

# 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩的成因及其构造意义\*

叶现韬 张传林

YE XianTao and ZHANG ChuanLin

河海大学海洋学院,南京 210098

College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, China

2020-05-02 收稿, 2020-08-11 改回.

Ye XT and Zhang CL. 2020. Petrogenesis and tectonic implications of the Neoproterozoic TTG gneiss in the North Altyn Tagh area, southeastern Tarim Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 36(11):3397–3413, doi:10.18654/1000-0569/2020.11.09

**Abstract** The Precambrian evolution of the Tarim Craton in NW China, in particular during the Early Precambrian stage, remains enigmatic. In this contribution, we report field observation, petrography, geochemistry and zircon SHRIMP U-Pb ages of Neoproterozoic TTG gneiss of the North Altyn Tagh area in the southeastern margin of the Tarim Craton. Zircon SHRIMP U-Pb dating reveals that the TTG gneiss was formed at  $2740 \pm 19$  Ma, and was later altered by Late Neoproterozoic ( $2494 \pm 53$  Ma) migmatization and Paleoproterozoic ( $1962 \pm 78$  Ma) granulite-facies metamorphism. Geochemically, the Neoproterozoic tonalitic orthogneisses exhibit low MgO (1.33% ~ 3.08%) contents and  $Mg^\#$  values (37 ~ 52) and characterized by high Sr ( $469 \times 10^{-6}$  ~  $764 \times 10^{-6}$ ) contents, low Y ( $4.72 \times 10^{-6}$  ~  $13.5 \times 10^{-6}$ ) and Yb ( $0.37 \times 10^{-6}$  ~  $0.99 \times 10^{-6}$ ) contents, leading to high Sr/Y ratios (41 ~ 99), displaying typical TTG rocks derived from the lower mafic continental crust. In addition, the TTG gneisses show positive  $\varepsilon_{Nd}(t)$  values (0.2 ~ 3.6) with Paleoproterozoic two-stage model ages ( $t_{DM2} = 3.62 \sim 3.70$  Ga), suggesting that the crustal materials of the basement rocks in the North Altyn Tagh area were initially extracted from a depleted mantle in the Paleoproterozoic and reworked in the Neoproterozoic. Therefore, the Neoproterozoic TTG gneisses were most possibly derived from partial melting of a mafic lower continental crust with residue of garnet, amphibolite and rutile. The diachronous formation ages of the TTGs from the North Altyn Tagh, Dunhuang and Kuruketage areas and the distinct features in continental growth process suggest that the Precambrian basement of the Tarim Craton is composed by independent continental terranes.

**Key words** TTG gneiss; Zircon SHRIMP U-Pb dating; Petrogenesis; North Altyn Tagh; Tarim Craton

**摘要** 塔里木克拉通前寒武纪构造演化,特别是早前寒武纪构造演化一直是地质学家讨论的焦点。本文通过对阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩进行详细的野外调查、岩相学观察、地球化学分析以及锆石 SHRIMP U-Pb 定年来揭示该岩石的成因以及探讨塔里木克拉通前寒武纪构造演化。锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果显示阿尔金北缘 TTG 片麻岩的形成年龄为  $2740 \pm 19$  Ma,而后经历了新太古代( $2494 \pm 53$  Ma)混合岩化作用和古元古代( $1962 \pm 78$  Ma)麻粒岩相变质作用。阿尔金北缘英云闪长质片麻岩显示低的 MgO 含量(1.33% ~ 3.08%)和  $Mg^\#$  (37 ~ 52),具有高 Sr( $469 \times 10^{-6}$  ~  $764 \times 10^{-6}$ )含量、低 Y( $4.72 \times 10^{-6}$  ~  $13.5 \times 10^{-6}$ )和 Yb( $0.37 \times 10^{-6}$  ~  $0.99 \times 10^{-6}$ )含量的特点,它们的 Sr/Y 比值可达到 41 ~ 99。岩石的这些特征与基性下地壳部分熔融形成的 TTG 相同。并且,该新太古代 TTG 片麻岩还具有正的  $\varepsilon_{Nd}(t)$  值(0.2 ~ 3.6)、高的 Nd 同位素初始值(0.509088 ~ 0.509260)和古太古代两阶段模式年龄(3.62 ~ 3.70 Ga)。因此,阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩可能来源于基性下地壳部分熔融,并且岩浆源区有石榴石、角闪石和金红石的残留。综合前人的研究成果,对比相邻区域 TTG 的形成时代,变质事件的记录以及太古宙地壳增生差异都指示阿尔金北缘和敦煌-库鲁塔格地区可能来源于不同的大陆块体。

**关键词** TTG 片麻岩;锆石 SHRIMP U-Pb 定年;岩石成因;阿尔金北缘;塔里木克拉通

中图法分类号 P588.121; P597.3

\* 本文受江苏省自然科学基金项目(BK20170873)、中央高校基本科研业务费项目(B200202137)和国家自然科学基金项目(41702197)联合资助。

第一作者简介:叶现韬,男,1987年生,博士,讲师,从事前寒武纪地质学与岩浆岩石学研究,E-mail: yexiantao10@mails.ucas.ac.cn

塔里木克拉通是中国最重要的三大克拉通之一,但是由于沙漠覆盖和研究程度低,一直被认为是具有统一前寒武纪基底的克拉通(辛后田等, 2013)。然而,随着对塔里木克拉通前寒武纪基底研究的深入,越来越多的年代学及岩石学证据显示塔里木克拉通早前寒武纪基底是由两个或多个独立的块体组成。有学者通过对塔中钻孔岩芯研究认为塔里木克拉通前寒武纪基底分为南北两个块体(Yang *et al.*, 2018),且这两个块体最终沿中央缝合带于新元古代拼合在一起(Xu *et al.*, 2013)。也有学者通过对比塔里木周缘古-中元古代变质事件和岩浆活动提出塔里木克拉通前寒武纪基底可能由库鲁克塔格-敦煌地体、阿克塔什塔格地体、塔里木西南地体和阿克苏地体组成(张健等, 2014; Ye *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2014)。显然,这一认识目前还存在争议。

太古宙 TTG 岩石广泛分布于各个古老的克拉通(张旗和翟明国, 2012),如西加拿大地盾(Sandeman *et al.*, 2006)、苏必利尔克拉通(Henry *et al.*, 2000)、波罗的地盾(Samsonov *et al.*, 2005)、西格林兰克拉通(Polat *et al.*, 2008)、华北克拉通(万渝生等, 2017)、南非和津巴布韦克拉通等(Kröner *et al.*, 1999)。年代学研究表明,全球大多数 TTG 岩石形成于 2.9~2.7Ga,其主要来源于基性岩石部分熔融,并有不同程度地幔橄榄岩的加入(Zhai and Santosh, 2011)。同时,这一时代也是大陆地壳增生的主要阶段(Condie, 1998; Zhai and Santosh, 2011)。因此,太古宙 TTG 岩石作为克拉通变质基底的重要组成部分(翟明国, 2017)。它不仅为地球早期提供了陆壳物质,还记录了地球早期构造环境和地壳演化的重要信息(Jahn *et al.*, 1981; Moyen and Martin, 2012)。所以,对太古宙 TTG 岩石的成因研究具有非常重要的意义。另外,太古宙 TTG 岩石作为花岗岩类富含锆石等副矿物,由于锆石具有良好的稳定性和抗风化等特点,使其能够很好地记录和保存早期地质体经历的构造热事件(Wu and Zheng, 2004)。所以对太古宙 TTG 进行精细的年代学研究同样可以为区域构造演化提供非常重要的信息(Zong *et al.*, 2013)。

本文通过对塔里木克拉通东南阿尔金北缘基底岩石(TTG 片麻岩)进行锆石 SHRIMP U-Pb 定年、全岩主微量元素及同位素分析,结合前人研究资料,探讨阿尔金北缘 TTG 片麻岩的成因,揭示塔里木克拉通周缘块体的构造演化和亲缘性。

## 1 区域地质背景与样品采集

塔里木克拉通位于中国西北地区,是中国最重要的三个克拉通之一,也是中国最主要的前寒武纪克拉通(图 1a, Zhao and Cawood, 2012; Zhang *et al.*, 2013a, b; Zhu *et al.*, 2020)。其面积将近 60 万平方千米,大部分被沙漠覆盖(大于 85%)(Xu *et al.*, 2013; Zhu *et al.*, 2013, 2014, 2017)。因此,塔里木前寒武纪基底主要出露于塔里木盆地周缘地

区,主要有北缘的库鲁克塔格地区,西南的铁克里克地区以及东南的敦煌-阿尔金北缘地区(图 1b)。

敦煌-阿尔金北缘地区位于星星峡-且末断裂、北山造山带和阿尔金断裂所夹持的区域(图 1b),即前人所说的阿北地块(陆松年和袁桂邦, 2003; 辛后田等, 2012)或者敦煌地块(甘肃省地质矿产局, 1989; 梅华林等, 1997, 1998; 辛后田等, 2013; 许志琴等, 1999; 张建新等, 2011)。前寒武纪岩石主要分布在敦煌地区(东巴兔山、三危山、红柳峡以及多坝沟)和阿尔金北缘地区(喀腊大湾和阿克塔什塔格)(Zhao *et al.*, 2015; 甘肃省地质矿产局, 1989; 李志琛, 1994)(图 1c)。该区早前寒武纪基底主要由 TTG 片麻岩、基性斜长角闪岩、基性麻粒岩、具有“孔兹岩系”特征的敦煌群和米兰群组成(甘肃省地质矿产局, 1989; 刘永顺等, 2009; 梅华林等, 1997; 于海峰等, 1998)。

敦煌地区 TTG 片麻岩的原岩的形成时代主要集中在 2.5~2.7Ga(Wang *et al.*, 2014; Yu *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2012a, 2013b; Zhao *et al.*, 2015; Zong *et al.*, 2013; 梅华林等, 1997, 1998; 王忠梅等, 2013; 张建新等, 2011; 赵燕等, 2013, 2015),并且在 TTG 片麻岩中普遍记 1.85~1.80Ga 的变质年龄(Zhang *et al.*, 2012a, 2013b; Zhao *et al.*, 2015)。另外,该地区的基性麻粒岩也记录了~1.84Ga 的高压变质事件(Zhang *et al.*, 2012a)。此外,原岩年龄为~1.83Ga 岛弧拉斑玄武岩遭受了低麻粒岩-高角闪岩相变质形成含石榴石斜长角闪岩(Wang *et al.*, 2014; 王忠梅, 2013)。基性麻粒岩相对较高的变质压力以及顺时针 *P-T* 演化轨迹都指示了敦煌地区在 1.84~1.83Ga 时处于碰撞造山环境(Zhang *et al.*, 2012b; Wang *et al.*, 2014)。直到 1.77Ga 出现 A 型花岗岩可能发生了由碰撞挤压向伸展拉张的构造转换(Yu *et al.*, 2014)。之后,约 1.61Ga 时板内岩浆活动开始发育并形成了具有 OIB 特征的玄武岩(现为角闪岩),此时敦煌地区已处于板内稳定环境(Wang *et al.*, 2014; 王忠梅, 2013)。

阿尔金北缘地区的早前寒武纪研究相对较早,积累了一系列重要的年代学资料。研究显示阿尔金北缘地区 TTG 片麻岩的形成于 2.5~2.8Ga(Long *et al.*, 2014; Lu *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2014),并在奥长花岗岩片麻岩中发现了~3.6Ga 的继承锆石。同时 TTG 片麻岩的 Hf 同位素证据也都显示该区存在太古代地壳可能性(Long *et al.*, 2014; Lu, 2001; Lu *et al.*, 2008; 李惠民等, 2001)。值得一提的是,近来有学者在阿克塔什塔格地区发现了~3.7Ga 的英云闪长片麻岩(Ge *et al.*, 2018, 2020),这是塔里木克拉通迄今发现的最老的岩石。阿尔金北缘地区发育一套 2.03~2.01Ga 具有的岛弧特征的片麻状花岗岩和片麻状辉长岩,证实该地区古元古代中晚期仍处于俯冲构造环境(Zhang *et al.*, 2014; 辛后田等, 2011)。此后,该地区普遍遭受了~2.0Ga 变质事件(Long *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014; 辛后田等, 2012)。且这一变质事件同样被石榴角闪岩(Zhang *et al.*, 2019)和

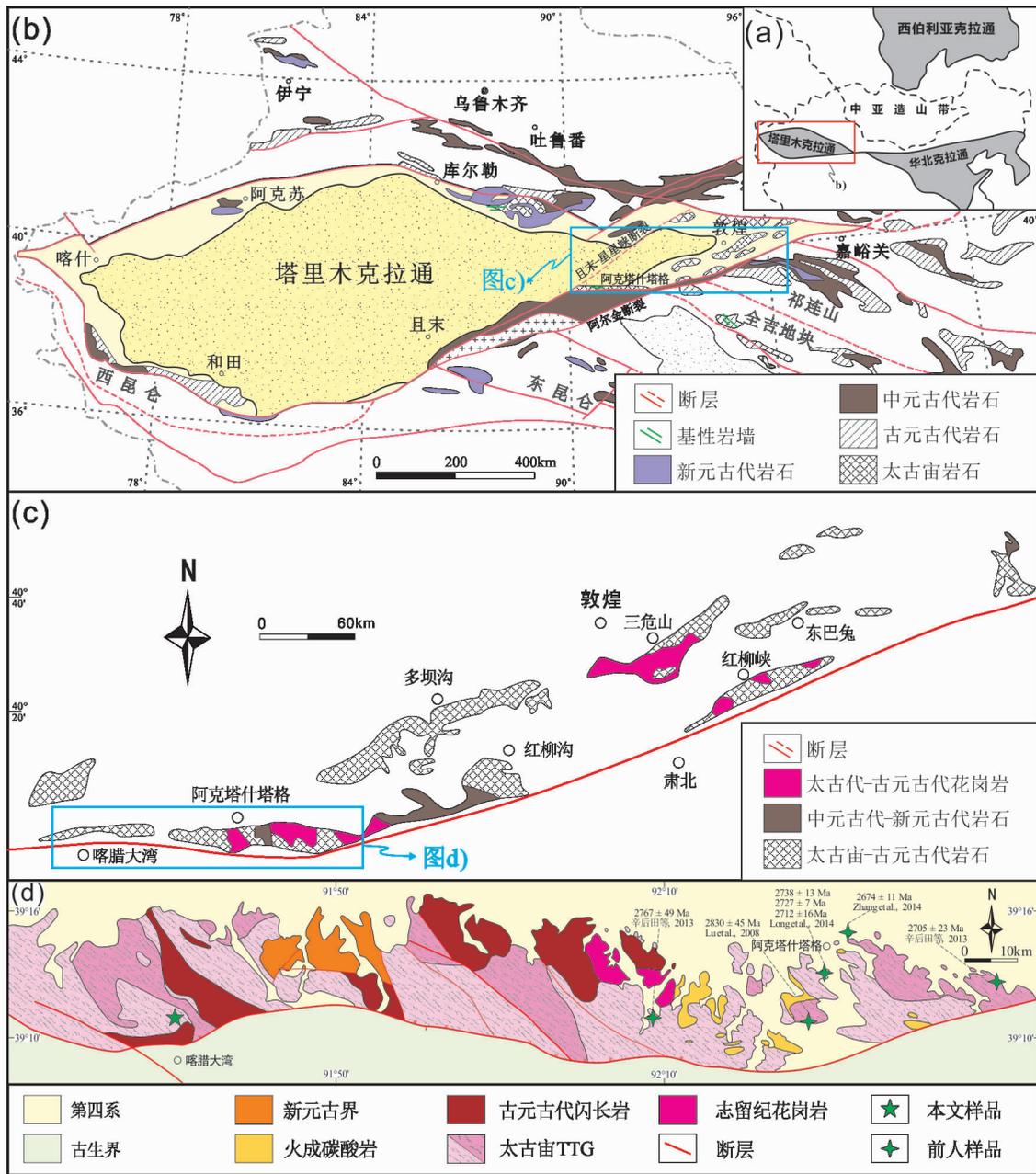


图1 研究区地质简图

(a) 中亚造山带构造图; (b) 塔里木克拉通前寒武纪岩石分布图 (据 Lu *et al.*, 2008 修改); (c) 阿尔金北缘-敦煌地区地质简图 (据梅华林等, 1997 修改); (d) 阿尔金北缘地区地质简图

Fig. 1 Simplified geological maps of studied area

(a) simplified tectonic map of Central Asian Orogenic Belt (CAOB) showing the location of the Tarim Craton; (b) geological map of the Tarim Craton showing the distribution of the Precambrian rocks (modified after Lu *et al.*, 2008); (c) simplified geological map of the North Altyn Tagh-Dunhuang area (modified after Mei *et al.*, 1997); (d) geological map of the North Altyn Tagh area

麻粒岩所记录 (Wu *et al.*, 2019)。这都表明 ~2.0Ga 左右阿尔金北缘地区已进入碰撞造山阶段 (Zhang *et al.*, 2014; 辛后田等, 2012)。随后, ~1.85Ga 具有 OIB 地球化学特征的基性岩墙侵入到 TTG 片麻岩和古元古代片麻状花岗岩中, 初步研究显示他们可能与地幔柱岩浆活动或者板内伸展环境有关 (Zhang *et al.*, 2014)。

本次研究的样品主要采集于阿尔金北缘西部喀腊大湾地区, 采样位置见图 1d (GPS: 39°11'02.6"N, 91°40'41.2"E)。所采岩石在该区域分布较广, 露头上可见被未变形和未变质的基性岩墙侵入 (图 2a, b)。本文针对 TTG 片麻岩选取 1 个年龄样品及 5 个地球化学样品。TTG 岩石呈灰白色, 具有典型的片麻状构造 (图 2c), 露头局部发育左形剪切韧性断层

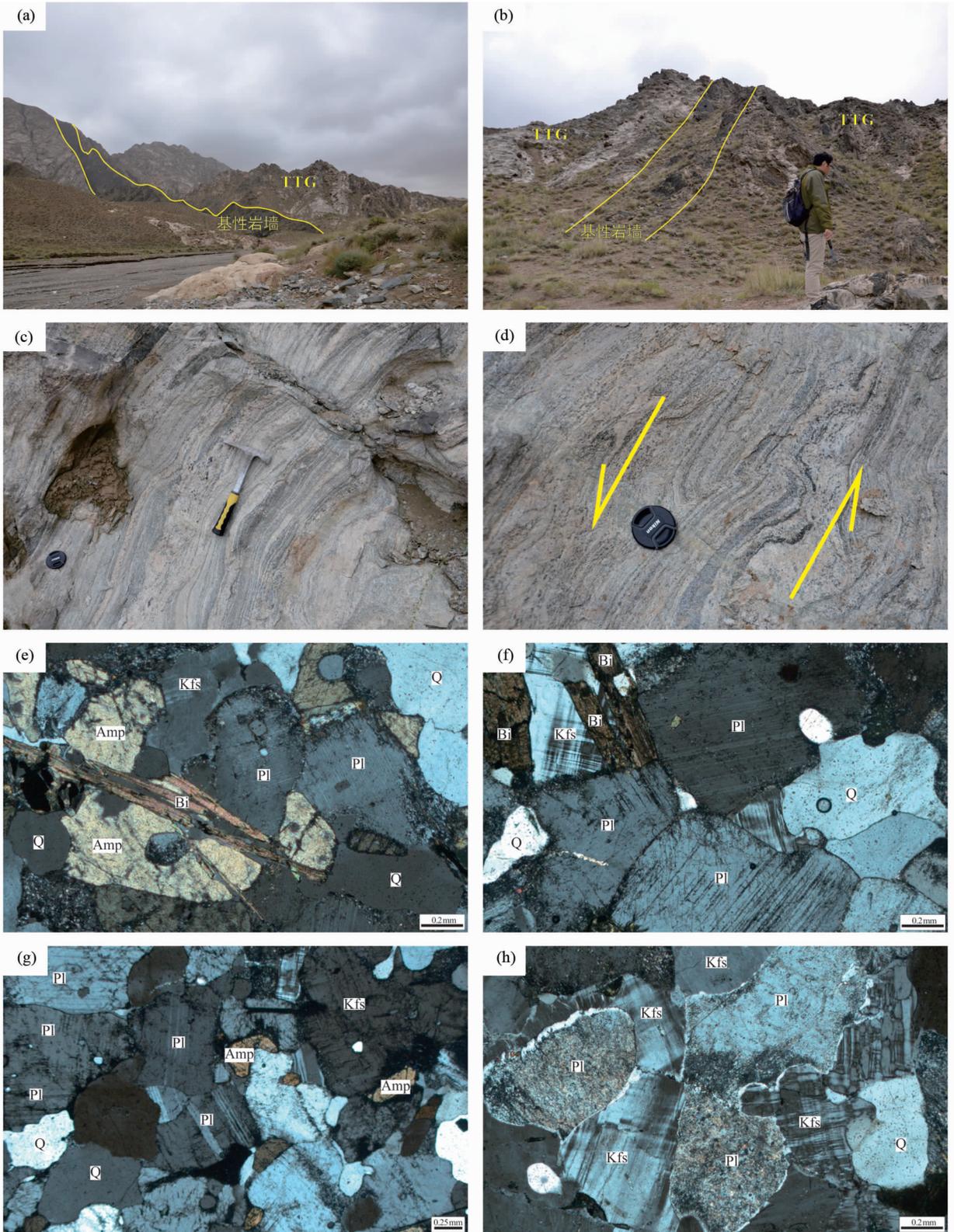


图2 阿尔金北缘喀腊大湾地区典型的野外照片和镜下照片

(a, b) 新太古代 TTG 片麻岩被未变形基性岩墙侵入; (c, d) 新太古代 TTG 片麻岩的露头特征; (e-h) 新太古代 TTG 片麻岩的镜下照片. Amp-角闪石; Bi-黑云母; Kfs-钾长石; Pl-斜长石; Q-石英

Fig.2 Representative field photos and photomicrographs showing the Precambrian rocks in Kaladawan, North Altyn Tagh area (a, b) Neoproterozoic TTG gneiss intruded by undeformed mafic dykes; (c, d) Neoproterozoic TTG gneiss show typical gneissic structure; (e-h) representative photomicrographs of the Neoproterozoic tonalitic gneisses. Amp-amphibole; Bi-biotite; Kfs-K-feldspar; Pl-plagioclase; Q-quartz

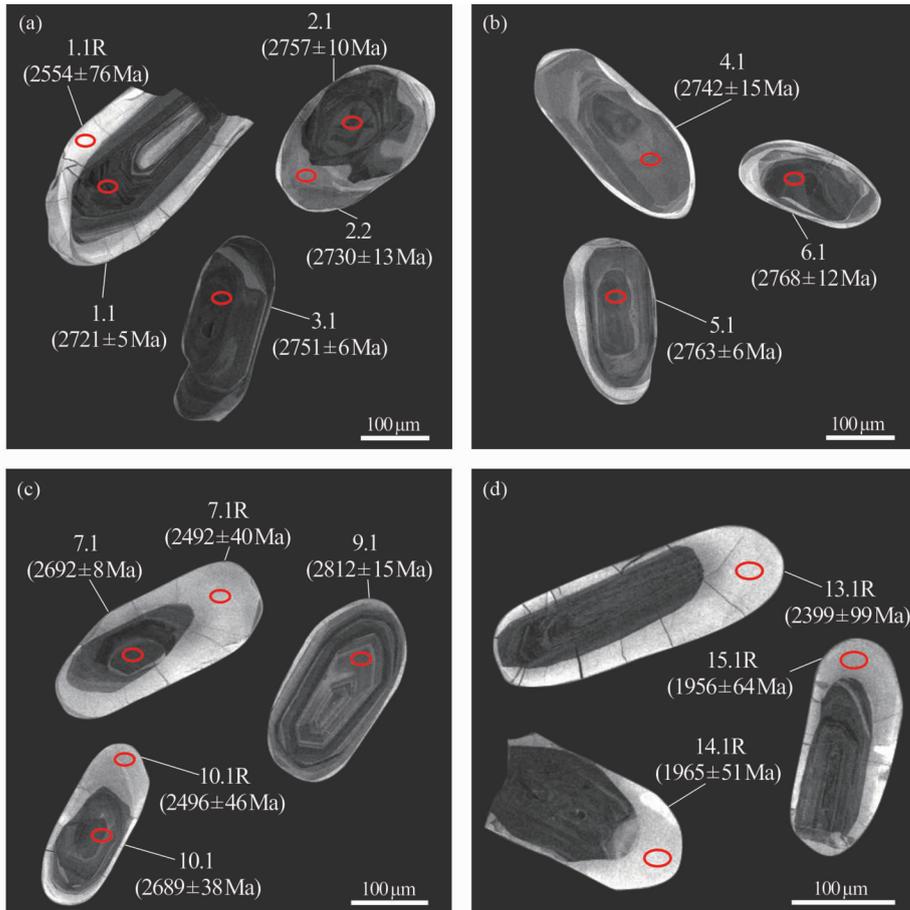


图3 典型锆石 CL 图像

圆圈代表分析点位和离子探针束斑大小,对应的年龄(Ma)已标出

Fig. 3 CL images of representative zircons

Analytical spots and ages in Ma are shown

(图2d)。岩石主要由斜长石(45%~55%)、石英(15%~25%)、钾长石(5%~10%)、黑云母(10%~15%)和角闪石(5%~10%)组成,其中角闪石和黑云母遭受了不同程度的蚀变作用(图2e-g)。此外,部分矿物还可见明显的增生边(图2h)。

## 2 分析方法

### 2.1 锆石 SHRIMP U-Pb 定年

本研究用于 SHRIMP U-Pb 定年的锆石颗粒来源于 17ALTO6 样品。首先对该岩石样品进行粗碎,再通过重液和磁选的方法分选出锆石颗粒,然后在双目镜下将具代表性的锆石颗粒和锆石标样(TEMORA)一起黏贴在环氧树脂表面并抛光至露出锆石颗粒中心。通过对锆石靶进行透射光、反射光显微照相和阴极发光(CL)照相检查锆石的外部 and 内部结构。锆石 U-Pb 定年在北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,详细的分析测试方法参见 Williams (1998)。分析过程中仪器使用的一次流( $O^{2-}$ )强度为 3~5 nA,束斑直径为 25  $\mu\text{m}$ 。

在锆石样品分析之前先对其扫描 120 秒,以去除表面杂质,然后对分析点进行 5 组扫描和数据采集。在分析过程中所用标样为 M257 ( $U = 840 \times 10^{-6}$ , Nasdala *et al.*, 2008) 和 TEMORA (417 Ma, Black *et al.*, 2003),分别用于锆石 U 含量和 U-Pb 年龄校正。每测试 3~4 个样品点测试 1 次标样 TEMORA,检验 U-Pb 定年数据质量。SHRIMP U-Pb 年龄数据采用 SQUID 和 ISOPLOT 程序(Ludwig, 2001, 2003)进行处理和作图。同位素比值和单点的年龄误差均为  $1\sigma$ ,加权平均年龄误差的置信度为 95%。

### 2.2 全岩主微量元素分析

全岩主量元素采用 X 荧光光谱分析方法在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成,测试仪器为 Rigaku ZSK 100e 型荧光光谱仪。样品处理流程类似于 Li *et al.* (2000),将 0.5 g 样品和 4g  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  混合均匀后倒入铂金坩埚并加入适量脱模剂溴化锂和氧化剂硝酸锂,置于 1200 $^{\circ}\text{C}$  高温熔融。待熔融完成后取出倒入铂金磨具中冷却成玻璃片以后进行 XRF 测试。样品的烧失量(LOI)为将干

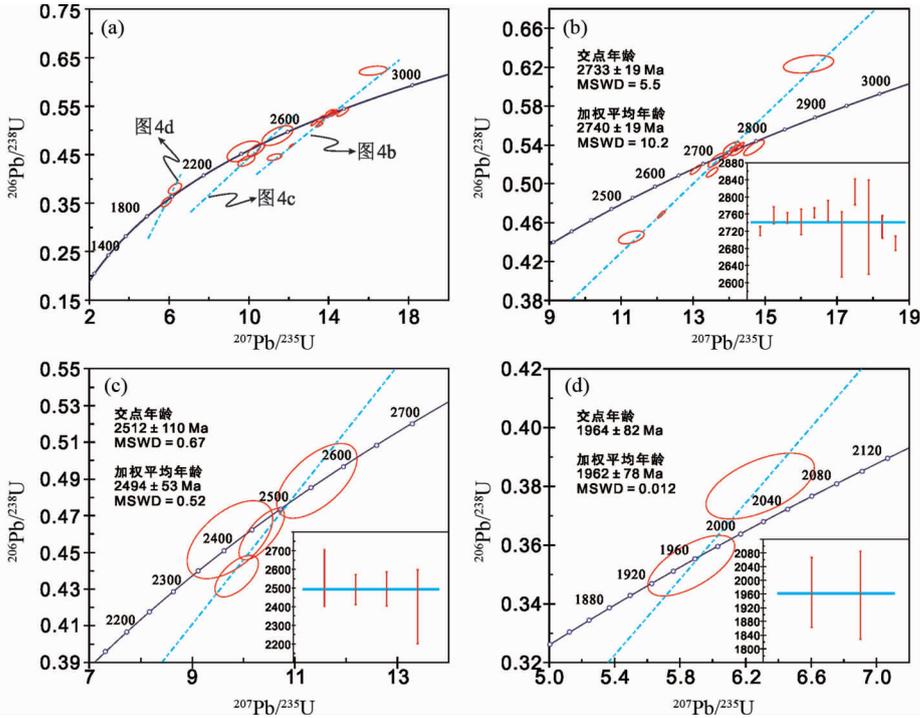


图4 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 4 Concordia plots of U-Pb zircon data for zircons from the Neoproterozoic gneiss in the North Altyn Tagh area

燥的样品在 1000℃ 下灼烧 1 小时所损失的重量百分率。分析精度优于 5%。全岩微量元素分析在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室采用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)完成,分析仪器为 Perkin-Elmer Sciex ELAN DRC-e ICP-MS,分析测试过程参见 Qi *et al.* (2000)。样品前处理流程为:准确称取 200 目或以下的样品粉末 50mg 加入特氟龙闷罐中,加入 1mL HF,在电热板上蒸干以赶走 SiO<sub>2</sub>,然后加入 1mL HF 和 0.5mL HNO<sub>3</sub>,加盖并放入不锈钢外套中密封置于烘箱中于 200℃ 下消解 48 小时。取出待冷却后于电热板上蒸干,加入 1mL HNO<sub>3</sub> 蒸干并重复一次。加入 2mL HNO<sub>3</sub> 和 5mL 蒸馏水重新置于烘箱中 130℃ 溶解残渣 8 小时。完成后取出冷却,加入 500ng Rh 内标溶液并转移至 50mL 离心管中待测。测试中采用国际标样 GBPG-1、OU-6 和国家标样 GSR-1 和 GSR-3 进行分析质量控制,分析精度优于 10%。

### 2.3 全岩 Sr-Nd 同位素分析

样品的 Sr-Nd 同位素的化学分离和测试均在天津地质矿产研究所实验室完成。分析流程为:称取 200 目或以下的样品粉末约 100mg 于特氟龙闷罐中,分别加入纯化的 2mL HF、0.3mL HClO<sub>4</sub> 和 1mL HNO<sub>3</sub> 于 120℃ 熔样一周,蒸干,加入 6mL 6N HCl 再蒸干,然后加入纯化的 1mL 2.5N HCl 并转移至离心管中静置过夜,离心后取清液置于 Rb-Sr 阳离子交换柱(AG50w × 12)分离出 Sr 和稀土元素,然后将接收的稀土溶液加入到 Sm-Nd 交换柱(P507)中分离 Sm 和 Nd,蒸干

后点样待测。测试仪器为 Thermo Fisher 公司生产的 Triton 型的热电离质谱仪(TIMS)。Nd 同位素的质量分馏用 <sup>146</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.7219 进行校正。本次测试中实测的 USGS 标样 BCR-2 的 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 平均值为 0.512641 ± 0.000004 (2σ), <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 平均值为 0.704985 ± 0.000006 (2σ)。

## 3 分析结果

### 3.1 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄

英云闪长片麻岩中的锆石颗粒多数呈自形,长度达 100 ~ 150μm,长宽比为 2 : 1 至 3 : 1(图 3)。多数锆石颗粒呈粉红色、棱柱状,阴极发光显示几乎全部锆石具有清晰的核-边结构。CL 图像显示锆石核部为灰色,且具有典型岩浆锆石的振荡环带;边部白色,为典型的变质增生边。对 15 粒锆石的 19 个点进行 SHRIMP U-Pb 同位素分析,其中核部 13 个点,边部 6 个点(表 1)。这些核部锆石的 U 含量变化较大,为 75 × 10<sup>-6</sup> ~ 1142 × 10<sup>-6</sup>, Th 含量为 77 × 10<sup>-6</sup> ~ 603 × 10<sup>-6</sup>, Th/U 比值为 0.22 ~ 1.06;其中 9 个点的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 和 <sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U 年龄在误差范围内谐和度超过 90%(表 1);另外 4 个点由于 Pb 的丢失或获得分别落在了谐和线的下方和上方(图 4a),这一现象在太古宙 TTG 片麻岩中很常见(Corfu, 2013)。这 13 个点构成了一条不一致线,其交点年龄为 2733 ± 19Ma (MSWD = 5.5),除谐和度最差的 8.1 和 12.1 外,其余 11 个点的 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄的加权平均值为 2740 ± 19Ma (MSWD = 10.2, n = 11,图 4b)。因此, ~ 2750Ma

表 1 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩 (17ALT06) 锆石 SHRIMP U-Pb 年龄结果

Table 1 Zircon SHRIMP U-Pb isotopic analyses for Neoproterozoic TTG gneiss (17ALT06) from the North Altyn Tagh area

Spot No.	$^{206}\text{Pb}_c$		U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ ( $\times 10^{-6}$ )	同位素比值			同位素年龄 (Ma)			Disc. (%)				
	(%)	(%)					$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$	1 $\sigma$ (%)	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$		1 $\sigma$			
1.1	-	619	134	0.22	0.22	249	0.18751	0.30	12.118	0.72	0.4687	0.66	0.909	14	2721	5.0	9
1.1R	-	10	6	0.66	0.66	4.01	0.16960	4.5	11.430	5.6	0.4890	3.4	0.600	72	2554	76	0
2.1	0.33	412	149	0.37	0.37	182	0.19170	0.60	13.530	0.98	0.5117	0.78	0.790	17	2757	10	3
2.2	-	75	77	1.06	1.06	33.6	0.18850	0.80	13.630	1.3	0.5243	1.1	0.802	24	2730	13	0
3.1	0.00	348	100	0.30	0.30	160	0.19098	0.36	14.040	1.2	0.5331	1.1	0.952	25	2751	6.0	0
4.1	-	136	117	0.88	0.88	62.9	0.19000	0.89	14.070	1.3	0.5373	0.89	0.706	20	2742	15	-1
5.1	0.03	380	148	0.40	0.40	176	0.19242	0.36	14.280	0.8	0.5382	0.71	0.895	16	2763	6.0	0
6.1	0.14	187	55	0.30	0.30	86.2	0.19300	0.75	14.220	1.1	0.5343	0.81	0.737	18	2768	12	0
7.1	-	189	65	0.36	0.36	83.6	0.18428	0.49	13.070	0.94	0.5146	0.80	0.852	18	2692	8.0	1
7.1R	-	10	7	0.70	0.70	3.93	0.16350	2.4	10.360	3.5	0.4600	2.5	0.726	51	2492	40	2
8.1	0.06	718	603	0.87	0.87	187	0.12400	1.7	5.1800	2.4	0.3030	1.7	0.721	26	2014	30	15
9.1	0.04	101	61	0.63	0.63	46.4	0.19830	0.92	14.690	1.6	0.5372	1.2	0.805	28	2812	15	1
10.1	-	231	49	0.22	0.22	88.1	0.18400	2.3	11.280	2.6	0.4448	1.2	0.477	25	2689	38	12
10.1R	0.95	15	20	1.32	1.32	5.87	0.16380	2.8	9.8700	3.5	0.4371	2.1	0.612	42	2496	46	6
11.1	0.00	231	57	0.26	0.26	124	0.18860	3.3	16.210	3.5	0.6233	1.2	0.331	29	2730	55	-14
12.1	0.12	1142	295	0.27	0.27	352	0.15250	5.6	7.5400	5.7	0.3586	1.0	0.179	17	2374	95	17
13.1R	-	8	6	0.79	0.79	3.14	0.15470	5.8	9.7400	7.0	0.4570	3.8	0.546	77	2399	99	-1
14.1R	0.31	13	12	0.90	0.90	4.04	0.12060	2.8	5.8700	3.7	0.3530	2.4	0.646	40	1965	51	1
15.1R	1.13	15	11	0.78	0.78	4.94	0.12000	3.6	6.2900	4.3	0.3801	2.4	0.554	42	1956	64	-6

注: R-变质增生边;  $^{206}\text{Pb}_c$  表示  $^{206}\text{Pb}$  中普通  $^{206}\text{Pb}$  的比例; \* 表示放射性成因  $\text{Pb}$ ; 单点年龄误差为  $1\sigma$ ; Disc. (%) =  $(1 - (^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄}) / (^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \text{ 年龄})) \times 100$ . 测点序号; 小数点左边表示分析锆石的颗粒顺序, 右边表示同一颗锆石上的点号



表 2 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩主量元素 (wt%) 与微量元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 地球化学数据Table 2 Major (wt%) and trace ( $\times 10^{-6}$ ) elements of the Neoproterozoic TTG gneisses from the North Altyn Tagh area

Sample No.	16AB06H1	16AB06H2	16AB06H3	17ALTO1B	17ALTO6B
SiO <sub>2</sub>	66.92	66.91	65.12	66.99	62.96
TiO <sub>2</sub>	0.42	0.47	0.46	0.44	0.55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.30	15.49	15.71	14.82	15.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup>	3.78	3.97	4.26	4.43	5.69
MnO	0.04	0.06	0.05	0.05	0.07
MgO	1.50	1.46	1.85	1.33	3.08
CaO	3.62	3.87	4.03	3.20	2.97
Na <sub>2</sub> O	4.14	4.40	4.25	3.99	4.25
K <sub>2</sub> O	2.24	1.78	2.37	2.88	1.18
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.16	0.14	0.23	0.15	0.14
LOI	1.27	0.96	1.20	0.70	3.28
Total	99.39	99.51	99.53	98.98	99.41
Mg <sup>#</sup>	44	42	46	37	52
Sc	8.71	12.4	10.6	7.40	9.66
V	67.2	69.0	75.7	66.1	93.4
Cr	21.1	11.6	39.0	18.3	39.0
Co	256	280	199	204	79.0
Ni	25.8	22.9	33.4	22.5	30.3
Ga	22.9	23.9	20.4	20.0	19.0
Rb	65.8	39.3	56.2	82.1	32.5
Sr	581	554	529	764	469
Y	7.65	13.5	12.6	12.4	4.72
Zr	150	106	145	194	64.3
Nb	3.01	5.79	4.37	5.00	3.60
Cs	0.169	0.120	0.118	0.223	0.316
Ba	1020	656	1060	1710	602
La	36.5	42.1	36.5	69.6	22.5
Ce	68.2	81.8	75.9	123	39.3
Pr	7.12	8.67	8.69	14.9	3.95
Nd	25.7	31.0	32.9	47.3	13.4
Sm	3.54	4.95	5.40	6.32	1.74
Eu	1.02	1.09	1.24	1.30	0.911
Gd	2.81	3.79	4.36	3.68	1.46
Tb	0.300	0.491	0.524	0.543	0.184
Dy	1.27	2.19	2.48	2.42	0.831
Ho	0.233	0.407	0.431	0.441	0.176
Er	0.658	1.08	1.33	1.15	0.427
Tm	0.0780	0.154	0.168	0.145	0.0697
Yb	0.503	0.903	0.989	0.950	0.369
Lu	0.0621	0.129	0.126	0.146	0.0633
Hf	3.49	2.51	3.92	4.58	1.41
Ta	0.643	0.969	0.688	0.985	0.360
Th	4.30	9.72	1.10	10.1	0.751
U	0.234	0.332	0.257	0.419	0.564

表 3 阿尔金北缘地区新太古代 TTG 片麻岩 Sr-Nd 同位素组成

Table 3 Sr-Nd isotopic compositions of the Neoproterozoic TTG gneisses in the North Altyn Tagh area

样品号	16AB06H1	16AB06H2
Rb ( $\times 10^{-6}$ )	65.8	39.3
Sr ( $\times 10^{-6}$ )	581	554
Sm ( $\times 10^{-6}$ )	3.54	4.95
Nd ( $\times 10^{-6}$ )	25.7	31.0
Age (Ma)	2740	2740
<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	0.3280	0.2054
<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	0.0832	0.0965
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.718598	0.714104
2 $\sigma$	0.000007	0.000005
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.510768	0.510837
2 $\sigma$	0.000003	0.000005
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr(t)	0.705583	0.705956
<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd(t)	0.509260	0.509088
<i>t</i> <sub>DM1</sub> (Ga)	2.77	2.99
<i>t</i> <sub>DM2</sub> (Ga)	3.70	3.62
$\epsilon_{Nd}(0)$	-36.5	-35.1
$\epsilon_{Nd}(t)$	3.6	0.2

注: 球粒陨石均一储库 (CHUR) 值为 <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd = 0.1967, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd = 0.512638,  $\lambda_{Sm} = 6.54 \times 10^{-12} \text{y}^{-1}$  (Lugmair and Marti, 1978).

这些岩石的 (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>i</sub>,  $\epsilon_{Nd}(t)$  根据表中年龄进行计算. 单阶段模式年龄 (*t*<sub>DM1</sub>) 和两阶段模式年龄 (*t*<sub>DM2</sub>) 计算参考 Jahn *et al.* (1999)

$10^{-6} \sim 13.5 \times 10^{-6}$ ) 和 Yb ( $0.369 \times 10^{-6} \sim 0.989 \times 10^{-6}$ ) 含量, Sr/Y 比值为 41.03 ~ 99.36, 与现今的埃达克岩的特点非常相似 (Kay, 1978; Defant and Drummond, 1990; Martin *et al.*, 2005)。在原始地幔标准化的微量元素蛛网图上, 它们显示出强烈的 Nb-Ta 亏损和 Ti 负异常的特征 (图 6b)。

### 3.3 全岩 Sr-Nd 同位素组成

上述 TTG 片麻岩样品的 Rb/Sr 比值为 0.11 和 0.07, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值变化较大 (0.718598 和 0.714104), 对应的初始 <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr 比值为 0.705583 和 0.705956 (表 3)。它们的 <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd 比值变化较小 (0.510768 和 0.510837), 对应的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值分别为 3.6 和 0.2 (图 7), 两阶段亏损地幔的 Nd 模式年龄 (*t*<sub>DM2</sub>) 为 3.70 ~ 3.62 Ga (表 3)。

## 4 讨论

### 4.1 阿尔金北缘 TTG 片麻岩岩石成因

TTG 或 TTG 岩套是由英云闪长岩 (Tonalite)、奥长花岗岩 (Trondhjemite) 和花岗闪长岩 (Granodiorite) 三种岩石形成

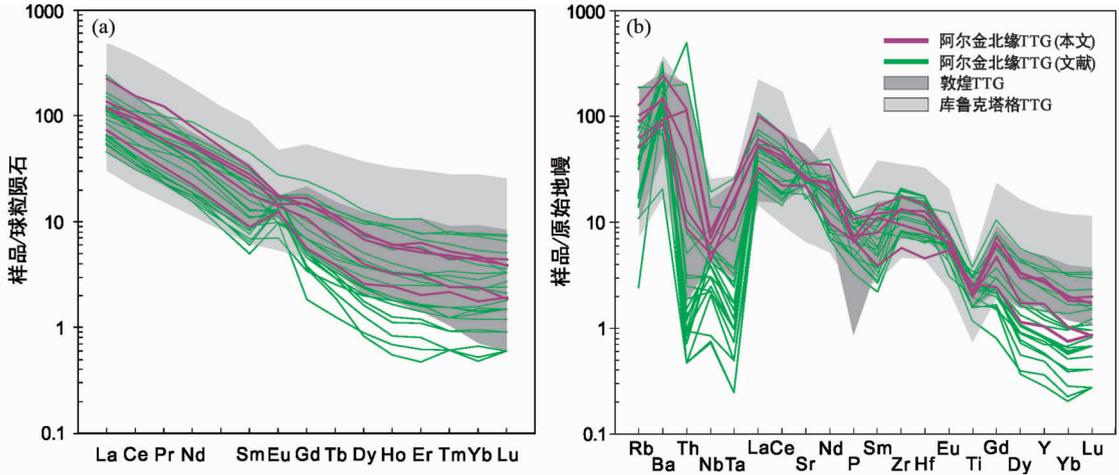


图6 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩球粒陨石标准化稀土元素模式图(a, 标准化值据 Boynton, 1984)和原始地幔标准化的微量元素蛛网图(b, 标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns (a, normalization values after Boynton, 1984) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b, normalization values after Sun and McDonough, 1989) for the Neoproterozoic TTG gneisses in the North Altyn Tagh area

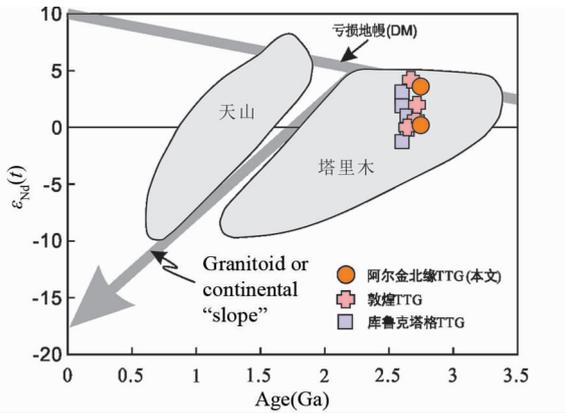


图7 岩石结晶年龄与  $\epsilon_{Nd}(t)$  图解(底图据 Hu *et al.*, 2000 修改)

敦煌地区 TTG 数据来源于梅华林等 (1998) 和 Zong *et al.* (2013); 库鲁克塔格 TTG 数据来源于 Zhang *et al.* (2012a)

Fig. 7 Crystallization ages vs.  $\epsilon_{Nd}(t)$  diagram (modified after Hu *et al.*, 2000)

Data for Dunhuang TTG from Mei *et al.* (1998) and Zong *et al.* (2013); data for Kuluketage TTG from Zhang *et al.* (2012a)

的岩石组合(Martin and Arndt, 2015),其为了解地球早期大陆地壳演化和板块构造提供非常重要的信息(Condie, 2005)。前人基于  $Al_2O_3$  的含量,将 TTG 岩石分为高铝和低铝两种类型(Barker and Arth, 1976; Barker *et al.*, 1976; Barker, 1979; Halla *et al.*, 2009)。根据这一分类,全球大多数太古宙 TTG 岩石都属于高铝类型(万渝生等, 2017)。因此,也有学者根据岩浆起源的深度,将 TTG 岩石进一步划分为低压、中压和高压 TTG,对应的压力条件分别为小于 10kbar、10~25kbar 和大于 25kbar (Moyen, 2011)。一般来

说,高压 TTG 岩石的化学成分具有更高的  $Na_2O$  含量 (>5%) 和 Sr/Y 比值 (50~500) 以及更重的重稀土含量 ( $Yb < 1 \times 10^{-6}$ ),岩石类型通常为奥长花岗岩;而中-低压 TTG 岩石相对贫硅 (65%~72%)、低钠 (4%~6%) 和较高的重稀土含量 ( $Yb < 1.5 \times 10^{-6}$ ), Sr/Y 比值 (10~200),岩石类型通常为英云闪长岩和花岗闪长岩 (Moyen and Martin, 2012)。高压 TTG 的形成通常认为与板片俯冲有关,而中-低压 TTG 则可能与下地壳的部分熔融有关 (Moyen, 2011)。根据地球化学特征和岩石类型,可将阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩划分为中-低压 TTG 类型。

尽管 TTG 岩石是由含水的基性岩石部分熔融形成的这一观点已基本达成共识 (Arth and Hanson, 1972; Martin, 1987; Drummond and Defant, 1990; Atherton and Petford, 1993; Rapp and Watson, 1995; Winther, 1996; Foley *et al.*, 2002; Rapp *et al.*, 2003; Nair and Chacko, 2008; Moyen and Martin, 2012; Martin and Arndt, 2015),但其形成的构造背景却一直存在争议 (Moyen and Martin, 2012)。这主要是因为高压条件下含水的基性岩部分熔融都有可能产生具有类似 TTG 特征的岩浆,这样的构造环境甚至包含洋底高原 (Willbold *et al.*, 2009) 和洋中脊 (Rollinson, 2009)。鉴于太古宙发育大量的 TTG 岩石,俯冲带和板内构造背景被认为是最合理的解释 (Moyen and Martin, 2012)。俯冲带模式下,TTG 岩石由俯冲洋壳部分熔融形成。这些熔体与上覆地幔楔发生反应导致 TTG 岩石具有高  $MgO$  ( $Mg^{\#}$ )、Cr 和 Ni 含量 (Martin, 1999; Martin *et al.*, 2005; Martin and Moyen, 2002; Smithies *et al.*, 2009; Moyen, 2009)。而在板内模式下,由于 TTG 岩石是基性下地壳部分熔融形成,因此它们的  $MgO$ 、 $Mg^{\#}$ 、Cr 和 Ni 含量均相对较低 (Atherton and Petford, 1993; Rapp *et al.*, 1999; Rapp and Watson, 1995)。结合前人的研

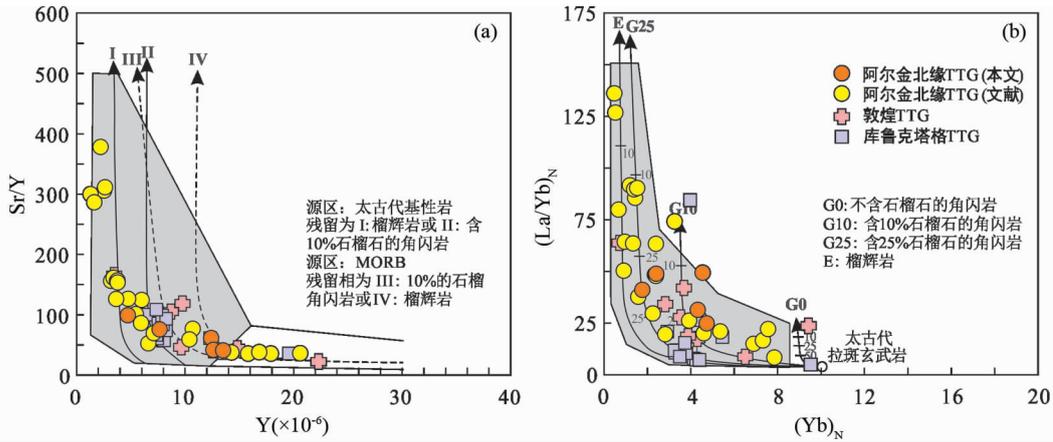


图8 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩 Sr/Y-Y 图解 (a) 和  $(La/Yb)_N$ - $Yb_N$  图解 (b) (据 Moyen and Martin, 2012 修改; 熔融曲线来自 Drummond and Defant, 1990)

Fig. 8 Y vs. Sr/Y diagram (a) and  $Yb_N$  vs.  $(La/Yb)_N$  diagram (b) (modified after Moyen and Martin, 2012; melting curves from Drummond and Defant, 1990) for the Neoproterozoic TTG gneisses in the North Altyn Tagh area

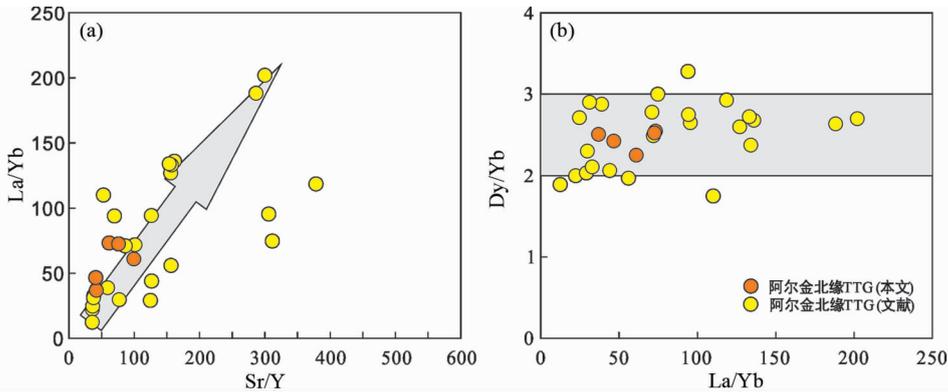


图9 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩 Sr/Y-La/Yb 图解 (a) 和  $Dy/Yb$ -La/Yb 图解 (b)

阿尔金北缘文献数据来源于 Long *et al.* (2014) 和 Zhang *et al.* (2014)

Fig. 9 Plots of La/Yb vs. Sr/Y diagram (a) and La/Yb vs. Dy/Yb diagram for the Neoproterozoic TTG gneisses in the North Altyn Tagh area

Data for North Altyn Tagh TTG from Long *et al.* (2014) and Zhang *et al.* (2014)

究数据 (Long *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2014), 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩显示较高的 Sr/Y 和  $(La/Yb)_N$  比值 (图 8a, b), MgO 和  $Mg^\#$  变化较大, 分别为 0.65% ~ 3.50% (平均值 1.79%) 和 26 ~ 60 (平均值 44), 大部分样品点落在下地壳部分熔融区域 (图 5c)。较低的 Cr 含量 ( $1.19 \times 10^{-6}$  ~  $59.4 \times 10^{-6}$ , 平均值  $25.7 \times 10^{-6}$ ) 和 Ni 含量 ( $1.14 \times 10^{-6}$  ~  $37.0 \times 10^{-6}$ , 平均值  $17.3 \times 10^{-6}$ ) 同样暗示了熔体没有与地幔楔参与反应。此外, 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩的 Nd 同位素和锆石 Hf 同位素两阶段模式年龄均为 3.6 ~ 3.1Ga, 与岩石的结晶年龄相差 0.9 ~ 0.4Ga。表明阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩并非来自与俯冲熔体相关的新生地壳。所以, 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩来源于古太古代基性下地壳部分熔融。阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩属于中-低压 TTG 同样证实了这一观点。

大部分 TTG 岩石都具有高 Sr、低 Y 和 Yb 的特点, 在稀土元素配分图上无明显 Eu 异常或 Eu 正异常。这些特点都指示了 TTG 岩浆的熔融深度位于斜长石的稳定区或斜长石的堆晶。阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩中部分样品显示微弱的负异常, 显示有少量斜长石的分离结晶。而高  $(La/Yb)_N$  比值和低  $Yb_N$  比值都暗示源区有石榴石或 (和) 角闪石的残留 (Martin *et al.*, 2005)。由于不同元素在同一矿物中的分配系数不同, 因此 TTG 岩石中一些特定的元素比值 (如 Nb/Ta、Zr/Hf、Zr/Sm 等) 可以示踪岩浆源区的成分 (Foley *et al.*, 2002; Klemme *et al.*, 2002; Xiong *et al.*, 2005; 熊小林等, 2007)。比如稀土元素在角闪石中的分配系数大小关系为 MREE > HREE > LREE (Bottazzi *et al.*, 1999), 因此, 源区角闪石的残留会导致熔体中 La/Yb 的比值升高, 而 Gd/Dy 和 Dy/Yb 比值降低。石榴石的残留不仅会

导致 Sr/Y、La/Yb 比值的升高,还会造成 Gd/Yb 和 Dy/Yb 比值的增加 (Davidson *et al.*, 2007)。阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩的 Sr/Y 比值和 La/Yb 比值显示明显的正相关关系 (图 9a), 指示了源区石榴石的存在; 而在 Dy/Yb 和 La/Yb 图中, 二者却没有明显的线性关系, 并且大多数岩石的 Dy/Yb 比值都介于 2~3 之间 (图 9b), 暗示了熔体除受到石榴石控制外, 还受到角闪石的作用。所以, 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩的岩浆源区有石榴石和角闪石的残留。此外, 样品还显示强烈的 Nb-Ta 负异常, 而 Zr-Hf 却显示明显的正异常 (图 6b), 指示了源区可能还存在金红石。

综上所述, 阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩岩浆来源于古太古代基性下地壳, 并且在源区有石榴石、角闪石和金红石的残留。估计其熔融压力超过 1.5 GPa, 深度超过 45 km (Rapp *et al.*, 1991; 熊小林等, 2007)。

#### 4.2 TTG 岩浆活动与变质事件

通过对锆石核部具有振荡环带的锆石进行精确的 SHRIMP U-Pb 定年获得其  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄的加权平均值为  $2740 \pm 19\text{Ma}$  (图 4b), 表明该 TTG 片麻岩的形成年龄为 2.74 Ga, 与前人在阿尔金北缘东段阿克塔什塔格地区获得的 TTG 片麻岩的年龄 (2.60~2.74 Ga, 平均值 ~2.70 Ga) 一致 (陆松年和袁桂邦, 2003; Long *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014)。

新太古代 TTG 片麻岩在塔里木克拉通广泛分布, 库鲁克塔格辛格尔地区和兴地地区的 TTG 片麻岩年代学显示其形成时代为 2.46~2.64 Ga (平均值 ~2.57 Ga, 胡嵩琴和韦刚健, 2006; Long *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2012b)。敦煌地区的 TTG 片麻岩主要分布在石包城、红柳峡、水峡口和东巴兔一带, 年龄为 2.50~2.71 Ga (平均值 ~2.59 Ga, 赵燕等, 2013; 梅华林等, 1998; Zhang *et al.*, 2013b; Zhao *et al.*, 2015; Zong *et al.*, 2013)。因此, 敦煌地区的 TTG 片麻岩的形成时代与库鲁克塔格地区的基本一致, 而比阿尔金北缘地区的晚 100~300 Myr。

阿尔金北缘 TTG 片麻岩除了其结晶年龄, 还记录了两期变质事件的形成时代, 分别为 ~2.5 Ga 和 ~1.96 Ga (图 4c, d)。目前, 对阿尔金北缘 ~2.5 Ga 变质事件的认识还非常有限, 前人在对 TTG 片麻岩进行定年时, 也发现了少量 ~2.5 Ga 的锆石 (辛后田等, 2013; Long *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014), 这些锆石在形态上和 CL 图像上与 ~2.7 Ga 的锆石并没有太大差别, 以至于有学者将其解释为 TTG 片麻岩的形成年龄。除此之外, 前人还对侵入 TTG 片麻岩中的片麻状花岗岩进行了详细的锆石 U-Pb 定年工作, 发现它的形成时代也是 ~2.5 Ga, 并将其解释为 ~2.7 Ga TTG 片麻岩部分熔融形成的浅色体 (新成体) (Zhang *et al.*, 2014)。同时, ~2.5 Ga 锆石的  $\varepsilon_{\text{Hf}}$  (~2.7 Ga) 与 TTG 片麻岩中 ~2.7 Ga 的  $\varepsilon_{\text{Hf}}$  (t) 相近也证实了混合岩化作用的存在。因此, 阿尔金北缘 ~2.5 Ga 的变质事件可能代表了 ~2.7 Ga TTG 片麻岩的混

合岩化作用 (深熔作用)。阿尔金北缘太古代岩中 (包括 TTG 和花岗片麻岩) 广泛发育 ~1.96 Ga 的锆石变质增生边 (辛后田等, 2013; Long *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014), 且这一事件被解释为与 Columbia 超大陆的聚合有关 (Zhang *et al.*, 2014)。虽然前人对片麻岩中的麻粒岩进行了报道, 但并没有年代学数据 (辛后田等, 2013)。近年来, Wu *et al.* (2019) 在阿克塔什塔格地区首次报道了二辉石麻粒岩的形成时代为 ~1.97 Ga, 建立了顺时针 *P-T* 轨迹, 证实了阿克塔什塔格地区存在古元古代碰撞造山带, 并认为该造山事件可能与 Columbia 超大陆聚合有关。而且对石榴角闪岩和泥质片麻岩的研究也得出了相同的结果 (Zhang *et al.*, 2019)。因此, 很显然该地区的 TTG 片麻岩也同样记录了这一期变质事件。

前人的研究表明敦煌地区和库鲁克塔格地区的 TTG 片麻岩不仅具有相似的形成时代, 而且它们记录的变质事件也相近。敦煌地区 TTG 片麻岩锆石变质增生边的 U-Pb 年龄为变化较大 (1856~2003 Ma), 主要集中在 1.85 Ga 左右 (Zhang *et al.*, 2013b; Zong *et al.*, 2013)。这一年龄与区域内高压麻粒岩的锆石年龄一致, 顺时针 *P-T* 轨迹揭示了敦煌地区 ~1.85 Ga 的碰撞造山事件 (Zhang *et al.*, 2012a)。前人推测这一事件可能与 Columbia 超大陆聚合有关, 且认为敦煌地块是华北克拉通的一部分 (Zhang *et al.*, 2012a; Zhao *et al.*, 2015)。库鲁克塔格地区的 TTG 片麻岩同样记录了 ~1.85 Ga 变质事件 (Zhang *et al.*, 2012a), 但目前还没有同时代的高压变质岩报道。

总之, 阿尔金北缘 TTG 片麻岩与敦煌-库鲁克塔格 TTG 片麻岩的形成时代略有不同, 并且它们记录的变质事件也有所差异。

#### 4.3 塔里木克拉通前寒武纪基底组成

塔里木一直被认为是具有统一前寒武纪基底的克拉通 (辛后田等, 2013)。然而, 越来越多的年代学及岩石学证据都显示塔里木克拉通早前寒武纪基底可能是由两个或多个独立的块体组成 (Xu *et al.*, 2013, Yang *et al.*, 2018; Ye *et al.*, 2016; Zhang *et al.*, 2014)。本文通过对阿尔金北缘新太古代 TTG 片麻岩详细的年代学和系统的岩石学研究, 结合前人的研究成果显示阿尔金北缘地区的太古代基底与敦煌-库鲁克塔格地区的基底并不相同。首先, 大量的年代学资料表明阿尔金北缘地区的大量基底岩石的形成时间比敦煌-库鲁克塔格地区的早 100~300 Myr; 其次阿北地块的 TTG 片麻岩经历了两期变质事件 (~2.5 Ga 混合岩化作用和 ~1.96 Ga 麻粒岩相变质作用), 而敦煌-库鲁克塔格地区只识别出了一期早前寒武纪变质事件 (~1.85 Ga), 并且它们的时间相差 ~100 Myr; 最后, 阿尔金北缘地区 TTG 片麻岩的 Hf 两阶段模式年龄显示其地壳生长发生峰期发生在 ~3.3 Ga, 而敦煌为 ~2.8 Ga、~2.9 Ga 和 ~3.4 Ga (Zhang *et al.*, 2013b; Zong *et al.*, 2013), 库鲁克塔格为 ~2.6 Ga 和 3.2 Ga (Long *et al.*, 2010)。与阿尔金北缘地区和敦煌-库鲁克塔格地区不同, 迄

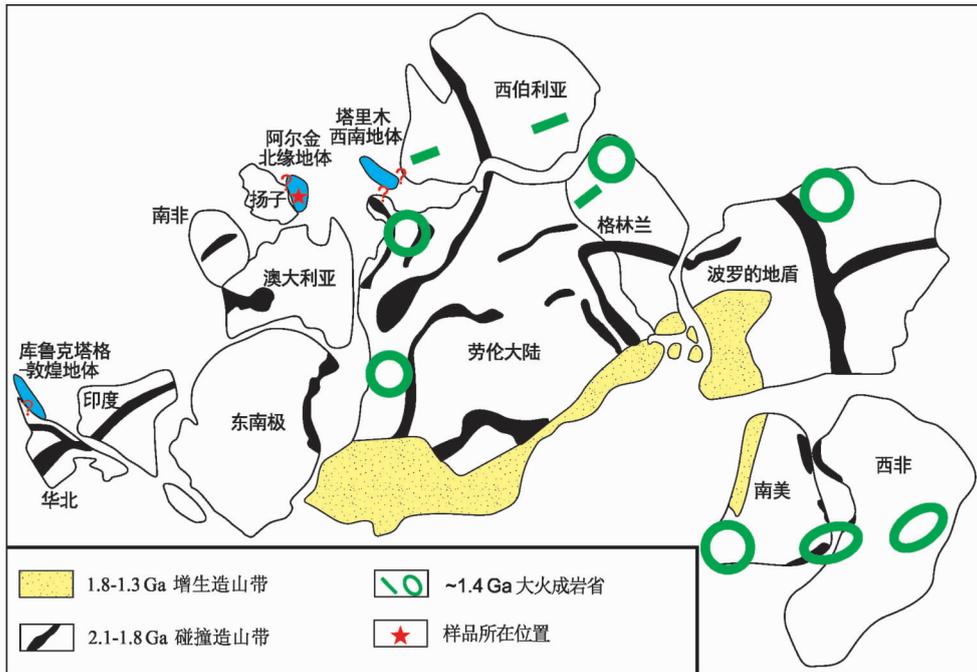


图 10 阿尔金北缘地体、库鲁克塔格-敦煌地体以及塔里木西南地体在 Columbia 超大陆中的位置(据 Zhao *et al.*, 2002; Ye *et al.*, 2016 修改)

Fig. 10 Possible positions of the North Altyn terrane, Kuluketage-Dunhuang terrane and Southwest Tarim terrane in the Columbia supercontinent (modified after Zhao *et al.*, 2002; Ye *et al.*, 2016)

今为止塔里木西南地区未发现可靠的太古宙 TTG 基底。该区最古老的岩系为赫罗斯坦杂岩,其形成时代为 2.41 ~ 2.34Ga,并清楚记录了 ~1.90Ga 变质事件(Zhang *et al.*, 2014; Ye *et al.*, 2016)。这些证据都表明阿尔金北缘地区前寒武纪基底与敦煌-库鲁克塔格地区以及塔里木西南地区具有显著的区别,它们可能来源于不同的大陆块体。

基于全球广泛分布的 2.1 ~ 1.8Ga 的碰撞造山带,前人对 Columbia 超大陆进行了复原和重建(如: Zhao *et al.*, 2002; Rogers and Santosh, 2002)。这些造山带主要包括南美和西非陆块之间的 Transamazonian 和 Eburnean 造山带(2.1 ~ 1.8Ga, Alkmim and Marshak, 1998);北美的 Trans-Hudson 造山带(1.95 ~ 1.85Ga, Hoffman, 1989);南非的 Limpopo 碰撞带(2.0 ~ 1.9Ga, Kröner *et al.*, 1999);澳大利亚西部的 Capricorn 碰撞带(2.0 ~ 1.9Ga, Myers, 1990);格陵兰的 Nagssugtoqidian 造山带(1.9 ~ 1.8Ga, Kalsbeek, 2001);西伯利亚的 Akitkan 造山带(1.9 ~ 1.8Ga, Rosen *et al.*, 2005)和中国的华北中部造山带(1.85Ga, Zhao *et al.*, 2001)等。根据塔里木不同地区变质事件的时代可以推测阿尔金北缘地体、库鲁克塔格-敦煌地体和塔里木西南地体分别与扬子和澳大利亚克拉通、华北克拉通以及西伯利亚和劳伦克拉通具有亲缘性(图 10, Zhang *et al.*, 2014; Ye *et al.*, 2016)。然而,它们在 Columbia 超大陆的具体位置还需要更多地质学和地球物理学证据。这些块体随后经历了复杂的构造事件,最终于新元古代拼贴在一起,形成统一的塔里木克拉通(叶现

韬和张传林, 2020)。

## 5 结论

(1) 阿尔金北缘 TTG 片麻岩的形成时代为 ~2.74Ga, 并遭受了两期不同程度的变质事件: ~2.5Ga 混合岩化作用和 ~1.96Ga 麻粒岩相变质作用。

(2) 阿尔金北缘 TTG 片麻岩来源于古太古代基性下地壳, 并且在源区残留有石榴石、角闪石和金红石, 估计其熔融深度超过 45km。

(3) 阿尔金北缘地区前寒武纪基底与敦煌-塔里木北缘地区具有显著的区别, 它们可能来源于不同的大陆块体。

**致谢** 野外工作得到福建闽西地质大队倪康高级工程师的大力帮助;中国科学院地球化学研究所漆亮研究员和胡静实验师在主微量元素分析上提供了指导和帮助;SHRIMP U-Pb 年代学测试得到北京离子探针中心颀颀强副研究员的大力帮助;同时主编、两位审稿人和俞良军编辑对本文提出了很多有益的意见,对本文质量的提升有非常重要的作用;我们在此一并感谢。

## References

Alkmim FF and Marshak S. 1998. Transamazonian Orogeny in the

- southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, 90(1–2): 29–58
- Arth JG and Hanson GN. 1972. Quartz diorites derived by partial melting of eclogite or amphibolite at mantle depths. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 37(2): 161–174
- Atherton MP and Petford N. 1993. Generation of sodium-rich magmas from newly underplated basaltic crust. *Nature*, 362(6416): 144–146
- Barker F and Arth JG. 1976. Generation of trondhjemitic-tonalitic liquids and Archean bimodal trondhjemite-basalt suites. *Geology*, 4(10): 596–600
- Barker F, Arth JG, Peterman ZE and Friedman I. 1976. The 1.7- to 1.8-b. y. -old trondhjemites of southwestern Colorado and northern New Mexico: Geochemistry and depths of genesis. *GSA Bulletin*, 87(2): 189–198
- Barker F. 1979. *Trondhjemites, Dacites, and Related Rocks*. Amsterdam; Elsevier: 1–659
- Black LP, Kamo SL, Allen CM, Aleinikoff JN, Davis DW, Korsch RJ and Foudoulis C. 2003. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology. *Chemical Geology*, 200(1–2): 155–170
- Bottazzi P, Tiepolo M, Vannucci R, Zanetti A, Brumm R, Foley SF and Oberti R. 1999. Distinct site preferences for heavy and light REE in amphibole and the prediction of  $A_{\text{Amph/L}}D_{\text{REE}}$ . *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 137(1–2): 36–45
- Boynton WV. 1984. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. *Developments in Geochemistry*, 2: 63–114
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province. 1989. *Regional Geology of Gansu Province*. Beijing: Geological Publishing House, 1–705 (in Chinese)
- Condie KC. 1998. Episodic continental growth and supercontinents: A mantle avalanche connection? *Earth and Planetary Science Letters*, 163(1–4): 97–108
- Condie KC. 2005. TTGs and adakites: Are they both slab melts? *Lithos*, 80(1–4): 33–44
- Corfu F. 2013. A century of U-Pb geochronology: The long quest towards concordance. *GSA Bulletin*, 125(1–2): 33–47
- Davidson J, Macpherson C and Turner S. 2007. Amphibole control in the differentiation of arc magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(15): A204
- Defant MJ and Drummond MS. 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347(6294): 662–665
- Drummond MS and Defant MJ. 1990. A model for trondhjemite-tonalite-dacite genesis and crustal growth via slab melting: Archean to modern comparisons. *Journal of Geophysical Research*, 95(B13): 21503–21521
- Foley S, Tiepolo M and Vannucci R. 2002. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 417(6891): 837–840
- Ge RF, Zhu WB, Wilde SA and Wu HL. 2018. Remnants of Eoarchean continental crust derived from a subducted proto-arc. *Science Advances*, 4(2): eaao3159
- Ge RF, Wilde SA, Kemp AIS, Jeon H, Martin LAJ, Zhu WB and Wu HL. 2020. Generation of Eoarchean continental crust from altered mafic rocks derived from a chondritic mantle: The ~3.72Ga Aktash gneisses, Tarim Craton (NW China). *Earth and Planetary Science Letters*, 538: 116225
- Halla J, van Hunen J, Heilimo E and Hölttä P. 2009. Geochemical and numerical constraints on Neoproterozoic plate tectonics. *Precambrian Research*, 174(1–2): 155–162
- Henry P, Stevenson RK, Larbi Y and Gariépy C. 2000. Nd isotopic evidence for Early to Late Archean (3.4–2.7Ga) crustal growth in the western Superior Province (Ontario, Canada). *Tectonophysics*, 322(1–2): 135–151
- Hoffman FP. 1989. Speculations on Laurentia's first gigayear (2.0 to 1.0Ga). *Geology*, 17(2): 135–138
- Hu AQ, Zhang GF, Zhang GX and Chen YB. 1998. Constraints on the age of basement and crustal growth in Tianshan Orogen by Nd isotopic composition. *Science in China (Series D)*, 41(6): 648–657
- Hu AQ, Jahn BM, Zhang GX, Chen YB and Zhang QF. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotopic evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. *Tectonophysics*, 328(1–2): 15–51
- Hu AQ and Wei GJ. 2006. On the age of the Neo-Archean Qingir gray gneisses from the northern Tarim Basin, Xinjiang, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 126–134 (in Chinese with English abstract)
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548
- Jahn BM, Glikson AY, Peucat JJ and Hickman AH. 1981. REE geochemistry and isotopic data of Archean silicic volcanics and granitoids from the Pilbara Block, western Australia: Implications for the early crustal evolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(9): 1633–1652
- Jahn BM, Wu FY, Lo CH and Tsai CH. 1999. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: Geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. *Chemical Geology*, 157(1–2): 119–146
- Kalsbeek F. 2001. Geochemical comparison between Archean and Proterozoic orthogneisses from the Nagssugtoqidian orogen, West Greenland. *Precambrian Research*, 105(2–4): 165–181
- Kay RW. 1978. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean crust. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1–2): 117–132
- Klemme S, Blundy JD and Wood BJ. 2002. Experimental constraints on major and trace element partitioning during partial melting of eclogite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(17): 3109–3123
- Kröner A, Jaeckel P, Brandl G, Nemchin AA and Pidgeon RT. 1999. Single zircon ages for granitoid gneisses in the central zone of the Limpopo belt, southern Africa and geodynamic significance. *Precambrian Research*, 93(4): 299–337
- Le Maitre RW. 1989. *A Classification of Igneous Rocks and Glossary Terms*. Oxford: Scientific Publications, 1–193
- Li HM, Lu SN, Zheng JK, Yu HF, Zhao FQ, Li HK and Zuo YC. 2001. Dating of 3.6Ga zircon in granite-gneiss from the eastern Altn Tagh Mountains and its geological significance. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4): 259–262 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Sun M, Wei GJ, Liu Y, Lee CY and Malpas J. 2000. Geochemical and Sm-Nd isotopic study of amphibolites in the Cathaysia Block, southeastern China: Evidence for an extremely depleted mantle in the Paleoproterozoic. *Precambrian Research*, 102(3–4): 251–262
- Li ZC. 1994. New speculation of the age of the metamorphic rock series of the Dunhuang massif. *Regional Geology of China*, (2): 131–134 (in Chinese with English abstract)
- Liu YS, Yu HF, Xin HT, Lu SN, Xiu QY and Li Q. 2009. Tectonic units division and Precambrian significant geological events in Altn Tagh Mountain, China. *Geological Bulletin of China*, 28(10): 1430–1438 (in Chinese with English abstract)
- Long XP, Yuan C, Sun M, Zhao GC, Xiao WJ, Wang YJ, Yang YH and Hu AQ. 2010. Archean crustal evolution of the northern Tarim craton, NW China: Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints. *Precambrian Research*, 180(3–4): 272–284
- Long XP, Yuan C, Sun M, Kröner A and Zhao GC. 2014. New geochemical and combined zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic data of orthogneisses in the northern Altn Tagh, northern margin of the Tibetan Plateau: Implication for Archean evolution of the Dunhuang Block and crust formation in NW China. *Lithos*, 200–201: 418–431
- Lu SN. 2001. Major Precambrian events in northwestern China.

- Gondwana Research, 4(4): 692
- Lu SN and Yuan GB. 2003. Geochronology of Early Precambrian magmatic activities in Aketashitage, East Altyn Tagh. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 61–68 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Li HK, Zhang CL and Niu GH. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments. *Precambrian Research*, 160(1–2): 94–107
- Ludwig KR. 2001. *Squid 1.02, a user's manual*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 1–19
- Ludwig KR. 2003. *User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley, CA: Berkeley Geochronology Center
- Lugmair GW and Marti K. 1978. Lunar initial  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ : differential evolution of the lunar crust and mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 39(3): 349–357
- Martin H. 1987. Petrogenesis of Archaean trondhjemites, tonalites, and granodiorites from eastern Finland: Major and trace element geochemistry. *Journal of Petrology*, 28(5): 921–953
- Martin H. 1999. Adakitic magmas: Modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46(3): 411–429
- Martin H and Moya JF. 2002. Secular changes in tonalite-trondhjemite-granodiorite composition as markers of the progressive cooling of Earth. *Geology*, 30(4): 319–322
- Martin H, Smithies RH, Rapp R, Moya JF and Champion D. 2005. An overview of adakite, tonalite-trondhjemite-granodiorite (TTG), and sanukitoid: Relationships and some implications for crustal evolution. *Lithos*, 79(1–2): 1–24
- Martin H and Arndt N. 2015. *Tonalite-Trondhjemite-Granodiorite*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2525–2530
- Mei HL, Yu HF, Li Q and Zuo GC. 1997. Preliminary litho-tectonic framework of early Precambrian rocks in Dunhuang-Beishan area, Gansu, West China. *Progress in Precambrian Research*, 20(4): 47–54 (in Chinese with English abstract)
- Mei HL, Yu HF, Lu SN, Li HM, Li Q, Lin YX and Zuo YC. 1998. Archaean tonalite in the Dunhuang, Gansu Province: Age from the U-Pb single zircon and Nd isotope. *Progress in Precambrian Research*, 21(2): 41–45 (in Chinese with English abstract)
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3–4): 215–224
- Moya JF. 2009. High Sr/Y and La/Yb ratios: The meaning of the “adakitic signature”. *Lithos*, 112(3–4): 556–574
- Moya JF. 2011. The composite Archaean grey gneisses: Petrological significance, and evidence for a non-unique tectonic setting for Archaean crustal growth. *Lithos*, 123(1–4): 21–36
- Moya JF and Martin H. 2012. Forty years of TTG research. *Lithos*, 148: 312–336
- Myers JS. 1990. Precambrian tectonic evolution of part of Gondwana, southwestern Australia. *Geology*, 18(6): 537–40
- Myers JS, Shaw RD and Tyler IM. 1996. Tectonic evolution of Proterozoic Australia. *Tectonics*, 15(6): 1431–1446
- Nair R and Chacko T. 2008. Role of oceanic plateaus in the initiation of subduction and origin of continental crust. *Geology*, 36(7): 583–586
- Nasdala L, Hofmeister W, Norberg N, Martinson JM, Corfu F, Dörr W, Kamo SL, Kennedy AK, Kronz A, Reiners PW, Frei D, Kosler J, Wan YS, Götz J, Häger T, Kröner A and Valley JW. 2008. Zircon M257: A homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 32(3): 247–265
- O'Connor JT. 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. *US Geological Survey*, 79–84
- Polat A, Frei R, Appel PWU, Dilek Y, Fryer B, Ordóñez-Calderón JC and Yang Z. 2008. The origin and compositions of Mesoarchean oceanic crust: Evidence from the 3075 Ma Ivisartog greenstone belt, SW Greenland. *Lithos*, 100(1–4): 293–321
- Qi L, Hu J and Gregoire DC. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51(3): 507–513
- Rapp RP, Watson EB and Miller CF. 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archaean trondhjemites and tonalites. *Precambrian Research*, 51(1–4): 1–25
- Rapp RP and Watson EB. 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8–32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891–931
- Rapp RP, Shimizu N, Norman MD and Applegate GS. 1999. Reaction between slab-derived melts and peridotite in the mantle wedge: Experimental constraints at 3.8 GPa. *Chemical Geology*, 160(4): 335–56
- Rapp RP, Shimizu N and Norman MD. 2003. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite. *Nature*, 425(6958): 605–609
- Rogers JJW and Santosh M. 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research*, 5(1): 5–22
- Rollinson H. 2009. New models for the genesis of plagiogranites in the Oman ophiolite. *Lithos*, 112(3–4): 603–614
- Rosen OM, Manakov AV and Serenko VP. 2005. Paleoproterozoic collisional system and diamondiferous lithospheric keel of the Yakutian kimberlite province. *Geologiya i Geofizika*, 46(12): 1259–1272
- Samsonov AV, Bogina MM, Bibikova EV, Petrova AY and Shchipansky AA. 2005. The relationship between adakitic, calc-alkaline volcanic rocks and TTGs: Implications for the tectonic setting of the Karelian greenstone belts, Baltic Shield. *Lithos*, 79(1–2): 83–106
- Sandeman HA, Hammer S, Tella S, Armitage AA, Davis WJ and Ryan JJ. 2006. Petrogenesis of Neoarchean volcanic rocks of the MacQuoid supracrustal belt: A back-arc setting for the northwestern Hearne subdomain, western Churchill Province, Canada. *Precambrian Research*, 144(1–2): 140–165
- Smithies RH, Champion DC and van Kranendonk MJ. 2009. Formation of Paleoproterozoic continental crust through infracrustal melting of enriched basalt. *Earth and Planetary Science Letters*, 281(3–4): 298–306
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publication, 42(1): 313–345
- Wan YS, Dong CY, Ren P, Bai WQ, Xie HQ, Liu SJ, Xie SW and Liu DY. 2017. Spatial and temporal distribution, compositional characteristics and formation and evolution of Archaean TTG rocks in the North China Craton: A synthesis. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1405–1419 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZM, Xiao WJ, Han CM, Ao SJ and Wang LJ. 2013. Metamorphism, zircon U-Pb dating and tectonic implications of garnet amphibolites from Hongliuxia, Dunhuang, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1685–1697 (in Chinese with English abstract)
- Wang ZM, Han CM, Xiao WJ, Wan B, Sakya PA, Ao SJ, Zhang JE and Song DF. 2014. Petrology and geochronology of Paleoproterozoic garnet-bearing amphibolites from the Dunhuang Block, eastern Tarim Craton. *Precambrian Research*, 255: 163–180
- Willbold M, Hegner E, Stracke A and Rocholl A. 2009. Continental geochemical signatures in dacites from Iceland and implications for models of Early Archaean crust formation. *Earth and Planetary Science Letters*, 279(1–2): 44–52
- Williams IS. 1998. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben MA, Shanks WC III and Ridley WI (eds.). *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. Littleton, CO: Society of Economic Geologists, 1–35
- Winther KT. 1996. An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts. *Chemical Geology*, 127(1–3): 43–59
- Wu HL, Zhu WB and Ge RF. 2019. Late Paleoproterozoic granulite-facies metamorphism in the North Altyn Tagh area, southeastern Tarim craton: Pressure-temperature paths, zircon U-Pb ages, and

- tectonic implications. *GSA Bulletin*, 131(9–10): 1591–1606
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15): 1554–1569
- Xin HT, Zhao FQ, Luo ZH, Liu YS, Wan YS and Wang SQ. 2011. Determination of the Paleoproterozoic geochronological framework in Aqtashtagh area in southeastern Tarim, China, and its geological significance. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 1977–1993 (in Chinese with English abstract)
- Xin HT, Luo ZH, Liu YS, Wang SQ and Zhang LZ. 2012. Geological features and significance of Palaeoproterozoic carbonatite of crustal origin in Aqtashtagh area of Southeast Tarim Basin, China. *Earth Science Frontiers*, 19(6): 167–178 (in Chinese with English abstract)
- Xin HT, Liu YS, Luo ZH, Song SC and Wang SQ. 2013. The growth of Archean continental crust in Aqtashtagh area of Southeast Tarim, China; Constraints from petrochemistry and chronology about Milan Group and TTG-gneiss. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 240–259 (in Chinese with English abstract)
- Xiong FH, Ma CQ, Zhang JY, Liu B and Jiang HA. 2014. Reworking of old continental lithosphere: An important crustal evolution mechanism in orogenic belts, as evidenced by Triassic I-type granitoids in the East Kunlun orogen, Northern Tibetan Plateau. *Journal of the Geological Society*, 171(6): 847–863
- Xiong XL, Adam J and Green TH. 2005. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis. *Chemical Geology*, 218(3–4): 339–359
- Xiong XL, Han JW and Wu JH. 2007. Phase equilibrium and trace element partitioning between minerals and melt in the metabasalt system: Constraints on the formation conditions of TTG/adakite magmas and the growth of early continental crust. *Earth Science Frontiers*, 14(2): 149–158 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Zhang JX, Jiang M, Li HB and Cui JW. 1999. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica*, 73(3): 193–205 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, He BZ, Zhang CL, Zhang JX, Wang ZM and Cai ZH. 2013. Tectonic framework and crustal evolution of the Precambrian basement of the Tarim Block in NW China: New geochronological evidence from deep drilling samples. *Precambrian Research*, 235: 150–162
- Yang HJ, Wu GH, Kusky TM, Chen YQ and Xiao Y. 2018. Paleoproterozoic assembly of the North and South Tarim terranes: New insights from deep seismic profiles and Precambrian granite cores. *Precambrian Research*, 305: 151–165
- Ye XT, Zhang CL, Santosh M, Zhang J, Fan XK and Zhang JJ. 2016. Growth and evolution of Precambrian continental crust in the southwestern Tarim terrane; New evidence from the Ca. 1.4Ga A-type granites and Paleoproterozoic intrusive complex. *Precambrian Research*, 275: 18–34
- Ye XT and Zhang CL. 2020. Advances in Meso- to Neoproterozoic stratigraphy of the southwestern Tarim. *Geological Survey and Research*, 43(2): 161–168 (in Chinese with English abstract)
- Yu HF, Mei HL and Li Q. 1998. The characteristics of Archean Khondalite series in Dunhuang, Gansu Province. Progress in *Precambrian Research*, 21(1): 19–25 (in Chinese with English abstract)
- Yu SY, Zhang JX, Zhao XL, Gong JH and Li YS. 2014. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Late Palaeoproterozoic A-type granites from the Dunhuang block, SE Tarim Craton, China; Implications for the break-up of the Columbia supercontinent. *Geological Magazine*, 151(4): 629–648
- Zhai MG and Santosh M. 2011. The early Precambrian odyssey of the North China Craton; A synoptic overview. *Gondwana Research*, 20(1): 6–25
- Zhai MG. 2017. Granites: Leading study issue for continental evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 33(5): 1369–1380 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Li HK, Santosh M, Li ZX, Zou HB, Wang HY and Ye HM. 2012b. Precambrian evolution and cratonization of the Tarim Block, NW China: Petrology, geochemistry, Nd-isotopes and U-Pb zircon geochronology from Archean gabbro-TTG-potassic granite suite and Paleoproterozoic metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 5–20
- Zhang CL, Zou HB, Li HK and Wang HY. 2013a. Tectonic framework and evolution of the Tarim Block in NW China. *Gondwana Research*, 23(4): 1306–1315
- Zhang CL, Zou HB, Santosh M, Ye XT and Li HK. 2014. Is the Precambrian basement of the Tarim Craton in NW China composed of discrete terranes? *Precambrian Research*, 254: 226–244
- Zhang J, Zhang CL, Li HK, Ye XT, Geng JZ and Zhou HY. 2014. Revisit to time and tectonic environment of the Aksu blueschist terrane in northern Tarim, NW China: New evidence from zircon U-Pb age and Hf isotope. *Acta Petrologica Sinica*, 30(11): 3357–3365 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Li HK, Meng FC, Xiang ZQ, Yu SY and Li JP. 2011. Polyphase tectonothermal events recorded in “metamorphic basement” from the Altyn Tagh, the southeastern margin of the Tarim basin, western China: Constraint from U-Pb zircon geochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 27(1): 23–46 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Gong JH and Yu SY. 2012a. Ca. 1.85Ga HP granulite-facies metamorphism in the Dunhuang block of the Tarim Craton, NW China: Evidence from U-Pb zircon dating of mafic granulites. *Journal of the Geological Society*, 169(5): 511–514
- Zhang JX, Yu SY, Gong JH, Li HK and Hou KJ. 2013b. The latest Neoproterozoic-Paleoproterozoic evolution of the Dunhuang block, eastern Tarim craton, northwestern China: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses. *Precambrian Research*, 226: 21–42
- Zhang Q and Zhai MG. 2012. What is the Archean TTG? *Acta Petrologica Sinica*, 28(11): 3446–3456 (in Chinese with English abstract)
- Zhang QWL, Liu JH, Wang HYC, Shi MY, Chen YC, Li ZMG, Zhang HCG, Pham VT and Wu CM. 2019. Amphibolite facies metamorphism and geochronology of the Paleoproterozoic Aketashitage Orogenic Belt, northwestern China. *Precambrian Research*, 328: 146–160
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA and Lu LZ. 2001. High-pressure granulites (retrograded eclogites) from the Hengshan Complex, North China Craton; Petrology and tectonic implications. *Journal of Petrology*, 42(6): 1141–1170
- Zhao GC, Cawood PA, Wilde SA and Sun M. 2002. Review of global 2.1–1.8Ga orogens; Implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews*, 59(1–4): 125–162
- Zhao GC and Cawood PA. 2012. Precambrian geology of China. *Precambrian Research*, 222–223: 13–54
- Zhao Y, Diwu CR, Sun Y, Zhu T and Wang HL. 2013. Zircon geochronology and Lu-Hf isotope compositions for Precambrian rocks of the Dunhuang complex in Shuixiakou area, Gansu Province. *Acta Petrologica Sinica*, 29(5): 1698–1712 (in Chinese with English abstract)
- Zhao Y, Sun Y, Yan JH and Diwu CR. 2015. The Archean-Paleoproterozoic crustal evolution in the Dunhuang region, NW China: Constraints from zircon U-Pb geochronology and in situ Hf isotopes. *Precambrian Research*, 271: 83–97
- Zhao Y, Diwu CR, Ao WH, Wang HL, Zhu T and Sun Y. 2015. Ca. 3.06Ga granodioritic gneiss in Dunhuang block. *Chinese Science Bulletin*, 60(1): 75–87 (in Chinese)
- Zhu GY, Su J, Yang HJ, Wang Y, Fei AG, Liu KY, Zhu YF, Hu JF and Zhang BS. 2013. Formation mechanisms of secondary hydrocarbon pools in the Triassic reservoirs in the northern Tarim Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 46: 51–66
- Zhu GY, Zhang BT, Yang HJ, Su J and Han JF. 2014. Origin of deep

strata gas of Tazhong in Tarim Basin, China. *Organic Geochemistry*, 74: 85–97

Zhu GY, Ren R, Chen FR, Li TT and Chen YQ. 2017. Neoproterozoic rift basins and their control on the development of hydrocarbon source rocks in the Tarim Basin, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 150: 63–72

Zhu GY, Li TT, Zhang ZY, Zhao K, Zhang KJ, Chen WY, Yan HH and Wang PJ. 2020. Distribution and geodynamic setting of the Late Neoproterozoic-Early Cambrian hydrocarbon source rocks in the South China and Tarim blocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 201: 104504

Zong K, Liu Y, Zhang Z, He Z, Hu Z, Guo J and Chen K. 2013. The generation and evolution of Archean continental crust in the Dunhuang block, northeastern Tarim craton, northwestern China. *Precambrian Research*, 235: 251–263

## 附中文参考文献

甘肃省地质矿产局. 1989. 甘肃省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–705

胡嵩琴, 韦刚健. 2006. 塔里木盆地北缘新太古代辛格尔灰色片麻岩形成时代问题. *地质学报*, 80(1): 126–134

李惠民, 陆松年, 郑健康, 于海峰, 赵凤清, 李怀坤, 左义成. 2001. 阿尔金山东端花岗片麻岩中 3.6Ga 锆石的地质意义. *矿物岩石地球化学通报*, 20(4): 259–262

李志琛. 1994. 敦煌地块变质岩系时代新认识. *中国区域地质*, (2): 131–134

刘永顺, 于海峰, 辛后田, 陆松年, 修群业, 李铨. 2009. 阿尔金山地区构造单元划分和前寒武纪重要地质事件. *地质通报*, 28(10): 1430–1438

陆松年, 袁桂邦. 2003. 阿尔金山阿克塔什塔格早前寒武纪岩浆活动的年代学证据. *地质学报*, 77(1): 61–68

梅华林, 于海峰, 李铨, 左国朝. 1997. 甘肃敦煌-北山早前寒武纪岩石组合-构造初步框架. *前寒武纪研究进展*, 20(4): 47–54

梅华林, 于海峰, 陆松年, 李惠民, 李铨, 林源贤, 左义成. 1998. 甘肃敦煌太古宙英云闪岩: 单颗粒锆石 U-Pb 年龄和 Nd 同位素. *前寒武纪研究进展*, 21(2): 41–45

万渝生, 董春艳, 任鹏, 白文倩, 颜炳强, 刘守偈, 谢士稳, 刘敦一. 2017. 华北克拉通太古宙 TTG 岩石的时空分布、组成特征及形成演化: 综述. *岩石学报*, 33(5): 1405–1419

王忠梅, 肖文交, 韩春明, 敖松坚, 王洛娟. 2013. 甘肃敦煌红柳峡地区石榴石斜长角闪岩的变质特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意

义. *岩石学报*, 29(5): 1685–1697

辛后田, 赵凤清, 罗照华, 刘永顺, 万渝生, 王树庆. 2011. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区元古代精细年代格架的建立及其地质意义. *地质学报*, 85(12): 1977–1993

辛后田, 罗照华, 刘永顺, 王树庆, 张利忠. 2012. 塔里木东南缘阿克塔什塔格地区元古代壳源碳酸岩的特征及其地质意义. *地学前缘*, 19(6): 167–178

辛后田, 刘永顺, 罗照华, 宋顺昌, 王树庆. 2013. 塔里木盆地东南缘阿克塔什塔格地区新太古代陆壳增生: 米兰岩群和 TTG 片麻岩的地球化学及年代学约束. *地学前缘*, 20(1): 240–259

熊小林, 韩江伟, 吴金花. 2007. 变质玄武岩体系相平衡及矿物-熔体微量元素分配: 限定 TTG/埃达克岩形成条件和大陆壳生长模型. *地学前缘*, 14(2): 149–158

许志琴, 杨经绥, 张建新, 姜枚, 李海兵, 崔军文. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. *地质学报*, 73(3): 193–205

叶现韬, 张传林. 2020. 塔里木西南中-新元古界研究进展. *地质调查与研究*, 43(2): 161–168

于海峰, 梅华林, 李铨. 1998. 甘肃敦煌地区太古宙孔兹岩系特征. *前寒武纪研究进展*, 21(1): 19–25

翟明国. 2017. 花岗岩: 大陆地质研究的突破口以及若干关键科学问题——“岩石学报”花岗岩专辑代序. *岩石学报*, 33(5): 1369–1380

张健, 张传林, 李怀坤, 叶现韬, 耿建珍, 周红英. 2014. 再论塔里木北缘阿克苏蓝片岩的时代和成因环境: 来自锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素的新证据. *岩石学报* 30(11), 3357–3365

张建新, 李怀坤, 孟繁聪, 相振群, 于胜尧, 李金平. 2011. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件: 锆石 U-Pb 年代学的制约. *岩石学报*, 27(1): 23–46

张旗, 翟明国. 2012. 太古宙 TTG 岩石是什么含义. *岩石学报*, 28(11): 3446–3456

赵燕, 第五春荣, 孙勇, 朱涛, 王洪亮. 2013. 甘肃敦煌水峡口地区前寒武纪岩石的锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义. *岩石学报*, 29(5): 1698–1712

赵燕, 第五春荣, 敖文昊, 王洪亮, 朱涛, 孙勇. 2015. 敦煌地块发现 ~3.06Ga 花岗闪长质片麻岩. *科学通报*, 60(1): 75–87