

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.187>



# 西天山巴仑台地区晚石炭世岩浆岩的岩石成因及其构造背景

张 喜<sup>1</sup>, 王信水<sup>2\*</sup>, 江 拓<sup>3</sup>, 高 俊<sup>4</sup>

1. 五矿勘查开发有限公司, 北京 100010  
2. 中国地质大学地球科学院, 湖北武汉 430074  
3. 中国地质调查局武汉地质调查中心同位素地球化学研究室, 湖北武汉 430205  
4. 中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

**摘要:** 位于中亚造山带西段和塔里木克拉通之间的天山造山带的古生代构造演化历史目前还存在很大争议, 其广泛发育的古生代岩浆岩则是揭示俯冲增生过程和构造体制转换的重要岩石探针。本文对我国西天山巴仑台地区的 7 个古生代岩浆岩进行了系统的年代学和地球化学研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年限定它们的结晶年龄在 319~307 Ma 之间, 均形成于晚石炭世。地球化学特征显示晚石炭世的镁铁质岩浆岩主要起源于软流圈地幔或者受俯冲交代富集的岩石圈地幔; 而同期花岗质岩总体上均属于准铝质-弱过铝质的中钾钙碱性和高钾钙碱性 I型花岗岩, 主要起源于下地壳基性岩的部分熔融。根据西天山地区古生代岩浆岩的时空分布规律及变质岩、蛇绿岩和沉积岩的研究成果, 本文提出 320~310 Ma 的岩浆岩形成于板片断离的构造背景, 标志着由大陆碰撞向后碰撞的构造体制转换; 而 310~307 Ma 的岩浆岩形成于后碰撞伸展的构造背景。

**关键词:** 中亚造山带; 天山; 岩浆作用; 板片断离; 地球化学。

中图分类号: P588.12

文章编号: 1000-2383(2022)03-1038-21

收稿日期: 2021-09-22

## Petrogenesis and Tectonic Setting of the Late Carboniferous Igneous Rocks in the Baluntai Region of the Chinese Western Tianshan

Zhang Xi<sup>1</sup>, Wang Xinshui<sup>2\*</sup>, Jiang Tuo<sup>3</sup>, Gao Jun<sup>4</sup>

1. Minmetals Exploration and Development Co. Ltd., Beijing 100010, China  
2. School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China  
3. Laboratory of Isotope Geochemistry, Wuhan Center of China Geological Survey, Wuhan 430205, China  
4. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

**Abstract:** The Paleozoic tectonic evolution of the Tianshan orogenic belt, which is situated between the western Central Asian Orogenic Belt and the Tarim Craton, is still in heated debate. The widespread Paleozoic igneous rocks in the Tianshan orogen are a powerful tool to reveal the subduction and accretion processes as well as the tectonic switching. In this paper, detailed geochronological and geochemical studies were presented for seven suites of Paleozoic igneous rocks in the Baluntai

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(Nos. 42172234, 42072079, 41902232)。

**作者简介:** 张喜(1984—), 男, 博士, 主要从事造山带演化、矿产勘查及战略性矿产研究。ORCID: 0000-0002-4881-7701. E-mail: zhang221223@163.com

\* 通讯作者: 王信水, ORCID: 0000-0001-7879-1293. E-mail: wangxinshui@cug.edu.cn

**引用格式:** 张喜, 王信水, 江拓, 高俊, 2022. 西天山巴仑台地区晚石炭世岩浆岩的岩石成因及其构造背景. 地球科学, 47(3): 1038—1058.

**Citation:** Zhang Xi, Wang Xinshui, Jiang Tuo, Gao Jun, 2022. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Late Carboniferous Igneous Rocks in the Baluntai Region of the Chinese Western Tianshan. *Earth Science*, 47(3): 1038—1058.

domain of the Chinese western Tianshan. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating reveals that their crystallization ages are in the range of ca. 319–307 Ma, i.e., Late Carboniferous. Geochemical characteristics indicate that the Late Carboniferous mafic igneous rocks were mainly derived from asthenosphere mantle or subduction-modified lithospheric mantle; while the coeval granitoid rocks are generally metaluminous to weak peraluminous medium- and high-K calc-alkaline I-type granites that were mainly originated from partial melting of the lower crustal meta-basic rocks. In combination with the tempo-spatial distribution of the Paleozoic igneous rocks and published results of the metamorphic, ophiolitic and sedimentary rocks in the western Tianshan, we propose that the ca. 320–310 Ma igneous rocks were generated during slab breakoff, marking the tectonic transition from continental collision to post-collision settings. By inference, the subsequent 310–307 Ma magmatism was formed in a post-collisional extensional setting caused by lithospheric delamination.

**Key words:** Central Asian Orogenic Belt; Tianshan; magmatism; slab breakoff; geochemistry.

## 0 引言

根据板块构造理论,汇聚板块边缘通常会先后经历以大洋俯冲为代表的增生造山作用和以大陆俯冲为代表的碰撞造山作用,包含洋脊俯冲、弧陆碰撞、板片回卷、板片断离、岩石圈拆沉等复杂的地质过程(Cawood *et al.*, 2009; Zheng and Chen, 2016; 肖文交等, 2019a). 岩浆作用在时间跨度上可以形成于造山带演化的整个生命周期,并在不同的构造体制下表现出一定的岩石类型和地球化学成分的差异,已成为揭示造山带构造体制及其转换时限的最重要的岩石探针之一(Barbarin, 1999; 王涛和侯增谦, 2018). 因此,准确厘定岩浆

作用的时空格架和构造背景,可为重建汇聚板块边缘的俯冲-碰撞造山历史提供重要制约.

位于东欧、西伯利亚、塔里木和华北克拉通之间的中亚造山带(图1a)是全球最大的增生型造山带,是研究增生造山作用和大陆地壳生长机制的天然实验室. 中亚造山带是古亚洲洋长期俯冲消减的产物,由众多的微陆块、岛弧、洋岛、海山及增生杂岩拼贴而成,并伴随着巨量岩浆岩的形成(Sengör *et al.*, 1993; 肖文交等, 2019b). 过去近30年前人针对岩浆岩开展了系统的年代学、元素和同位素地球化学研究,基本查明了岩浆岩的时空分布规律,并揭示了中亚造山带具有最显著的显生宙大陆地壳生长、最强烈的壳幔相互作用和大规模的大陆成

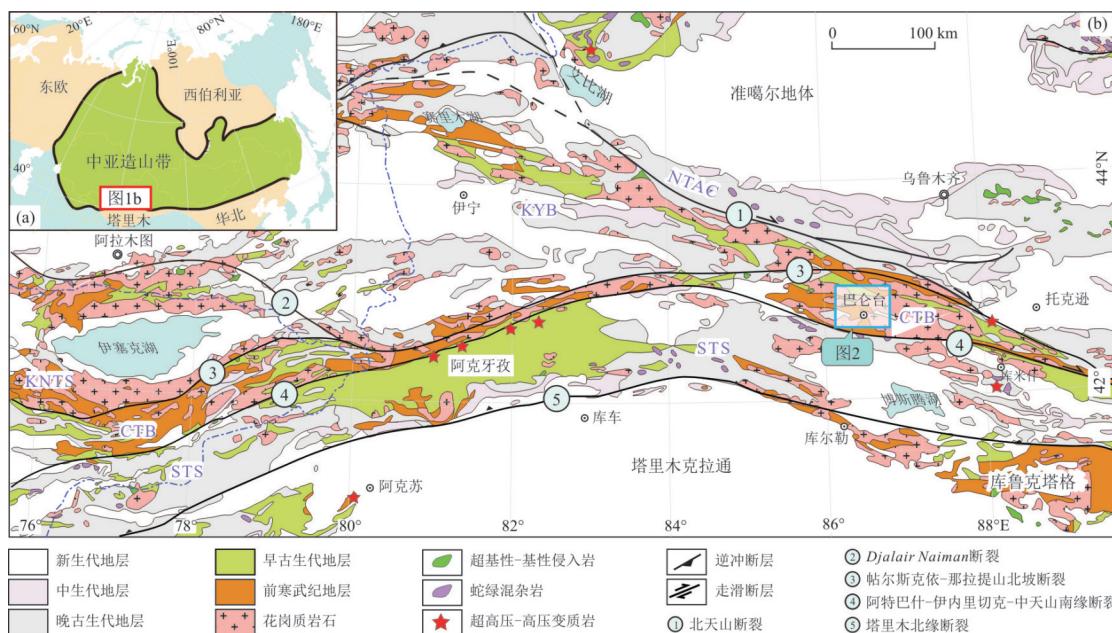


图1 西天山造山带大地构造简图

Fig.1 Simplified geological map of the western Tianshan orogenic belt

据高俊等(2009)和Wang *et al.*(2018a)修改.NTAC. 北天山增生杂岩;KYB. 哈萨克斯坦-伊犁地块;KNTS. 吉尔吉斯北天山地块;CTB. 中天山地块,STS. 南天山构造带

矿作用等特征 (Şengör *et al.*, 1993; Jahn *et al.*, 2000; 肖文交等, 2008; Wan *et al.*, 2017; 高俊等, 2019; 许文良等, 2019; Cheng *et al.*, 2021). 尤为重要的是, 岩浆岩在重建中亚造山带的大地构造格局和俯冲–增生造山历史中发挥了不可替代的作用 (Geng *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2010; Long *et al.*, 2011; Şengör *et al.*, 2018; 高俊等, 2019).

天山造山带位于中亚造山带的西南缘, 其形成标志着中亚造山带西段和塔里木克拉通的最终拼合 (Gao *et al.*, 1998; 高俊等, 2009; Xiao *et al.*, 2013; Han and Zhao, 2018; Wang *et al.*, 2018a). 但目前对于天山造山带的古生代俯冲增生造山过程, 尤其是洋盆的存在时限和俯冲极性、洋陆转换时限, 还没有统一的认识 (Han *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018b; Alexeiev *et al.*, 2019a), 严重制约了人们对中亚造山带增生造山机制和时限的限定. 天山造山带发育大量的古生代岩浆岩, 被广泛用来重建区域构造演化历史. 然而, 由于区域大地构造格局的复杂性和岩浆岩成分的多样性, 不同学者对其岩石成因机制和形成的地球动力学背景提出了截然不同的认识 (Wang *et al.*, 2007; Gao *et al.*, 2009; Zhu *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018c; Huang *et al.*, 2020). 本文通过对我国西天山巴仑台地区的晚石炭世岩浆岩进行系统的锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究, 厥定了它们的岩石类型和成因机制, 并结合已有的研究资料, 限定了这些岩浆岩形成的地球动力学背景, 为重建天山造山带的俯冲–碰撞造山过程提供了重要制约.

## 1 地质背景和样品采集

天山造山带是古生代时期多洋盆、多块体相互作用的产物, 并在中–新生代遭受了强烈陆内造山作用的叠加改造 (Gao *et al.*, 1998; Xiao *et al.*, 2013). 我国境内的天山造山带在地理上大致以库米什–托克逊高速公路为界划分为西天山和东天山 (高俊等, 2009). 根据蛇绿岩、高压变质岩和岩浆岩的研究成果, 我国西天山造山带在大地构造上自北向南被划分为北天山增生杂岩带、伊犁–中天山地块和南天山构造带 (图 1b; Gao *et al.*, 1998; 高俊等, 2009; Xiao *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2018a).

北天山增生杂岩带和伊犁–中天山地块以北天山断裂为界, 是北天山洋向南俯冲消减的产物, 并

在伊犁–中天山地块的北缘形成了安第斯型活动大陆边缘, 形成了大量的古生代岛弧岩浆岩 (高俊等, 2009). 伊犁–中天山地块是一个具有确切寒武纪结晶基底的微陆块, 尽管目前对其构造亲缘性还存在分歧 (Wang *et al.*, 2014, 2017). 部分学者把伊犁–中天山地块当作是不可再分的统一地块 (Alexeiev *et al.*, 2019b), 但近期 Qian *et al.* (2009) 沿那拉提北坡断裂发现的寒武纪夏特蛇绿岩可能表明在伊犁和中天山地块之间存在一个古洋盆, 并在早奥陶世时期洋盆关闭导致两地块拼贴. 同样, 伊犁–中天山地块南缘也发育大量的古生代岩浆岩, 可被解释为南天山洋向北俯冲消减形成的活动大陆边缘型岩浆作用产物 (高俊等, 2009; Zhu *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2020; Wan *et al.*, 2021). 沿中天山南缘断裂分布有洋壳型高压–超高压变质带和数个蛇绿混杂岩, 是南天山洋向伊犁–中天山地块之下俯冲消减的产物 (Jiang *et al.*, 2014; 李继磊等, 2017; Wang *et al.*, 2018a; Tan *et al.*, 2019). 因此, 该断裂带被当作是伊犁–中天山地块和塔里木之间的缝合带 (高俊等, 2009; Jiang *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2018a). 位于中天山南缘断裂和塔里木北缘断裂之间的南天山构造带 (图 1b) 的构造属性存在较大争议, 早期被认为是塔里木北部被动大陆边缘的组成部分 (Allen *et al.*, 1993; Gao *et al.*, 1998); 也有部分学者认为是拼贴到伊犁–中天山地块南缘的宽阔增生楔 (Xiao *et al.*, 2013; Abduxun *et al.*, 2021); 近期研究表明南天山构造带是在早古生代时期南天山洋的南向俯冲过程中从塔里木北缘裂离的一个日本型岛弧, 随后在晚古生代时期拼贴到塔里木北缘并转变为被动大陆边缘 (Wang *et al.*, 2018a). 南天山构造带和塔里木北缘发育同样的古生代岩浆作用, 可分为两期, 早期形成时代为 460~380 Ma, 晚期形成时代为 310~270 Ma (Wang *et al.*, 2018a; Huang *et al.*, 2020).

本文研究区位于中天山地块的巴仑台地区, 即伊犁–中天山地块向东尖灭的顶端 (图 1b). 区域地质图把区内出露的一套强烈变质变形的片麻岩、片岩和大理岩地层视为中天山地块的前寒武纪基底岩石, 但碎屑锆石 U-Pb 年代学结果限定了该套地层的原岩沉积时代为早寒武世至晚志留世 (Wang *et al.*, 2021a). 晚古生代地层零星分布, 与早古生代地层呈角度不整合接触. 下石炭统马鞍桥组是一套未

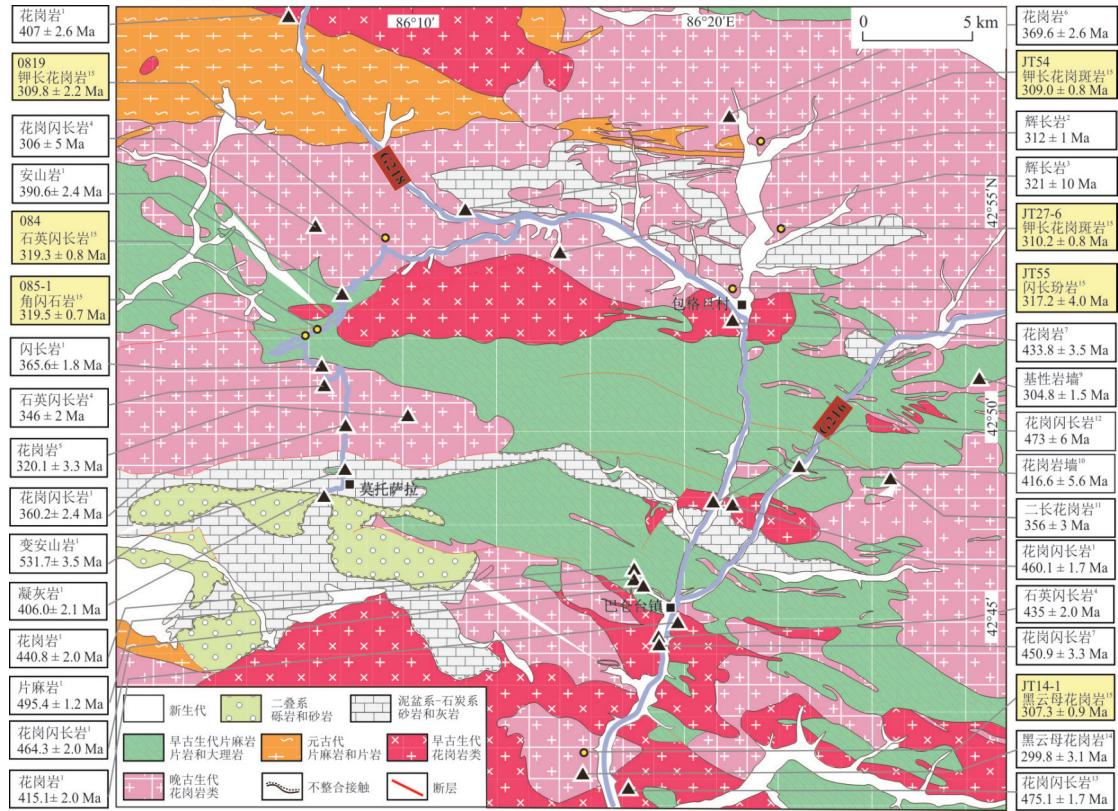


图2 西天山巴仑台地区地质简图

Fig. 2 Geological map of the Baluntai domain in the Chinese western Tianshan

图据 Wang *et al.* (2021a)修改. 年龄数据来源:1. 据 Wang *et al.* (2021a);2. 据 Tang *et al.* (2012);3. 据朱永峰等(2006);4. 据黄河等(2015);5. 据 Jin *et al.* (2014);6. 据王守敬和王居里(2010);7. 据 Ma *et al.* (2014);8. 据 Ma *et al.* (2013);9. 据尹继元等(2015);10. 据杨天南等(2006);11. 据李平等(2018);12. 据 Shi *et al.* (2014);13. 据 Ma *et al.* (2013);14. 据 Ma *et al.* (2015);15. 本次研究

变质的以厚层状砾岩、砂砾岩、薄层砂岩、粉砂岩夹灰岩为主的陆源碎屑岩和碳酸盐建造,笔者近期的碎屑锆石年代学结果限定其沉积时代实际为早泥盆世至早石炭世(Wang *et al.*, 2021a). 二叠系紫红色砾岩和粗砂岩角度不整合在马鞍桥组之上,仅在莫托萨拉地区可见. 研究区古生代岩浆岩发育非常广泛,出露面积占比达70%左右(图2),通常构成大型复式岩基,呈现多期次岩浆侵入和多种岩性单元的特征,也可见大量的小岩体和岩墙侵入到围岩地层和复式岩基中. 岩石类型多样,从辉长岩、闪长岩、石英闪长岩到花岗闪长岩、花岗岩均有发育,变形程度各不相同. 前人针对研究区的古生代侵入岩已经开展了大量的高精度年代学和地球化学研究,准确限定它们的侵位时代在475~263 Ma之间(部分年龄结果标示在图2中),但对于它们形成的地球动力学背景仍存在较大分歧(Ma *et al.*, 2013, 2014, 2015; Jin *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2014; 黄河等, 2015; Zhong *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2021a).

本次研究选取巴仑台地区的7个岩体或岩墙进

行详细的野外观察和样品采集(采样位置见图2),其中7件样品用于锆石U-Pb年代学研究以限定它们的侵位时代,其余18件样品用于全岩主量和微量元素地球化学研究以探讨它们的岩石类型和成因机制. 位于包格旦村北侧的钾长花岗斑岩体侵入薄层状灰岩地层,主要由粗粒和细粒钾长花岗斑岩构成,粗粒钾长花岗斑岩中可见细粒钾长花岗斑岩包体(图3a~3c). 细粒钾长花岗斑岩(JT54)呈肉红色致密块状构造,典型斑状结构(图4a~4b),主要由钾长石(50%~55%)、斜长石(10%~15%)、石英(25%~30%)及少量白云母(1%~2%)组成. 斑晶主要为石英,含量15%~20%;基质主要由细粒长英质矿物构成,呈球粒结构. 粗粒钾长花岗斑岩(JT27-6)具有斑状结构(图4c~4d),主要由钾长石(55%~60%)、斜长石(15%~20%)、石英(20%~25%)组成. 斑晶为长石和石英,含量10%~15%;基质主要由细粒长英质矿物构成,呈球粒结构. 南侧的暗灰绿色辉长-闪长玢岩体(即骆驼沟岩体)同样侵入薄层状灰岩地层(图3d). 该岩体是中天

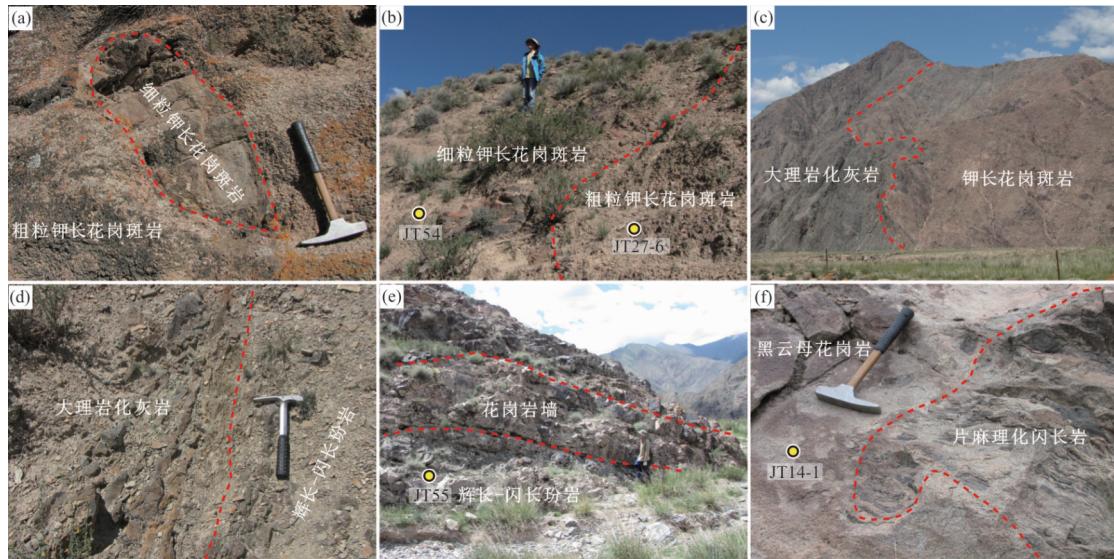


图3 西天山巴伦台地区部分晚石炭世岩浆岩的野外地质特征

Fig.3 Field photos of the selected Late Carboniferous igneous rocks in the Baluntai domain of the Chinese western Tianshan

山地块出露面积最大的基性侵入体,约300 km<sup>2</sup>,岩相分带明显,由边部细粒辉长玢岩逐渐过渡到内部中粗粒辉长-闪长玢岩(朱永峰等,2006).岩体中发育大量近平行侵入的浅红色花岗岩墙,宽度80 cm至2 m不等(图3e).本次研究采集的闪长玢岩样品(JT55)呈致密块状构造和典型斑状结构(图4e~4f),主要由角闪石(30%~35%)、斜长石(60%~65%)组成.斑晶主要为自形板柱状斜长石,含量25%~30%;基质由细粒角闪石和斜长石交织形成,大小0.05~0.20 mm.

位于巴伦台镇南侧的黑云母花岗岩(JT14-1)呈小岩株形式侵入早古生代片麻理化花岗闪长岩中(图2和图3f).黑云母花岗岩呈浅灰白色致密块状构造,无任何变形,露头上发育大量闪长质暗色包体,通常呈椭球形,大小2~20 cm不等(图4g).岩石具有中细粒花岗结构,主要由黑云母(8%~10%)、斜长石(35%~40%)、钾长石(30%~35%)、石英(15%~20%)组成(图4h).闪长质暗色包体呈细粒结构,主要由黑云母、角闪石和斜长石组成.位于莫托萨拉地区的早古生代变质地层被后期石英闪长岩小岩株和角闪石岩墙所侵入.石英闪长岩株(084)发生中等程度糜棱岩化,具有中细粒结构,主要由角闪石(15%~20%)、斜长石(55%~60%)、石英(15%~20%)和少量绿帘石、绿泥石组成(图4i~4j).角闪石岩墙(085-1)呈暗绿色块状构造和中细粒结构,主要由角闪石和少量绿帘石(1%~2%)组成(图4k~4l).沿山路往北出露一钾

长花岗岩体,侵入变质地层和早古生代岩体中.钾长花岗岩(0819)呈肉红色致密块状构造和中细粒结构,主要由钾长石(60%~65%)、斜长石(15%~20%)和石英(15%~20%)组成(图4m~4o).

## 2 分析方法

锆石分选工作由河北廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务公司完成.岩石样品经过破碎和淘洗,采用常规的重选和磁选技术初步分选后,在双目镜下手工分离锆石.随机挑选100~150粒少裂隙、少包体的锆石与锆石标样一起粘在双面胶上,加注环氧树脂进行制靶.待固化后将其打磨至原尺寸一半大小并抛光.对待测锆石进行透射光和反射光显微照片拍摄以及阴极发光图像采集,详细研究待测锆石的内部结构.阴极发光图像拍摄是利用中国科学院地质与地球物理研究所电子探针与扫描电镜实验室的德国LEO1450VP扫描电子显微镜配上MiniCL阴极发光装置完成.

LA-ICP-MS锆石U-Pb定年是在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室的Agilent 7500a型ICP-MS上完成的,激光器剥蚀系统为New Wave UP193ss型,激光束斑直径36 μm,采用He作为剥蚀物质的载气,预剥蚀时间5 s,剥蚀时间45 s.测试时每隔10个样品测试标准锆石91500、TEM和NIST612.年龄计算以91500为外标进行同位素比值校正,TEM为监控盲样;元素含量以NIST610为外标,Si为内标计算,NIST612和

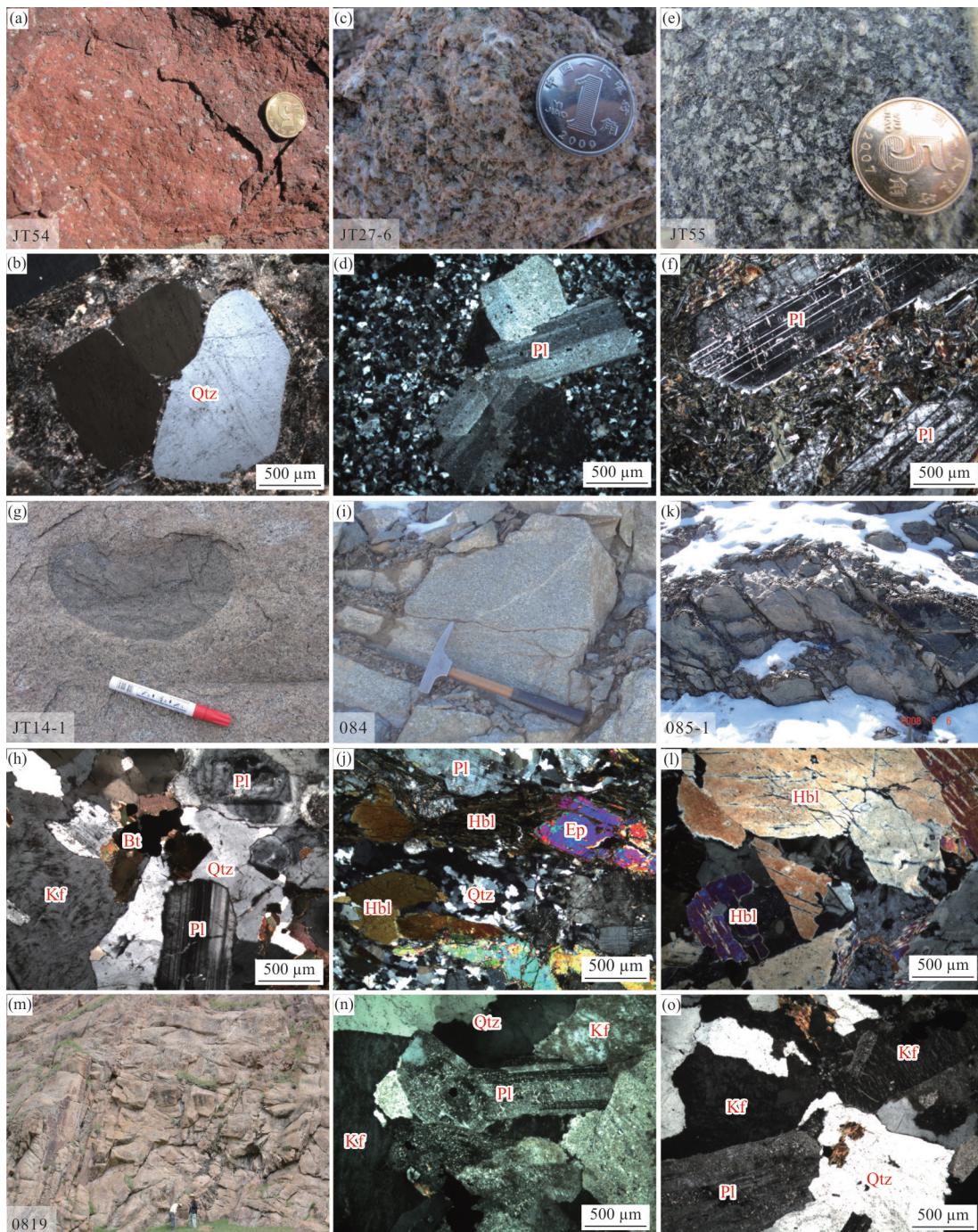


图4 西天山巴伦台地区晚石炭世岩浆岩的露头和显微照片

Fig.4 Outcrop photos and photomicrographs of the Late Carboniferous igneous rocks in the Baluntai domain of the Chinese western Tianshan

Hbl. 角闪石; Pl. 斜长石; Qtz. 石英; Kf. 钾长石; Bt. 黑云母; Ep. 绿帘石

NIST614做监控盲样.普通铅校正方法同Andersen (2002),锆石测点的同位素比值、U-Pb表面年龄和U-Pb含量的计算采用GLITTER4.4程序.最后,利用Isoplot 3.0程序对输出数据进行谐和图制作及加权平均年龄计算(Ludwig, 2003).单个测试点的同位素比值和年龄误差(标准偏差)为 $1\sigma$ ,加权平均年

龄按95%的置信度给出.分析结果见附表1.

全岩主量和微量元素分析在中国科学院地质与地球物理研究所完成.主量元素分析采用顺序式X射线荧光光谱仪(AXIOS Minerals)测试.准确称取恒温烘干的岩石粉末样品0.5 g放入坩埚中,并在高温炉内保持恒温1 000 ℃灼烧60 min.取出坩埚并

放入干燥器中冷却至室温,称重,测定待测样品的烧失量。随后利用 M-4 燃气自动熔样机将样品制备成玻璃片。分析采用国家一级岩石标样 GBW07101-07114 作为基本效应校正,每 10 个样品带一个平行样品,检验实验的可靠性。利用标准曲线法校正,分析误差优于 0.2%。全岩微量元素分析在 Finnigan 公司生产的 ICP-MS Element II 上完成。准确称取 40 mg 岩石粉末样品放入清洗干净的 Teflon 溶样罐中进行溶样操作,确保样品全部溶解。将样品溶液转移到 50 mL 容量瓶中,加入 1 mL  $500 \times 10^{-9}$  ln 内标,用 1%  $\text{HNO}_3$  稀释至刻度,摇晃至混合均匀以备上机测试。测试过程中每 10 个待测样品带一个平行样,一批样品中加做 1~2 个空白样。以 GSR1、GSR2、GSR3 为标样进行质量监控,采用标准曲线法校正微量元素含量,以 In 内标校正仪器漂移。元

素含量大于  $10 \times 10^{-6}$  的分析精度优于 5%, 小于  $10 \times 10^{-6}$  的分析精度优于 10%。分析结果见附表 2。

### 3 分析结果

#### 3.1 镍石 U-Pb 年代学结果

细粒钾长花岗斑岩(JT54)的镍石呈自形长柱状,长约 100~200  $\mu\text{m}$ ,显示典型的岩浆振荡环带,表明均是岩浆成因镍石(图 5)。其中 25 颗镍石分析点获得较高的 Th/U 比值(0.70~0.97),且  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  表面年龄集中在 300~318 Ma 之间(附表 1)。所有测点均落在谐和线上,并获得谐和年龄  $309.0 \pm 0.8 \text{ Ma}$ (MSWD=0.15),与加权平均年龄  $309.1 \pm 2.0 \text{ Ma}$ (MSWD=1.4)一致(图 5a),可以代表细粒钾长花岗斑岩的侵位时代。

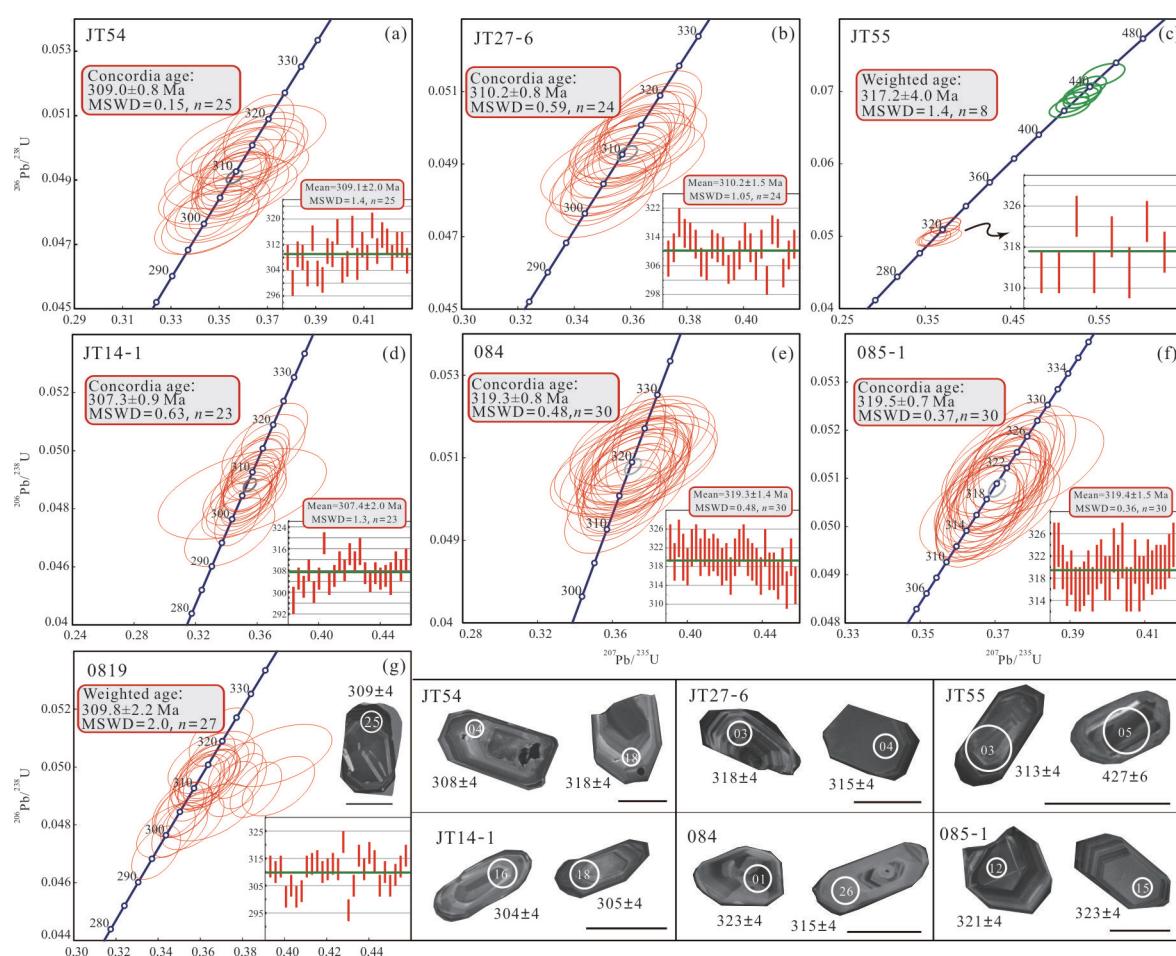


图 5 西天山巴仑台地区晚石炭世岩浆岩样品的 LA-ICP-MS 镍石 U-Pb 年龄谐和图和典型镍石的阴极发光图像

Fig.5 LA-ICP-MS zircon U-Pb concordia diagrams and selected cathodoluminescence images for the Late Carboniferous igneous rocks in the Baluntai domain of the Chinese western Tianshan

图中比例尺代表 100  $\mu\text{m}$

粗粒钾长花岗斑岩(JT27-6)的锆石呈自形长柱状,长约50~150 μm,具有同心振荡环带,为典型的岩浆锆石(图5).24个锆石分析点的Th/U比值在0.55~0.99之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在302~318 Ma之间(附表1).这些分析点获得一致的谐和年龄 $310.2\pm0.8$  Ma(MSWD=0.59)和加权平均年龄 $310.2\pm1.5$  Ma(MSWD=1.05;图5b),故可代表该岩体的结晶年龄.其结晶年龄和JT54的年龄在分析误差范围内基本一致,表明它们属于同一岩体的不同相.

骆驼沟岩体中闪长玢岩(JT55)的锆石呈自形长柱状或短柱状,长约40~100 μm.多数锆石发育典型振荡环带,为岩浆成因.部分锆石具有明显的核边结构,核部发育岩浆振荡环带,呈不规则边界被边部截切,表明核部可能是岩浆上升过程中捕获的围岩锆石(图5).15颗锆石分析点的Th/U比值为0.47~1.62.其中7个锆石核部的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在423~450 Ma之间(附表1).另外8颗岩浆锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在313~324 Ma之间,加权平均年龄为 $317.2\pm4.0$  Ma(MSWD=1.4;图5c),与前人获得的全岩Rb-Sr等时线年龄321±10 Ma(朱永峰等,2006)和斜长石Ar-Ar坪年龄312±1 Ma(Tang et al., 2012)在误差范围内一致.因此,骆驼沟岩体的就位时代为~317 Ma.

侵入片麻理化花岗闪长岩的黑云母花岗岩(JT14-1)的锆石呈自形棱柱状,长约50~100 μm,且显示清晰的同心振荡环带,是典型的岩浆锆石(图5).23颗锆石分析点的Th/U比值为0.54~1.51, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在297~318 Ma之间(附表1).所有分析点均落在谐和线上,并获得谐和年龄 $307.3\pm0.9$  Ma(MSWD=0.63)和加权平均年龄 $307.4\pm2.0$  Ma(MSWD=1.3;图5d),可以代表该岩体的侵位时代.

侵入早古生代变质地层的石英闪长岩(084)中锆石呈自形长柱状,长约80~200 μm.锆石CL图显示清晰的岩浆振荡环带,部分显示扇形分带(图5),为典型的岩浆成因锆石.30颗岩浆锆石分析点的Th/U比值为0.43~0.98, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为313~324 Ma(附表1).所有分析点均落在谐和线上,其谐和年龄 $319.3\pm0.8$  Ma(MSWD=0.48)和加权平均年龄 $319.3\pm1.4$  Ma(MSWD=0.48;图5e),代表该岩体的结晶年龄.

侵入变质地层的角闪石岩墙(085-1)的锆石呈

自形长柱状,长约80~200 μm,具有典型的岩浆振荡环带,为岩浆锆石(图5).30颗岩浆锆石的Th/U比值为0.18~1.38, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为316~324 Ma(附表1).所有分析点落在谐和线上,并获得一致的谐和年龄 $319.5\pm0.73$  Ma(MSWD=0.37)和加权平均年龄 $319.4\pm1.5$  Ma(MSWD=0.36;图5f),可被解释为该岩墙的侵位时代.

钾长花岗岩(0819)的锆石呈自形长柱状,长约100~250 μm.CL图显示锆石发育大量的矿物包裹体,且岩浆振荡环带清晰可见,均为岩浆锆石(图5).27个分析点的Th/U比值为0.43~1.17, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为296~321 Ma(附表1).所有分析点落在谐和线附近,加权平均年龄为 $309.8\pm2.2$  Ma(MSWD=2.0;图5g),可以代表该钾长花岗岩体的侵位时代.

### 3.2 全岩地球化学特征

在锆石U-Pb年代学研究基础上,本文选取代表性样品进行了岩石地球化学分析,主量和微量元素分析结果见附表2.为了全面认识中天山地块巴仑台地区古生代岩浆岩的岩石类型和成因机制,本文对已发表的岩石地球化学数据和本文数据开展综合对比分析.根据西天山造山带已发表的古生代岩浆岩锆石U-Pb年代学数据(Wang et al., 2018a; Wan et al., 2021)和阿克牙孜高压-超高压变质岩的峰期变质年龄(李继磊等,2017; Tan et al., 2019),本文以320 Ma为界将巴仑台地区的古生代岩浆岩分为两个期次,即475~321 Ma和320~300 Ma.本文研究的7个岩浆岩样品的侵位时代为319~307 Ma,均属于第二阶段的岩浆作用.

第一阶段(475~321 Ma)的岩浆岩具有非常宽阔的SiO<sub>2</sub>含量,岩石类型多样,既包括SiO<sub>2</sub>含量偏低的辉长岩、闪长岩、基性岩脉等镁铁质岩浆岩,也包括SiO<sub>2</sub>含量偏高的花岗闪长岩、花岗岩、钾长花岗岩等花岗岩类,大部分样品在TAS图解上表现为亚碱性特征(图6a).花岗质岩样品的铝饱和指数(A/CNK)值变化于0.6~1.2之间,显示准铝质到弱过铝质的特征(图6b).在Fe指数( $\text{FeO}^{\text{total}}/(\text{FeO}^{\text{total}}+\text{MgO})$ )-SiO<sub>2</sub>图解中,所有样品落入科迪勒拉型花岗岩范围,主要为镁质花岗岩(Frost et al., 2001).在MALI( $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$ )指数-SiO<sub>2</sub>图中,样品总体属于钙性-钙碱性-碱钙性(图6c~6d).在SiO<sub>2</sub>-K<sub>2</sub>O图解中,大多数花岗质岩样品表现出高钾钙碱性和钾玄岩的特征,个别样品落在中钾钙碱性的范

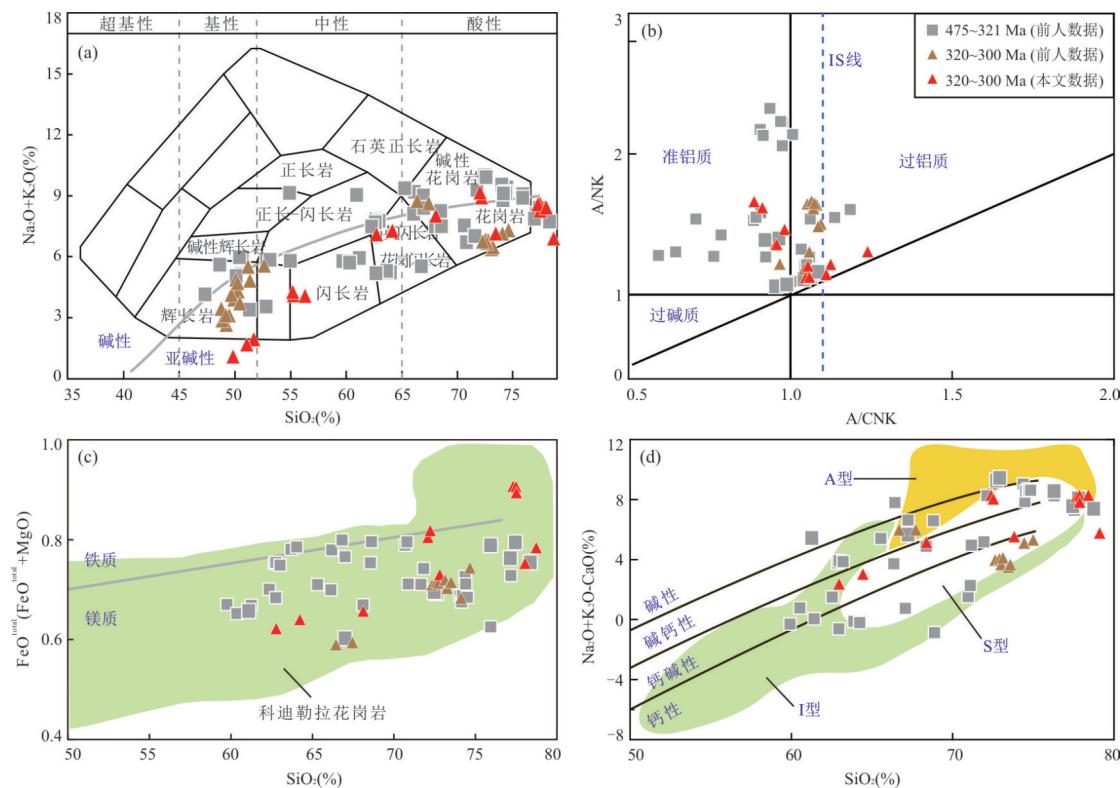


图 6 TAS 图解(a; Cox *et al.*, 1979); A/CNK-A/NK 图解(b; Maniar and Piccoli, 1989);  $\text{SiO}_2\text{-FeO}^{\text{total}}/(\text{FeO}^{\text{total}}+\text{MgO})$  图解(c) 和  $\text{SiO}_2\text{-}(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$  图解(d; Frost *et al.*, 2001)

Fig.6 TAS diagram (a; Cox *et al.*, 1979); A/CNK-A/NK plot (b; Maniar and Piccoli, 1989);  $\text{SiO}_2\text{-FeO}^{\text{total}}/(\text{FeO}^{\text{total}}+\text{MgO})$  diagram (c);  $\text{SiO}_2\text{-}(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO})$  plot (d; Frost *et al.*, 2001)

已发表数据来源同图 2; 图 b~d 中数据点的  $\text{SiO}_2 > 56\%$

围内。尽管该阶段的岩浆岩具有不同的结晶年龄和主量元素含量, 它们的微量元素特征总体差别不大。在稀土配分模式图上总体显示轻稀土元素(LREE)富集、中稀土元素(HREE)亏损的右倾型模式, 且具有 LREE 内部显著分异、HREE 平坦的特征(图 7a)。此外, 绝大多数样品表现不同程度的负 Eu 异常, 反映源区存在不同程度的斜长石堆晶作用。样品的微量元素图解整体上具有大离子亲石元素(LILE)富集、高场强元素(HFSE)亏损的特点, 并具有明显的 Nb、Ta、Sr、P、Eu、Ti 负异常(图 7b)。

第二阶段(320~300 Ma)的岩浆岩根据  $\text{SiO}_2$  含量明显分为两组。偏基性的岩浆岩主要包括骆驼沟岩体和本文研究的石英闪长岩(084)和角闪石岩墙(085-1)。骆驼沟岩体样品具有相对稳定的  $\text{SiO}_2$ (48%~52%)和  $\text{MgO}$ (6.2%~7.4%)含量, 以及变化较大的  $\text{TiO}_2$ (0.6%~2.2%)含量。它们的  $\text{Mg}^{\#}$ (35~67)、 $\text{Cr}$ ( $3.08 \times 10^{-6}$ ~ $578 \times 10^{-6}$ )、 $\text{Ni}$ ( $12.4 \times 10^{-6}$ ~ $107 \times 10^{-6}$ )含量也相对变化较大。多

数样品属于拉斑玄武岩系列(Tang *et al.*, 2012)。样品均表现平缓右倾型的稀土配分型式(图 7c),  $\text{La}/\text{Yb}$  比值为 1.1~18.9, 具有微弱的 Eu 异常( $\delta\text{Eu}=0.77\sim1.37$ )。其微量元素图解同样显示平缓右倾型的特点, 未见明显的 Nb、Ta、Ti 异常, 类似于 E-MORB(图 7d; Tang *et al.*, 2012)。石英闪长岩和角闪石岩墙的  $\text{SiO}_2$  含量分别为 53.70%~55.08% 和 48.42%~50.50%, 在 TAS 图解上均显示亚碱性特征(图 6a)。石英闪长岩样品具有 LREE 显著富集、HREE 相对平坦, 且没有 Eu 异常的稀土配分型式(图 7c); 在微量元素蛛网上显示 LILE 富集、HFSE 亏损以及显著的 Nb、Ta、Ti 负异常的特征(图 7d)。相较而言, 角闪石岩墙样品呈现中稀土元素(MREE)富集的上凸型稀土元素配分模式, 且具有明显的 Eu 负异常(图 7c), 这是由于角闪石相对富集 MREE 的缘故(Chambeuf *et al.*, 2013)。角闪石岩墙样品在微量元素图解上表现轻微的 LILE 富集以及 Ti 的负异常(图 7d)。

第二阶段的花岗质岩类( $\text{SiO}_2 > 56\%$ )主要岩性

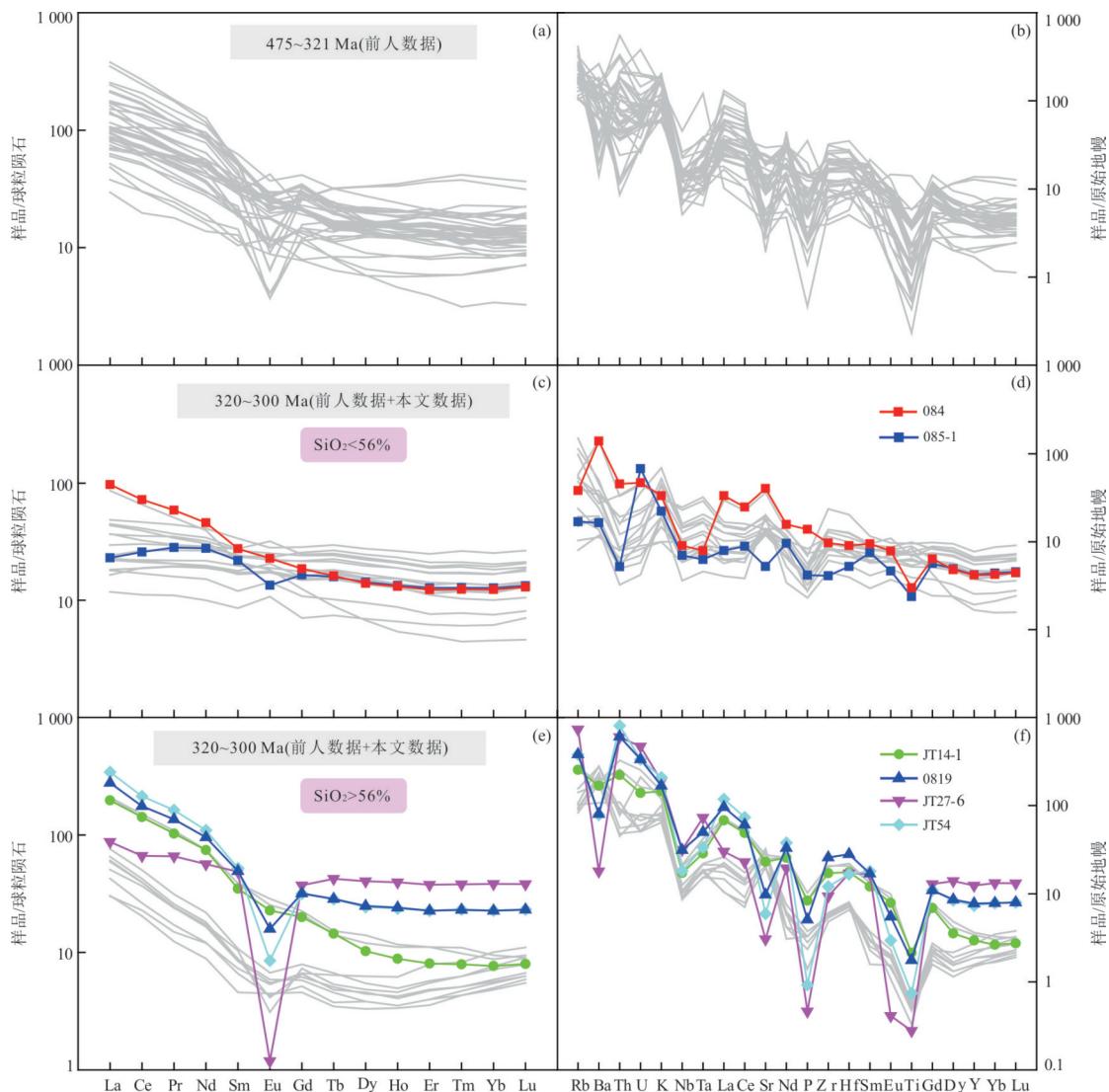


图7 西天山巴伦台地区古生代岩浆岩的球粒陨石标准化稀土配分模式图和原始地幔标准化微量元素图解

Fig.7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergrams for the Paleozoic igneous rocks in the Baluntai domain of the Chinese western Tianshan

标准化值引自 Sun and McDonough(1989);已发表数据来源同图2

包括花岗闪长岩、黑云母花岗岩和钾长花岗岩,  $\text{SiO}_2$  含量在 62%~80% 之间, 绝大多数样品的  $\text{SiO}_2$  含量 > 72%, 隶属于高分异花岗岩的范畴(吴福元等, 2017). 样品的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  含量变化很大, 在 TAS 图中落入花岗闪长岩和花岗岩的区域(图 6a). 样品的 A/CNK 值为 0.88~1.24, 绝大多数小于 1.1, 与  $\text{SiO}_2$  含量具有明显的正相关关系, 总体上为准铝质-弱过铝质岩系(图 6b). 在 Fe 指数-SiO<sub>2</sub> 和 MALI 指数-SiO<sub>2</sub> 相关关系图中, 样品分别落入镁质花岗岩和钙性-钙碱性-碱钙性的范围内(图 6c~6d). 所有样品的  $\text{K}_2\text{O}$  含量变化很大, 大部分属于钙碱性和高钾钙碱性系列(图 8a). 该阶段花岗质岩样品的稀土配分型式和微量元素图解变化较大(图

7e~7f). 其中, 艾日肯齐肯花岗岩体(锆石 U-Pb 年龄为 320 Ma)具有较低的稀土元素含量, 且显示 LREE 相对 HREE 强烈富集的下凸型稀土配分模式; 微量元素图解上显示 LILE 相对 HFSE 富集以及明显的 Nb、Ta、Ti 的负异常(图 7e~7f; Jin et al., 2014). 黑云母花岗岩(JT14-1)在稀土配分模式图上显示 LREE 强烈富集、HREE 内部分异和 Eu 异常不显著的右倾型特征, 在微量元素图解上显示 LILE 相对 HFSE 强烈富集和明显的 Nb、Ta、P、Ti 负异常的特点, 与前人报道的数据一致(Ma et al., 2015). 细粒钾长花岗斑岩(JT54)和钾长花岗岩(0819)具有非常相似的稀土配分型式和微量元素特征, 如 LREE 和 LILE 富集、HREE 和 HFSE 亏损以及显著

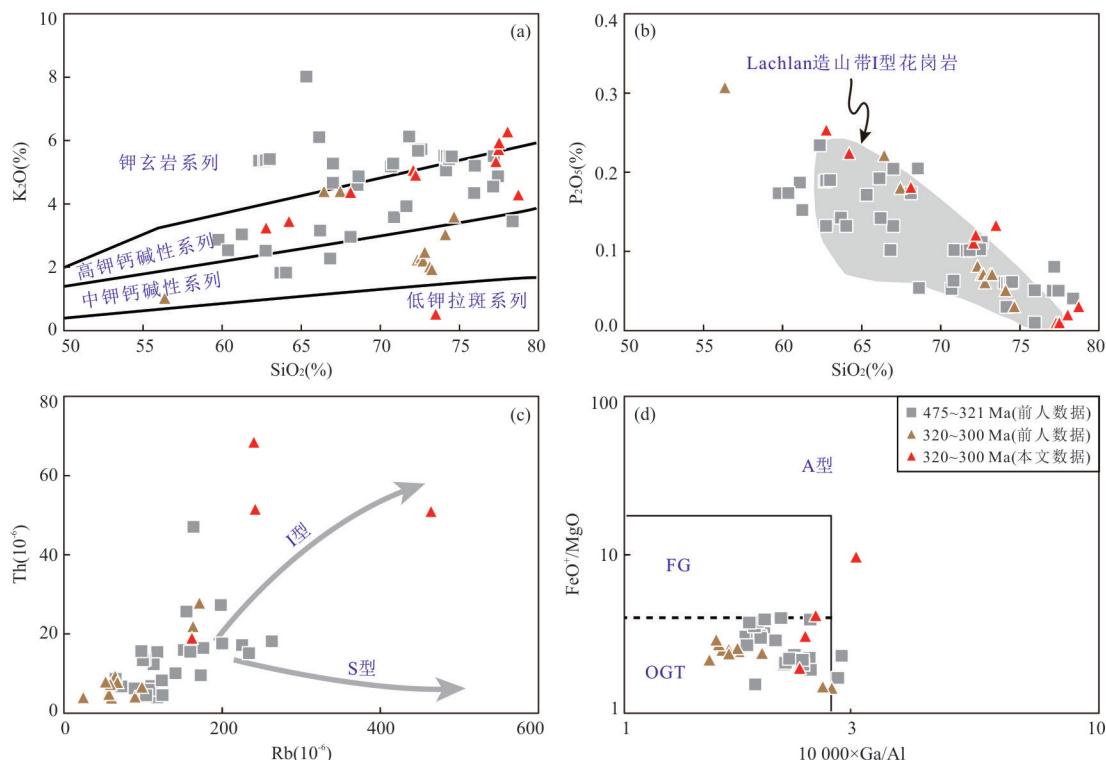


图8 西天山巴伦台地区古生代花岗质岩类( $\text{SiO}_2 > 56\%$ )的 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图解(a); $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$ 相关关系图(b);Rb-Th协变图解(c;Chappell and White, 1992); $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}\text{-FeO}^*/\text{MgO}$ 图解(d;Whalen *et al.*, 1987)

Fig.8  $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$  diagram (a);  $\text{SiO}_2\text{-P}_2\text{O}_5$  diagram (b); Rb-Th plot (c; Chappell and White, 1992); and  $10000 \times \text{Ga}/\text{Al}\text{-FeO}^*/\text{MgO}$  (d; Whalen *et al.*, 1987) discrimination diagram for the Paleozoic granitoid rocks ( $\text{SiO}_2 > 56\%$ ) in the Baluntai domain of the Chinese western Tianshan

图b中阴影区代表澳大利亚Lachlan造山带早古生代I型花岗岩的分布范围,据李献华等(2007).图d中FG代表分异型花岗岩;OGT代表未分异的M-/I-/S型花岗岩

的Nb、Ta、P、Eu、Ti负异常(图7e~7f).此外,粗粒钾长花岗斑岩(JT27-6)具有LREE和HREE总体平坦、Eu负异常显著的海鸥型稀土配分模式,在微量元素图解上显示LILE相对HFSE富集和显著的Ba、Nb、Sr、P、Eu、Ti负异常的特征(图7e~7f).

## 4 讨论

### 4.1 岩石类型和成因

第一阶段(475~321 Ma)的镁铁质岩浆岩样品具有较低的 $\text{SiO}_2$ 和较高的 $\text{MgO}$ ( $\text{Mg}^\# = 42\sim66$ )、Cr(主要为 $64 \times 10^{-6}\sim250 \times 10^{-6}$ )、Co(主要为 $20 \times 10^{-6}\sim38 \times 10^{-6}$ )、Ni(主要为 $12 \times 10^{-6}\sim106 \times 10^{-6}$ )含量,表明它们起源于地幔源区.这些样品富集LREE和LILE、亏损HREE和HFSE,以及具有明显的Nb、Ta、Ti负异常,类似于岛弧玄武岩的微量元素特征,暗示其地幔源区受到了俯冲带相关流体/熔体的交代.根据它们的锆石Hf模式年龄

(0.69~2.20 Ga)远大于其侵位时代,表明其岩浆源区为古老的大陆岩石圈地幔(Ma *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2014; Zhong *et al.*, 2015).此外,多数样品HREE含量较高且相对平坦,具有较低的La/Yb(6.1~14.5)和Dy/Yb(1.59~2.51)比值,反映源区部分熔融深度较浅,位于尖晶石相稳定域.因此,第一阶段的镁铁质岩浆岩的源区为俯冲交代富集的古老岩石圈地幔(即尖晶石相二辉橄榄岩).

第一阶段(475~321 Ma)的花岗质岩类总体上属于准铝质-弱过铝质的高钾钙碱性和钾玄岩系列(图6b和图8a).所有样品的 $\text{P}_2\text{O}_5$ 与 $\text{SiO}_2$ 含量呈明显的负相关关系,和澳大利亚Lachlan造山带中I型花岗岩类似(Chappell, 1999),表明它们的母岩浆在演化早期发生了磷灰石的分离结晶,属于准铝质-弱过铝质花岗岩浆(李献华等, 2007).此外,这些样品的Th和Rb含量呈正相关关系,这是因为Th富集的矿物在准铝质岩浆演化早期不会优先结晶(Chappell, 1999).因此,该阶段的花岗质岩类应该

属于I型花岗岩,而不是强过铝质的S型花岗岩,与缺乏堇青石、白云母和石榴子石等富铝矿物相吻合。通常,I型花岗岩被认为是壳源的,其源区主要为下地壳的变基性岩,幔源物质贡献相对较小(吴福元等,2007;Chappell *et al.*, 2012)。根据部分花岗质岩石样品的锆石Hf模式年龄在0.75~2.51 Ga之间(Ma *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2014; 黄河等,2015; Wang *et al.*, 2021a),限定其岩浆源区为古老的下地壳岩石。因此,第一阶段花岗质岩类主要来自于古老下地壳的变基性岩的部分熔融。

第二阶段(320~300 Ma)的镁铁质岩类因其较低的SiO<sub>2</sub>含量和较高的MgO含量同样来源于地幔源区。其中,骆驼沟岩体的岩石成因研究非常详细。骆驼沟岩体具有类似E-MORB的稀土元素和微量元素特征,如相对平坦的右倾型稀土配分模式、微弱的Eu异常和无明显的Nb、Ta、Ti负异常(图7c~7d)。骆驼沟岩体样品的初始Sr同位素比值为0.704 01~0.705 90,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值集中在+4.3~+7.8之间,表明其岩浆源区中亏损地幔的贡献较大(朱永峰等,2006; Tang *et al.*, 2012)。结合单斜辉石矿物成分变化及母岩浆成分模拟,Tang *et al.*(2012)提出骆驼沟岩体是俯冲交代富集的岩石圈地幔和上涌的软流圈地幔在较浅区域(尖晶石相稳定域)相互作用并发生部分熔融的产物。本文研究的角闪石岩墙在微量元素图解上显示微弱的Nb、Ta负异常,和骆驼沟岩体相似,可能表明它们具有相似的地幔源区。但是,本文研究的石英闪长岩样品具有LREE和LILE富集、HREE和HFSE亏损以及明显的Nb、Ta、Ti负异常的稀土元素和微量元素特征,完全不同于骆驼沟岩体,表明其岩浆源区主要为受俯冲交代富集的岩石圈地幔。

第二阶段花岗质岩类总体上属于准铝质-弱过铝质的中钾钙碱性和高钾钙碱性岩石(图6b和图8a)。所有样品的P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和SiO<sub>2</sub>含量呈明显的负相关关系,与Lachlan褶皱带的I型花岗岩类似,而且Rb和Th含量也显示明显的正相关关系,与I型花岗岩的演化趋势一致,明显不同于S型花岗岩(图8b~8c)。此外,除粗粒钾长花岗斑岩样品JT27-6之外,其余样品的10 000×Ga/Al值为1.5~2.7,没有落入A型花岗岩的范围(图8d),因此,这些样品均属于I型花岗岩。值得注意的是,粗粒钾长花岗斑岩样品JT27-6的10 000×Ga/Al值为3.1,落入A型花岗岩的范围(Whalen *et al.*, 1987),且显示HREE含量

高、Eu负异常非常显著的海鸥型稀土配分型式以及Ba、Sr、P、Eu、Ti极其亏损的微量元素特征,与A型花岗岩的微量元素特征非常相似。但是,该样品的Zr含量为105×10<sup>-6</sup>, Zr+Nb+Ce+Y含量为224×10<sup>-6</sup>,远小于A型花岗岩的判别标准Zr>250×10<sup>-6</sup>, Zr+Nb+Ce+Y>350×10<sup>-6</sup>(Whalen *et al.*, 1987);同时,该样品和细粒钾长花岗斑岩属于同一岩体的不同侵入相,且不含有A型花岗岩中特有的碱性暗色矿物,这些证据显然不支持粗粒钾长花岗斑岩为A型花岗岩。笔者注意到该样品的Nb/Ta比值为7.5,Zr/Hf比值为19.9,远小于正常花岗岩的比值,表明该样品经历了高程度的结晶分异作用,属于高分异I型花岗岩,这也就可以很好地解释它为什么会显示A型花岗岩的一些地球化学特征(吴福元等,2007;吴福元等,2017)。因此,第二阶段的花岗质岩均属于I型花岗岩(部分为高分异I型花岗岩),其岩浆源区主要为下地壳的变基性岩。笔者野外观察发现黑云母花岗岩JT14-1中产出较多的闪长质暗色微粒包体,表明岩浆形成过程中存在幔源玄武质岩浆的贡献,这也得到了变化范围很大的锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值(-10.4~+2.5)的支持(Ma *et al.*, 2015)。所有花岗质岩样品的稀土配分型式和微量元素特征变化非常大,可能与源区部分熔融深度(导致残留相不同)和结晶分异程度有关。因此,该阶段花岗岩是幔源基性岩浆的底侵(提供热和物质)导致下地壳基性岩石发生部分熔融,然后经历岩浆混合和结晶分异作用的产物。

#### 4.2 构造背景及意义

西天山造山带是中亚造山带西段与塔里木克拉通的最终拼合位置,记录了中亚造山带西段的增生造山过程及其与Pangea超大陆聚合的时空关系(Wang *et al.*, 2018a)。过去30年来许多学者从岩浆作用、变质作用、蛇绿混杂岩、构造变形、古地磁、沉积作用等不同学科角度开展了大量的研究,对西天山造山带的俯冲-增生造山过程进行了详细的讨论,但尚未达成共识(Yang *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2011; Xiao *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2014; Ma *et al.*, 2014; Zhong *et al.*, 2015; Han and Zhao, 2018; Wang *et al.*, 2018a, 2018b, 2021a; Huang *et al.*, 2020; Abuduxun *et al.*, 2021)。古生代岩浆岩在西天山广泛分布,因而研究程度很高,其年代学、岩石成因和源区性质获得了很好的限定,但在反演其形成的构造背景时出现了百家争鸣的

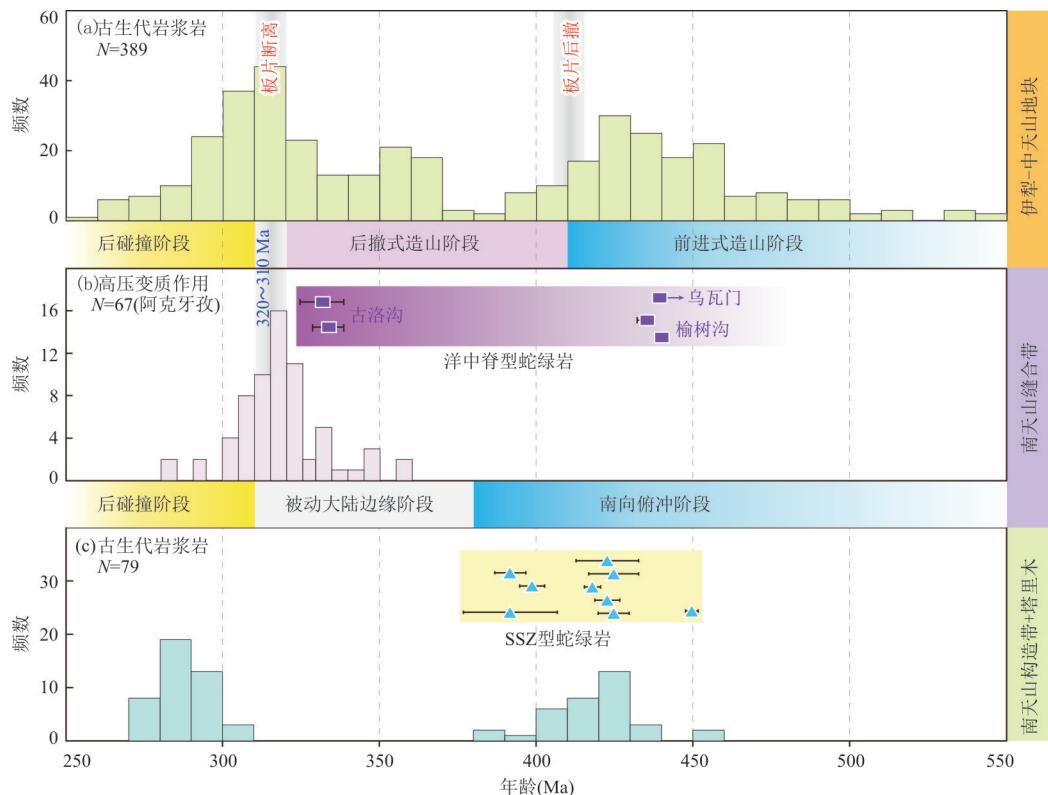


图9 西南天山地区古生代岩浆岩结晶年龄、蛇绿岩形成时代和阿克牙孜高压变质岩变质时代统计

Fig.9 Compilation of the crystallization ages for the Paleozoic igneous rocks, the formation ages for the ophiolites, and the metamorphic ages for the Akeyazi high-pressure metamorphic terrane in the Chinese southwestern Tianshan

标准引用数据来源参考 Wan *et al.*(2021)、Wang *et al.*(2018a, 2021a)

局面。其中一个重要原因在于单纯依靠花岗质岩石的成因类型和地球化学特征来判断其形成的构造背景存在多解性,其地球化学组成通常是其源岩成分以及部分熔融和结晶分异演化过程的综合结果(Frost *et al.*, 2001; 李献华等, 2007; 吴福元等, 2007)。比如,I型花岗岩可以形成于同俯冲、同碰撞、后碰撞甚至非造山等许多不同的构造背景(李献华等, 2007);A型花岗岩需要高温-低压的条件,往往与拉张背景有关,可以产生于洋中脊俯冲、俯冲板片后撤、板片断离、后碰撞伸展以及地幔柱等大地构造环境(Collins *et al.*, 1982; Whalen *et al.*, 1987)。因此,准确限定西天山造山带的俯冲-增生造山过程及不同构造体制的转换时限,一方面要注重岩浆岩组合的研究,另一方面要综合变质岩、沉积岩、构造变形、蛇绿岩的研究成果进行综合判断。

年代学研究表明,伊犁-中天山地块南缘的古生代岩浆活动发育相对连续,从晚寒武世一直到晚二叠世均有出露,且明显分成两个阶段,即500~390 Ma 和 370~260 Ma(图9a);而南天山构造带和塔里木北缘的古生代岩浆活动相对有限,也可以分

为两个阶段,即460~380 Ma 和 310~270 Ma(图9a)。蛇绿岩研究结果表明古生代时期西天山造山带至少存在两个洋盆的相互作用,包括以古洛沟、乌瓦门、榆树沟、铜花山蛇绿岩为代表的南天山洋,位于伊犁-中天山地块和塔里木克拉通之间;及以巴音沟蛇绿岩为代表的北天山洋,位于伊犁-中天山地块和准噶尔地体之间(Gao *et al.*, 1998; Han *et al.*, 2010, 2011; Jiang *et al.*, 2014)。在伊犁地块和中天山地块之间可能存在一个早古生代洋盆,以夏特蛇绿岩为代表,但研究表明该洋盆在早奥陶世关闭导致了伊犁-中天山统一地块的形成(Gao *et al.*, 2009; Qian *et al.*, 2009)。尽管目前对于北天山洋的开启时限和俯冲起始时限无法确定,但其俯冲极性和闭合时限不存在争议,大家普遍接受该洋盆往南向伊犁-中天山地块之下俯冲消减,并在晚石炭世时期(约316 Ma)已经闭合(Han *et al.*, 2010)。乌兹别克斯坦 Sultan-Uvais 山的 Kazansai 蛇绿岩中斜长花岗岩的锆石 U-Pb 年龄为~505 Ma, 表明南天山洋在寒武纪中期已经存在(Dolgopolova *et al.*, 2017)。但目前对南天山洋的俯冲极性和闭合时限

存在较大分歧,俯冲极性方面存在单一的南向或者北向俯冲以及双向俯冲这3种主要观点,闭合时限方面存在中-晚泥盆世、晚石炭世甚至晚三叠世等不同观点(Gao *et al.*, 1998; Charvet *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2011, 2018a; Ge *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2013; Jiang *et al.*, 2014; Han and Zhao, 2018; Sang *et al.*, 2018; Abduxun *et al.*, 2021).

伊犁-中天山地块南缘的古生代岩浆岩和地层在构造变形和变质程度方面具有明显的区别,早古生代的岩浆岩和地层发生了强烈的韧性变形和绿片岩相-角闪岩相变质作用;而晚古生代的岩浆岩和地层没有发生韧性变形和变质作用(Zhong *et al.*, 2015, 2017; Wang *et al.*, 2021a).由于早古生代地层和晚古生代地层之间存在一个明显的角度不整合面,部分学者视为南天山洋在中-晚泥盆世闭合后由陆陆(伊犁-中天山地块和塔里木克拉通)碰撞向后碰撞伸展的构造体制转换的产物(Charvet *et al.*, 2011).但是,南天山地区最年轻的古洛沟蛇绿岩的形成时代被限定在330 Ma左右,表明南天山洋的闭合时限晚于~330 Ma (Jiang *et al.*, 2014),显然不支持该洋盆在中-晚泥盆世闭合.既然北天山洋和南天山洋在早石炭世之前都没有关闭,一个随之而来的问题就是伊犁-中天山地块产出的古生代岩浆岩到底是北天山洋南向俯冲引起的(Wang *et al.*, 2007; Ma *et al.*, 2014; Cao *et al.*, 2017)抑或是南天山洋北向俯冲导致的(Zhu *et al.*, 2009; Long *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2021a).目前笔者对此问题无法给出明确答案,但考虑到南天山洋在中寒武世已经存在,且阿克牙孜洋壳型高压变质岩记录的最早变质年龄为360 Ma左右(Tan *et al.*, 2019),笔者认为伊犁-中天山地块南缘的古生代岩浆作用受控于南天山洋的北向俯冲(Wang *et al.*, 2018c, 2021a).近期有学者也提出伊犁-中天山地块的晚古生代火山-沉积建造的空间分布和变化规律指示南天山洋向北俯冲(李永军等, 2017).早古生代和晚古生代岩浆岩除了构造变形和变质程度的差异,它们的锆石Hf同位素组成也存在明显区别,早古生代(500~410 Ma)岩浆岩的锆石Hf同位素变化范围很大,表明古老陆壳物质和新生幔源物质均有贡献;而晚古生代(410~321 Ma)岩浆岩的锆石Hf同位素组成随年龄减小逐渐升高,暗示新生幔源物质的贡献不断增加(Wang *et al.*, 2021a).

据此本文提出伊犁-中天山地块南缘的古生代(>320 Ma)岩浆岩整体形成于南天山洋北向俯冲背景下,但早古生代时期南天山洋板片以低角度俯冲形成挤压构造体制,而晚古生代时期由于板片后撤导致南天山洋板片以高角度俯冲形成伸展构造体制(Wang *et al.*, 2021a).该模型可以解释伊犁-中天山地块南缘的诸多地质现象,包括:(1)早古生代和晚古生代岩浆岩的构造变形、变质程度以及锆石Hf同位素组成差异(Wang *et al.*, 2021a);(2)早泥盆世的角度不整合面(Wang *et al.*, 2021a);(3)晚古生代的高角闪岩相至麻粒岩相变质作用(Xia *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2018, 2019; Li *et al.*, 2020);及(4)晚古生代OIB型基性岩和A型花岗岩的形成(Ma *et al.*, 2014; Zhong *et al.*, 2017).

伊犁-中天山地块南缘的古生代岩浆岩的时空分布规律显示,在320~310 Ma存在一个岩浆爆发期(图9a),岩石类型多样,且具有非常亏损的全岩Nd同位素和锆石Hf同位素组成,表明该岩浆爆发期以亏损地幔来源的新生物质贡献为主(Tang *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018c).据此大部分研究表明该期岩浆作用是在伸展环境下形成的,但存在板片后撤(Tang *et al.*, 2012)、后碰撞伸展(林靓等, 2015)以及陆内裂谷环境(李永军等, 2017)等不同的认识.沿中天山南缘断裂出露阿克牙孜洋壳型高压-超高压变质地体的峰期变质年龄集中在320~310 Ma之间(图9b;李继磊等, 2017),其折返至浅构造层次的时间被限定在313~302 Ma(Klemd *et al.*, 2005; Klemd *et al.*, 2011),表明该变质地体经历了快速的折返过程.大量研究证实,俯冲板片断离能够引起强烈而短暂的岩浆活动和高压变质岩的快速折返(Davies and von Blanckenburg, 1995; Warren *et al.*, 2008; Garzanti *et al.*, 2018).板片断裂通常发生在大陆碰撞的晚期阶段,往往在板片俯冲角度变陡、板片回撤之后.当洋壳俯冲殆尽,与其相连的大陆岩石圈在高密度俯冲洋壳的拖拽下进入俯冲带,但是由于大陆岩石圈密度低难以持续俯冲,因而会在俯冲板片的应力集中处发生板片断离.板片断离会导致板片窗的形成,软流圈地幔通过板片窗上涌引发不同物质(包括软流圈地幔本身、岩石圈地幔以及上覆大陆地壳)发生部分熔融而引发爆发性的岩浆活动(Garzanti *et al.*, 2018).另一方面,俯冲板片断离后,对大陆岩石圈的拖拽力消失,

导致残余板片在浮力作用下迅速回弹,有利于高压变质岩的快速折返(Warren *et al.*, 2008; 李继磊等, 2017).另一方面,板片回撤以及板片断离均会伴随软流圈地幔上涌,导致俯冲带上覆板片整体处于伸展构造环境,为深部高压变质岩石的折返提供了帮助(Brun and Faccenna, 2008; Agard *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2021b).板片断离导致的高压/超高压变质地体折返多发生在板块俯冲-碰撞事件的晚期阶段,例如西阿尔卑斯和New Caledonia的高压变质地体(Agard *et al.*, 2009).因此,笔者认为本文研究的骆驼沟岩体、石英闪长岩和角闪石岩墙形成于板片断离的构造背景下,其形成标志着西南天山地区从同碰撞向后碰撞的构造体制转换.由于板片断离发生在大陆碰撞的晚期阶段,可以代表洋盆关闭和大陆碰撞的时代上限,表明南天山洋的闭合时限以及伊犁-中天山地块和塔里木的碰撞时限在330~320 Ma之间.

若板片断离确实发生在320~310 Ma左右,那么晚石炭世-晚二叠世(310~260 Ma)时期西南天山地区进入后碰撞阶段,通常会发生加厚岩石圈的拆沉并导致拉张环境的形成,并以发育广泛的岩浆活动和区域性走滑剪切作用为特征.该期岩浆活动沿中天山南缘缝合带呈带状分布,且跨越块体边界(Wan *et al.*, 2021),除少数岩浆岩受同期韧性走滑剪切影响外,其余岩浆岩均未发生构造变形.稍早阶段(约310~300 Ma)岩浆岩显示较为亏损的Nd-Hf同位素特征(Huang *et al.*, 2020),表明其岩浆源区或多或少地受到板片断离后上涌的软流圈地幔的影响.而晚期(300~250 Ma)岩浆岩的Nd-Hf同位素显示非常宽的范围(Tang *et al.*, 2017),表明其岩浆源区既有软流圈地幔物质的加入,也有古老岩石圈地幔和古老地壳的贡献.绝大多数花岗质岩石属于高钾钙碱性-钾玄岩系列,其中部分花岗岩为典型的A2型花岗岩,指示后碰撞伸展环境(Long *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2015; Han and Zhao, 2018).同期构造变形作用以区域性韧性走滑剪切为主,主要沿先存的缝合带或块体内部薄弱带广泛发育,活动时代在290~240 Ma之间(Laurent-Charvet *et al.*, 2003; Yang *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2020).同期沉积作用从石炭纪晚期的海陆交互相岩石建造向二叠纪陆相磨拉石建造或陆相双峰式火山岩-火山碎屑岩组合转变,两者存在明显的角度不整合,表明西南天山地区在后碰撞伸展背景下由于软流圈上涌

发生了隆升作用(Gao *et al.*, 1998; Han *et al.*, 2011; 李永军等, 2017).因此,晚石炭世-晚二叠世(310~260 Ma)的岩浆岩(包括本文研究的钾长花岗岩、钾长花岗斑岩和黑云母花岗岩)是在后碰撞伸展的构造背景下形成的,属于典型的后碰撞岩浆作用(Liégeois, 1998; 许文良等, 2020).

根据以上的讨论,本文提出了一个更为自洽的西天山造山带古生代构造模型(图10).早古生代时期,北天山洋和南天山洋分别向伊犁-中天山地块之下俯冲消减,并在两侧形成安第斯型活动大陆边缘.由于在南天山构造带和塔里木北缘发育460~380 Ma的岛弧型岩浆活动(Ge *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2020)以及南天山构造带南缘散布的SSZ型蛇绿岩(Wang *et al.*, 2011; Jiang *et al.*, 2014),表明早古生代时期南天山洋同时往南向南天山构造带和塔里木之下俯冲消减,形成日本型沟-弧-盆系统.晚古生代时期,北天山洋和南天山洋继续向伊犁-中天山地块之下俯冲,其中,南天山洋板片发生板片后撤导致上覆板片处于伸展构造背景;而此时南

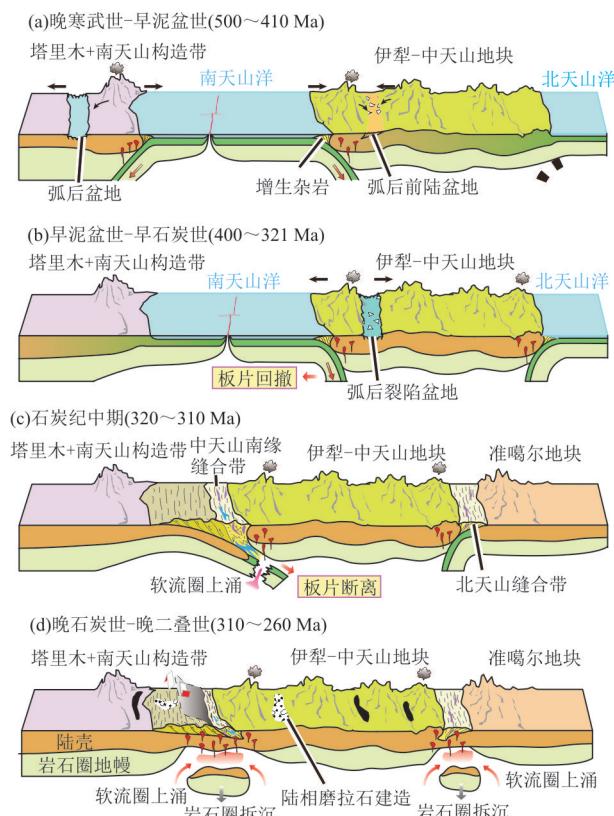


图 10 西天山造山带古生代地球动力学演化模型

Fig.10 Schematic geodynamic evolution model of the Chinese western Tianshan orogenic belt during the Paleozoic times

天山洋南向俯冲停止,南天山构造带由活动大陆边缘转变为被动大陆边缘(Wang *et al.*, 2018a). 大约在石炭纪中期(约330~320 Ma),北天山洋和南天山洋基本同时闭合,中亚造山带西段和塔里木克拉通最终拼合,成为Pangea超大陆北方大陆的组成部分(Wang *et al.*, 2018a). 在石炭纪晚期(约320~310 Ma),南天山洋发生板片断离,标志着西南天山地区从大陆碰撞向后碰撞转换的构造体制. 石炭纪晚期至二叠纪,整个西天山地区发生加厚岩石圈的拆沉,处于后碰撞伸展的构造背景.

## 5 结论

位于中亚造山带西南缘的西天山造山带发育广泛的古生代岩浆活动,是揭示该地区从大洋俯冲增生造山到大陆碰撞造山过程的直接物质记录. 本文研究的我国西天山巴仑台地区的7个古生代岩浆岩形成于晚石炭世(319~307 Ma),其中镁铁质岩浆岩起源于软流圈地幔或者受俯冲交代的岩石圈地幔,而花岗质岩浆岩均属于I型花岗岩,起源于下地壳变基性岩的部分熔融. 综合不同学科(包括岩浆岩、沉积岩、变质岩和蛇绿岩等)的研究资料,本文认为西南天山地区的古生代岩浆作用是南天山洋俯冲和关闭的产物,其中伊犁-中天山地块南缘的>320 Ma的岩浆活动受控于南天山洋的北向俯冲,并在早泥盆世时期发生俯冲板片后撤;320~310 Ma的岩浆爆发期和洋壳型高压变质岩的峰期变质时代同期,可被解释为板片断离的结果,标志着南天山洋闭合之后的构造体制由大陆碰撞转变为后碰撞伸展环境;<310 Ma的岩浆活动则形成于后碰撞伸展的构造背景下,标志着中亚造山带西段已经由汇聚板块边缘演化为陆内环境.

**致谢:**本研究的实验分析工作得到了中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室以及中国科学院地质与地球物理研究所岩矿制样与分析实验室和成矿年代学实验室相关工作人员的支持和帮助. 感谢两位评审人对本文提出的宝贵修改意见和建议,大大提高了本文的质量!

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>).

## References

- Abduxun, N., Xiao, W. J., Windley, B. F., et al., 2021. Terminal Suturing between the Tarim Craton and the Yili - Central Tianshan Arc: Insights from Mélange - Ocean Plate Stratigraphy, Detrital Zircon Ages, and Provenance of the South Tianshan Accretionary Complex. *Tectonics*, 40(7): e2021TC006705. <https://doi.org/10.1029/2021tc006705>
- Agard, P., Yamato, P., Jolivet, L., et al., 2009. Exhumation of Oceanic Blueschists and Eclogites in Subduction Zones: Timing and Mechanisms. *Earth - Science Reviews*, 92(1-2): 53–79. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.11.002>
- Alexeiev, D. V., Biske, Y. S., Djenchuraeva, A. V., et al., 2019a. Late Carboniferous (Kasimovian) Closure of the South Tianshan Ocean: No Triassic Subduction. *Journal of Asian Earth Sciences*, 173: 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2019.01.021>
- Alexeiev, D. V., Kröner, A., Kovach, V. P., et al., 2019b. Evolution of Cambrian and Early Ordovician Arcs in the Kyrgyz North Tianshan: Insights from U-Pb Zircon Ages and Geochemical Data. *Gondwana Research*, 66: 93–115. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.09.005>
- Allen, M. B., Windley, B. F., Zhang, C., 1993. Palaeozoic Collisional Tectonics and Magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia. *Tectonophysics*, 220(1-4): 89–115. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90225-9](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90225-9)
- Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses That Do not Report <sup>204</sup>Pb. *Chemical Geology*, 192(1-2): 59–79. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00195-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X)
- Barbarin, B., 1999. A Review of the Relationships between Granitoid Types, Their Origins and Their Geodynamic Environments. *Lithos*, 46(3): 605–626. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00085-1](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00085-1)
- Brun, J. P., Faccenna, C., 2008. Exhumation of High-Pressure Rocks Driven by Slab Rollback. *Earth and Planetary Science Letters*, 272(1-2): 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.02.038>
- Cao, Y. C., Wang, B., Jahn, B. M., et al., 2017. Late Palaeozoic Arc Magmatism in the Southern Yili Block (NW China): Insights to the Geodynamic Evolution of the Balkhash-Yili Continental Margin, Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 278–281: 111–125. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.01.023>
- Cawood, P. A., Kröner, A., Collins, W. J., et al., 2009. Accretionary Orogenes through Earth History. *Geological Society, London, Special Publications*, 318(1): 1–36. <https://doi.org/10.1144/sp318.1>
- Chambefort, I., Dilles, J. H., Longo, A. A., 2013. Amphibole Geochemistry of the Yanacocha Volcanics, Peru:

- Evidence for Diverse Sources of Magmatic Volatiles Related to Gold Ores. *Journal of Petrology*, 54(5): 1017–1046. <https://doi.org/10.1093/petrology/egt004>
- Chappell, B. W., 1999. Aluminium Saturation in I- and S-Type Granites and the Characterization of Fractionated Haplogranites. *Lithos*, 46(3): 535–551. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(98\)00086-3](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(98)00086-3)
- Chappell, B. W., Bryant, C. J., Wyborn, D., 2012. Peraluminous I - Type Granites. *Lithos*, 153: 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.07.008>
- Chappell, B. W., White, A. J. R., 1992. I- and S - Type Granites in the Lachlan Fold Belt. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 83(1–2): 1–26. <https://doi.org/10.1017/s0263593300007720>
- Charvet, J., Shu, L. S., Laurent-Charvet, S., et al., 2011. Palaeozoic Tectonic Evolution of the Tianshan Belt, NW China. *Science China Earth Sciences*, 54(2): 166–184. <https://doi.org/10.1007/s11430-010-4138-1>
- Cheng, Y., Xiao, Q. H., Li, T. D., et al., 2021. An Intra-Oceanic Subduction System Influenced by Ridge Subduction in the Diyanmiao Subduction Accretionary Complex of the Xar Moron Area, Eastern Margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Earth Science*, 32(1): 253–266. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1404-4>
- Collins, W. J., Beams, S. D., White, A. J. R., et al., 1982. Nature and Origin of A -Type Granites with Particular Reference to Southeastern Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 80(2): 189–200. <https://doi.org/10.1007/BF00374895>
- Cox, K. G., Bell, J. D., Pankhurst, R. J., 1979. The Interpretation of Igneous Rocks. George Allen and Unwin, London.
- Davies, J. H., von Blanckenburg, F., 1995. Slab Breakoff: A Model of Lithosphere Detachment and Its Test in the Magmatism and Deformation of Collisional Orogens. *Earth and Planetary Science Letters*, 129(1–4): 85–102. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(94\)00237-S](https://doi.org/10.1016/0012-821X(94)00237-S)
- Dolgopolova, A., Seltmann, R., Konopelko, D., et al., 2017. Geodynamic Evolution of the Western Tien Shan, Uzbekistan: Insights from U-Pb SHRIMP Geochronology and Sr-Nd-Pb-Hf Isotope Mapping of Granitoids. *Gondwana Research*, 47: 76–109. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.10.022>
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., et al., 2001. A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 42(11): 2033–2048. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.11.2033>
- Gao, J., Li, M. S., Xiao, X. C., et al., 1998. Paleozoic Tectonic Evolution of the Tianshan Orogen, Northwestern China. *Tectonophysics*, 287(1–4): 213–231. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)80070-X](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)80070-X)
- Gao, J., Long, L. L., Klemd, R., et al., 2009. Tectonic Evolution of the South Tianshan Orogen and Adjacent Regions, NW China: Geochemical and Age Constraints of Granitoid Rocks. *International Journal of Earth Sciences*, 98(6): 1221–1238. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0370-8>
- Gao, J., Qian, Q., Long, L. L., et al., 2009. Accretionary Orogenic Process of Western Tianshan, China. *Geological Bulletin of China*, 28(12): 1804–1816 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J., Zhu, M. T., Wang, X. S., et al., 2019. Large-Scale Porphyry - Type Mineralization in the Central Asian Metallogenic Domain: Tectonic Background, Fluid Feature and Metallogenic Deep Dynamic Mechanism. *Acta Geologica Sinica*, 93(1): 24–71 (in Chinese with English abstract).
- Garzanti, E., Radeff, G., Malusà, M. G., 2018. Slab Break-off: A Critical Appraisal of a Geological Theory as Applied in Space and Time. *Earth-Science Reviews*, 177: 303–319. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.11.012>
- Ge, R. F., Zhu, W. B., Wu, H. L., et al., 2012. The Paleozoic Northern Margin of the Tarim Craton: Passive or Active? *Lithos*, 142–143: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.02.010>
- Geng, H. Y., Sun, M., Yuan, C., et al., 2009. Geochemical, Sr-Nd and Zircon U-Pb-Hf Isotopic Studies of Late Carboniferous Magmatism in the West Junggar, Xinjiang: Implications for Ridge Subduction? *Chemical Geology*, 266(3–4): 364–389. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.07.001>
- Han, B. F., Guo, Z. J., Zhang, Z. C., et al., 2010. Age, Geochemistry, and Tectonic Implications of a Late Paleozoic Stitching Pluton in the North Tian Shan Suture Zone, Western China. *Geological Society of America Bulletin*, 122(3–4): 627–640. <https://doi.org/10.1130/b26491.1>
- Han, B. F., He, G. Q., Wang, X. C., et al., 2011. 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. *Earth-Science Reviews*, 109(3–4): 74–93. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.09.001>
- Han, Y. G., Zhao, G. C., 2018. Final Amalgamation of the

- Tianshan and Junggar Orogenic Collage in the South-western Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the Closure of the Paleo-Asian Ocean. *Earth-Science Reviews*, 186: 129—152. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.012>
- Huang, H., Wang, T., Qin, Q., et al., 2015. Zircon Hf Isotopic Characteristics of Granitoids from the Baluntai Region, Central Tianshan: Implications for Tectonic Evolution and Continental Growth. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2286—2313 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H., Wang, T., Tong, Y., et al., 2020. Rejuvenation of Ancient Micro-Continents during Accretionary Orogenesis: Insights from the Yili Block and Adjacent Regions of the SW Central Asian Orogenic Belt. *Earth-Science Reviews*, 208: 103255. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103255>
- Jahn, B. M., Wu, F. Y., Chen, B., 2000. Massive Granitoid Generation in Central Asia: Nd Isotope Evidence and Implication for Continental Growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23(2): 82—92. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/2000/v23i2/001>
- Jiang, T., Gao, J., Klemd, R., et al., 2014. Paleozoic Ophiolitic Mélanges from the South Tianshan Orogen, NW China: Geological, Geochemical and Geochronological Implications for the Geodynamic Setting. *Tectonophysics*, 612—613: 106—127. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.038>
- Jin, Z. L., Zhang, Z. C., Huang, H., et al., 2014. Geochronology and Geochemistry of the Airikenqiken Granite, Central Tianshan Terrane, Xinjiang, China: Implications for Petrogenesis and Continental Growth. *International Geology Review*, 56(7): 801—822. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.901159>
- Klemd, R., Bröcker, M., Hacker, B. R., et al., 2005. New Age Constraints on the Metamorphic Evolution of the High-Pressure/Low-Temperature Belt in the Western Tianshan Mountains, NW China. *The Journal of Geology*, 113(2): 157—168. <https://doi.org/10.1086/427666>
- Klemd, R., John, T., Scherer, E. E., et al., 2011. Changes in Dip of Subducted Slabs at Depth: Petrological and Geochronological Evidence from HP-UHP Rocks (Tianshan, NW-China). *Earth and Planetary Science Letters*, 310(1—2): 9—20. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.07.022>
- Laurent-Charvet, S., Charvet, J., Monié, P., et al., 2003. Late Paleozoic Strike-Slip Shear Zones in Eastern Central Asia (NW China): New Structural and Geochronological Data. *Tectonics*, 22(2): 1009. <https://doi.org/10.1029/2001tc901047>
- Li, J. L., Gao, J., Wang, X. S., 2016. A Subduction Channel Model for Exhumation of Oceanic-Type High-Pressure to Ultrahigh-Pressure Eclogite-Facies Metamorphic Rocks in SW Tianshan, China. *Science in China (Series D)*, 47(1): 23—39 (in Chinese).
- Li, P. F., Sun, M., Rosenbaum, G., et al., 2020. Tectonic Evolution of the Chinese Tianshan Orogen from Subduction to Arc-Continent Collision: Insight from Polyphase Deformation along the Gangou Section, Central Asia. *GSA Bulletin*, 132(11—12): 2529—2552. <https://doi.org/10.1130/b35353.1>
- Li, P., Zhao, T. Y., Mu, L. X., et al., 2018. The Paleozoic Intrusive Magmatic Sequence and Tectonic Evolution of Central Tianshan Mountains in Xinjiang, NW China. *Geological Review*, 64(1): 91—107 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., Li, W. X., Li, Z. X., 2007. On the Genetic Classification and Tectonic Implications of the Early Yanshanian Granitoids in the Nanling Range, South China. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 981—991 (in Chinese).
- Li, Y. J., Wu, L., Li, S. L., et al., 2017. Tectonic Evolution of Yining Block: Insights from Carboniferous Volcanic Rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 33(1): 1—15 (in Chinese with English abstract).
- Liégeois, J. P., 1998. Preface: Some Words on the Post-Collisional Magmatism. *Lithos*, 45: XV—XVIII.
- Lin, L., Qian, Q., Wang, Y. L., et al., 2015. Gabbroic Pluton in the Dahalajunshan Formation Volcanic Rocks from Northern Zhaosu, Western Tianshan: Age, Geochemistry and Geological Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 31(6): 1749—1760 (in Chinese with English abstract).
- Long, L. L., Gao, J., Klemd, R., et al., 2011. Geochemical and Geochronological Studies of Granitoid Rocks from the Western Tianshan Orogen: Implications for Continental Growth in the Southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 126(3—4): 321—340. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.07.015>
- Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.6: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley.
- Ma, X. X., Shu, L. S., Meert, J. G., 2015. Early Permian Slab Breakoff in the Chinese Tianshan Belt Inferred from the Post-Collisional Granitoids. *Gondwana Research*, 27(1): 228—243. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.018>
- Ma, X. X., Shu, L. S., Meert, J. G., et al., 2014. The Paleozoic Evolution of Central Tianshan: Geochemical and Geochronological Evidence. *Gondwana Research*, 25(2):

- 797—819. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.05.015>
- Ma, X. X., Shu, L. S., Santosh, M., et al., 2013. Petrogenesis and Tectonic Significance of an Early Palaeozoic Mafic - Intermediate Suite of Rocks from the Central Tianshan, Northwest China. *International Geology Review*, 55(5): 548—573. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.727575>
- Maniar, P. D., Piccoli, P. M., 1989. Tectonic Discrimination of Granitoids. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635—643. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1989\)101:635:tdog>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101:635:tdog>2.3.co;2)
- Qian, Q., Gao, J., Klemd, R., et al., 2009. Early Paleozoic Tectonic Evolution of the Chinese South Tianshan Orogen: Constraints from SHRIMP Zircon U-Pb Geochronology and Geochemistry of Basaltic and Dioritic Rocks from Xiate, NW China. *International Journal of Earth Sciences*, 98(3): 551—569. <https://doi.org/10.1007/s00531-007-0268-x>
- Sang, M., Xiao, W. J., Orozbaev, R., et al., 2018. Structural Styles and Zircon Ages of the South Tianshan Accretionary Complex, Atbashi Ridge, Kyrgyzstan: Insights for the Anatomy of Ocean Plate Stratigraphy and Accretionary Processes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 9—41. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2017.07.052>
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Burtman, V. S., 1993. Evolution of the Altai Tectonic Collage and Palaeozoic Crustal Growth in Eurasia. *Nature*, 364(6435): 299—307. <https://doi.org/10.1038/364299a0>
- Sengör, A. M. C., Natal'in, B. A., Sunal, G., et al., 2018. The Tectonics of the Altaids: Crustal Growth during the Construction of the Continental Lithosphere of Central Asia between  $\sim$ 750 and  $\sim$ 130 Ma Ago. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 46: 439—494. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060313-054826>
- Shi, Y. R., Jian, P., Kröner, A., et al., 2014. Zircon Ages and Hf Isotopic Compositions of Plutonic Rocks from the Central Tianshan (Xinjiang, Northwest China) and Their Significance for Early to Mid-Palaeozoic Crustal Evolution. *International Geology Review*, 56(11): 1413—1434. <https://doi.org/10.1080/00206814.2014.942807>
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19>
- Tan, Z., Agard, P., Monié, P., et al., 2019. Architecture and P-T-Deformation-Time Evolution of the Chinese SW-Tianshan HP/UHP Complex: Implications for Subduction Dynamics. *Earth-Science Reviews*, 197: 102894. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102894>
- Tang, G. J., Chung, S. L., Hawkesworth, C. J., et al., 2017. Short Episodes of Crust Generation during Protracted Accretionary Processes: Evidence from Central Asian Orogenic Belt, NW China. *Earth and Planetary Science Letters*, 464: 142—154. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.02.022>
- Tang, G. J., Wang, Q., Wyman, D. A., et al., 2012. Metasomatized Lithosphere - Asthenosphere Interaction during Slab Roll-Back: Evidence from Late Carboniferous Gabbros in the Luotuogou Area, Central Tianshan. *Lithos*, 155: 67—80. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.08.015>
- Wan, B., Wang, X. S., Liu, X. J., et al., 2021. Long-Lived Seamount Subduction in Ancient Orogens: Evidence from the Paleozoic South Tianshan. *Geology*, 49(5): 531—535. <https://doi.org/10.1130/g48547.1>
- Wan, B., Xiao, W. J., Windley, B. F., et al., 2017. Contrasting Ore Styles and Their Role in Understanding the Evolution of the Altaids. *Ore Geology Reviews*, 80: 910—922. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.08.025>
- Wang, B., Liu, H. S., Shu, L. S., et al., 2014. Early Neoproterozoic Crustal Evolution in Northern Yili Block: Insights from Migmatite, Orthogneiss and Leucogranite of the Wenquan Metamorphic Complex in the NW Chinese Tianshan. *Precambrian Research*, 242: 58—81. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2013.12.006>
- Wang, B., Shu, L. S., Cluzel, D., et al., 2007. Geochemical Constraints on Carboniferous Volcanic Rocks of the Yili Block (Xinjiang, NW China): Implication for the Tectonic Evolution of Western Tianshan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 29(1): 148—159. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2006.02.008>
- Wang, B., Shu, L. S., Faure, M., et al., 2011. Paleozoic Tectonics of the Southern Chinese Tianshan: Insights from Structural, Chronological and Geochemical Studies of the Heiyingshan Ophiolitic Mélange (NW China). *Tectonophysics*, 497(1—4): 85—104. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.11.004>
- Wang, B., Zhai, Y. Z., Kapp, P., et al., 2018b. Accretionary Tectonics of Back-Arc Oceanic Basins in the South Tianshan: Insights from Structural, Geochronological, and Geochemical Studies of the Wuwamen Ophiolite Mélange. *GSA Bulletin*, 130(1—2): 284—306. <https://doi.org/10.1130/b31397.1>
- Wang, J. M., Lanari, P., Wu, F. Y., et al., 2021b. First Evidence of Eclogites Overprinted by Ultrahigh Temperature Metamorphism in Everest East, Himalaya: Impli-

- cations for Collisional Tectonics on Early Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, 558: 116760. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2021.116760>
- Wang, S. J., Wang, J. L., 2010. The Geochemical Characteristics and Chronology of the K - Feldspar Granite in Baluntai Area, Xinjiang. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 40(1): 105—110 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Hou, Z. Q., 2018. Isotopic Mapping and Deep Material Probing ( I ): Revealing the Compositional Evolution of the Lithosphere and Crustal Growth Processes. *Earth Science Frontiers*, 25(6): 1—19 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. S., Gao, J., Klemd, R., et al., 2017. The Central Tianshan Block: A Microcontinent with a Neoarchean-Paleoproterozoic Basement in the Southwestern Central Asian Orogenic Belt. *Precambrian Research*, 295: 130—150. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.03.030>
- Wang, X. S., Klemd, R., Gao, J., et al., 2018a. Final Assembly of the Southwestern Central Asian Orogenic Belt as Constrained by the Evolution of the South Tianshan Orogen: Links with Gondwana and Pangea. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(9): 7361—7388. <https://doi.org/10.1029/2018jb015689>
- Wang, X. S., Klemd, R., Gao, J., et al., 2021a. Early Devonian Tectonic Conversion from Contraction to Extension in the Chinese Western Tianshan: A Response to Slab Rollback. *GSA Bulletin*, 133(7—8): 1613—1633. <https://doi.org/10.1130/b35760.1>
- Wang, X. S., Zhang, X., Gao, J., et al., 2018c. A Slab Break-Off Model for the Submarine Volcanic-Hosted Iron Mineralization in the Chinese Western Tianshan: Insights from Paleozoic Subduction-Related to Post-Collisional Magmatism. *Ore Geology Reviews*, 92: 144—160. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2017.11.015>
- Warren, C. J., Beaumont, C., Jamieson, R. A., 2008. Modelling Tectonic Styles and Ultra-High Pressure (UHP) Rock Exhumation during the Transition from Oceanic Subduction to Continental Collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 267(1—2): 129—145. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.11.025>
- Whalen, J. B., Currie, K. L., Chappell, B. W., 1987. A-Type Granites: Geochemical Characteristics, Discrimination and Petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407—419. <https://doi.org/10.1007/BF00402202>
- Wu, F. Y., Li, X. H., Yang, J. H., et al., 2007. Discussions on the Petrogenesis of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1217—1238 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F. Y., Liu, X. C., Ji, W. Q., et al., 2017. Highly Fractionated Granites: Recognition and Research. *Science in China (Series D)*, 47(7): 745—765 (in Chinese).
- Xia, B., Zhang, L. F., Bader, T., 2014. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopic Analyses of Migmatite from the ‘Paired Metamorphic Belt’ in Chinese SW Tianshan: Constraints on Partial Melting Associated with Orogeny. *Lithos*, 192—195: 158—179. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.02.003>
- Xiao, W. J., Li, J. L., Song, D. F., et al., 2019a. Structural Analyses and Spatio-Temporal Constraints of Accretionary Orogens. *Earth Science*, 44(5): 1661—1687 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Mao, Q. G., Windley, B. F., et al., 2010. Palaeozoic Multiple Accretionary and Collisional Processes of the Beishan Orogenic Collage. *American Journal of Science*, 310(10): 1553—1594. <https://doi.org/10.2475/10.2010.12>
- Xiao, W. J., Shu, L. S., Gao, J., et al., 2008. Continental Dynamics of the Central Asian Orogenic Belt and Its Metallogenesis. *Xinjiang Geology*, 26(1): 4—8 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, W. J., Song, D. F., Windley, B. F., et al., 2019b. Accretionary Processes and Metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt: Advances and Perspectives. *Science in China (Series D)*, 49(10): 1512—1545 (in Chinese).
- Xiao, W. J., Windley, B. F., Allen, M. B., et al., 2013. Palaeozoic Multiple Accretionary and Collisional Tectonics of the Chinese Tianshan Orogenic Collage. *Gondwana Research*, 23(4): 1316—1341. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.01.012>
- Xu, W. L., Sun, C. Y., Tang, J., et al., 2019. Basement Nature and Tectonic Evolution of the Xing'an-Mongolian Orogenic Belt. *Earth Science*, 44(5): 1620—1646 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. L., Zhao, Z. F., Dai, L. Q., 2020. Post-Collisional Mafic Magmatism: Record of Lithospheric Mantle Evolution in Continental Orogenic Belt. *Science in China (Series D)*, 50(12): 1906—1918 (in Chinese).
- Yang, T. N., Wang, Y., Li, J. Y., et al., 2007. Vertical and Horizontal Strain Partitioning of the Central Tianshan (NW China): Evidence from Structures and  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology. *Journal of Structural Geology*, 29(10): 1605—1621. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.08.002>
- Yang, T. N., Li, J. Y., Sun, G. H., et al., 2006. Earlier Devonian Active Continental Arc in Central Tianshan:

- Evidence of Geochemical Analyses and Zircon SHRIMP Dating on Mylonitized Granitic Rock. *Acta Petrologica Sinica*, 22(1): 41—48 (in Chinese with English abstract).
- Yin, J. Y., Chen, W., Xiao, W. J., et al., 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Age and Geochemistry of the Dark Dykes in Central Tianshan Block. *Geological Bulletin of China*, 34(8): 1470—1481 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L., Zhang, L. F., Xia, B., et al., 2018. Metamorphic  $P-T$  Path and Zircon U-Pb Dating of HP Mafic Granulites in the Yushugou Granulite-Peridotite Complex, Chinese South Tianshan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 153: 346—364. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.05.034>
- Zhang, L., Zhu, J. J., Xia, B., et al., 2019. Metamorphism and Zircon Geochronological Studies of Metagabbro Vein in the Yushugou Granulite - Peridotite Complex from South Tianshan, China. *Journal of Earth Science*, 30(6): 1215—1229. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1254-5>
- Zheng, Y. F., Chen, Y. X., 2016. Continental Versus Oceanic Subduction Zones. *National Science Review*, 3(4): 495—519. <https://doi.org/10.1093/nsr/nww049>
- Zhong, L. L., Wang, B., Alexeiev, D. V., et al., 2017. Paleozoic Multi-Stage Accretionary Evolution of the SW Chinese Tianshan: New Constraints from Plutonic Complex in the Nalati Range. *Gondwana Research*, 45: 254—274. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2016.12.012>
- Zhong, L. L., Wang, B., Shu, L. S., et al., 2015. Structural Overprints of Early Paleozoic Arc-Related Intrusive Rocks in the Chinese Central Tianshan: Implications for Paleozoic Accretionary Tectonics in SW Central Asian Orogenic Belts. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 194—217. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2014.12.003>
- Zhu, Y. F., Guo, X., Song, B., et al., 2009. Petrology, Sr-Nd-Hf Isotopic Geochemistry and Zircon Chronology of the Late Palaeozoic Volcanic Rocks in the Southwestern Tianshan Mountains, Xinjiang, NW China. *Journal of the Geological Society*, 166(6): 1085—1099. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-130>
- Zhu, Y. F., Guo, X., Zhou, J., 2006. Petrology and Geochemistry of a  $+ \epsilon_{\text{Nd}}$  Gabbro Body in Baluntai Region, Central Tianshan Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 22(5): 1178—1192 (in Chinese with English abstract).
- 矿特征: 大地构造背景、流体作用与成矿深部动力学机制. *地质学报*, 93(1): 24—71.
- 黄河, 王涛, 秦切, 等, 2015. 中天山巴仑台地区花岗质岩石的 Hf 同位素研究: 对构造演化及大陆生长的约束. *地质学报*, 89(12): 2286—2313.
- 李继磊, 高俊, 王信水, 2017. 西南天山洋壳高压-超高压变质岩石的俯冲隧道折返机制. *中国科学(D辑)*, 47(1): 23—39.
- 李平, 赵同阳, 穆利修, 等, 2018. 新疆中天山古生代侵入岩浆序列及构造演化. *地质论评*, 64(1): 91—107.
- 李献华, 李武显, 李正祥, 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. *科学通报*, 52(9): 981—991.
- 李永军, 吴乐, 李书领, 等, 2017. 伊宁地块石炭纪火山岩及其对构造演化的约束. *岩石学报*, 33(1): 1—15.
- 林靓, 钱青, 王艳玲, 等, 2015. 西天山昭苏北部大哈拉军山组火山岩中辉长岩体的形成时代、地球化学特征及地质意义. *岩石学报*, 31(6): 1749—1760.
- 王守敬, 王居里, 2010. 新疆巴仑台钾长花岗岩的地球化学及年代学. *西北大学学报(自然科学版)*, 40(1): 105—110.
- 王涛, 侯增谦, 2018. 同位素填图与深部物质探测(I): 揭示岩石圈组成演变与地壳生长. *地学前缘*, 25(6): 1—19.
- 吴福元, 李献华, 杨进辉, 等, 2007. 花岗岩成因研究的若干问题. *岩石学报*, 23(6): 1217—1238.
- 吴福元, 刘小驰, 纪伟强, 等, 2017. 高分异花岗岩的识别与研究. *中国科学(D辑)*, 47(7): 745—765.
- 肖文交, 李继亮, 宋东方, 等, 2019a. 增生型造山带结构解析与时空制约. *地球科学*, 44(5): 1661—1687.
- 肖文交, 舒良树, 高俊, 等, 2008. 中亚造山带大陆动力学过程与成矿作用. *新疆地质*, 26(1): 4—8.
- 肖文交, 宋东方, Windley, B. F., 等, 2019b. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展. *中国科学(D辑)*, 49(10): 1512—1545.
- 许文良, 孙晨阳, 唐杰, 等, 2019. 兴蒙造山带的基底属性与构造演化过程. *地球科学*, 44(5): 1620—1646.
- 许文良, 赵子福, 戴立群, 2020. 碰撞后镁铁质岩浆作用: 大陆造山带岩石圈地幔演化的物质记录. *中国科学(D辑)*, 50(12): 1906—1918.
- 杨天南, 李锦轶, 孙桂华, 等, 2006. 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. *岩石学报*, 22(1): 41—48.
- 尹继元, 陈文, 肖文交, 等, 2015. 中天山地块暗色岩墙 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和岩石地球化学特征. *地质通报*, 34(8): 1470—1481.
- 朱永峰, 郭璇, 周晶, 2006. 新疆中天山巴仑台地区晚石炭世  $+ \epsilon_{\text{Nd}}$  辉长岩体的岩石学和同位素地球化学研究. *岩石学报*, 22(5): 1178—1192.

## 附中文参考文献

- 高俊, 钱青, 龙灵利, 等, 2009. 西天山的增生造山过程. *地质通报*, 28(12): 1804—1816.
- 高俊, 朱明田, 王信水, 等, 2019. 中亚成矿域斑岩大规模成