表述,下文在涉及长英质岩浆岩的描述中, 使用了"正常的"I型、埃达克质、S型、A型和高分 异型等术语。虽然上述术语在使用中普遍具有成因 含义,但在本节中,仅仅是用于描述岩石样品的整体 岩石学和地球化学特征,并不暗示其具有特定的岩石 成因。

寒武纪—奥陶纪侵入岩在区内零星分布,包括出露于伊犁地块南缘的~523 Ma的辉长岩(夏特辉长岩,李平等,2024)、~497 Ma的二长花岗岩体(Xu et al., 2013),以及沿主要缝合带少量出露的奥陶纪花岗岩类(图 1b)。上述早古生代早期的岩体包括花岗闪长岩、二长花岗岩、偶见含白云母花岗岩,同时伴生少量石英闪长岩等。大多数岩体无明显变形特征,少数岩体具不同程度的片麻状构造、或遭受糜棱岩化。在地球化学特征上,大多数该时期样品的SiO<sub>2</sub>>60%,呈准铝质--弱过铝质(大多数样品A/CNK<1.1),在(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O-CaO)-SiO<sub>2</sub>图解中一般落入钙碱性--碱钙性区域内(图 2),呈钙碱性--碱钙性 I型花岗岩特征,部分岩体 Sr/Y 值较高,具有埃达克岩的特征,少量岩体为 S 型花岗岩。

志留纪—早泥盆世(444~393 Ma)的侵入岩在伊 犁地块在南缘较为发育,主要岩石类型为二长花岗岩、 花岗闪长岩、黑云母花岗岩等,少见中、基性侵入岩。 在中天山地块的西段,该期侵入岩主要包括钾长花岗 岩、黑云母花岗岩等,少数岩石被糜棱岩化。该时期 还形成少量基性--超基性岩体,如著名的菁布拉克基 性-超基性杂岩体(~430 Ma)(张作衡等, 2007; Yang et al., 2009)。在南天山造山带,发育志留纪—中泥盆 世早期(435~388 Ma)的二长花岗岩和花岗岩、钾长 花岗岩,少量高分异花岗岩,主要出露于该带的东段, 其中侵入岩的围岩均为前寒武纪基底岩石。南天山 造山带中这一时期的英安岩、流纹岩等中酸性火山岩 也较发育。在塔里木克拉通北缘,志留纪花岗岩和少 量闪长岩主要出露在库鲁克塔格及邻区,年龄主要集 中在~420 Ma前后,花岗岩类型主要包括二长花岗岩 和花岗闪长岩(Ge et al., 2014)(图 1b)。在地球化学特 征上,西天山该时期的岩浆岩样品大多呈钙碱性特征





Fig. 2 Total alkaline K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> versus SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O-CaO versus SiO<sub>2</sub> diagram, and K<sub>2</sub>O versus SiO<sub>2</sub>, diagrams for Paleozoic magmatic rocks in the West Tianshan

(里特曼指数 σ<3.3, σ=(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)<sup>2</sup>/(SiO<sub>2</sub>-43)),在 (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O-CaO)-SiO<sub>2</sub> 图解中一般落入钙碱性-碱钙 性区域内(图 2)。在伊犁地块南缘钙碱性 I型、埃达 克质和 A型花岗岩类为代表,是区内早期奥陶纪岩 浆事件的延续(图 3)。在中天山地块的西段,该期花 岗岩类均显示出 I型花岗岩的特征(Ma et al., 2014) (图 3)。在南天山造山带东段,这一时期主要形成钙 碱性 I型花岗岩和英安岩、以及少量的高分异花岗岩 (图 3)。此外,在南天山造山带还出露具 E-MORB 型 地球化学特征的辉长岩(Zhao et al., 2015)。在塔里木 克拉通北缘库鲁克塔格地区,志留纪花岗岩类主要包 括钙碱性 I型花岗岩和少量埃达克质岩石(具高 Sr/Y、 La/Yb 值)。值得注意的是,从晚志留世到早泥盆世 (420~400 Ma)在伊犁地块、中国中天山地块以及南 天山造山带-塔里木克拉通北缘的花岗岩和长英质火 山岩样品整体呈现出 Sr/Y和 Sr/Yb 值下降的趋势 (Huang et al., 2020)。

中泥盆世—晚泥盆世早期(395~375 Ma)岩浆岩 在整个西天山地区都较为缺乏,暗示存在一个持续 ~20 My的岩浆活动宁静期(Huang et al., 2019, 2020)。 极少数形成于该时期的花岗岩类出露于南天山造山 带和伊犁地块北缘。

晚泥盆世—早石炭世侵入岩在西天山地区较为 发育,主要分布于伊犁地块和中天山地块(图 1b)。在 伊犁地块北缘,375~340 Ma的花岗岩类包括花岗闪 长岩、二长闪长岩、二长花岗岩等。伊犁地块北缘相 对缺乏早石炭世晚期(340~320 Ma)岩浆岩的记录, 但近期新报道的岩浆岩年代学数据和碎屑锆石年龄



Zr-10000Ga/Al 和 (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)/CaO vs.-Zr+Nb+Ce+Y 图解底图据 Whalen 等(1987); 岩浆岩地球化学数据主要来源自 Huang 等(2020), 含部分新测和新搜集样品数据

#### 图3 西天山古生代花岗岩等岩浆岩微量元素图解

Fig. 3 Trace elemental plots for Paleozoic magmatic rocks in the West Tianshan. Plots of Zr versus 10000Ga/Al and (K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)/CaO versus Zr+Nb+Ce+Y

(来自北天山造山带增生杂岩体中弧前浊积岩)均指示这一时期的伊犁地块北缘存在岩浆活动(Wang et al., 2018a)。在伊犁地块南部,泥盆世—早石炭世末期的侵入岩广泛出露,主要包括石英闪长岩、英云闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩,还出露少量钾长花岗岩、黑云母花岗岩等。同时期的酸性火山岩(流纹岩)

也较发育。在中国中天山地块西段,形成于约370~330 Ma的侵入岩以闪长岩、花岗闪长岩为主,含少量 钾长花岗岩。在地球化学特征上,该时期有较多的中酸性侵入岩样品在(K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O-CaO)-SiO<sub>2</sub> 图解中落入 碱质区域,在 K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> 图解中落入钾玄质区域的样品数也增多(图2)。伊犁地块北缘,375~340 Ma的花岗

2024年

岩类大多具有钙碱性 I 型花岗岩的特征。少数早石炭 世花岗岩类为埃达克岩或埃达克质岩石和 A 型花岗 岩,前者常与同时期高镁安山岩同时共生。在伊犁地 块南部,该期岩浆岩以广泛出露的钙碱性 I 型花岗岩 为主,含部分 A 型和埃达克质岩石(图 3)。在中国中 天山地块西段,形成于 370~330 Ma 的中酸性侵入岩 同样以钙碱性 I 型花岗岩为主导,含少量埃达克质岩 石和 A 型花岗岩(图 3)。在伊犁地块和中国中天山地 块,长英质岩浆岩的 Sr/Y 和 Sr/Yb 值首先呈现了 375~350 Ma 的上升趋势及随后 350~330 Ma 的下降 趋势(Huang et al., 2020)。

晚石炭世岩浆岩在西天山出露较少(图 1b)。在 伊犁地块和中国中天山地块,该时期岩石为一套石英 闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩组合。在北天山造 山带则主要为花岗闪长岩(Wang et al., 2018b), 基性岩 中出现特征的高镁安山岩、富 Nb 玄武岩等(Wang et al., 2007; 陈建等, 2024)。在南天山造山带, 形成于该 时期的花岗闪长岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩等主 要分布于该带的东段。位于伊犁地块南缘的哈拉达 拉辉长岩体也形成于这一阶段(He et al., 2016)。该时 期长英质岩石类型上同时出现"正常的"I型、埃达 克质、A型和高分异等类型。具体而言,在北天山造 山带则均为 A 型花岗岩(Wang et al., 2018b)。在南天 山造山带东段出露晚石炭世I型、埃达克质和A型花 岗岩。出露于伊犁地块北部的、形成于 320~300 Ma 之间的长英质岩石呈现出明显的 Sr/Y、Sr/Yb 值抬高 的趋势(Huang et al., 2020)。

二叠纪侵入岩在西天山分布最为广泛(图 1b),涵 盖多种类型。与早期的岩浆岩相比较,该期岩浆活动 的一个突出特征是碱性花岗岩在全区性广泛分布 (Long et al., 2011),特别是在塔里木克拉通北缘、南天 山造山带和北天山造山带。发育于塔里木克拉通北 缘的侵入岩主要包括正长岩类、碱长花岗岩,零星出 露花岗闪长岩,常与基性-超级性侵入岩相伴生(如巴 楚县瓦吉里塔格、小海子,阿图什市哈拉峻乡一带皮 羌等基性-超基性杂岩体),在区域上总体构成双峰式 岩石组合。南天山造山带中,早二叠世侵入岩包括碱 长花岗岩、黑云母花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩、 二云母花岗岩等,局部出露有闪长岩、辉石闪长岩等, 还发育各种类型的岩脉(Gao et al., 2011)。在伊犁地 块,这一时期的侵入岩涵盖了闪长岩、石英闪长岩、

岩和花岗斑岩等各种类型。在北天山造山带,二叠纪 岩体包括石英闪长岩、二长花岗岩、黑云母花岗岩和 碱长花岗岩等。从成因类型的角度考察,与早期的岩 浆作用相比较, 二叠纪侵入岩中包含更高比例的 A 型花岗岩(Long et al., 2011; Huang et al., 2020)。A型 花岗质岩浆活动主要发生在塔里木克拉通北缘、南天 山造山带和北天山造山带。发育于塔里木克拉通北 缘的 A 型花岗岩几乎均为 A1 型,常与具 OIB 特征的 基性--超基性杂岩体或基性火山岩(碱性玄武岩)相伴 生。而二叠纪I型花岗岩类主要分布于伊犁地块、中 国中天山地块和南天山造山带。埃达克质岩石集中 分布于伊犁地块北缘的阿吾拉勒山(Zhao et al., 2009; Tang et al., 2017),在南天山造山带川乌鲁地区也有出 露(Huang et al., 2012)。此外, 南天山造山带还出露 S 型花岗岩和流纹岩,构成一条近东西向展布的过铝质 岩浆岩带(Qin et al., 2021)。值得注意的是,年龄为 300~295 Ma 的高 Sr/Y 和 Sr/Yb 值的长英质岩石几乎 出现在所有岩浆岩带中。随后,直至显生宙岩浆作用 的终结(~260 Ma),在整个西天山地区,除了伊犁地 块北部的阿吾拉勒山出露了高 Sr/Y、Sr/Yb 值样品外, 大多数二叠纪长英质样品都以低 Sr/Y 和 Sr/Yb 值为 特征(Huang et al., 2020)。

## 3 西天山古生代岩浆岩形成的构造环 境及其演变

基于前文的论述,笔者初步总结了西天山古生代 岩浆-构造演化的整体特征(图 4)。

在古生代时期,西天山地区的构造演化主要与古 亚洲洋两个大的分支洋盆的演化有关,即南侧的南天 山洋和北侧北天山洋(准噶尔洋的南段)(Long et al., 2011; Xiao et al., 2013; Han et al., 2018; Gao et al., 2018)。 根据已发表的资料(Wang et al., 2011; Jiang et al., 2014; Han et al., 2018; Hegner et al., 2019),南天山造山带蛇 绿岩多具有形成于"俯冲带之上"(suprasubduction zone, SSZ)的构造背景,且其中镁铁质-超镁铁质岩石 的年龄主要分布在晚奥陶世至中泥盆世之间。因而, 大洋板片俯冲起始的年代要早于西天山地区绝大多 数早古生代岩浆岩的形成年代。结合西天山主要古 生代岩浆岩带的空间展布、侵入岩体的长轴方向均大 致平行于缝合带的特征,笔者认为南天山洋和北天山 洋俯冲、闭合过程是导致西天山地区古生代岩浆作用



各时代侵入岩面积直方图引自项目组未发表编图成果;样品年龄分布直方图原始数据引自 Huang 等(2020)

图4 西天山古生代岩浆-构造演化综合示意图

#### Fig. 4 Sketchatic diagram describing the Paleozoic tectonomagmatic evolution of West Tianshan

的主要因素。据此,西天山地区的岩浆岩按其形成的 构造环境,可分为第一期俯冲阶段(约460~395 Ma)、 第二期俯冲阶段(约375~310 Ma)和碰撞-后碰撞阶 段(约310~260 Ma)(见图4构造环境及演化栏)。

#### 3.1 第一阶段(460~395 Ma)洋盆俯冲及俯冲形态转换

根据岩浆岩带分布和性质等特征,笔者认为在第 一阶段俯冲事件中,南天山洋的俯冲为双向俯冲,即 在洋盆的南(南天山造山带和塔里木克拉通北缘)北 (伊犁地块南缘)均为活动大陆边缘(图 4)(Ge et al., 2012; Jiang et al., 2014; Huang et al., 2019)。

海沟的周期性前进和后撤是增生造山带演化过 程中的普遍特征(Aitchison et al., 2012)。俯冲过程中 重力势能或上部大陆岩石圈增厚,都可能诱发板片回 卷(slab rollback)(Antonijevic et al., 2015; Niu, 2018)。 例如,当洋壳前端被俯冲至榴辉岩相的深度,具有负 浮力,此时俯冲洋壳易发生垂直方向的旋转,最终导 致了板片回卷。而古洋盆中大洋高原(oceanic plateau) 被间歇性携带至俯冲带,则会诱发平板俯冲(flat subduction)(Collins, 2002; Gazel et al.; 2015),持续的平板 俯冲会导致地幔楔的消失(Gutscher et al., 2000; Hao et al., 2018)及大陆岛弧岩浆活动的暂停或终止(Axen et al., 2018)。在大洋高原被俯冲下去,大洋板片会重新恢复到低角到至正常角度的俯冲,导致一个短暂的前进型俯冲,以及紧随其后的大洋回卷(板片后撤) (Kemp et al., 2009; Collins et al., 2019)。

在伊犁地块南段和南天山造山带,约430~385 Ma 时段长英质岩石呈现随时间下降 Sr/Y 和 Sr/Yb 值 下降的趋势(Huang et al., 2020), 上述现象暗示该时段 内岩浆源区物质部分熔融深度的下降。可以解释为 该时段伴随着从前进型俯冲到后撤型俯冲的转换,活 动陆缘的构造体制从挤压增厚转为伸展减薄(图 4)。 伴随此转换的深部过程可能还包括板片断离和/或岩 石圈拆沉(Zhang et al., 2019)。上述论断也得到了构 造解析方面证据的支持,在塔里木克拉通北缘奥陶系 中,发育大量褶皱和逆冲推覆构造,但在志留系中挤 压构造却基本消失(Li et al., 2015b; Zhang et al., 2019)。 在南天山造山带南缘,前人研究还辨识出 E-MORB 型 地球化学特征的辉长岩(Zhao et al., 2015)。因此,至 少在塔里木克拉通北缘,早古生代样品的后撤型俯冲 最终演化出一套相对完整的、与现今西太平洋俯冲体 系类似的沟-弧-盆系统(图4)。

对于西天山地区北天山洋早期的构造演化,由于

2024年

33

资料相对匮乏,目前还难以得到精细的结论认识。前 人在东天山地区对早古生代岩浆岩锆石和沉积岩中 碎屑锆石进行了Hf同位素研究,认为北天山洋板片 回卷、海沟后撤发生在450~440 Ma(Zhang et al., 2016, 2019),笔者暂时遵循这一观点,认为西天山地区北天 山洋俯冲方式的转换也发生在同一时期。

综上所述,在第一期俯冲事件中,北天山洋和南 天山洋从低角度前进型俯冲向高角度后撤型俯冲的 转化分别发生在~450 Ma和~420 Ma。

值得注意的是,上述第一阶段俯冲作用形成的一 些侵入岩体中,部分岩体遭受了韧性变形、或高绿片 岩相-角闪岩相区域变质作用的改造,而这些变形变 质特征在第二期俯冲形成的岩体(详见后述)中缺失 (Gao et al., 2009; Cao et al2017; Zhong et al., 2017)。这 一差异暗示区域性的挤压变形和变质作用伴随着两 期俯冲事件之间、持续约 20 My(约 395~375 Ma)的 岩浆宁静期。大洋高原卷入俯冲带是最有可能诱发 平板俯冲、活动陆缘构造体制转换(从伸展构造转为 挤压构造)、弧岩浆活动间歇或停止的因素。在中亚 造山带西南段早古生代蛇绿岩/蛇绿混杂岩带中,发 育 OIB 型碱性玄武岩,如南天山造山带的黑英山蛇绿 混杂岩、西准噶尔的达布尔特和克拉玛依蛇绿混杂岩 (Wang et al., 2011; Yang et al., 2019 及所附参考文献)。 这些 OIB 型碱性玄武岩代表了增生至陆块边缘的、古 亚洲洋中地幔柱成因的海山(seamount)。综上所述, 笔者认为在 390 Ma 前后,一些体积巨大的海山被到 达俯冲带,可能导致了短暂的岩浆活动宁静期(图4)。 需要指出,增生的大洋高原可能也包含其他的成分, 岩浆间歇期也可能由其他机制所导致,需要更进一步 的研究。

#### 3.2 第二阶段(375~310 Ma)洋盆俯冲及俯冲形态转换

在晚泥盆世至早石炭世的第二阶段俯冲事件中, 南天山洋呈现北向俯冲的特征(现今纬度,下同)。伊 犁地块南缘发育形成于约 375~320 Ma、具大陆岛弧 岩石地球化学特征的岩浆岩(Zhu et al., 2009),显示活 动大陆边缘环境;而晚古生代塔里木克拉通北缘缺失 岩浆活动的记录,显示转化为被动陆源环境。在伊犁 地块北缘,石炭纪末期之前始终存在北天山洋的南向 俯冲(图 4)。

从晚古生代俯冲作用形成的岩浆岩的空间形态 考察,该时期形成于伊犁地块北部博罗科努-依连哈 比尔尕山和南部那拉提山的花岗岩等岩浆岩,均属于 大陆岛弧的组成部分; 而发育于地块内部的北侧阿吾 拉勒山和南侧乌孙山的岩浆岩, 则是弧后岩浆作用的 产物(孙吉明等, 2024)。那拉提山出露的花岗岩体和 长英质火山岩样品距离地块南侧缝合带的最远距离, 从约 370~350 Ma 呈增加的趋势, 而从约 350~322 Ma 则呈减小的趋势; 在博罗科努-依连哈比尔尕山, 样品距 北侧缝合带的距离, 同样在 350 Ma 前后出现了从升 高到降低的转化(Huang et al., 2020; Wang et al., 2020)。 这种大陆岛弧岩浆岩带从向陆到向洋迁移的转换, 对 应着大洋俯冲样式从前进型到后撤型的转变。

除了大陆岛弧岩浆岩带的迁移规律,北天山洋俯 冲形态的变化也得到长英质岩石的放射性同位素和 元素地球化学变化趋势的支持。在~366 Ma,长英质 岩石的 Sr/Y和 Sr/Yb 值随时间的变化趋势由上升转 变为下降(Huang et al., 2020),石炭纪持续的海沟后撤 最终导致了弧前软流圈的减压熔融。这一过程被北 天山造山带的蛇绿岩残片中 E-MORB和 OIB 型镁铁 质岩石所记录(Feng et al., 2018)(图 4)。北天山洋南 向高角度俯冲至少一直持续到晚石炭世,在北天山造 山带阿拉套山形成了钠质埃达克岩(即狭义的埃达克 岩)和高铌岛弧玄武岩(Wang et al., 2007)(图 4)。

综上所述,第二期俯冲事件首先表现为短期的低 角度前进型俯冲(北天山洋:约375~350 Ma,南天山 洋:约370~350 Ma),随后在早石炭世转化为低角度 后撤型俯冲(北天山洋:约350~310 Ma,南天山洋:约 350~322 Ma),并伴随着弧后盆地的发育。

## 3.3 第三阶段(310~260 Ma)西天山拼贴体的最终形成与碰撞--后碰撞阶段岩浆演化

目前,学界对于南天山洋最终闭合的时代——即 塔里木克拉通与中亚造山带西南段碰撞拼合的时间 还存在较大的争议(见 Han et al., 2011, 2018; Gao et al., 2011; Xiao et al., 2013; 及所附参考文献; Tan et al., 2022)。笔者倾向于认为碰撞时间发生在晚石炭世 (图 4)。前人从多学科角度对这一问题进行了探讨 (详见 Han et al., 2011, 2018; Gao et al., 2011; Tan et al., 2019 及其所附参考文献),文中不再赘述,仅重点讨论 来自伊犁地块和南天山造山带晚石炭世-早二叠世岩 浆活动对碰撞事件的响应。

整体而言,中亚造山带主要由增生型(太平洋型) 造山带构成,但局部也保存碰撞型(喜马拉雅型)造山 带(Safonova, 2017)。从放射性同位素的角度,相对于 其他构造块体(如伊犁地块和中天山地块),南天山带

中石炭纪末期—早二叠世的花岗岩等岩浆岩具有非 常"古老"的放射性同位素组成(详见后述)。这一 由古老地壳物质为主导的花岗质岩浆源区也进一步 暗示南天山洋的闭合以塔里木克拉通和哈萨克斯坦 陆块南翼(即吉尔吉斯斯坦中天山、伊犁、中国中天 山等地块)的"硬碰撞"为特征,即南天山造山带具 有碰撞造山带的特征。这一"硬碰撞"的拼合形态, 可能导致了伊犁地块内部弧后盆地的终结。此外,近 期研究显示,在南天山造山带南缘,从温宿县到库尔 勒市,发育一条石炭世末期—早二叠世形成的过铝质 岩浆岩带,该带形成于塔里木克拉通北缘表壳岩在快 速折返过程中发生的部分熔融(Cheng et al., 2017; Qin et al., 2021)。综上所述, 南天山洋的最终闭合, 以及塔 里木克拉通与中亚造山带西南段的最终拼贴,主要发 生在晚石炭世,南天山造山带中石炭纪末期—早二叠 世岩浆作用发生于后碰撞伸展环境。

伴随着晚石炭世初始碰撞(initial collision),在伊 犁地块南缘发生少量的钙碱性 I 型和埃达克质岩浆作 用(图 4)。随着碰撞过程的持续,区域整体进入同碰 撞构造体制,伊犁地块南缘岩浆活动停止,在南天山 造山带发生钙碱性 I 型和埃达克质岩浆作用(图 4)。 在晚石炭世末期或早二叠世早期,西天山南部整体进 入后碰撞阶段,由于板片断离和/或岩石圈拆沉,在伊 犁地块南缘和南天山发生高通量、多类型岩浆活动。 早二叠世 I 型、S 型、埃达克质和 A2 型花岗岩广泛出 露,伴有少量基性侵入岩和火山岩(图 4)。上述对碰 撞事件的岩浆响应,与印度-亚洲大陆碰撞的岩浆岩 浆岩记录十分类似(Zhu et al., 2015, 2017)。

石炭纪—二叠纪地层的古地磁学研究证实塔里 木、伊犁、准噶尔、西伯利亚等块体的古纬度在晚石 炭世之后无明显变化(Wang et al., 2007; Zhu et al., 2018)。此外,~303 Ma后北天山造山带形成的花岗 岩均具有 A型花岗岩特征,更进一步指示了以减压熔 融为主导的部分熔融环境(Collins et al., 2019)。综上, 笔者认为西天山北缘、沿北天山缝合带发生的碰撞事 件主要发生在石炭纪末期。相较于南侧的"硬碰 撞",紧随北天山洋闭合发生的这一碰撞事件具有 "软碰撞"的特征,即拼贴到伊犁地块和中天山地块 北缘的块体并非是克拉通或微陆块,而是不成熟/初生 的洋内岛弧。从更大区域考察,这一洋内岛弧很可能 是东天山哈尔里克-大南湖岛弧的西延(Xiao et al., 2013, Mao et al., 2019; 及所附参考文献)(图 4)。北天 山早二叠世  $A_2$  型花岗岩普遍具有高正的  $\varepsilon_{Hf}(t)$ 和  $\varepsilon_{Nd}(t)$  值, 以及较低的 Nb/La 值(Huang et al., 2020), 暗示它 们的源区主要是年轻的岛弧物质, 也进一步支持了弧 陆"软碰撞"模型。

综上所述,中国西天山的最终拼合,可以总结为 南侧的陆陆"硬碰撞"和北侧的弧陆"软碰撞",均 发生在晚石炭世。

## 4 西天山长英质岩浆岩源区物质特征 及发育的深部物质背景

笔者在项目组前期工作的基础上(Huang et al., 2020),结合近年来新发表的长英质岩石锆石 Hf 同位素结果,更新了西天山地区长英质岩石(SiO<sub>2</sub>≥ 60%)Hf 同位素图(图 5)。文中简要介绍长英质岩石的锆石 Hf 同位素时空演化特征,之后,基于这些特征,讨论西天山长英质岩浆岩源区物质特征和演化,即岩浆活动的深部物质背景。

#### 4.1 锆石 Hf 同位素时空演化特征

4.1.1 与第一阶段洋盆俯冲(寒武纪晚期—中泥盆世) 有关的长英质岩石锆石 Hf 同位素特征

形成于早古生代的花岗岩和长英质火山岩在空 间上共同组成了一些规模较小、古老的Hf模式年龄 省,紧邻伊犁地块北缘和南缘的缝合带分布(图 5)。 在伊犁地块北段,少数晚寒武世至早志留世(约 493~ 441 Ma)岩浆自结晶锆石的 $\epsilon$ Hf(t)值为-3.88~+4.53, 对应Hf模式年龄为1.16~1.69 Ga,中泥盆世侵入岩  $\epsilon$ Hf(t)值为-0.59~+5.33,模式年龄为1.05~1.43 Ga (图 6b)。在伊犁地块南段,中寒武世—晚奧陶世自 结晶锆石的 $\epsilon$ Hf(t)值为-5.16~+9.48,对应的T<sup>C</sup><sub>DM</sub>为 0.82~1.77 Ga(图 6c)。随后,伊犁地块南段 443~389 Ma 的岩浆活动形成的自结晶锆石的 $\epsilon$ Hf(t)值呈明显 的上升趋势,同时变化范围也更大(-7.44~+15.19), 模式年龄也总体上更加年轻(0.45~1.90 Ga)(图 6c) (Huang et al., 2020)。

在中天山西段,早古生代(约477~393 Ma)花岗 岩锆石 Hf同位素在空间和组成上可划分为两组:一 组集中分布于中国中天山地块最南侧的狭长区域内, 具有非常"古老"(富集)的 Hf 同位素特征, *ε*Hf(*t*) 值为-17.09~-3.73,模式年龄为 1.64~2.51 Ga;另一 组分布在块体的中部、北部广泛分布,相对"年轻" (亏损), *ε*Hf(*t*)值为-1.54~+9.52,模式年龄为 0.85~



基于长英质岩石岩浆锆石 Hf 同位素模式年龄均值(剔除异常值后)以反距离权重法进行空间插值生成;数据主要来源自 Huang 等(2020), 含部分新测和新搜集样品数据;数据处理和空间插值流程可见 Huang 等(2024)

#### 图5 西天山古生代长英质岩石 Hf模式年龄等值线图

Fig. 5 Contour map of two-stage Hf model age of Paleozoic felsic magmatic rocks in West Tianshan

 $1.49 \text{ Ga}(85, 86)_{\circ}$ 

在南天山造山带,早古生代长英质岩石的锆石 Hf 同位素特征指示了同期存在的"年轻"和"古老" 的地壳源区组分。结晶年龄在 432~375 Ma 之间的岩 浆自结晶锆石主要来自南天山造山带的东段,具有较 为宽泛的  $\epsilon$ Hf(t)值(-8.73~+13.18)和模式年龄范围 (0.54~1.93 Ga)(图 5、图 6e)。相较而言,在塔里木克 拉通北缘库鲁克塔格及邻区,早古生代花岗岩类 (434~406 Ma)则呈现更为"古老"的 Hf 同位素特 征(图 5、图 6e)。其中,一个晚志留世二长花岗岩侵 入体中的自结晶锆石的  $\epsilon$ Hf(t)值为-23.12~-16.25、 T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值为 2.42~2.85 Ga(Ge et al., 2014),可能指示了卷 入西天山古生代岩浆事件的最古老的壳源物质组分 (图 6e)。除该岩体的锆石外,其余位于塔里木克拉通 北缘 的早古生代花岗岩类的  $\epsilon$ Hf(t)值为-13.85~ +1.71, T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值为 1.29~2.28 Ga(Huang et al., 2020)。

#### 4.1.2 与第二阶段洋盆俯冲(晚泥盆世—晚石炭世)有 关长英质岩石锆石 Hf 同位素特征

在伊犁地块北段,这一期花岗岩样品的 Hf 模式 年龄中位数变化范围为 0.88~1.20 Ga,在博罗科努-依连哈比尔尕山一带构成了"混合"或"稍年轻" 的 Hf 同位素区(图 5)。其中,晚泥盆世—早石炭世花 岗岩类的锆石 εHf(t)值为-1.69~+14.17,对应的T<sup>C</sup><sub>DM</sub> 值为 0.44~1.46 Ga。在  $\varepsilon$ Hf(t)-结晶年龄图解上,该时 段形成的锆石的  $\varepsilon$ Hf(t)值在 350 Ma 前呈下降趋势, 随后呈上升趋势(图 6b)。从~335 Ma 开始,伊犁 地块北段的长英质岩石的  $\varepsilon$ Hf 值整体呈现出向"年 轻"(亏损)方向演变的趋势, $\varepsilon$ Hf(t)(t范围:~335 至~310 Ma)值为+6.48~+15.29,模式年龄为 0.35~ 0.91 Ga(图 6b)(Huang et al., 2020)。

在伊犁地块南段,形成于 380~310 Ma 的岩浆自 结晶锆石的  $\varepsilon$ Hf(t)值(-8.19~+11.44)和T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值(0.61~ 1.88)变化较大(图 6c)。在  $\varepsilon$ Hf(t)-结晶年龄图解上, 锆石点从下降趋势到上升趋势的转换发生在~350 Ma (图 6c)。

在中国中天山地块西段,晚泥盆世至早石炭世, 随结晶年龄降低,花岗岩中岩浆自结晶锆石的 $\epsilon$ Hf(t) 值呈现明显的总体增高、收敛的演变趋势(图 6d)。 370~350 Ma 自结晶锆石的 $\epsilon$ Hf(t)为-7.88~+10.15(对应的 Hf模式年龄为0.72~1.87),而 349~310 Ma 的自结晶锆石 $\epsilon$ Hf(t)为+0.11~+7.93(对应的模式年 龄为0.84~1.34 Ga)。

#### 4.1.3 与碰撞-后碰撞阶段(晚石炭世—中二叠世)有 关长英质岩石锆石 Hf 同位素特征

伊犁地块北段晚石炭世晚期—中二叠世长英质 岩石与稍早形成的岩石在 Hf 同位素组成上基本一致,



岩浆岩锆石 Hf 同位素数据引自 Huang 等(2020);北天山造山带浊积岩样品的碎屑锆石数据见 Wang 等(2018a)

图6 西天山整体及各个构造单元花岗岩和长英质火山岩的锆石年龄-*E*Hf(t)图解

Fig. 6 Plot of  $\varepsilon$ Hf(*t*) values vs. U-Pb ages of zircons from Paleozoic granitoid intrusions and felsic volcanic suites in the West Tianshan

均呈现粗相对亏损的特征, *ε*Hf(*t*)(*t*范围:~310至~256 Ma)值为+3.42~+13.62, T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值为 0.42~1.11 Ga。

而在伊犁地块南段,该时期长英质岩石则呈现出稍富 集的同位素特征,εHf(t)(t范围:310~250 Ma)值为 -4.53~+6.65, T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值为 0.87~1.60 Ga。

在中天山地块,石炭世晚期—中二叠世长英质岩 石呈现总体亏损,局部相对富集的同位素特征,εHf(t) (t范围: 310~260 Ma)值为-1.06~+12.86, T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值为 0.47~1.39 Ga。

前已述及,除了伊犁地块和中天山地块,晚石炭 世—二叠世的岩浆活动同样发生在北天山造山带、南 天山造山带和塔里木克拉通北缘。在北天山造山带 (伊犁和中天山地块北侧的增生杂岩体),晚石炭世至 早二叠世 A 型花岗岩中自结晶锆石(303~288 Ma)  $\varepsilon$ Hf(t)值为+2.79~+14.10 Ma, T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值为 0.42~1.14 Ga (图 6e)。在南天山造山带,该时期长英质岩石则具 更为"古老"(富集)的 Hf 同位素特征, $\varepsilon$ Hf(t)值为 -9.97~+4.21, T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值为 1.03~1.93 Ga。相较于南天山 造山带中的同时期岩体,塔里木克拉通西北缘广 泛出露的二叠纪早期(291~269 Ma)A1 型花岗岩则呈 现出相对"年轻"(亏损)的锆石 Hf 同位素成分,  $\varepsilon$ Hf(t)值为-0.80~+16.12, T<sup>C</sup><sub>DM</sub>值 0.28~1.36 Ga(图 6e) (Huang et al., 2020)。

### 4.2 西天山长英质岩浆的源区物质特征、深部物质背 景及地壳生长意义

西天山显生宙花岗岩等岩浆岩锆石 Hf 同位素数 据显示了其源区物质显著的时空差异性。中天山地 块南缘和塔里木克拉通北缘库鲁克塔格地区、Hf模 式年龄(T<sup>C</sup><sub>DM</sub>)大于 1.8 Ga 的岩浆自结晶锆石,代表了 卷入古生代岩浆事件的最古老的地壳组分(图 6)。而 在伊犁地块,尽管极少数前寒武纪至寒武纪早期的捕 获锆石的Hf同位素模式年龄大于1.8Ga(图6b、图6c), 但岩浆自结晶锆石的T<sup>C</sup><sub>DM</sub>均小于1.8 Ga。上述事实说 明,当伊犁地块卷入中亚造山带增生造山作用时,已 缺失古元古代或更古老的基底岩石。这些古老的基 底岩石可能在前寒武纪的岩浆--构造演化过程中已 被消耗殆尽(Wang et al., 2014a, 2014b)。如果仅比较 T<sub>DM</sub> < 1.8 Ga 的自结晶锆石, 可观察到在西天山主要 的岩浆岩带(特别是伊犁地块和中国中天山地块),年 龄在 320 Ma 前的岩浆自结晶锆石都表现出非常相似 的  $\varepsilon$ Hf(t)随时间演化趋势(图 6)。这说明卷入岩浆源 区的新生物质比例是影响块体尺度锆石 Hf 同位素组 成随时间变化趋势的主控性因素。而从大区域尺度, 源区中新生地壳物质的升高或降低,又进一步受控于 中亚造山带西南段动态变化的构造体制。

在现有剥蚀程度下,西天山地区各个岩浆岩带的

主体由花岗岩和长英质火山岩构成,中、基性岩石出 露较少。因而,系统总结古生代长英质岩石源区年轻 组分贡献度随时间的变化趋势,可以揭示区域上显生 宙地壳生长/再循环的历史。从中寒武世一直到早奥 陶世,古老地壳物质的再循环主导了伊犁和中天山地 块的地壳演化。该时期(>445 Ma)这两个块体长英 质岩石的锆石  $\varepsilon$ Hf(t)值均呈现出随时间演化下降的 趋势,且样品T<sub>DM</sub>值均大于1.0 Ga。随后,伊犁地块南 缘~430 至~390 Ma、中国中天山地块~420 至~400 Ma、以及南天山造山带和塔里木克拉通北缘~420至 ~385 Ma的岩浆自结晶锆石的 EHf(t)值均呈现明显 的抬升趋势,指示了显著的全区性地壳生长。在伊犁 地块和中国中天山地块,形成于泥盆纪最晚期 (375~359 Ma)的自结晶锆石 *ε*Hf(*t*)值呈明显的下降 趋势(图 6b~图 6d)。在伊犁地块和中天山地块,形成 于早石炭世的自结晶锆石随时间变化表现为 *ε*Hf(*t*) 的抬升且分布范围变窄,暗示这一时期大量新生地壳 物质的注入。晚石炭世—早二叠世,西天山不同地区 的地壳演化模式有所差异。在南天山造山带,重启的 二叠世长英质岩浆岩主要记录了古老物质的再循环; 与之相反,在塔里木克拉通北缘和北天山造山带,较 多的年轻物质卷入了该时期的中酸性岩浆作用,指示 显著的地壳生长(图 6e)。

与前文论述的构造背景演化相对应,可见在低角 度俯冲(前进性俯冲)和同碰撞挤压阶段,西天山各个 构造块体的长英质岩浆活动主要记录了更多的古老 物质卷入,即地壳再循环增强。而在板片回卷/后撤型 俯冲、后碰撞挤压阶段,则记录了显著的新生物质加 入,即地壳的生长。在古生代演化的绝大多数时期, 西天山的长英质岩浆的源区物源以年轻物质为主导, 且年轻物质在深部源区的比例整体上不断增加。这 些特征说明中亚造山带增生造山作用对新生地壳的 形成和保存起到了至关重要的过程。在古老微陆块 中,这一过程可归纳为"再更新"或"再年轻化" (rejuvenation),即增生造山活动开始之前业已形成的 古老地壳物质,伴随着增生造山作用的进行,不断地 被年轻物质所置换。

陆陆碰撞作用往往是古老物质大量卷入深部岩 浆作用最为重要的阶段。从大的空间和时间尺度考 察(图 5),伴随着塔里木克拉通与伊犁-中天山地块的 碰撞造山,南天山造山带、伊犁地块南缘和中天山地 块南缘,晚石炭世起表现出显著地古老物质加入的特

征,在区域上构成了西天山南部的古老同位素省。但 即使这个古老同位素省,和典型的古生代碰撞造山带 相比(如秦岭-大别造山带、加里东造山带、海西造山 带)(Wang et al., 2023b), 无论实在同位素"富集"程 度上,还是古老同位素省所占据的空间比例上,都具 有显著地差距。而在北部的广阔区域,即伊犁地块主 体、中天山地块北缘和北天山造山带,晚石炭世之后 的岩浆岩锆石 Hf 同位素特征和早期基本并无明显区 别,使之总体上仍保持了年轻的同位素指纹。这一特 征暗示即使在陆陆碰撞事件发生后,古老物质的输入 和再循环程度,也是相当有限的。结合项目组未发表 资料,笔者认为在西天山晚石炭世"硬碰撞"过程中, 仍然未发生上盘(即伊犁-中天山地块)岩石圈底部被 塔里木克拉通的古老岩石圈整体置换的情况。反之, 古老物质的加入,更可能是通过俯冲古老陆壳物质进 一步交代原先的弧下岩石圈和/或塔里木的表壳岩通 过底垫作用(relamination)的方式加入北侧壳幔过渡带 的方式实现的。因此,除了俯冲阶段,后碰撞阶段也 仅仅发生了有限的古老物质再循环,同样是西天山地 壳生长的一个重要阶段。

#### 4.3 对中亚造山带年轻地壳形成与保存机制的启示

在中亚造山带,保存在增生杂岩体和混杂岩中的 在洋内环境形成的年轻物质,如大洋地壳、洋内岛弧、 洋岛、大洋高原等,指示了显著的侧向地壳生长(Windley et al., 2007; Kröner et al., 2017; Yang et al., 2019; Safonova, 2024)。在一些无前寒武纪古老基底的年轻 块体中,年轻物质(如洋壳、洋内弧)部分重熔形成中 酸性岩浆的上升、就位,是地壳生长的另一种形式(Xu et al., 2013, 2016)。然而,在古老块体中(如微陆块), 是否发生了显著的地壳生长?如果是,新生地壳是否 被大量保存?这仍是值得探索的科学问题。

前文论述了俯冲带上盘板片(伊犁地块、中天山 地块)地壳生长与海沟后撤(板片回卷)之间存在重要 的联系。在更大尺度上考察,这一长期地壳"再更新" (rejuvenation)过程,即前增生古老物质在后撤型俯冲 过程中逐步被同增生年轻地壳所置换,同样发生在东 天山(Zhang et al., 2019)、北山(Song et al., 2015; He et al., 2018)、蒙古阿尔泰(Guy et al., 2015)。因此,现今 保存中亚造山带陆块地壳,相当一部分属于前增生古 老物质和同增生年轻物质的混合物。

值得注意的是,陆陆碰撞可导致原先被动陆缘下 的古老岩石圈物质再次置换增生楔和活动陆缘之下 的年轻组分(Collins et al., 2011)。因此,在中亚造山带, 年轻/混合地壳得以广泛保存的基本前提,是需要存在 一系列直至造山活动终结也未与古老陆块发生碰撞 的大陆边缘,即无碰撞或软碰撞陆缘(non-collisional or soft-collisional margins)(Mišković et al., 2009)。在中亚 造山带西段,一系列山弯构造的发育(如哈萨克斯坦 山弯、图瓦-蒙古山弯),可能对残留洋盆的发育、无 碰撞或软碰撞陆缘的存在、以及年轻(混合)地壳的保 存发挥了至关重要的作用。在西天山地区,伊犁-中 天山地块构成了哈萨克斯坦山弯构造的南翼(Li et al., 2018)。由于山弯构造的存在,伊犁-中天山地块北侧 始终未与古老陆块发生碰撞事件,而仅仅发生了陆弧 之间的"软碰撞",成为大量年轻地壳得以保存的关 键因素之一。

此外,前已述及,在西天山地区,即使在存在陆陆 "硬碰撞"的情况下,仍然只发生了相对有限的古老 物质输入。这一现象可能与在塔里木克拉通与中亚 造山带碰撞过程中缺乏典型的大陆深俯冲有关(Han et al., 2019)。对此,一部分研究者提出是受到了同时 期的塔里木地幔柱事件有关,认为地幔柱活动打断了 大陆深俯冲过程(Han et al., 2019)。但从更大空间考 察,上述碰撞过程中"低效"的古老物质输入,不仅 在西天山发生,而是在整个中亚造山带南缘都有体现 (Wang et al., 2023a, 2023b)。因此,除了局部地幔柱的 影响,广泛存在的山弯构造也可能是另一个重要的影 响因素。在西天山地区,塔里木克拉通与伊犁-中天 山地块的碰撞作用发生之后,被哈萨克斯坦山弯构造 圈闭的准噶尔残留洋盆的存在,使伊犁-中天山地块 可以整体发生逆时针旋转(Li et al., 2018),这一过程 可以在一定程度上抵消塔里木克拉通发生大陆深俯 冲的能力,也可能是西天山地区碰撞、后碰撞阶段仅 发生有限古老物质输入的重要原因。

综上所述,在西天山俯冲增生过程中,以后撤型 俯冲(板片回卷)为主导的构造样式,导致微陆块内部 的古老物质大量被新生物质所置换,是地壳生长的重 要方式。在西天山各块体拼合过程中,由于山弯构造 存在,一方面,西天山北侧仅发生了陆弧拼贴,而未发 生与刚性古老陆块的碰撞。另一方面,即使南部发生 了典型的陆陆"硬碰撞",块体的逆时针旋转也在一 定程度上抵消了大陆发生深俯冲的能力。这些因素, 以及可能的其他深部背景(如地幔柱),使得即使在碰 撞—后碰撞阶段,古老物质再循环仍然非常有限。整 体上,在西天山及邻区,古生代增生造山作用过程中 形成了大量的年轻地壳,并且最终得以保存。

#### 39

## 5 结论

(1)西天山地区显生宙侵入岩主要形成于古生代, 可分为寒武纪早期—中泥盆世早期(497~388 Ma)、 晚泥盆世—早石炭世(375~323 Ma)、晚石炭世—早 二叠世(322~263 Ma)3个阶段。

(2)寒武纪早期—中泥盆世早期、晚泥盆世—早 石炭世侵入岩形成于与古亚洲洋洋分支洋盆俯冲有 关的构造环境中。南北洋盆的最终闭合均发生在晚 石炭世。在南侧,古南天山洋的闭合跟随着大陆板块 之间的"硬碰撞"。而在北侧,伊犁地块和中天山地 块北缘与一不成熟/新生岛弧发生了"软碰撞"。

(3)西天山地区在在古生代交替发生大陆地壳物 质再循环(continental reworking)和大陆生长(continental growth)。伊犁地块、中天山地块等微陆块是在古 生代被显著"再更新(rejuvenation)"的古老微陆块, 大洋板片回卷、后撤型俯冲是显生宙地壳生长的构造 背景。

致谢:感谢国内外同行长期在西天山及邻区开 展的深入研究,前人积累的大量高水平数据资料构 成了本文的基础。由于笔者水平有限,时间仓促, 本文对西天山古生代岩浆岩的总结难免有所疏漏, 在此致歉。两位匿名审稿人对本文提出了宝贵的修 改意见,在此深表感谢。编辑同志为处理本稿件付 出大量辛勤劳动,在此一并致谢。特别感谢中国地 质调查局西安地质调查中心李艳广高级工程师长期 对项目组测试分析工作的帮助和支持,以及牛亚卓 副研究员在本文写作过程中的有益讨论,在此致以 诚挚的谢意。

## 参考文献(References):

- 陈新跃,王岳军,孙林华,等.天山冰达坂和拉尔敦达坂花岗片 麻岩 SHRIMP 锆石年代学特征及其地质意义[J].地球化 学,2009,38(5):424-431.
- CHEN Xinyue, WANG Yuejun, SUN Linhua, et al. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the granitic gneisses from Bingdaban and Laerdundaban (Tianshan Orogen) and their geological significances [J]. Geochimica, 2009, 38(5): 424–431.
- 陈建, 王欣, 孟元库, 等. 北天山巴音沟石炭纪安山岩岩石成因 及构造意义[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 91-112.

CHEN Jian, WANG Xin, MENG Yuanku, et al. Petrogenesis and

Tectonic Implications of the Carboniferous Andesites from Bayingou in the North Tianshan Belt, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 91–112.

- 李锦轶,何国琦,徐新,等.新疆北部及邻区地壳构造格架及其 形成过程的初步探讨[J].地质学报,2006,80(1):148-168.
- LI Jinyi, HE Guoqi, XU Xin, et al. Crustal tectonic framework of northern Xinjiang and adjacent regions and its formation[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(1): 148–168.
- 李锦轶,曲军峰,张进,等.中国北方造山区显生宙地质历史重 建与成矿地质背景研究进展[J].地质通报,2013,32(2-3): 207-219.
- LI Jinyi, HE Guofeng, ZHANG Jin, et al. Reconstruction of Phanerozoic Geological History and Research of Metallogenic Geological Settings of the Northern China Orogenic Region[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(2-3): 207–219.
- 李平,朱涛,吕鹏瑞,等.西天山早寒武世夏特辉长岩:南天山洋 早期俯冲的岩浆记录[J].西北地质,2024,57(3):44-58.
- LI Ping, ZHU Tao, LÜ Pengrui, et al. Early Cambrian Xiate Gabbro in Western Tianshan: Magmatic Records of Initial Subduction of the South Tianshan Ocean[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 44–58.
- 孙吉明,马中平,贠杰,等.西天山乌孙山花岗岩和闪长岩年代 学、地球化学及岩石成因[J].西北地质,2024,57(3): 59-72.
- SUN Jiming, MA Zhongping, YUN Jie, et al. Geochronology Geochemistry and Petrogenesis of the Granite and Diorite in Wusun Mountain Western Tianshan[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 59–72.
- 徐学义,夏林圻,马中平,等.北天山巴音沟蛇绿岩斜长花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及蛇绿岩成因研究[J].岩石学报, 2006,22(1):83-94.
- XU Xueyi, XIA Linqi, MA Zhongping. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of the plagiogranites from Bayingou ophiolite in North Tianshan Mountains and the petrogenesis of the ophiolite[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1): 83–94.
- 杨天南,李锦轶,孙桂华,等.中天山早泥盆世陆弧:来自花岗质 糜棱岩地球化学及 SHRIMP-U/Pb 定年的证据[J]. 岩石学 报,2006,22(1):41-48.
- YANG Tiannan, LI Jinyi, SUN Guihua, et al. Earlier Devonian active continental arc in Central Tianshan: evidence of geochemical analyses and Zircon SHRIMP dating on mylonitized granitic rock[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(1): 41–48.
- 张作衡, 王志良, 王彦斌, 等. 新疆西天山菁布拉克基性杂岩体 闪长岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. 矿床地质, 2007, 26(4): 353-360.

ZHANG Zuoheng, WANG Zhiliang, WANG Yanbin, et al. Shrimp

zircon U-Pb dating of diorite from Qingbulake basic complex in western Tianshan Mountains of Xinjiang and its geological significance[J]. Mineral Deposits, 2007, 26(4): 353–360.

- Aitchison J C, Buckman S. Accordion vs. quantum tectonics: Insights into continental growth processes from the Paleozoic of eastern Gondwana[J]. Gondwana Research, 2012, 22(4): 674–680.
- Antonijevic S K, Wagner L S, Kumar A, et al. The role of ridges in the formation and longevity of flat slabs[J]. Nature, 2015, 524(7564): 212–215.
- Axen G J, Van Wijk J W, Currie C A. Basal continental mantle lithosphere displaced by flat-slab subduction[J]. Nature Geoscience, 2018, 11: 961–964.
- Cao Y C, Wang B, Jahn B M, et al. Late Paleozoic arc magmatism in the southern Yili Block (NW China): Insights to the geodynamic evolution of the Balkhash–Yili continental margin, Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2017, 278–281; 111–125.
- Carroll A, Graham S, Hendrix M, et al. Late Paleozoic tectonic amalgamation of northwestern China: sedimentary record of the northern Tarim, northwestern Turpan, and southern Junggar basins[J]. Bulletin of the Geological Society of America, 1995, 107: 571–594.
- Cheng Z G, Zhang Z C, Santosh M, et al. Late Carboniferous to early Permian partial melting of the metasedimentary rocks and crustal reworking in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from garnet-bearing rhyolites in the Chinese South Tianshan [J]. Lithos, 2017, 282–283: 373–387.
- Collins W J. Hot orogens, tectonic switching, and creation of continental crust[J]. Geology, 2002, 30(6): 535–538.
- Collins W J, Huang H Q, Bowden P, et al. Repeated S-I-A-type granite trilogy in the Lachlan Orogen, and geochemical contrasts with A-type granites in Nigeria: Implications for petrogenesis and tectonic discrimination[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2019, 491: SP491–2018-2159.
- Collins W J, Belousova E A, Kemp A I, et al. Two contrasting Phanerozoic orogenic systems revealed by hafnium isotope data[J]. Nature Geoscience, 2011, 4: 333–337.
- Feng W, Zhu Y. Petrology and geochemistry of mafic and ultramafic rocks in the north Tianshan ophiolite: Implications for petrogenesis and tectonic setting [J]. Lithos, 2018, 318–319: 124–142.
- Frost B R. A Geochemical Classification for Granitic Rocks[J]. Journal of Petrology, 2001, 42: 2033–2048.
- Gao J, Klemd R, Zhu M, et al. Large-scale porphyry-type mineralization in the Central Asian metallogenic domain: A review[J]. [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 165: 7–36.

Gao J, Long L, Klemd R, et al. Tectonic evolution of the South Tian-

2024 年

shan orogen and adjacent regions, NW China: geochemical and age constraints of granitoid rocks[J]. International Journal of Earth Sciences, 2009, 98: 1221–1238.

- Gazel E, Hayes J L, Hoernle K, et al. Continental crust generated in oceanic arcs[J]. Nature Geoscience, 2015, 8: 321–327.
- Gao J, Klemd R, Qian Q, et al. The collision between the Yili and Tarim blocks of the Southwestern Altaids: Geochemical and age constraints of a leucogranite dike crosscutting the HP–LT metamorphic belt in the Chinese Tianshan Orogen[J]. Tectonophysics, 2011, 499: 118–131.
- Ge R, Zhu W, Wilde S A, et al. Neoproterozoic to Paleozoic long lived accretionary orogeny in the northern Tarim Craton[J]. Tectonics, 2014, 33: 302–329.
- Ge R, Zhu W, We H, et al. The Paleozoic northern margin of the Tarim Craton: Passive or active?[J]. Lithos, 2012, 142-143; 1–15.
- Gutscher M A, Eissler J, Bourdon E. Can slab melting be caused by flat subduction?[J]. Geology, 2000, 28: 535–538.
- Guy A, Schulmann K, Janousek V, et al. Geophysical and geochemical nature of relaminated arc-derived lower crust underneath oceanic domain in southern Mongolia[J]. Tectonics, 2015, 34(5): 1030–1053.
- Han B F, He G Q, Wang X C, et al. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan–Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the Northern Xinjiang, western China[J]. Earth-Science Reviews, 2011, 109: 74–93.
- Han Y, Zhao G. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186: 129–152.
- Han Y, Zhao G, Cawood P A, et al. Plume-modified collision orogeny: The Tarim–western Tianshan example in Central Asia[J]. Geology, 2019, 47(11): 1001–1005.
- Hao L L, Wang Q, Zhang C, et al. Oceanic plateau subduction during closure of the Bangong-Nujiang Tethyan Ocean: insights from central Tibetan volcanic rocks[J]. GSA Bulletin, 2018, 131: 864–880.
- He P L, Huang X L, Xu Y G, et al. Plume-orogenic lithosphere interaction recorded in the Haladala layered intrusion in the Southwest Tianshan Orogen, NW China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121: 1525–1545.
- Hegner E, Alexeiev D V, Willbold M, et al. Early Silurian tholeiiticboninitic Mailisu ophiolite, South Tianshan, Kyrgyzstan: a geochemical record of subduction initiation[J]. International Geology Review, 2019, 61(1): 1–18.
- He Z Y, Klemd R, Yan L L, et al. The origin and crustal evolution of

microcontinents in the Beishan orogen of the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 185: 1–14.

- Hou Z, Duan L, Lu Y, et al. Lithospheric Architecture of the Lhasa Terrane and Its Control on Ore Deposits in the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Economic Geology, 2015, 110: 1541–1575.
- Hu A Q, Jahn B M, Zhang G X, et al. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence.
  Part. I. Isotopic characterization of basement rocks[J].
  [J]. Tectonophysics, 2000, 328; 15–51.
- Huang H, Wang T, Guo L, et al. Crustal modification influenced by multiple convergent systems: Insights from Mesozoic magmatism in northeastern China[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 252: 104737.
- Huang H, Wang T, Tong Y, et al. Rejuvenation of ancient micro-continents during accretionary orogenesis: Insights from the Yili Block and adjacent regions of the SW Central Asian Orogenic Belt[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 208: 103255.
- Huang H, Zhang Z, Kusky T, et al. Geochronology and geochemistry of the Chuanwulu complex in the South Tianshan, western Xinjiang, NW China: Implications for petrogenesis and Phanerozoic continental growth[J]. Lithos, 2012, 140-141: 65–84.
- Huang H, Zhang Z, Santosh M, et al. Crustal evolution in the South Tianshan Terrane: Constraints from detrital zircon geochronology and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt[J]. Geological Journal, 2019, 54: 1379–1400.
- Jahn B M, Wu F, Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic [J]. Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 2000a, 91: 181–193.
- Jahn B M, Wu F, Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic [J]. Episodes Journal of International Geoscience, 2000b, 23: 82–92.
- Jiang T, Gao J, Klemd R, et al. Paleozoic ophiolitic mélanges from the South Tianshan Orogen, NW China: Geological, geochemical and geochronological implications for the geodynamic setting[J]. Tectonophysics, 2014, 612-613: 106–127.
- Kemp A I S, Hawkesworth C J, Collins W J, et al. Isotopic evidence for rapid continental growth in an extensional accretionary orogen: the Tasmanides, eastern Australia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 284(3-4): 455–466.
- Kröner A, Kovach V, Belousova E, et al. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 2014, 25(1): 103–125.

Kröner A, Windley B F, Badarch G, et al. Accretionary growth and

crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian-Nubian shield[J]. Geological Society of America Memoirs, 2007, 200: 181–209.

- Kröner A, Kovach V, Alexeiev D, et al. No excessive crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Further evidence from field relationships and isotopic data[J]. Gondwana Research, 2017, 50: 135–166.
- Li C, Xiao W J, Han C M, et al. Late Devonian-early Permian accretionary orogenesis along the North Tianshan in the southern Central Asian Orogenic Belt[J]. International Geology Review, 2015b, 57: 1023–1050.
- Li P, Sun M, Rosenbaum G, et al. Geometry, kinematics and tectonic models of the Kazakhstan Orocline, Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 153: 42–56.
- Li Y J, Wen L, Yang H J, et al. New discovery and geological significance of Late Silurian–Carboniferous extensional structures in Tarim Basin[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 98: 304–319.
- Liu Y J, Li W M, Ma Y F, et al. An orocline in the eastern Central Asian Orogenic Belt[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 221: 103808.
- Long L, Gao J, Klemd R, et al. Geochemical and geochronological studies of granitoid rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for continental growth in the southwestern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2011, 126: 321–340.
- Ma X, Shu L, Meert J G, et al. The Paleozoic evolution of Central Tianshan: Geochemical and geochronological evidence[J]. Gondwana Research, 2014, 25: 797–819.
- Ma X, Shu L, Meert J G. Early Permian slab breakoff in the Chinese Tianshan belt inferred from the post-collisional granitoids[J]. Gondwana Research, 2015, 27: 228–243.
- Mao Q, Wang J, Xiao W, et al. Mineralization of an intra-oceanic arc in an accretionary orogen: Insights from the Early Silurian Honghai volcanogenic massive sulfide Cu-Zn deposit and associated adakites of the Eastern Tianshan (NW China)[J]. GSA Bulletin, 2019, 131(3-4); 803–830.
- Middlemost E A. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. Earth-Science Reviews, 1994, 37: 215–224.
- Mišković A, Schaltegger U. Crustal growth along a non-collisional cratonic margin: A Lu-Hf isotopic survey of the Eastern Cordilleran granitoids of Peru[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 279(1-2): 303–315.
- Niu Y L. Geological understanding of plate tectonics: basic concepts, illustrations, examples and new perspectives[J]. Global Tectonics and Metallogeny, 2018, 10: 23–46.

Peccerillo A, Taylor S R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline vol-

canic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1976, 58: 63-81.

- Qin Q, Wang T, Huang H, et al. Late Carboniferous and Early Permian garnet-bearing granites in the South Tianshan Belt, NW China: Two Late Paleozoic magmatic events and implications for crustal reworking[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2021, 220: 104923.
- Safonova I. Juvenile versus recycled crust in the Central Asian Orogenic Belt: Implications from ocean plate stratigraphy, blueschist belts and intra-oceanic arcs[J]. Gondwana Research, 2017, 47: 6–27.
- Safonova I, Krutikova A, Perfilova A, et al. Early Paleozoic juvenile crustal growth in the Paleo-Asian Ocean: A contribution from the Zasur'ya accretionary complex of NW Altai[J]. Earth-Science Reviews, 2024, 249: 104648.
- Song D F, Xiao W J, Windley B F, et al. A Paleozoic Japan-type subduction-accretion system in the Beishan orogenic collage, southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2015, 224-225: 195–213.
- Şengör A, Natal'in B, Sunal G, et al. The tectonics of the Altaids: crustal growth during the construction of the continental lithosphere of Central Asia between ~ 750 and ~ 130 Ma ago [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2018, 46: 439-494.
- Tan Z, Agard P, Monié P, et al. Architecture and P-T-deformationtime evolution of the Chinese SW-Tianshan HP/UHP complex: Implications for subduction dynamics[J]. Earth-Science Reviews, 2019, 197: 102894.
- Tan Z, Xiao W, Mao Q, et al. Final closure of the Paleo Asian Ocean basin in the early Triassic[J]. Communications Earth & Environment, 2022, 3: 259.
- Tang G J, Wang Q, Wyman D A, et al. Genesis of pristine adakitic magmas by lower crustal melting: A perspective from amphibole composition[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122: 1934–1948.
- Wang B, Chen Y, Zhan S, et al. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 263(1–2): 288–308.
- Wang B, Liu H, Shu L, et al. Early Neoproterozoic crustal evolution in northern Yili Block: Insights from migmatite, orthogneiss and leucogranite of the Wenquan metamorphic complex in the NW Chinese Tianshan[J]. Precambrian Research, 2014a, 242: 58–81.

Wang B, Shu L, Faure M, et al. Paleozoic tectonics of the southern

Chinese Tianshan: Insights from structural, chronological and geochemical studies of the Heiyingshan ophiolitic mélange (NW China) [J]. Tectonophysics, 2011, 497: 85–104.

- Wang B, Shu L, Liu H, et al. First evidence for ca. 780Ma intra-plate magmatism and its implications for Neoproterozoic rifting of the North Yili Block and tectonic origin of the continental blocks in SW of Central Asia[J]. Precambrian Research, 2014b, 254: 258–272.
- Wang M, Zhang J, Pei X, et al. Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes study of the Lower Carboniferous Anjihai Formation from the northern margin of the Yili Block, NW China[J]. Geological Journal, 2018a, 53: 223–236.
- Wang Q, Wyman D, Zhao Z, et al. Petrogenesis of Carboniferous adakites and Nb-enriched arc basalts in the Alataw area, northern Tianshan Range (western China): Implications for Phanerozoic crustal growth in the Central Asia orogenic belt[J]. Chemical Geology, 2007, 236: 42–64.
- Wang T, Huang H, Zhang J, et al. Voluminous continental growth of the Altaids and its control on metallogeny[J]. National Science Review, 2023a, 10: nwac283.
- Wang T, Xiao W, Collins W J, et al. Quantitative characterization of orogens through isotopic mapping[J]. Communications Earth & Environment, 2023b, 4: 110.
- Wang X S, Cai K D, Sun M, et al. Two contrasting late Paleozoic magmatic episodes in the northwestern Chinese Tianshan Belt, NW China: Implication for tectonic transition from plate convergence to intra-plate adjustment during accretionary orogenesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018b, 153: 118–138.
- Wang Z P, Li Y J, Yang G X, et al. Petrogenesis and geochemical characteristics of Early Carboniferous sanukitic high - Mg andesite from Atengtao Mountain, Yili Block: Implications for the tectonic setting during Late Palaeozoic in Chinese West Tianshan[J]. Geological Journal, 2020, 55: 517–532.
- Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95: 407–419.
- Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review[J]. Earth-Science Reviews, 2012, 113: 303–341.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao W, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164: 31–47.
- Xiao W J, Song D F, Windley B F, et al. Accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt: Advances and perspectives[J]. Science China Earth Sciences, 2020, 63: 1–33.

- Xiao W, Santosh M. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth [J]. Gondwana Research, 2014, 25: 1429–1444.
- Xiao W J, Windley B F, Sun S, et al. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2015, 43: 477-507.
- Xiao W, Windley B F, Allen M B, et al. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1316–1341.
- Xu Q, Ji J, Zhao L, et al. Tectonic evolution and continental crust growth of Northern Xinjiang in northwestern China: Remnant ocean model[J]. Earth-Science Reviews, 2013, 126: 178–205.
- Xu X Y, Wang H L, Li P, et al. Geochemistry and geochronology of Paleozoic intrusions in the Nalati (Narati) area in western Tianshan, Xinjiang, China: Implications for Paleozoic tectonic evolution[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 72: 33–62.
- Xu Y X, Yang B, Zhang S, et al. Magnetotelluric imaging of a fossil paleozoic intraoceanic subduction zone in western Junggar, NW China[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121: 4103–4117.
- Yang G X, Li Y J, Tong L L, et al. An overview of oceanic island basalts in accretionary complexes and seamounts accretion in the western Central Asian Orogenic Belt[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 179: 385–398.
- Yang S H, Zhou M F. Geochemistry of the 430-Ma Jingbulake mafic–ultramafic intrusion in Western Xinjiang, NW China: implications for subduction related magmatism in the South Tianshan orogenic belt[J]. Lithos, 2009, 113: 259–273.
- Zhang C L, Zou H B. Comparison between the Permian mafic dykes in Tarim and the western part of Central Asian Orogenic Belt (CAOB), NW China: Implications for two mantle domains of the Permian Tarim Large Igneous Province[J]. Lithos, 2013, 174: 15–27.
- Zhang X R, Zhao G C, Han Y G, et al. Differentiating advancing and retreating subduction zones through regional zircon Hf isotope

mapping: A case study from the Eastern Tianshan, NW China[J]. Gondwana Research, 2019, 66: 246–254.

- Zhang X R, Zhao G C, Sun M, et al. Tectonic evolution from subduction to arc-continent collision of the Junggar ocean: Constraints from U-Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from the North Tianshan belt, NW China[J]. Geological Society of America Bulletin, 2016, 128: 644–660.
- Zhao Z Y, Zhang Z C, Santosh M, et al. Early Paleozoic magmatic record from the northern margin of the Tarim Craton: Further insights on the evolution of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 2015, 28: 328–347.
- Zhao Z, Xiong X, Wang Q, et al. Late Paleozoic underplating in North Xinjiang: Evidence from shoshonites and adakites[J]. Gondwana Research, 2009, 16: 216–226.
- Zhong L L, Wang B, Alexeiev D V, et al. Paleozoic multi-stage accretionary evolution of the SW Chinese Tianshan: New constraints from plutonic complex in the Nalati Range[J]. Gondwana Research, 2017, 45: 254–274.
- Zhou J B, Wilde S A. The crustal accretion history and tectonic evolution of the NE China segment of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1365–1377.
- Zhu D, Wang Q, Zhao Z, et al. Magmatic record of India-Asia collision[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14289.
- Zhu D, Wang Q, Zhao Z. Constraining quantitatively the timing and process of continent-continent collision using magmatic record: Method and examples[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(6): 1040–1056.
- Zhu X, Wang B, Chen Y, et al. First Early Permian Paleomagnetic Pole for the Yili Block and its Implications for Late Paleozoic Postorogenic Kinematic Evolution of the SW Central Asian Orogenic Belt[J]. Tectonics, 2018, 37(6): 1709–1732.
- Zhu Y, Guo X, Song B, et al. Petrology, Sr-Nd-Hf isotopic geochemistry and zircon chronology of the Late Palaeozoic volcanic rocks in the southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China[J]. Journal of the Geological Society, 2009, 166: 1085– 1099.