



引文格式: 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. DOI: 10.12401/j.nwg.2023146

Citation: LI Ping, ZHU Tao, LÜ Pengrui, et al. Early Cambrian Xiata Gabbro in Western Tianshan: Magmatic Records of Initial Subduction of the South Tianshan Ocean[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 44–58. DOI: 10.12401/j.nwg.2023146

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

李平^{1,2}, 朱涛¹, 吕鹏瑞¹, 王洪亮¹, 陈隽璐^{1,3}

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心/西北地质科技创新中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局造山带地质研究中心, 陕西 西安 710119; 3. 陕西紫阳中志留统底界层型剖面野外科学观测研究站, 陕西 西安 710119)

摘要: 相对于西天山晚古生代—中生代广泛存在的岩浆事件, 其天山早古生代初期地质记录保存较少, 此在很大程度上制约了学界对于亚洲洋早期演化的认识。此次选取的夏特辉长岩位于中天山南缘构造混杂岩带北侧, LA-ICPMS 锆石 U-Pb 测年结果为 (523 ± 5) Ma, 属早寒武世, 其与中天山早古生代岩浆活动构成有“西早—东晚”的时空分布特征, 从而在一定程度上奠定了西天山“西早—东晚”的剪刀差式闭合事件。夏特辉长岩为钠质的钙碱性系列, 岩石地球化学特征反映其形成过程中经历过橄榄石、尖晶石等矿物的分离结晶以及斜长石的堆晶作用。该辉长岩富集大离子亲石元素、亏损高场强元素, 构造岩浆环境判别图解也进一步指示其为弧岩浆作用的产物。锆石 Hf 同位素特征具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 $(+1.47 \sim +11.91)$, 显示出亏损地幔的物质源区。此外, 较高的 Th/Nb 原始地幔标准化比值和较低的 Nb/La 值, 暗示了岩浆形成过程中存有俯冲物质的卷入。夏特辉长岩的形成表明南天山洋在早寒武世已经开始向中天山地块之下俯冲, 伴随着中天山地块的俯冲、消减, 沿中天山地块周缘于早寒武世已经形成有陆缘弧岩浆体系。

关键词: 中天山南缘; 辉长岩岩石成因; 早寒武世弧岩浆活动

中图分类号: P581

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0044-15

Early Cambrian Xiata Gabbro in Western Tianshan: Magmatic Records of Initial Subduction of the South Tianshan Ocean

LI Ping^{1,2}, ZHU Tao¹, LÜ Pengrui¹, WANG Hongliang¹, CHEN Junlu^{1,3}

(1. Xi'an Center of China Geological Survey/Geosciences Innovation Center of Northwest China, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Centre for Orogenic Belt Geology, CGS, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 3. Strata-type Section for the Bottom of Wenlock—Shaanxi Ziyang Field Scientific Observation, Xi'an 710119, Shaanxi, China)

Abstract: Compared with the widespread magmatic events between the late Paleozoic and the early Mesozoic in Western Tianshan, the intrusive magmatic record of the early Paleozoic are preserved less, which conatraind

收稿日期: 2023-05-29; 修回日期: 2023-07-16; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目 (DD20243439、DD20240073、DD20230228、12120114020501), 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2023-JC-YB-268、2023-JC-ZD-15、2022JM-149) 和国家自然科学基金 (40872061、41502061) 联合资助。

作者简介: 李平 (1983–), 男, 正高级工程师, 从事岩浆岩石学研究和地质矿产调查工作。E-mail: gogogis@qq.com。

our understanding on the early evolution of the Asian Ocean. Xiatae gabbro is exposed in the north of the Southern Margin of the Central Tianshan, and zircon LA-ICPMS U-Pb dating shows that the formation age is 523 ± 5 Ma, suggesting the Early Cambrian emplacement. Combined with the research on the regional igneous rocks, we believe that the Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean initiated in the west and then gradually expanded to the east, which may lay the foundation for the scissors closure (earlier in the west and later in the east) of the Tianshan Ocean. The geochemical characteristics of the Sodium and calcium alkaline rocks studied show that they have experienced the fractional crystallization of olivine, spinels, and the cumulation of plagioclase during their formation. The gabbro is a sodic and calc-alkaline series rocks, rich in large ion lithophile elements (LILE) and depleted in high field strength elements (HFSE). Discrimination diagrams of tectonic magmatic environment indicate that it is a product of arc magmatism. The $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values range from +1.47 to +11.91, indicating a distinct mantle material source; the higher $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{PM}}$ and lower Nb/La ratios imply the involvement of subduction materials during magmatic evolution. The formation age and petrogenetic characteristics of the Xiatae gabbro indicate that the South Tianshan Ocean began to subduct towards the Central Tianshan Block in the Early Cambrian, and the initial arc magmatism was formed during the tectonic event.

Keywords: south margin of central Tianshan; the petrogenesis of gabbro; arc magmatic activity in Early Cambrian

板块构造体制之下, 板块俯冲的动力学过程和机制一直是地学界研究的热点, 古亚洲构造域相关的俯冲机制和俯冲时限研究也是长期以来工作的重点。中天山南缘构造混杂岩带已发现有一系列的蛇绿混杂岩和高压变质岩系, 此缝合带被认为是古亚洲洋俯冲消减及碰撞造山的重要地质记录(肖文交等, 2019; 李舫等, 2023; Wang et al., 2023; 张向飞等, 2023)。沿此缝合带北侧出露的具有不同形成时代和成因背景的岩浆岩(Gao et al., 2009; Long et al., 2011; Xu et al., 2013)具有十分重要的研究意义。夹持于那拉提北缘断裂与中天山南缘缝合带之间的伊犁-中天山地块南缘侵入岩带曾被认为是一条晚古生代复合型侵入岩带, 沿此带出露的侵入岩类多为巨大的岩基且整体沿构造线以北东东向带状展布, 亦有一定数量的岩体呈岩枝或岩株状产出。大量的同位素测年工作显示中天山南缘地区的岩浆活动期主要集中在石炭纪—早二叠世(李平等, 2011, 李平, 2012; Xu et al., 2013; Huang et al., 2020), 而早古生代初期的侵入体和火山岩的出露却十分有限。

中天山南缘西段的那拉提北坡地区曾发现有少量形成于寒武纪—早奥陶世的岩浆岩(钱青等, 2007; Qian et al., 2009; Long et al., 2011), 该时期岩浆作用的研究可以作为揭示西天山早古生代初期构造岩浆演化的窗口。笔者在前人区域地质调查工作和区域岩石研究的基础上, 选择中天山西段出露的早寒武世辉长岩为研究对象, 结合锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素和

岩石地球化学特征, 探讨了其岩浆演化过程, 进而为南天山洋的早期俯冲消减事件提供依据。

1 区域地质特征

中国西北部的天山造山带是一个古生代多地块与缝合带镶嵌、新生代盆山耦合体系下形成的中亚巨型复合造山系。它是由其北部西伯利亚板块和南部塔里木板块、华北板块(中朝地块)之间的古亚洲洋, 在古生代由一系列的俯冲-增生-碰撞作用所形成。中国境内的天山造山带可由中天山北缘断裂、那拉提断裂和中天山南缘断裂这3条区域性断裂划分为北天山构造带、伊犁地块、中天山地块及南天山构造带(图1a)。

研究区紧邻那拉提北缘断裂带北侧(图1a), 大地构造位置上属于伊犁-中天山地块南缘地区。该区主要由前寒武纪木扎尔特岩群结晶基底和石炭纪火山-沉积岩系构成(新疆维吾尔自治区地质局, 1981), 另有少量的寒武系零星分布。区内的木扎尔特岩群分布于那拉提北缘断裂和中天山南缘断裂之间的狭长区域, 主要为一套由二云母石英片岩、黑云母斜长片岩和二云斜长片麻岩等构成的结晶基底。石炭系是西天山地区晚古生代出露最广泛的地层单位, 研究区内则主要由大哈拉军山组和阿克沙克组构成。阿克沙克组为一套岩性相对单一、厚度较大的碎屑岩建造, 主要由砾岩、含砾岩屑砂岩、岩屑砂岩、杂砂岩、岩屑晶屑凝灰岩、粉砂岩等组成, 属于浅海陆棚碳酸盐沉

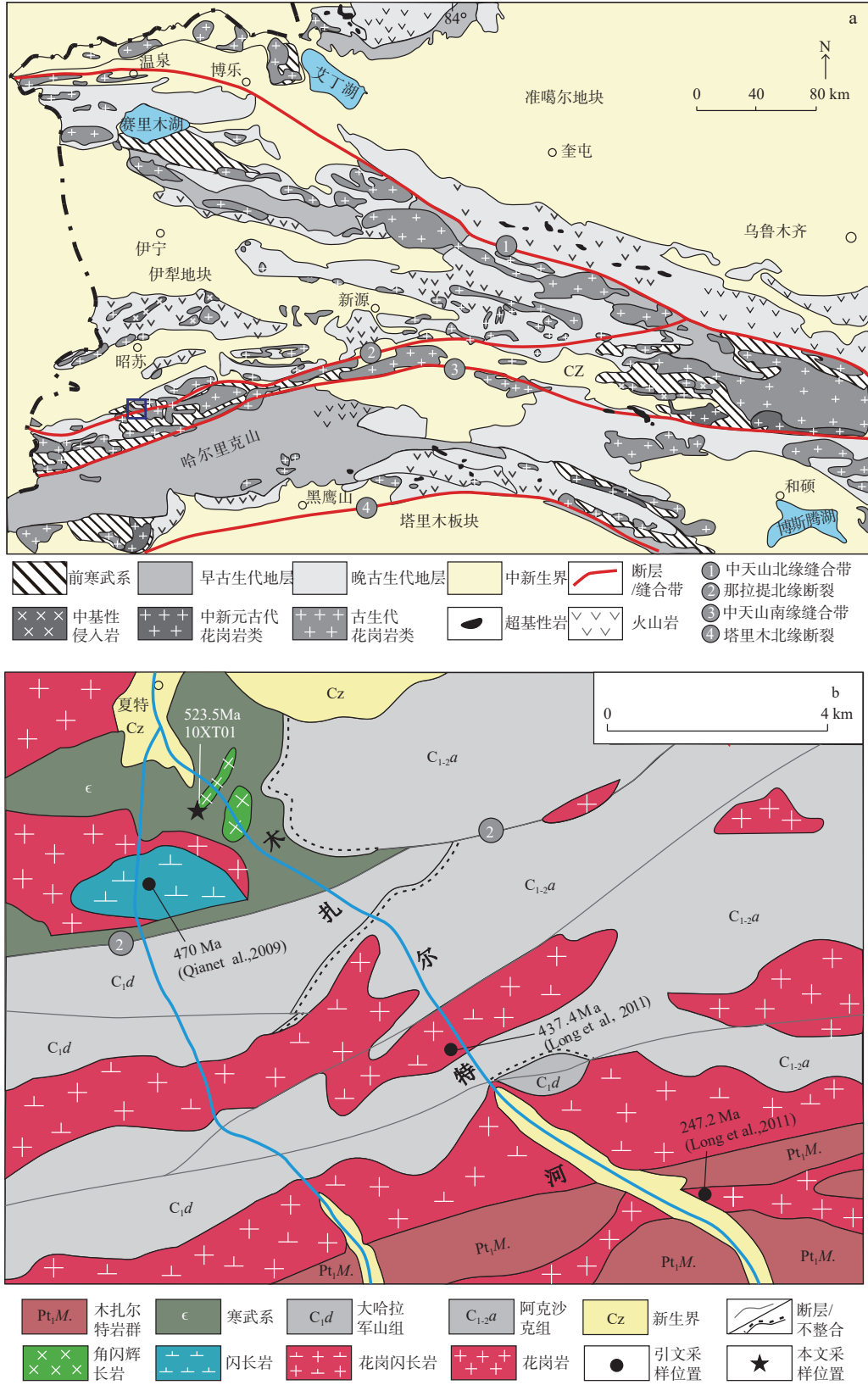


图1 中国西天山地质简图(a)(据 Gao et al., 2009; Xu et al., 2013 修)和夏特地区地质图(b)
(据新疆维吾尔自治区地质局区域地质调查大队, 1981; Qian et al., 2009 修)

Fig. 1 (a) Simplified geological map of Chinese western Tianshan and (b) the geological map of the Xiarte

积。大哈拉军山组则以火山碎屑岩、熔岩大量发育为特征,在火山岩中常出现厚薄不等、延伸不太稳定的沉积碎屑岩和碳酸盐岩夹层,二者构成一套火山-沉积岩系。前期工作发现,选区内原划定的早石炭世大哈拉军山组由灰绿色片岩、灰黑色糜棱岩以及变质火山岩构成且部分岩层具有明显的变形、变质特征,这与西天山大哈拉军山组多数典型剖面的岩石组合存有较为明显的差异(茹艳娇等,2012)。此外,晚石炭世阿克沙克组灰岩内发育褶皱、断层, Qian 等(2009)也曾原划定的石炭纪地层中解体出寒武纪的火山岩地层。

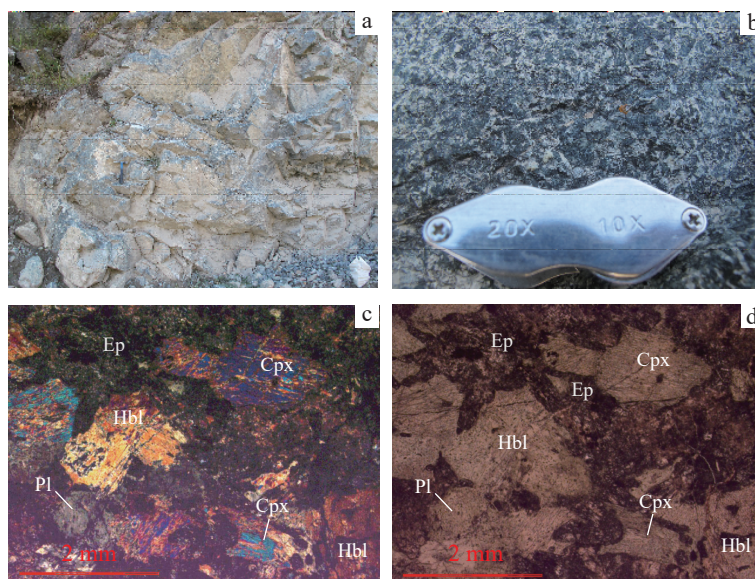
夏特辉长岩沿近 NE-SW 向呈狭长条带状展布,紧邻那拉提北缘断裂延伸约 2.5 km (图 1b),侵入于寒武纪围岩之中。岩体受风化作用较弱,呈暗灰绿色,具块状构造(图 2a、图 2b)。矿物组成主要包括斜长石、角闪石、辉石和少量的绿帘石和绿泥石等(图 2c、图 2d)。其中,角闪石含量为 35%~40%,粒径为 2~4 mm,矿物颗粒边界明显且多为半自粒状晶的结构,内部偶见少量的磁铁矿等副矿物。部分角闪石颗粒仍保留有明显的辉石节理。辉石含量为 15%~20%,多为干涉色略高的单斜辉石。斜长石含量在 20% 至 25% 之间,呈半自形-他形柱状分布于角闪石和辉石之间,多发生有较为强烈的钠黝帘石化和绢云母化。其余为蚀变矿物绿帘石、绿泥石等,填充于斜长石和

角闪石间隙之中。据以上岩石结构和矿物组成特征,可以将此岩体定名为角闪辉长岩。

2 样品分析及测试方法

本次研究挑选较为新鲜的样品(N42°37.492', E80°36.776')用于锆石分选和岩石地球化学测试分析。测年样品经粗碎、细碎后经人工淘洗挑选出锆石,而后在双目镜下挑纯。样品粗碎在刚玉破碎机中进行,粗碎样品经筛分后用日本 CMT 公司生产的 T1-100 型钨化细碎机碎至 200 目以下,整个样品加工过程无污染。

锆石阴极发光图像、LA-ICPMS 定年以及 Hf 同位素分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。锆石的阴极发光图像在 FEI 公司的场发射环境扫描电子显微镜 Quanta400 EFG 上完成。锆石 U-Pb 原位定年分析所采用的 ICP-MS 为 Elan 6100DRC,激光剥蚀系统为德国 Lamda Physik 公司生产的 Geolas 200M 深紫外(DUV)193 nmArF 准分子(excimer)激光剥蚀系统,该系统相对常规的 266 nm 或 213 nm ND:YAG 剥蚀系统具有较小的元素分馏效应。分析所采用的激光束直径为 30 μm ,剥蚀深度为 20~40 μm 。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST SRM610 进行仪器最佳化调试,采样方式为单



a.辉长岩野外露头; b.辉长岩结构; c.正交偏光(CPL)矿物组成特征; d.单偏光(PPL)矿物组成特征;
Pl.斜长石; Cpx.单斜辉石; Hbl.角闪石; Ep.绿帘石

图2 夏特辉长岩的野外产出及镜下特征

Fig. 2 Outcrops and micro-structure features for the Xiata grabbo

点剥蚀,数据采集选用一个质量峰一点的跳峰方式,每完成4~5个待测样品测定,插入测标样一次。在所测锆石样品15~20个点前后各测2次NIST SRM610。锆石年龄采用标准锆石91500作为外部标准物质,元素含量采用NIST SRM610作为外标。测试结果通过Glitter软件计算得出,获得的数据采用Andersen的方法(Andersen, 2002)进行Pb同位素比值校正,而后由Isoplot 3.23v程序(Ludwing, 2003)进行最终的年龄计算和图表绘制。分析点的同位素比值和同位素年龄的误差(标准偏差)为 1σ , $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄按95%的置信度给出,分析结果见表1,详细分析参见文献(Yuan et al., 2004)。

岩石中锆石原位微区Hf同位素测试仪器为Nu Plasma HR (Wrexham, UK)多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS),测试工作在西北大学大陆动力学实验室完成,激光束斑直径同样为20~40 μm ,激光脉冲宽度为15 ns,试验中以He气做为剥蚀物质载体。所测定样品的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值以 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02655$ 和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5886$ (Lizuka et al., 2005)为标准进行校正计算。在样品测定期间,通过标准参考物91500和GJ-1的实时分析以对仪器状态进行监控,并对样品测试结果进行校正,最终测试结果见表2。 ^{176}Lu 衰变系数为 $1.865 \times 10^{-11} \text{a}^{-1}$ (Scherer et al., 2001),现今球粒陨石的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为0.282772和0.0332(Blichert-Toft et al., 1997);现今亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为0.283250和0.0384(Griffin et al., 2000)。

样品的主量、稀土和微量元素含量分析均由中国地质调查局西安地质调查中心的自然资源部岩浆作用成矿与找矿重点实验室完成。主量元素含量由Panalytical公司产PW4400型X荧光光谱仪(XRF)测定,分析误差低于5%(其中,TFeO含量由XRF法直接测得,FeO含量由滴定法完成,Fe₂O₃含量则通过化学换算进一步得出);微量元素、稀土元素含量采用Themmo Fisher公司产X-series II型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,相对标准偏差优于10%。测试结果见表3。

3 测试结果

3.1 锆石 LA-ICPMS U-Pb 同位素定年

夏特辉长岩中的锆石大部分为无色透明的长柱

状晶体,自形程度较好(图3中的1#、4#、和8#锆石颗粒);另有部分锆石可能由于碎样粒度过小而呈破碎粒状(图3中的6#、9#和14#锆石颗粒)。被测定锆石的Th/U值为0.43~1.72,均大于0.1,位于典型岩浆锆石比值范围之内(Belousova et al., 2002)。部分锆石的CL图像可以观察到典型岩浆锆石所具有的振荡环带,且这些环带多中等较宽(图3中的6#、8#和14#锆石),可能同基性岩浆所具有较低的锆饱和度有关(Hoskin et al., 2003)。因而,根据锆石阴极发光电子图像(CL)及其微量元素含量特征可以认为这些锆石属岩浆结晶锆石。在此基础上,笔者测定了22颗岩浆锆石,其测定点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 图中均位于谐和线上或其附近(图4a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为505~536 Ma(表1),加权平均值为(523±5) Ma(MSWD=0.32)(图4b),该年龄代表了此辉长岩的岩浆结晶年龄,即形成年龄。

3.2 地球化学特征

所测试的样品均具有相对略高的LOI值(LOI=2.14%~3.04%),表明该辉长岩可能经历有不同程度的风化和蚀变,以致相对较活泼的主量元素发生一定的迁移。故文中参与计算和讨论的主量元素数据均为扣除烧失量后重新换算结果。夏特辉长岩具有较低的SiO₂含量(50.20%~52.10%)和TiO₂含量(0.27%~0.43%),及较高的MgO含量(8.31%~10.15)、CaO含量(11.38%~13.6%)、Al₂O₃(16.65%~17.93)含量和Mg[#]值(71.02~74.98)。其全碱含量介于2.06%至3.52%之间、Na₂O/K₂O=2.59~5.51,里克曼指数均小于3.3($\sigma=0.54\sim 1.36$),结合岩石类型判别图(图5a、图5b)可以进一步判定此套辉长岩为钠质的钙碱性系列岩石。

据岩石样品的稀土元素球粒陨石标准化图解(图6a、图6b),辉长岩稀土元素总含量较低, ΣREE 含量在 20.73×10^{-6} 至 32.54×10^{-6} 之间,为球粒陨石稀土总含量的6.2至9.8倍。除10XT01-5样品具轻稀土亏损的左倾型分配样式($(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=0.82$, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.63$)外,所采样品的球粒陨石标准化分配样式为微弱右倾状($(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}=1.18\sim 1.76$),轻稀土富集($(\text{La}/\text{Sm})_{\text{N}}=1.25\sim 1.59$)、重稀土轻微变化($(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}=0.8\sim 1.07$)且无Eu负异常($\delta\text{Eu}=1.11\sim 1.35$)。在微量元素组成上,所有样品均富集Rb、Ba、K和Sr等大离子亲石元素(LILE),且亏损Nb、Ti等高场强元素(HFSE),显示出典型的弧岩浆地球化学特征。

表 2 夏特辉长岩锆石 Hf 同位素组分表

Tab. 2 Zircons Hf isotopic compositions for the Xiate gabbro

样品	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	2σ	$\varepsilon\text{Hf}(0)$	$\varepsilon\text{Hf}(t)$	$T_{\text{DM1}}(\text{Hf})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
10XT01-02	0.053 82	0.001 936	0.282 737	0.282 714	0.000 028	-2.05	8.8	782	-0.94
10XT01-03	0.041 586	0.001 425	0.282 62	0.282 597	0.000 022	-6.19	4.84	939	-0.96
10XT01-04	0.044 278	0.001 74	0.282 795	0.282 772	0.000 025	-0.01	10.92	695	-0.95
10XT01-05	0.020 027	0.000 678	0.282 588	0.282 565	0.000 021	-7.33	3.96	965	-0.98
10XT01-06	0.017 006	0.000 631	0.282 714	0.282 691	0.000 019	-2.87	8.44	788	-0.98
10XT01-07	0.020 814	0.000 779	0.282 783	0.282 76	0.000 018	-0.42	10.84	694	-0.98
10XT01-08	0.024 405	0.000 853	0.282 799	0.282 776	0.000 02	0.13	11.37	673	-0.97
10XT01-09	0.025 408	0.000 928	0.282 69	0.282 667	0.000 023	-3.7	7.51	827	-0.97
10XT01-10	0.034 956	0.001 253	0.282 748	0.282 725	0.000 03	-1.66	9.43	753	-0.96
10XT01-11	0.014 002	0.000 508	0.282 668	0.282 645	0.000 018	-4.5	6.85	850	-0.98
10XT01-12	0.021 002	0.000 769	0.282 81	0.282 787	0.000 023	0.54	11.81	655	-0.98
10XT01-13	0.028 995	0.000 981	0.282 721	0.282 698	0.000 029	-2.61	8.58	785	-0.97
10XT01-15	0.023 846	0.000 84	0.282 799	0.282 776	0.000 023	0.16	11.4	672	-0.97
10XT01-16	0.046 849	0.001 636	0.282 779	0.282 756	0.000 029	-0.58	10.38	716	-0.95
10XT01-17	0.058 428	0.002 052	0.282 629	0.282 605	0.000 035	-5.89	4.92	942	-0.94
10XT01-18	0.036 25	0.001 255	0.282 796	0.282 773	0.000 028	0.03	11.13	684	-0.96
10XT01-19	0.062 74	0.002 117	0.282 565	0.282 542	0.000 035	-8.14	2.65	1 036	-0.94
10XT01-20	0.013 112	0.000 489	0.282 786	0.282 763	0.000 031	-0.33	11.03	685	-0.99
10XT01-21	0.053 937	0.001 939	0.282 599	0.282 576	0.000 041	-6.92	3.93	982	-0.94
10XT01-22	0.025 045	0.000 947	0.282 758	0.282 735	0.000 032	-1.3	9.9	732	-0.97
10XT01-23	0.020 744	0.000 762	0.282 751	0.282 728	0.000 044	-1.57	9.69	739	-0.98
10XT01-24	0.024 952	0.000 896	0.282 732	0.282 709	0.000 023	-2.24	8.98	769	-0.97
10XT01-25	0.028 115	0.000 933	0.282 72	0.282 697	0.000 032	-2.66	8.54	786	-0.97
10XT01-26	0.032 419	0.001 09	0.282 698	0.282 675	0.000 036	-3.44	7.71	821	-0.97
10XT01-27	0.052 459	0.001 858	0.282 824	0.282 801	0.000 042	1.02	11.91	655	-0.94
10XT01-28	0.062 645	0.001 985	0.282 551	0.282 528	0.000 038	-8.64	2.19	1 053	-0.94
10XT01-30	0.045 656	0.001 551	0.282 719	0.282 696	0.000 036	-2.68	8.31	800	-0.95

3.3 锆石 Hf 同位素

对夏特辉长岩锆石中 27 个测点的 Lu-Hf 同位素成分分析(其中的 18 个测定微区同 LA-ICP MS U-Pb 同位素测点位置相一致)可以看出,其 $^{176}\text{Yb}/^{176}\text{Hf}$ 和 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值分别为 0.013 112~0.062 74 和 0.489~ 2.117×10^{-3} 。结合其 523 Ma 的岩浆结晶年龄,可以测算 $\varepsilon\text{Hf}(t)=2.19\sim 11.91$, $T_{\text{DM1}}=655\sim 1\ 053$ Ma(表 3)。

4 讨论

4.1 西天山地区早古生代初期岩浆活动特征

大量同位素测年工作表明,西天山地区侵入岩浆

活动自中志留世开始大规模出现且集中于 515~380 Ma、370~330 Ma 和 325~265 Ma 等 3 个阶段(李平, 2011),而基性侵入岩则主要集中形成于晚石炭—早二叠世阶段(Wang et al., 2023)。相较于整个中天山地块广泛存在的晚古生代岩浆活动(Huang et al., 2020; Long et al., 2011),区域上寒武纪岩浆活动却较为微弱,且主要分布在中天山西段。前人曾在那拉提北坡地区发现有形成时代为 516 Ma 的玄武岩和 470 Ma 的埃达质闪长岩(Qian et al., 2009),在夏特以东的森木塔斯地区也曾发现有 497 Ma 的晚寒武世 I 型花岗岩(李平, 2011; Xu et al., 2013)。本次经 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 同位素测定的夏特辉长岩,获得有 523 Ma 的同位

表3 夏特辉长岩主量元素(%)和微量元素(10^{-6})分析结果Tab. 3 Major elements (%) and trace elements (10^{-6}) compositions of the Xiatae gabbro

样品号	10XT01-1	10XT01-3	10XT01-5	10XT01-6	10XT01-7
SiO ₂	49.57	49.20	49.25	50.54	49.52
Al ₂ O ₃	16.86	17.10	16.15	17.39	17.02
Fe ₂ O ₃	1.16	0.94	1.39	1.37	1.71
FeO	4.59	5.28	4.98	4.47	5.00
Fe ₂ O ₃ ^T	6.26	6.81	6.92	6.34	7.27
CaO	13.19	12.89	12.44	11.04	11.48
MgO	9.36	9.89	9.85	8.06	8.88
K ₂ O	0.34	0.31	0.71	0.95	0.90
Na ₂ O	1.69	1.77	1.69	2.46	1.84
TiO ₂	0.26	0.27	0.29	0.42	0.35
P ₂ O ₅	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05
MnO	0.11	0.11	0.12	0.11	0.12
LOI	2.74	2.14	2.98	2.99	3.04
Total	99.91	99.93	99.88	99.85	99.91
Cu	144.0	59.0	73.3	97.7	65.3
Pb	28.2	11.5	36.4	5.85	9.06
Zn	38.6	34.3	66.4	48.5	47.1
Cr	769	617	689	579	463
Ni	146	149	141	106	108
Co	38.2	36.5	38.0	31.8	37.3
Li	8.6	4.65	11.0	18.6	12.6
Rb	11.9	8.91	22.2	29.2	26.0
Cs	0.55	0.41	0.70	1.09	0.96
Mo	0.35	0.62	0.34	0.36	0.25
Sr	193	162	159	175	212
Ba	74.6	53.8	106	172	161
V	152	138	164	170	136
Sc	38.0	34.5	38.2	37.5	31.8
Nb	0.65	0.87	0.52	1.18	1.43
Ta	0.27	0.40	0.26	0.21	0.34
Zr	13.1	14.3	9.51	23.7	24.2
Hf	0.48	0.44	0.34	0.76	0.72
Ga	11.4	11.5	11.2	11.5	11.9
U	0.13	0.10	0.05	0.11	0.14
Th	0.67	0.70	0.31	0.59	0.64
La	1.61	1.45	0.91	2.46	2.31
Ce	3.47	4.17	2.25	5.40	5.16
Pr	0.48	0.46	0.40	0.73	0.69
Nd	2.39	2.22	1.98	3.94	3.16
Sm	0.76	0.75	0.72	1.01	0.94
Eu	0.37	0.33	0.39	0.53	0.47

续表3

样品号	10XT01-1	10XT01-3	10XT01-5	10XT01-6	10XT01-7
Dy	1.28	1.35	1.39	1.77	1.51
Ho	0.32	0.32	0.37	0.49	0.34
Er	0.78	0.78	0.88	1.06	0.88
Tm	0.14	0.13	0.17	0.22	0.15
Yb	0.97	0.89	1.05	1.34	0.95
Lu	0.12	0.11	0.13	0.17	0.13
Y	7.77	7.93	8.90	11.50	9.02
Mg [#]	74.98	74.43	74.04	71.83	71.02
(La/Sm) _N	1.37	1.25	0.82	1.57	1.59
(Gd/Yb) _N	0.80	1.03	0.78	0.99	1.07
(La/Yb) _N	1.20	1.18	0.63	1.33	1.76
REE	21.57	22.19	20.73	32.54	27.15
δEu	1.35	1.11	1.42	1.28	1.34
Sr/Y	24.84	20.43	17.87	15.22	23.5
Sr/Yb	198.97	182.02	151.43	130.6	223.16

注: Mg[#]=mol MgO/(MgO+FeO_{tot}), FeO_{tot}=FeO+0.89Fe₂O₃(扣除烧失量后), 标准化数据引自 Sun et al. (1989)。

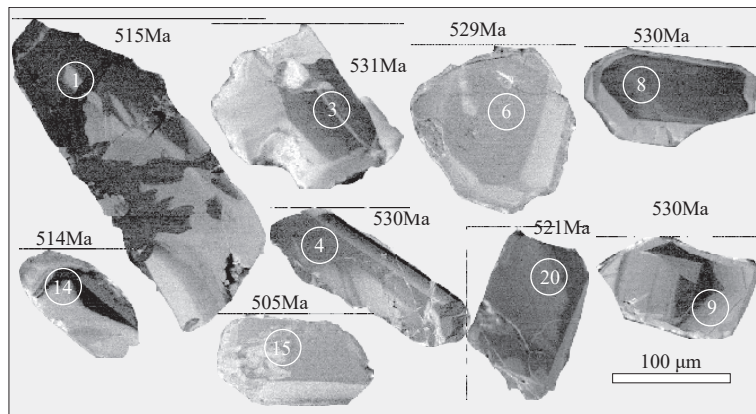


图3 夏特辉长岩锆石阴极发光照片(圆圈为测试位置, 数字为测试点号)

Fig. 3 Cathodoluminescence (CL) images of typical zircons from the Xiате gabbro

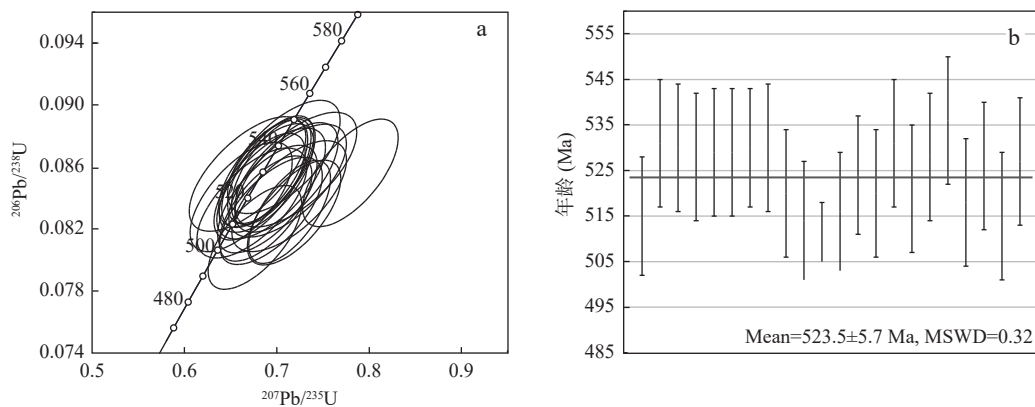


图4 夏特辉长岩锆石 LA-ICPMS U-Pb 同位素年龄谐和图(a)及加权平均年龄图(b)

Fig. 4 (a) Zircon U-Pb age Concordia diagram and (b) the weighted average age diagram for Xiате gabbro

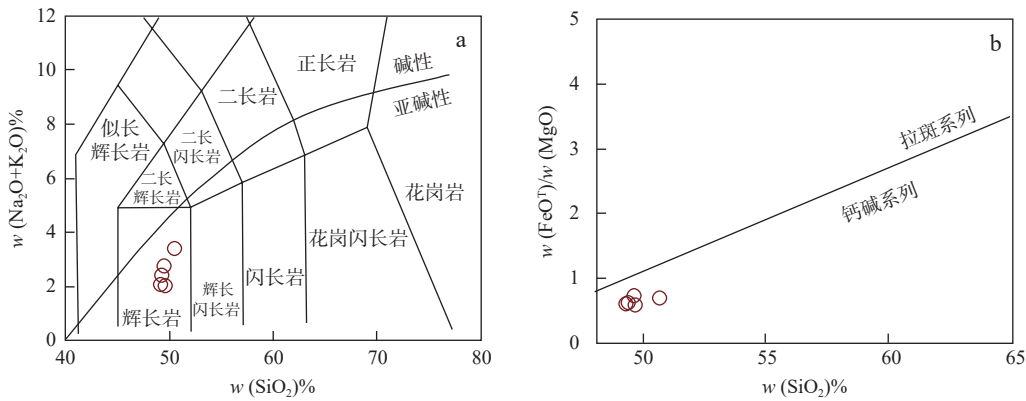


图5 夏特辉长岩 SiO_2 - $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 图解(a) (Irvine et al, 1971; Middlemost, 1994) 和 SiO_2 - $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO}$ 图解(b) (Miyashiro, 1975)

Fig. 5 (a) SiO_2 versus $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ Diagram and (b) SiO_2 - $\text{FeO}^\text{T}/\text{MgO}$ Diagram for Xiate gabbro

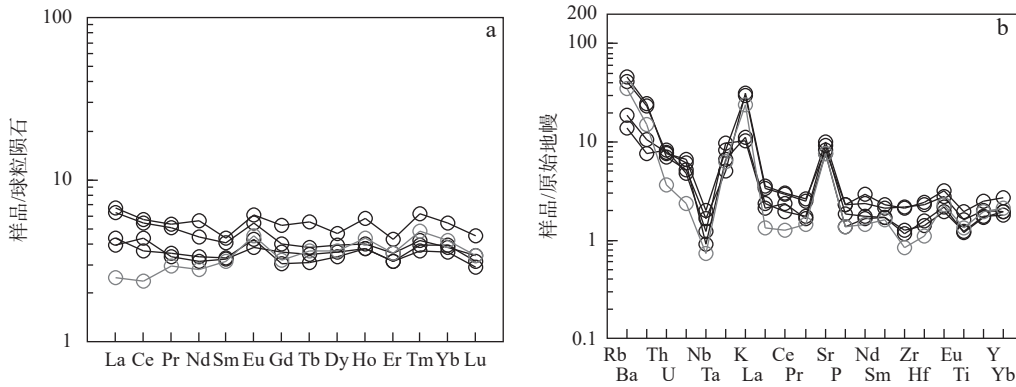


图6 稀土元素球粒陨石标准化图解(a)和微量元素原始地幔标准化图解(b) (标准化数据均来自 Sun et al., 1989)

Fig. 6 (a) Chondrite-normalized REE distribution patterns and (b) Primitive mantle-normalized multi-element variation diagram for the Xiate gabbro

素年龄, 属于早寒武世侵入岩。

在中天山南缘断裂-那拉提北坡断裂之间, 在中奥陶世之前形成的侵入岩主体分布在那拉提山西段(如夏特、森木塔斯等地), 一般规模较小, 多呈带状分布, 显示有较强的区域变形特征, 岩石组合为闪长岩-花岗闪长岩-花岗岩系列(徐学义等, 2010); 而后形成的中酸性侵入岩主要分布在那拉提山中西段、巴伦台及那拉提山东段等地, 岩石类型复杂。而且从形成时代上看, 以夏特辉长岩为代表的中天山(那拉提)西段的侵入岩要略早于中天山构造带中-东段和巴伦台地区(李平, 2011)。

4.2 岩石成因和构造背景

所测样品的 $\text{Mg}^\#$ 值介于 70.8~74.8, 虽然与地幔熔融而成的原生岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值(67~73)变化范围一致, 但部分样品的 Ni 含量($106 \times 10^{-6} \sim 149 \times 10^{-6}$)仍低于原始岩浆的 Ni 含量($150 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$)。根据 $\text{Mg}^\#$ 与多元素的协变关系图(图 7)可以看出, 夏特辉长

岩存有一定程度的结晶分离作用: ①低温条件下 Nb/Ta 在熔体中的扩散分异可以结晶出 Nb/Ta 值高于整体熔体的金红石, 以致堆晶岩中往往会存有较高的 Nb/Ta 值(~ 19)(Tang et al., 2019)。夏特辉长岩($\text{Nb}/\text{Ta}=2.18 \sim 5.62$)低于典型岛弧(10~18)或陆缘弧(11~20)体系下的 Nb/Ta 值(Chen et al., 2021), 表明其为岩浆结晶的结果而非镁铁质-超镁铁质岩浆堆晶体。②CaO 含量变化与 $\text{Mg}^\#$ 值的含量变化呈正相关性(图 7a), 指示其母岩浆在分离结晶过程中含钙的镁铁质矿物(单斜辉石)和橄榄石是重要的分离相; 同时, 随着 $\text{Mg}^\#$ 值的降低, Cr、Ni 元素含量也呈现出线性减少的趋势(图 7b、图 7c), 也证明了橄榄石、尖晶石等矿物分离结晶的存在。③ δEu 、Sr 含量与 $\text{Mg}^\#$ 值几乎无相关性且在协变关系图中分布略微分散(图 7d、图 7e), δEu 值也均大于 1, 反映了基性岩浆演化过程中可能存有斜长石的堆晶作用; 同时, 重稀土元素 Dy/Yb 值相对

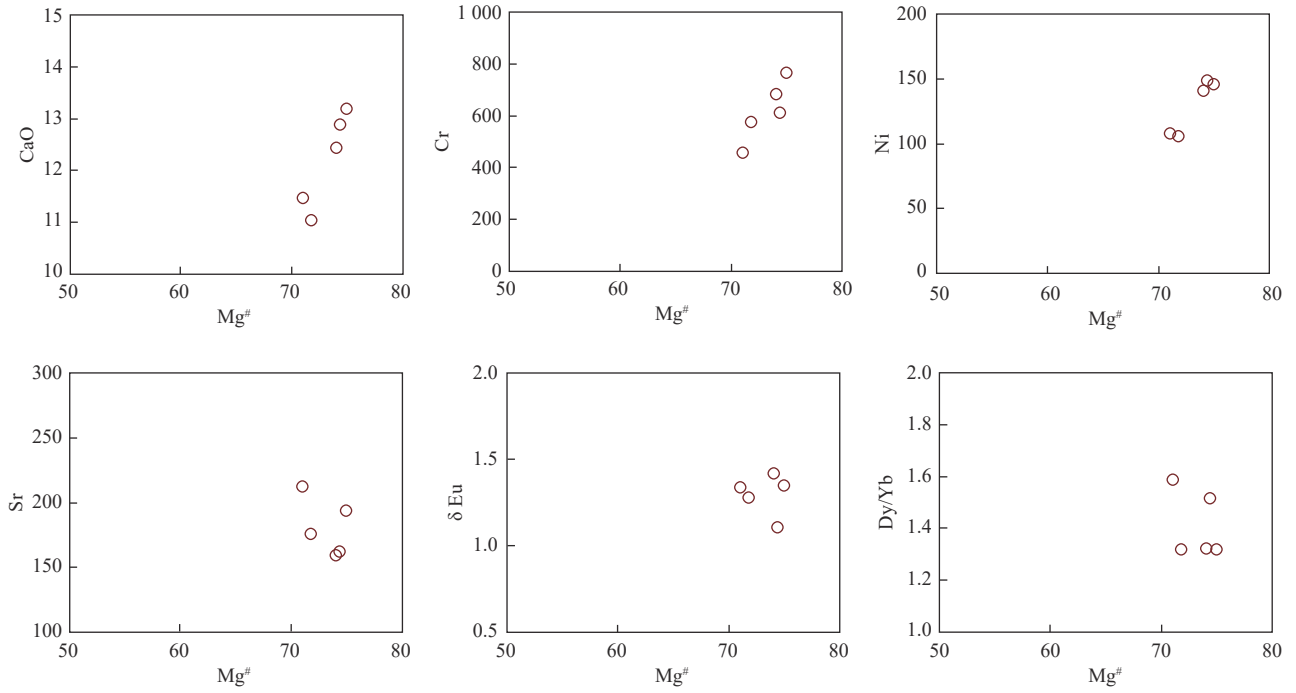


图7 西天山夏特辉长岩 Mg[#]—多元素含量协变图

Fig. 7 the covariant diagram of Mg # versus multi-elements for Xiate hornblende gabbro

稳定,与 Mg[#]值也不具有正线性变化关系,而且中等略低的 Sr/Y 值(15.22~24.84)也反映出形成过程中并未经历有石榴子石的结晶分离过程。

夏特辉长岩锆石的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 值为 0.282 534~0.282 824,对应的 εHf(*t*) 值为+1.47~+11.91,εHf(*t*) 值与锆石 U-Pb 年龄关系图(图 8)显示所测的 εHf(*t*) 值都在亏损地幔线附近,显示有亏损源区的物质特征。同时,均具正 εHf(*t*) 值锆石的一阶段模式年龄 T_{DM1} 介于 655~1 089 Ma,说明其母岩浆来源于中新元古代亏损地幔源区且在上升过程中很少受到壳源物质的混染。另外,这套辉长岩的 Cr 含量为 247×10⁻⁶~769×10⁻⁶,Co 含量为 31.8×10⁻⁶~38.2 ×10⁻⁶,Ni 含量为

90.6×10⁻⁶~156.0×10⁻⁶,接近于亏损地幔的微量元素含量(Hoffmann, 1988),此结果也与其 Hf 同位素组成所反映的源区组成相一致。

夏特地区钙碱性岩浆同时显示出 HFSE 元素的亏损和 Th 元素的相对富集(图 6b),表明弧岩浆形成过程中可能存有地壳物质或俯冲环境下富集物质的加入(Ewart et al., 1998; Plank, 2005; Martin et al., 2005; 徐义刚等, 2020)。在俯冲消减带中,消减板片及其所携沉积物质的加入可以改变源区中微量元素的丰度,使得岩浆中活动性元素与活动性元素、活动性元素与高场强元素的比值发生不同程度的改变;但高场强元素 HFSE (Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 和 Y) 之间的相对惰性和相

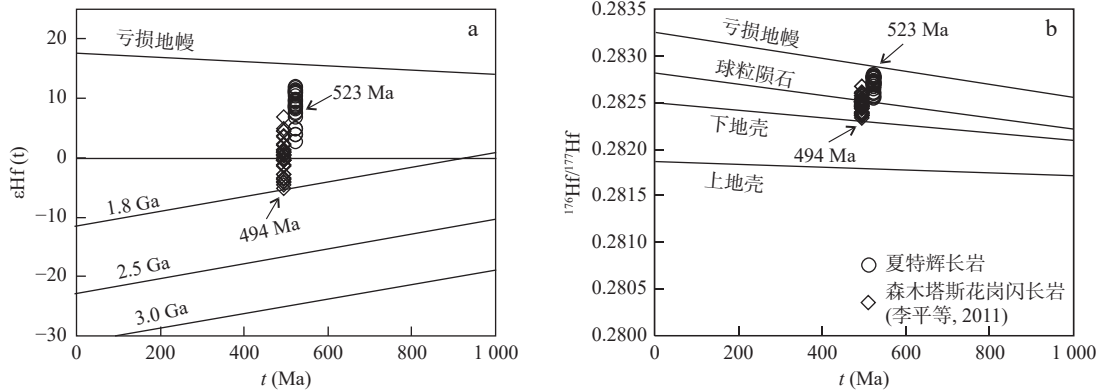


图8 夏特辉长岩 εHf(*t*)-*t* 图 (a) 和 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf-*t* 图 (b)

Fig. 8 (a) εHf(*t*) versus *t* Diagram and (b) ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf versus *t* Diagram for the Xiate grabbo

近的不相容性,使得 HFSE 之间的比值可以作为识别岩浆物质源区的有效工具(Marini et al., 2005; Handley et al., 2007; 李平等, 2014)。Niu 等(2009)认为由仅由地幔熔融而来的洋中脊玄武岩(MORB)以 $(\text{Nb}/\text{Th})_{\text{PM}} > 1$ 为显著特征,夏特辉长岩的 $(\text{Nb}/\text{Th})_{\text{PM}}$ 值介于 0.12~0.27, 此与弧火山岩多数远小于 1 的 $(\text{Nb}/\text{Th})_{\text{PM}}$ 标准化比值相类似,说明其物质源区并非由单一的亏损地幔物质构成。部分研究进一步发现,幔源岩浆经历地壳物质的卷入会致使基性岩浆体系中的不相容元素 La 相对于 Nb 明显增高,使得不相容元素 Nb/La 值 (< 1) 可以作为是否存在地壳物质加入的有效判别指标(Xia et al., 2004; Ernst, 2005; 夏林圻等, 2008; Xia, 2014)。夏特辉长岩的 $(\text{Th}/\text{Nb})_{\text{PM}} = 3.75 \sim 8.65$ 、 $\text{Nb}/\text{La} = 0.4 \sim 0.62$, 显示出基性侵入岩浆形成过程中存地壳物质成分的加入。而且,夏特辉长岩锆石 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值较大的跨度范围(+1.47~+11.91)和晚寒武世森木塔斯花岗岩闪长岩的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值(-5.22~+6.90)(图 8),也进一步暗示此种岩浆过程的存在。

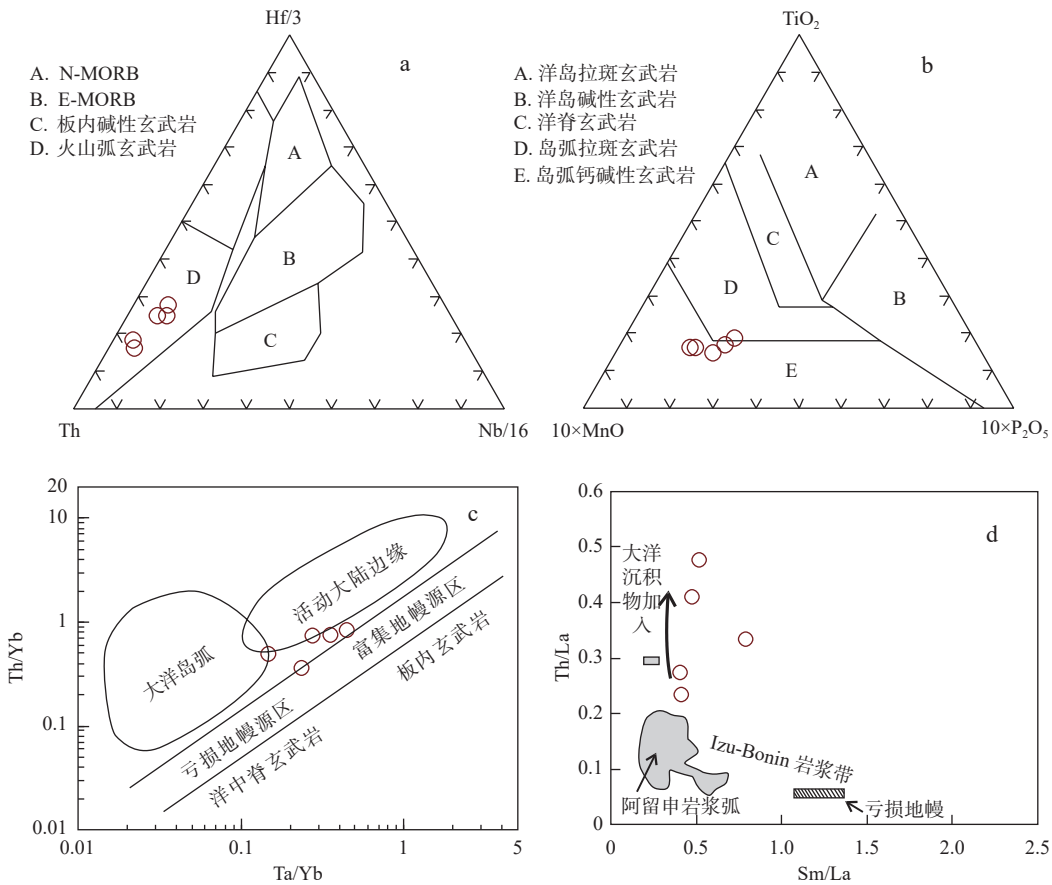
4.3 西天山早古生代构造格局

包括中国天山在内的中亚造山带是世界上典型的增生型造山带,是由古亚洲洋经历了长期而复杂的俯冲消减以及不同地体拼贴、碰撞和相关的火山-侵入岩浆作用下形成的(Allen et al., 1993; Windley et al., 2007; Xiao et al., 2008)。其中,不同阶段和成因类型的岩浆活动记录了天山地区岩浆弧、增生杂岩的生长、拼贴及碰撞造山岩浆响应等重大地质事件。自南华纪以来,天山及其邻区各微地块上开始出现一定数量的大陆裂谷火山岩(Xia, 2014; 2007),可以看作大陆裂解开始形成古生代洋盆的标志。进入古生代以来,中天山南缘蛇绿构造混杂岩带沿线断续出露大量包含基性-超基性岩和其它性质构造岩块的混杂岩,部分基性-超基性岩石组合具有蛇绿岩性质,并伴生有榴辉岩、蓝片岩及高压麻粒岩等高压-超高压变质岩类。碰撞造山事件大多被认为具有穿时特征,天山地区东西延伸约 2500km 的不同地段的同期构造事件也必然会出现有不同时代的年龄数据;已有的蛇绿岩、侵入岩和高压变质岩工作共同表明了天山碰撞造山事件表现有“西早-东晚”的剪刀差式闭合样式(高俊等, 2006; Wang et al., 2023)。如前所述,中天山地区“西早-东迟”的古生代岩浆时空分布特征,也从一定程度上奠定了西天山剪刀差式的碰撞造山过程。

早寒武世夏特辉长岩(523 Ma)的微量元素原

始地幔标准化图解表现出明显的大离子亲石元素富集和高场强元素亏损(图 6b)的弧岩浆地球化学特征。在 $\text{Hf}/3\text{-Th-Nb}/16$ 和 $\text{TiO}_2\text{-}10\times\text{MnO-}10\times\text{P}_2\text{O}_5$ 图解中(图 9a、图 9b),夏特辉长岩均落入火山弧玄武岩范围内;而在 $\text{Th}/\text{Yb-Ta}/\text{Yb}$ 协变图中(图 9c),样品也基本落入大洋岛弧或活动大陆边缘地区。此外, $\text{Th}/\text{La-Sm}/\text{La}$ 物质源区判别图中(图 9d)也显示出火山弧中存有大洋沉积物质加入的趋势,也与前述的岩石地球化学成因相一致。森木塔斯 494.2 Ma(李平, 2011; 李平等, 2012)、比开河 478.7 Ma 的弧花岗岩(龙灵利等, 2007)和夏塔 470 Ma 的埃达质闪长岩(Qian et al., 2009)的形成演化也与早寒武世—早奥陶世岛弧增生岩浆作用有关。此外,拉提北坡地区也曾出现有形成于 516 Ma 的 T-MORB 玄武岩(Qian et al., 2009)。

大洋板块内部的薄弱带(洋中脊、转换断层、破碎带等)往往可以构成板块俯冲起始的有利地段(Frisch et al., 2011)。新近研究表明,微陆块的边缘更容易产生初始俯冲,而且相对于老的大洋板块,年轻的大洋板块更易发生初始俯冲。初始俯冲过程中,往往存有明显的软流圈上涌,微陆块的肢解破坏,且大部分被俯冲的大洋板片带到地球深部(Martin et al., 2005; Zhu et al., 2023)。具体到本工作区,古元古界木扎尔特岩群是那拉提构造活动带的重要组成部分,代表了中天山地块(那拉提微地块)的基底建造。自南华纪至早奥陶世阶段,南天山古生代洋盆的演化进程中存有三期显著的构造-岩浆事件:①在早寒武世,南天山洋已经开始向中天山地块发生初始俯冲。弧成因的夏特辉长岩(523 Ma)和森木塔斯花岗岩(494 Ma)的形成,表明了西天山地区在早寒武世已经形成有早期的弧岩浆作用。②伴随着初始俯冲过程,中天山地块消减至地壳深部;俯冲板片在石榴子石残余稳定区内发生熔融,并于那拉提山北坡形成~470 Ma 的埃达克质岩类(图 10)。③那拉提北缘断裂曾发现有形成于 516 Ma 的 T-MORB 玄武岩(Qian et al., 2009),却仍欠缺蛇绿岩套的其余物质构成,且其是否与境外的尼古拉耶夫线存有衔接关系仍具疑问(冯益民等, 2021)。但根据目前岩浆岩组合特征来看,俯冲带微陆块后侧的构造薄弱带也可以是形成具 T-MORB 地球化学特征玄武岩的有利构造环境。④中天山南缘地区出现有形成于 427 Ma 的强过铝质同碰撞花岗岩(Xu et al., 2013),暗示着俯冲消减至地壳深部的中天山地块已于伊犁地块完成拼合,与早寒武世夏特地区的弧侵入



a.Hf/3-Th-Nb/16 图 (Pearce, 1983); b.TiO₂-10×MnO-10×P₂O₅ 图 (Mullen, 1983);
c.Ta/Yb-Th/Yb (Wood, 1980); d. Sm/La-Th/La 图 (McCarthy et al., 2021)

图9 夏特辉长岩构造环境判别图

Fig. 9 Geotectonic discrimination diagrams for the Xiate grabbo

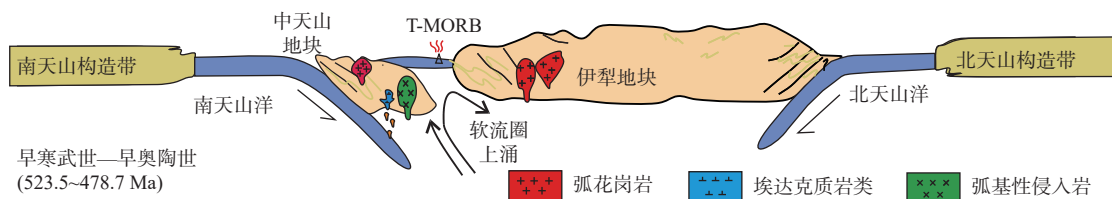


图10 中天山南缘地区早古生代早期构造岩浆模式图

Fig. 10 Tectonic magmatic model of the south margin of the Central Tianshan mountains in the Early Paleozoic

岩浆活动一同构成中天山-伊犁地块广泛发育的陆缘弧体系。

5 结论

(1)夏特辉长岩 LA-ICP MS 锆石 U-Pb 同位素测年结果为(523±5)Ma, 为西天山地区早寒武世岩浆记录。西天山早古生代初期“西早-东晚”的岩浆时空分布特征也奠定了南天山洋晚古生代剪刀差式的闭合过程。

(2)夏特辉长岩具有明显的弧地球化学特征, 其 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值均大于 0 并具有较高的 $(Th/Nb)_{PM}$ 和较低的 Nb/La 比值, 反映出幔源物质为其主要物质源区, 且形成过程中存有富集的俯冲物质的卷入。

(3)夏特辉长岩的发现表明了南天山洋在早寒武世已经开始向中天山地块发生初始俯冲, 并沿中天山地块北缘形成有早期的弧岩浆作用。

致谢: 中国地质科学院地质研究所黄河、付长垒副研究员和审稿老师给予了许多有益建议, 在此感谢。

参考文献(References):

- 冯益民, 李智配, 陈隽璐, 等. 中国西北部大地构造图(1:2000000)及说明书[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- 高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 南天山: 晚古生代还是三叠纪碰撞造山带?[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1049–1061.
- GAO Jun, LONG Lingli, QIAN Qing, et al. South Tianshan: a Late Paleozoic or a Triassic orogen?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1049–1061.
- 李平, 王洪亮, 徐学义, 等. 西准噶尔早泥盆世马拉苏组火山岩岩石成因研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(12): 3553–3568.
- LI Ping, WANG Hongliang, XU Xueyi, et al. Petrogenesis of volcanic rocks from Early Devonian Marasu Formation, West Junggar[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(12): 3553–3568.
- 李平, 徐学义, 王洪亮, 等. 中天山南缘那拉提碱性花岗岩岩石成因——来自锆石微量元素和 Hf 同位素的证据[J]. 地质通报, 2012, 31(12): 1949–1964.
- LI Ping, XU Xueyi, WANG Hongliang, et al. Petrogenesis of Nalati alkali granites in South Central Tianshan Mountains: Evidence from zircon trace elements and Hf isotope[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(12): 1949–1964.
- 李平. 中天山中段古生代花岗岩成因及对天山洋陆转换时限的制约[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- LI Ping. The Petrogenesis of Paleozoic Granites in the Middle and West Segment of the Central Tianshan and Constrain to the Process of the Ocean-continent Transition of the Tianshan [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- 李舫, 王涛, 肖文交, 等. 中亚造山带东南缘从俯冲-增生到碰撞的构造-岩浆演化记录[J]. 岩石学报, 2023, 39(5): 1261–1275.
- LI Shan, WANG Tao, XIAO WenJiao, et al. Tectono-magmatic evolution from accretion to collision in the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Acta Petrologica Sinica*, 2023, 39(5): 1261–1275.
- 龙灵利, 高俊, 熊贤明, 等. 新疆中天山南缘比开(地区)花岗岩地球化学特征及年代学研究[J]. 岩石学报, 2007, 23(4): 719–732.
- LONG Lingli, GAO Jun, XIONG Xianming, et al. Geochemistry and geochronology of granitoids in Bikai region, southern Central-Tianshan mountains, Xinjiang[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(4): 719–732.
- 钱青, 徐守礼, 何国琦, 等. 那拉提山北缘寒武纪玄武岩的元素地球化学特征及构造意义[J]. 岩石学报, 2007, 23(7): 1708–1720.
- QIAN Qing, XU Shouli, HE Guoqi, et al. Elemental geochemistry and tectonic significance of Cambrian basalts from basalts from the northern side of the Nalati Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(7): 1708–1720.
- 茹艳娇. 西天山大哈拉军山组火山岩地层序列、岩石成因与构造环境[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- RU Yanjiao. The Stratigraphic Sequence, Petrogenesis and Tectonic Setting of the Volcanic Rocks of the Dahalajunshan Formation, Western Tianshan Mountain, China [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山及邻区石炭纪—早二叠世裂谷火山岩岩石成因[J]. 西北地质, 2008, 41(4): 1–68.
- XIA Linqi, XIA Zuchun, XU Xueyi, et al. Petrogenesis of Carboniferous-Early Permian Rift-Related Volcanic Rocks in the Tianshan and its Neighboring Areas, Northwestern China[J]. *Northwestern Geology*, 2008, 41(4): 1–68.
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 天山岩浆作用[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- 肖文交, 宋东方, WINDLEY BF, 等. 中亚增生造山过程与成矿作用研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(10): 1512–1545.
- XIAO Wenjiao, SONG Dongfang, WINDLEY BF, et al. Research progresses of the accretionary processes and metallogenesis of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(10): 1512–1545.
- 新疆维吾尔自治区地质局. 1:20万汗腾格里峰幅(K-44XV)地质矿产图[R]. 1981.
- 徐学义, 王洪亮, 马国林, 等. 西天山那拉提地区古生代花岗岩的年代学和锆石 Hf 同位素研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(6): 691–706.
- XU Xueyi, WANG Hongliang, MA Guolin, et al. Geochronology and Hf isotope characteristics of the Paleozoic granite in Nalati area, West Tianshan Mountains[J]. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 2010, 29(6): 691–706.
- 徐义刚, 王强, 唐功建, 等. 弧玄武岩的成因: 进展与问题[J]. 中国科学(地球科学), 2020, 63(12): 1969–1991.
- XU Yigang, WANG Qiang, TANG Gongjian, et al. The origin of arc basalts: New advances and remaining questions[J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, 63(12): 1969–1991.
- 张向飞, 陈莉, 曹华文, 等. 中国新疆—中亚大地构造单元划分及演化简述[J]. 西北地质, 2023, 56(4): 1–39.
- ZHANG Xiangfei, CHEN Li, CAO Huawen, et al. Division of Tectonic Units and Their Evolutions within Xinjiang, China to Central Asia[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(4): 1–39.
- Allen M B, Windley B F, Zhang C. Palaeozoic collisional tectonics and magmatism of the Chinese Tien Shan, Central Asia[J]. *Tectonophysics*, 1993, 220: 89–115.
- Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192: 59–79.
- Belousova E, Griffin W, Oreilly S, et al. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, 143(5): 602–622.
- Blichert T, Albarède. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 148: 243–258.
- Chen W, Zhang G, Ruan M, et al. Genesis of intermediate and silicic arc magmas constrained by Nb/Ta fractionation[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2021, 126.
- Ernst R E, Buchan K L, Campbell I H. Frontiers in large igneous province research[J]. *Lithos*, 2005, 79: 271–297.
- Ewart A, Collerson K D, Regelous M, et al. Geochemical evolution within the Tonga–Kermadec–Lau arc–back-arc systems: the role of varying mantle wedge composition in space and time[J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39: 331–368.
- Frisch W, Meschede M, Blakey R. Plate tectonics: Continental drift and mountain building [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- Gao Jun, Long Lingli, Klemd R, et al. Tectonic evolution of the South Tianshan Orogen, NW China: geochemical and age con-

- straints of granitoid rocks[J]. *International Journal Of Earth Sciences*, 2009, 98: 1221–1238.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, et al. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LA-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, 64: 133–147.
- Handley H K, Macpherson C G, Davidson J P, et al. Constraining Fluid and Sediment to Subduction-Related Magmatism in Indonesia: Ijen Volcanic Complex[J]. *Journal of Petrology*, 2007, 48: 1155–1183.
- Huang He, Wang Tao, Tong Ying, 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.
- Hofmann A W. Chemical differentiation of the Earth: the relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 90: 297–314.
- Irvine T N, Baragar W R A. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1971, 8: 523–548.
- Hoskin P, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. *Rev Mineral Geochem*, 2003, 53: 27–62.
- Lizuka T, Hirata T. Improvements of precision and accuracy in situ Hf isotope microanalysis of zircon using the laser ablation-MC-ICPMS technique[J]. *Chemical Geology*, 2005, 220: 121–137.
- Long Lingli, Gao Jun, 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.
- Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00, a geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2003, 4: 25–32.
- Marini J C, Chauvel C, Maury R C. Hf isotope compositions of northern Luzon arc lavas suggest involvement of pelagic sediments in their source[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2005, 149: 216–232.
- Martin H, Smithies R H, Rapp R, et al. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution[J]. *Lithos*, 2005, 79: 1–24.
- Mccarthy A, Yogodzinski G M, Bizimis M, et al. Volcaniclastic sandstones record the influence of subducted Pacific MORB on magmatism at the early Izu-Bonin arc[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta: Journal of the Geochemical Society and the Meteoritical Society*, 2021, 296: 170–188.
- Middlemost E A H. Naming materials in magma-igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 1994, 7: 215–224.
- Miyashiro A. Classification, characteristics, and origin of ophiolites[J]. *The Journal of Geology*, 1975, 83: 249–281.
- Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 62: 53–62.
- Niu Y L, O'Hara M J. MORB mantle hosts the missing Eu (Sr, Nb, Ta and Ti) in the continental crust: New perspectives on crustal growth, crust–mantle differentiation and chemical structure of oceanic upper mantle[J]. *Lithos*, 2009, 112: 1–17.
- Pearce J A. Role of the sub-continental lithosphere in magma genesis at active continental margins[A]. In: Hawkesworth C J, Norry M J (eds.). *Continental Basalts and Mantle Xenoliths*[M]. Cambridge: Shiva Publishing Ltd., 1983.
- PLANK T. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46: 921–944.
- Qian Qing, Gao Jun, Klemd R, et al. 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 Xiata, NW China[J]. *International Journal Of Earth Sciences*, 2009, 98: 551–569.
- Scherer E, Münker C, Mezger K. Calibration of the Lutetium-Hafnium clock[J]. *Science*, 2001: 683–687.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1989, 42: 313–345.
- Tang M, Lee C T A, Chen K, et al. Nb/Ta systematics in arc magma differentiation and the role of arclogites in continent formation[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 235.
- Wang Tao, Tong Ying, Huang He, et al. Granitic record of the assembly of the Asian continent[J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 237: 104298.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W J, et al. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164: 31–47.
- Wood D A. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary volcanic province[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50: 11–30.
- Xia Linqi, Xu Xueyi, Xia Zuchun, et al. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, Northwestern China[J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 2004, 116: 419–433.
- Xia Linqi. The geochemical criteria to distinguish continental basalts from arc related ones[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 139: 195–212.
- Xiao W J, Han C M, Yuan C, et al. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of Northern Xinjiang, NW China: Implications for the tectonic evolution of central Asia[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 102–117.
- Xu Xueyi, Wang Hongliang, Li Ping, 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 Fwaof Asian Earth Sciences*, 2013, 72: 33–62.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasmas mass spectrometry[J]. *Geostandard and Geoanalytical Research*, 2004, 28: 353–370.
- Zhu M S, Yan H Y, Pastor G D, et al. Do microcontinents nucleate subduction initiation?[J]. *Geology*, 2023, 7: 668–672.