

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.977>



# 中天山基底与塔里木克拉通的构造亲缘性

舒良树<sup>1\*</sup>, 邓兴梁<sup>2</sup>, 马绪宣<sup>3</sup>

1.南京大学成矿作用国家重点实验室, 江苏南京 210023

2.塔里木油田指挥部, 新疆库尔勒 841000

3.中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

**摘要:** 中天山基底与塔里木克拉通的构造亲缘性问题涉及中亚大地构造单元的划分,倍受学术界关注。在诸多学者的研究基础上,特别是塔里木北缘物质成分和年代学成果基础上,通过区域地质调查,对托克逊县干沟与和静县阿拉沟两地的前南华纪地层序列及其岩石组合进行了专门研究,并筛选出4件浅变质砂岩样品做碎屑锆石U-Pb测年研究,获得165组年龄数据。结果表明,发育在中天山地区的前南华纪地层序列、岩石组合、地层接触关系、沉积环境与塔里木北缘的基本一致,可比性好,揭示了二者之间密切的构造亲缘性。其Th/U比值密集分布在0.4~4.0,表明岩浆锆石占绝大多数。锆石U-Pb测年产生了4个年龄峰值,分别为950 Ma、1 550 Ma、1 920 Ma和2 480 Ma,表明中天山较好地保存了元古代的4次重大构造—岩浆活动信息。这些年龄峰值在塔里木陆块均有对应岩浆体的发育,也与塔里木周缘的前寒武纪年龄谱吻合,进一步佐证了中天山基底与塔里木克拉通曾经是一个统一地块的认识。结合区域构造分析,认为中天山陆块是在南华纪以来,逐渐从塔里木克拉通拉张裂离出来的;伴随早古生代天山洋的俯冲,一个奥陶纪—志留纪火山弧发育在这个裂离的中天山陆块之上。

**关键词:** 地层序列; 碎屑锆石; U-Pb年龄谱; 构造亲缘性; 中天山基底; 塔里木克拉通; 构造地质。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2019)05-1584-18

收稿日期: 2019-01-06

## Tectonic Affinity between Central Tianshan Basement and Tarim Block Craton

Shu Liangshu<sup>1\*</sup>, Deng Xingliang<sup>2</sup>, Ma Xuxuan<sup>3</sup>

1. State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. Tarim Petroleum Field Prospect Headquarter, Korla 841000, China

3. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

**Abstract:** The tectonic affinity between the Chinese Central Tianshan basement and the Tarim craton is pivotal for us to understand the tectonic framework of the Central Asian orogenic belt. Based on analyses of field investigation and stratigraphic sequences, it performed detrital zircon U-Pb dating analysis on the four Neoproterozoic meta-sandstone samples from the Gangou region of Hejing County and Alagou region of Baluntai Town, Chinese Central Tianshan. Stratigraphically, the Precambrian strata, rock assemblages, stratigraphical contacts, sedimentary environment in the Chinese Central Tianshan are very similar to those in the northern margin of the Tarim craton, revealing close tectonic affinity between them. All analyzed detrital zircons show oscillatory zoning and have Th/U ratios >0.1 (mainly ranging from 0.4 to 4.0), suggesting that they were mainly derived from igneous rocks. A total of about 165 detrital zircon analyses yielded four age peaks, namely, 950 Ma, 1 550 Ma, 1 920 Ma and 2 480 Ma, respectively, corresponding to four prominent tectonomagmatic events that occurred in the Tarim craton. In addition, these peak ages are remarkably consistent with age populations of detrital zircons in the Tarim craton and its neighbouring areas, and further corroborate that the Chinese Central Tianshan terrane has close tectonic affinity with the Tarim craton.

**基金项目:** 国家自然基金委青年项目(No.41502198)。

**作者简介:** 舒良树(1951—),男,地质学教授,长期从事华南和中亚南缘研究工作,E-mail: Lsshu@nju.edu.cn

\* 通讯作者: 舒良树, E-mail: Lsshu@nju.edu.cn

**引用格式:** 舒良树, 邓兴梁, 马绪宣, 2019. 中天山基底与塔里木克拉通的构造亲缘性. 地球科学, 44(5): 1584—1601.

Furthermore, some Proterozoic zircons have been found, showing ages of 2 600—3 260 Ma. Therefore, it is argued that the Chinese Central Tianshan belonged to the Tarim craton in the Precambrian time. Owing to the southward subduction of the Paleo-Tianshan oceanic lithosphere beneath the northern margin of the Tarim craton during the Neoproterozoic period, the remarkable arc-type magmatism occurred in the Chinese Central Tianshan terrane, which rifted away from the Tarim craton.

**Key words:** stratigraphic sequence; detrital zircon; U-Pb age population; tectonic affinity; basement of Chinese Central Tianshan; Tarim craton; tectonics.

研究成果表明,中亚地区天山造山带的构造格局主要是由古陆块与古生代活动陆缘组合而成的,在洋盆关闭之前,诸多源区不一的古陆块杂乱散布在古天山洋盆中(马瑞士等,1993;舒良树等,1998,2001).其古地理现象颇与现今的西南太平洋海底格局相似.早在 20 世纪 80 年代,就有学者提出中天山是塔里木陆块的一部分,并据此将塔里木陆块的北界划定在中天山北缘断裂(陈哲夫和梁云海,1985).一些学者认为克拉麦里蛇绿岩带是晚古生代塔里木与西伯利亚两大陆块的拼合界线,代表天山地区最晚的板块拼合带(马瑞士等,1993;李锦轶,1995;李锦轶和徐新,2004;李锦轶等,2006;舒良树等,2007;Wang *et al.*, 2014).还有学者提出,准噶尔及其周缘的地壳不是大陆地壳,而是幔源组分占优势的新生地壳或大洋地壳,不归塔里木陆块(Jahn *et al.*, 2000, 2004; 肖文交等, 2008; Xiao and Kusky, 2009),介于克拉麦里带与中天山北缘断裂之间的广阔地区属于准噶尔洋壳块体,或哈萨克斯坦中间地块(何国琦等,1994; Li *et al.*, 2003).由此可见,中天山的构造属性或亲缘性问题涉及中亚地区大地构造单元的划分,研究意义重大.本文作者认真研究了近年发表的塔里木北缘物质成分和年代学等诸多数据,在区域地质调查的基础上,对托克逊县干沟与和静县巴仑台两个地区的前寒武纪地层序列及其岩石组合进行了重点研究,对采集的 4 件变质砂岩样品进行了碎屑锆石 U-Pb 测年.结果表明,发育在中天山地区的前寒武纪地层序列、岩石组合、地层接触关系、沉积环境以及岩浆活动—构造演化信息与塔里木北缘的基本一致,可比性好,二者之间具有密切的地质亲缘性.

## 1 区域地质背景

### 1.1 构造格局

天山造山带位于中亚造山带南缘,沿 NWW-EW-NEE 方向展布,平面上是呈一向南弧形突出的地质体.NW 走向的克拉麦里—伊吾断裂带是个晚

古生代蛇绿混杂岩带,其北东侧为西伯利亚板块,其南西侧为准噶尔—吐哈块体.近 E-W 走向的中天山北缘断裂将天山造山带分为两大构造单元,其南为早古生代中—南天山活动陆缘带,简称中—南天山带,其北为晚古生代北天山活动陆缘带,习称北天山带,包括吐哈盆地南缘的康古尔—雅满苏山、北缘的博格达—哈儿里克山和准噶尔东西两缘的东准和西准造山带(图 1).本文主要研究天山东段的中—南天山地区.

中—南天山由 3 个早古生代构造单元所构成:(1)中天山北缘早古生代蛇绿混杂岩带,其蛇绿岩残迹以米什沟和干沟出露最好,在尾亚、冰达坂等地也有发现.其围岩主要是含早奥陶世牙形刺的砂岩、杂砂岩,也有少量奥陶纪—志留纪的基性、中性火山岩以及元古宙片岩、花岗片麻岩团块(马瑞士等,1993;车自成等,1994).在米什沟、干沟、巴仑台等地,早石炭世砂砾岩呈角度不整合覆盖在志留纪变质复理石地层之上.在中天山北缘断裂带附近,右旋走滑型糜棱岩、花岗片麻岩非常发育(Ma *et al.*, 2015),白云母 Ar-Ar 年龄约为 246 Ma (Laurent-Charvet *et al.*, 2003).(2)中天山奥陶纪—志留纪钙碱性火山—岩浆弧带,主要由奥陶纪中、基性火山熔岩、凝灰岩和志留纪火山质复理石组成,发育在前寒武纪结晶基底之上,其安山岩年龄为 477 Ma(马瑞士等,1997; Wang *et al.*, 2010).侵入火山岩地层的钾长花岗岩 U-Pb 年龄为 428 ± 10 Ma (Shi *et al.*, 2007),其他花岗岩 U-Pb 年龄为 446 ~ 395 Ma (Wang *et al.*, 2010).(3)南天山库米什志留纪—早泥盆世弧后边缘海,主要由志留纪基性熔岩、凝灰岩及蛇纹石化超镁铁质岩组成.在蛇绿岩的硅质岩、灰岩中存在大量志留纪珊瑚、腕足及腹足、层孔虫(吴文奎等,1992).在榆树沟的镁铁质—超镁铁质混杂岩中,发育粗粒基性麻粒岩(Shu *et al.*, 2004, 2010; Zhou *et al.*, 2004),其锆石 U-Pb 年龄为 390 ± 11 Ma 和 392 ± 7 Ma(Zhou *et al.*, 2004).

### 1.2 前泥盆纪地层序列与岩石组合

#### 1.2.1 塔里木克拉通 NE 缘库鲁克塔格块体 塔里

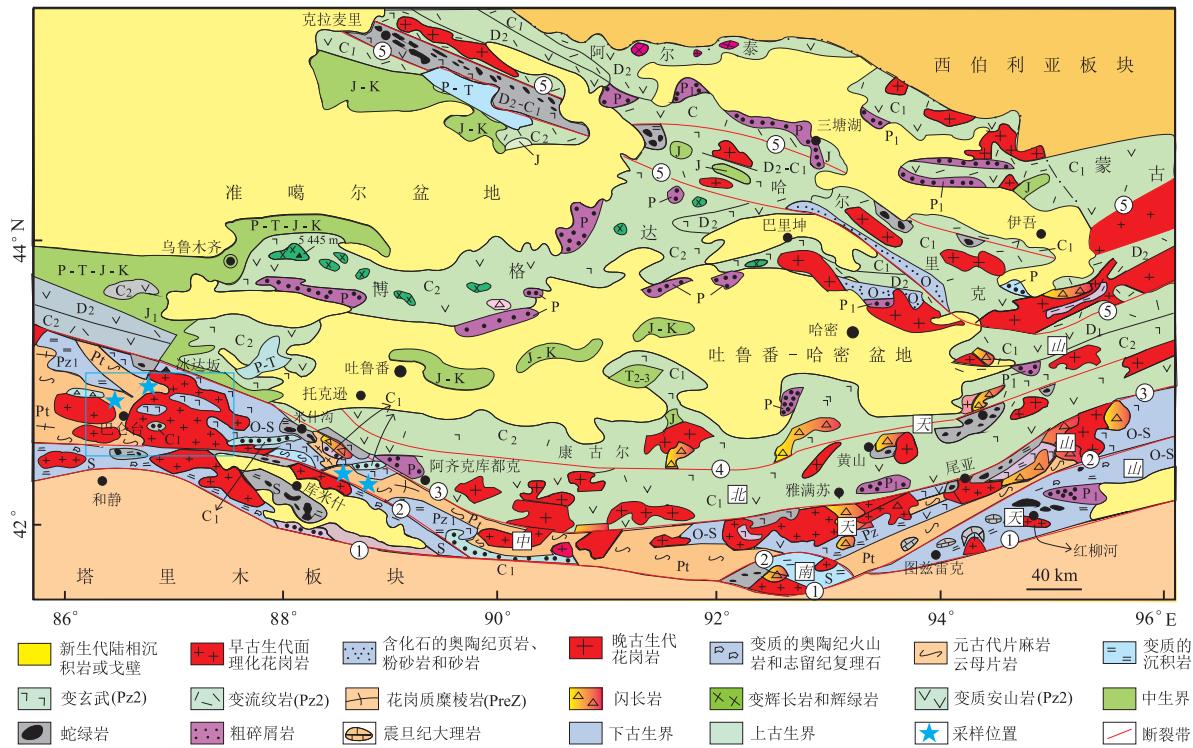


图 1 天山东段地质构造简图

Fig.1 Simplified geological and tectonic sketch map of the eastern Tianshan

据 Shu *et al.*(2003)略修改;①和静—红柳河断裂(南天山与塔里木块体边界断裂);②中天山南缘断裂;③中天山北缘断裂(早古生代蛇绿混杂岩带);④托克逊—黄山断裂;⑤克拉麦里—伊吾断裂带(晚古生代蛇绿混杂岩带)

木克拉通地表广泛被新生代沙漠所覆盖,其岩石露头主要分布在其周缘,尤以 NE 缘库鲁克塔格块体保存的地层最全,构造信息最丰富。根据区域地质和地震资料,库鲁克塔格块体的基底与塔里木克拉通是相通的(邓兴梁等,2008;Shu *et al.*, 2011);该块体是塔里木陆块的重要组成部分,经历了太古代到新生代的多期地质演化过程。太古代和古元古代地层及岩浆岩分布零星,中—新元古代岩层全区广泛发育,由强烈褶皱、中高级变质和韧性变形的千枚岩、片岩、片麻岩、花岗片麻岩、角闪片岩、斜长角闪岩、大理岩和变质玄武岩、变质安山岩、流纹质火山岩以及面理化花岗岩等组成,原岩是前南华纪泥砂质复理石、碳酸盐岩、中—基性火山岩及其侵入岩,总厚约为 8 000 m。沉积盖层则由几无变质、微弱变形的南华系、震旦系和古生界组成,为一套泥砂质碎屑岩、冰碛岩和碳酸盐岩沉积岩系,局部夹火山岩。南华系与下伏青白口系呈角度不整合接触(图 2)。

南华纪开始,以兴地断裂为界,南北两侧构造环境发生分化(邓兴梁等,2008)。在其北侧的库鲁克塔格西大山区段,形成了南华纪—震旦纪的泥砂质碎屑岩夹三套冰碛岩堆积层序(Xu *et al.*, 2005,

2009),偶夹火山岩,而其南侧则为隆升区,为陆相粗碎屑岩、火山岩堆积序列,缺失冰碛岩。进入寒武纪,兴地断裂北侧提克不拉大黄—西大山一带寒武纪和奥陶纪为浅海相碳酸盐岩沉积区,海相生物种类繁多,广泛分布,与扬子地区岩石—生物组合相似;南侧元宝山—却尔却克山一带则为半深海相青灰色中—薄层状泥砂质韵律层,厚达数千米,生物化石相对简单,种类较少。志留纪,兴地断裂北侧为隆升期,缺失沉积(图 2),其原因可能与天山地区早古生代板块俯冲/碰撞作用有关(邓兴梁等,2008)。一直到泥盆纪,兴地断裂带南北两侧的沉积环境才渐趋统一。

区内辉长岩、闪长岩、花岗岩、花岗片麻岩广泛发育,对其岩浆锆石作 U-Pb 测年,获得多组高质量年龄数据,包括年龄为 2 534 ± 19 Ma(钾长花岗岩)、2 789 ± 12 Ma(奥长花岗岩)、2 602 ± 27 Ma(英云闪长岩)(Zhang *et al.*, 2007)、2 470 ± 24 Ma(片麻状花岗岩)、2 469 ± 12 Ma(变闪长岩)、1 048 ± 19 Ma(片麻状花岗岩)、933 ± 11 Ma(面理化花岗岩)、806 ± 8 Ma(花岗岩)、798 ± 7 Ma(花岗岩)、775 ± 12 Ma(辉长岩)、698 ± 51 Ma(花岗岩)

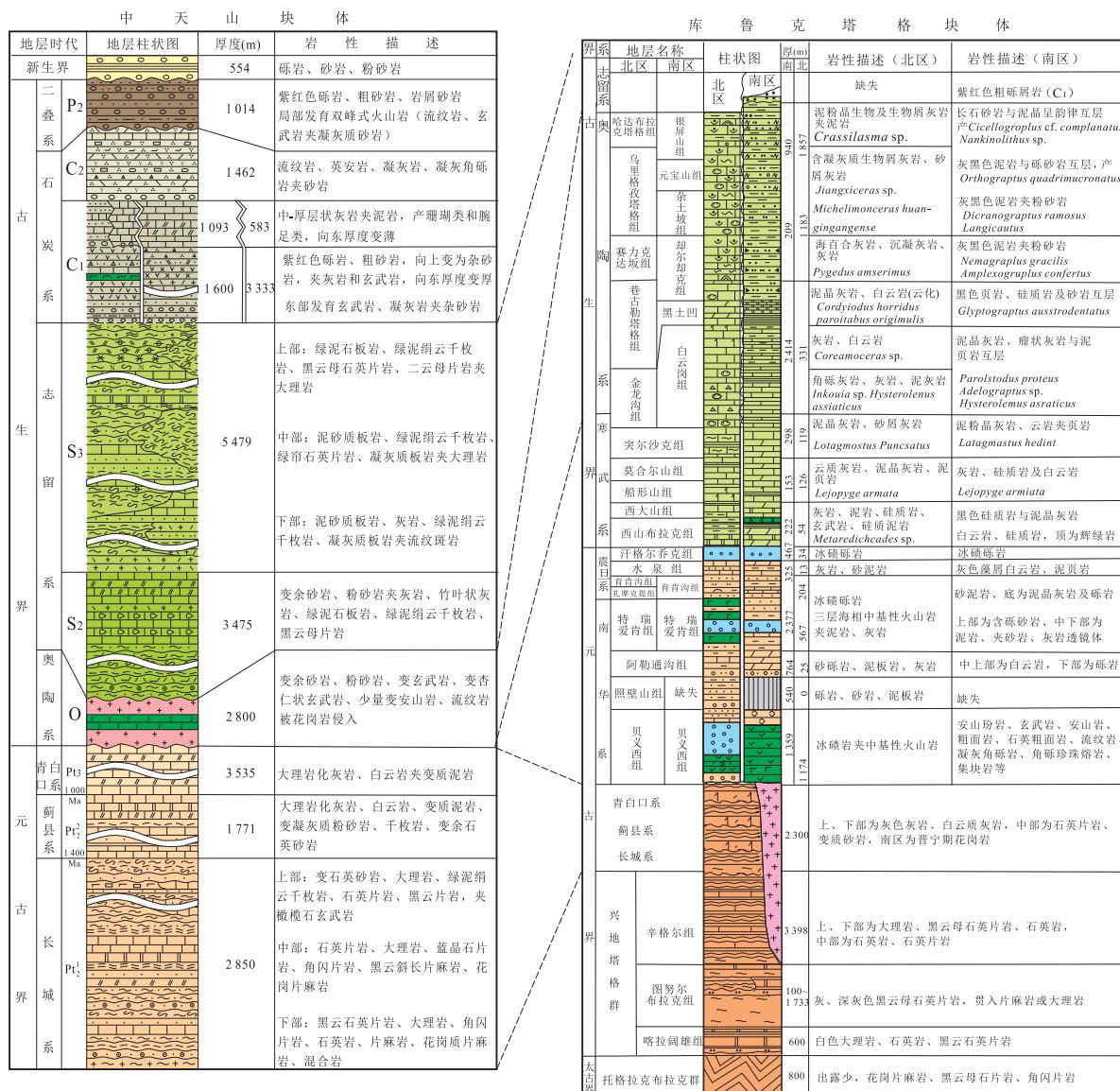


图2 中天山和库鲁克塔格地层序列与岩石组合柱状对比

Fig.2 Column comparison of stratigraphic sequences and rock assemblages of the Central Tianshan and Quruqtagh blocks

(Shu et al., 2011),进一步证明本区古元古代—新元古代基底物质和岩浆机制的存在。

**1.2.2 中天山块体** 它由三大岩石构造组合所组成:前寒武纪基底单元、奥陶纪—志留纪火山—沉积单元和石炭纪及其以后的沉积盖层单元,具有和塔里木相似的中—新元古代基底岩石和形成年龄(舒良树等,1998, 2001; Shu et al., 2003).研究表明,它是在新元古代晚期从塔里木板块裂解出来的(Shu et al., 2011),到早奥陶世,以南天山洋壳的方式沿阿齐克库都格—尾亚断裂带向塔里木板块俯冲,导致中天山火山弧的形成,并在泥盆纪发生诸地体的碰撞增生作用下,导致天山洋逐渐关闭,形成中天山南缘红柳河—库米什—乌瓦门—黑英山蛇绿混

杂岩带和中天山北缘尾亚—干沟—米什沟—冰达坂—那拉提—科克苏蛇绿混杂岩带(舒良树等,1998;王博等,2007).

中天山前寒武纪基底主要由测年值为800~1 800 Ma的各类片岩、片麻岩、花岗片麻岩、混合岩、石墨大理岩和变粒岩所组成,其下部花岗片麻岩曾获1 800 Ma的Sm-Nd年龄(胡霭琴等,1999).最新的研究表明,在中天山地块南缘存在原岩年龄为25亿年的互层的黑云母—长石片麻岩和黑云母—斜长石—角闪石片麻岩,并且叠加了18亿年的角闪岩相变质事件(Wang et al., 2017).普遍缺失南华纪、震旦纪、寒武纪的地层序列和岩石露头(图2),暗示一次重要构造事件的存在.在巴仑台区段的变质

砂岩中,曾获得年龄大于  $3.0 \text{ Ga}$ ( $3\ 017 \pm 37 \text{ Ma}$ ~ $3\ 663 \pm 38 \text{ Ma}$ )和大于  $2.0 \text{ Ga}$ (其中  $2.5 \sim 3.0 \text{ Ga}$  为 28 颗)的碎屑锆石(Ma *et al.*, 2014)。

中天山早古生代变质火山—沉积岩系发育,由奥陶纪玄武岩、安山岩、英安岩、流纹岩、杂砂岩和志留纪泥砂质复理石组成;其火山岩化学成分与环太平洋岛弧型火山岩相似,并具明显的大陆地壳亲缘性(Guo *et al.*, 2002).在中天山浅变质沉积岩中,发育三叶虫、腕足类、笔石和腹足类等化石,其时代多为奥陶纪—志留纪,少数为寒武纪(车自成等,1994)。

在中天山内部,发育多种类型的花岗岩,包括面理化含角闪石花岗岩、花岗闪长岩、似斑状花岗岩及二云母花岗岩,侵位于前寒武纪基底中,其花岗岩锆石 U-Pb 年龄为  $475 \pm 2 \text{ Ma}$ ~ $427 \pm 1 \text{ Ma}$ ,其岩石地球化学呈明显的大陆岛弧特征(Ma *et al.*, 2012);这与吉尔吉斯坦天山所测定的侵位于前寒武系的岛弧花岗岩岩浆锆石 U-Pb 年龄  $470 \sim 430 \text{ Ma}$  一致(Wang *et al.*, 2010),暗示两者是彼此相连的构造单元。

在中天山地区,区域缺失泥盆纪地层(舒良树等,1998;Shu *et al.*, 2003).在中天山干沟,志留纪复理石与其下的前寒武纪基底之间呈断层接触,与其上的下石炭统红色磨拉石则为角度不整合接触;在中天山巴仑台北侧,下石炭统马鞍桥组杂色砾岩不整合覆盖于中一上元古界巴仑台群片岩、片麻岩之上;在中天山苏巴什,马鞍桥组砾岩不整合于奥陶系可可乃克群之上;在中天山米什沟和乌苏通,马鞍桥组砾岩不整合于变质的下志留统米什沟组复理石之上,指示中天山在早古生代晚期发生过强烈的褶皱造山事件。

### 1.3 塔里木与中天山地层序列对比

根据上述地层序列和岩石组合的描述和对比,可以得出如下认识:(1)相对塔里木陆块北缘连续发育太古代—奥陶纪地层序列和岩石组合而言,中天山既没有出露古元古代—太古代的岩石记录,也缺失南华纪、震旦纪、寒武纪的地层和岩石;(2)塔里木北缘与中天山的中元古代—新元古代早期变质基底(长城系—青白口系)的组成和岩石组合特征基本相同,可以对比;(3)塔里木北缘奥陶纪地层序列为稳定的浅海碳酸盐岩和泥砂质复理石,缺失志留纪地层,而中天山奥陶纪地层序列为中—基性火山岩组合,志留纪为泥砂质复理石组合.两者不能对比。

## 2 样品制备与年龄测定

### 2.1 样品采集与样品特征

中天山的巴仑台和干沟区段,地层发育,露头连续,其南以乌瓦门—库米什蛇绿混杂岩与南天山志留纪—泥盆纪泥砂质碎屑岩—碳酸盐岩沉积序列为界(图 1,图 3).该区段主要由一套新元古代早期的火山岩(玄武岩、凝灰岩)、沉积岩与花岗岩组成,已变质为云母片岩、石英片岩、角闪片岩和花岗片麻岩,属青白口群.该岩群中面理化花岗岩和片麻状花岗岩广泛发育,占出露岩石面积的 50%~70%.前人对青白口群的岩相学和构造变形开展过较详细的研究(Shu *et al.*, 2003, 2004; Charvet *et al.*, 2007; Ma *et al.*, 2014),但测年数据较少,精度偏低,基底演化研究薄弱.为了了解中天山形成与演化过程,探寻中天山与塔里木前寒武纪基底有无亲缘性,我们采用了目前国际流行的碎屑锆石年龄谱研究与对比方法,选择中天山西段的巴仑台阿拉沟和中天山西段的干沟测制剖面和采样(图 1),开展了碎屑锆石年龄谱的研究。

笔者在巴仑台阿拉沟(样品号 726 和 691)和干沟(样品号 180 和 184)分别采集了 2 个样品(图 4),做锆石 U-Pb 年龄测定与原位锆石 Hf 同位素成分测定.采样位置如图 1 和图 3 所示.样品 180 采自干沟中部,为钾长花岗片麻岩,片麻构造、眼球构造发育,由石英(25%)、钠长石(15%)、钾长石(45%)、黑云母(15%)等矿物组成,侵入于黑云母片岩中.石英多呈他形,波状消光显著;钾长石主要为微斜长石,颗粒粗大,自形,具卡钠复合双晶;钠长石( $An = 9$ )颗粒较小,具细密的聚片双晶;黑云母具有绿至棕色多色性.样品 184 采自干沟南侧,为黑云斜长片麻岩,片麻构造发育,主要矿物成分为石英(30%)、斜长石( $An = 8 \sim 15$ , 钠—更长石, 占 45%)、黑云母(25%),锆石、独居石、磷灰石等富矿物约占 3%~5%.样品 691 采自巴仑台北侧阿拉沟,为杂砂质千枚岩,主要由鳞片状的绢云母(30%)、石英(50%)、微细粒状长石(20%)组成,具明显定向排列.样品 726 采自阿拉沟南侧,为粗砂质板岩,主要由粗粒他形石英(65%)、细粒他形长石(20%)和鳞片状绢云母+绿泥石(15%)组成,略具定向排列。

### 2.2 样品制备与测试方法

样品制备:用作测年的 4 件样品均是采自天然露头的新鲜样品.碎样和锆石挑选均由河北廊坊诚信地质服务公司采用标准技术方法完成.先对样品

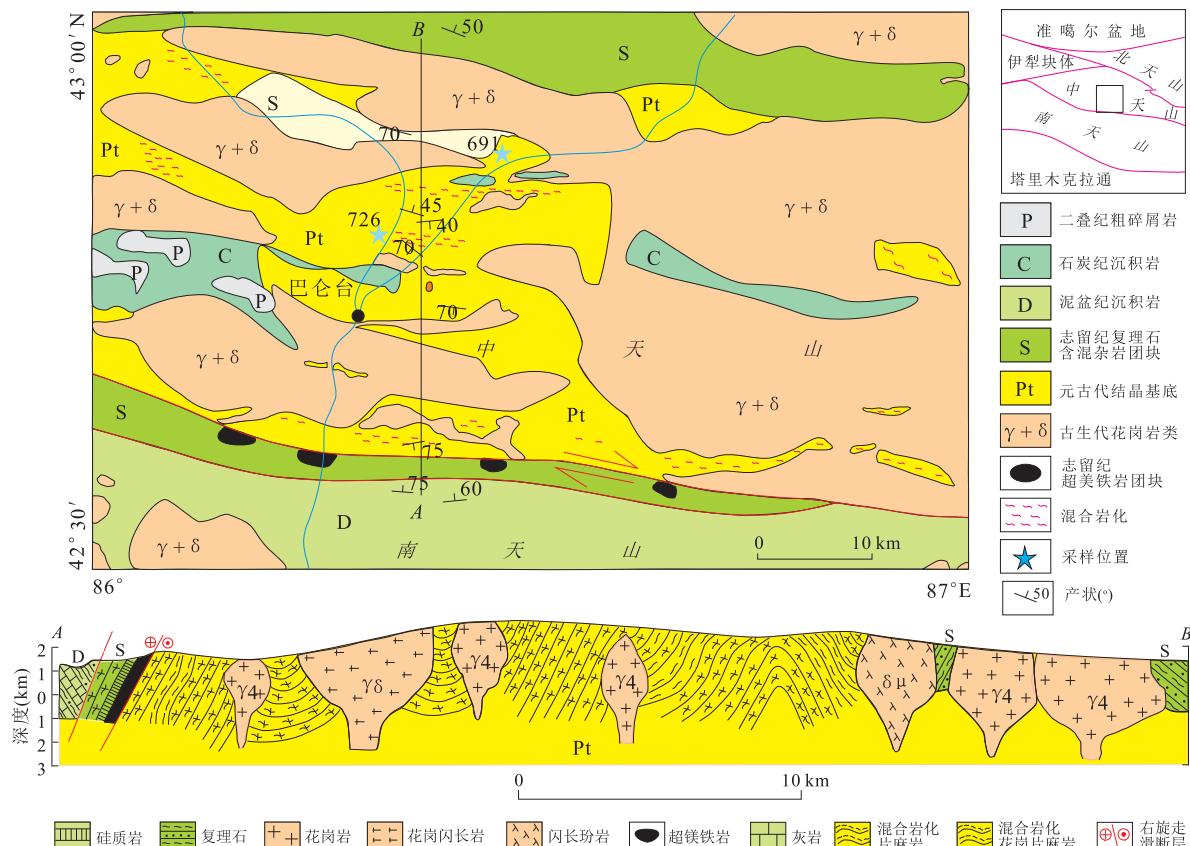


图3 中天山巴仑台区段前泥盆纪地质图和构造剖面

Fig.3 The Pre-Devonian geological map with the structural cross-section

进行粉碎,摇床分选,重液分离,经过磁选和电磁选后,在双目镜下挑选出透明、少裂纹、无包裹体、晶形较好的锆石单颗粒。在锆石 U-Pb 测定之前,用浓度为 3% 的稀  $\text{HNO}_3$  清洗锆石颗粒表面,以除去样品表面的污染。在实验室,先将挑出的锆石颗粒置于双面胶上,之后将双面胶置于圆环塑料管中,注入环氧树脂,待其固结后,对其进行抛光,使每个锆石颗粒的一半得以暴露,然后用超声波清洗,以待测试。锆石样品的阴极发光照相、U-Pb 同位素组成测定均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

CL 照相: 镐石样品定年前, 先进行阴极发光(CL)内部结构照相, 以作为测年选点的依据. CL 照相采用安装有 MonoCL3+型(Gatan, U.S.A.)阴极荧光探头的扫描电镜(Quanta 400 FEG)进行. CL 图像显示, 镐石大小不等, 粒径以  $80\sim150\ \mu\text{m}$  者居多. 多数榍石呈自形一半自形, 反映它们为近源搬运; 部分呈次棱角状一混圆状, 表明它们经过一定距离的搬运与磨蚀. 本次从 4 件样品中选择了 165 颗裂隙少的榍石进行了 LA-ICP-MS 测试. 大多数(95%)榍石的 Th/U 比值分布在  $0.1\sim10.0$ , 主要出现在  $0.4\sim4.0$ (图 5), 且发育岩浆结晶韵律环带, 表

明中一酸性的岩浆锆石占绝大多数。少数 Th/U 比值低，<0.1，可能为变质成因 (Möller *et al.*, 2003)。另有一些锆石由暗色核部和亮色宽边 2 个部分组成，形成核环构造，指示后期构造—岩浆作用对早先形成锆石的改造。

锆石 U-Pb 同位素成分测定：锆石 U-Pb 测年和 Lu-Hf 同位素成分测试采用的激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M。该激光发生器由 Lambda Physik 公司的 ComPex102 Excimer 准分子激光器(波长 193 nm)与 MicroLas 公司的光学系统组成，U-Pb 成分测试在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

锆石 ICP-MS U-Pb 定年和锆石原位 Lu-Hf 同位素成分测试使用同一台激光剥蚀系统, 对样品进行一次性剥蚀完成, 分别由 LA-ICP-MS 与 MC-ICP-MS 两台仪器同时采集各自的信号, 其操作流程详见参考文献(Yuan *et al.*, 2008). 对于放射性成因组分积累较少的年轻锆石来说,  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄精度较差,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄更能代表锆石的结晶年龄(Simon *et al.*, 2004). 通常采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄来代表相对年轻( $<1.0\text{ Ga}$ ) 岩石的成岩年龄, 采用

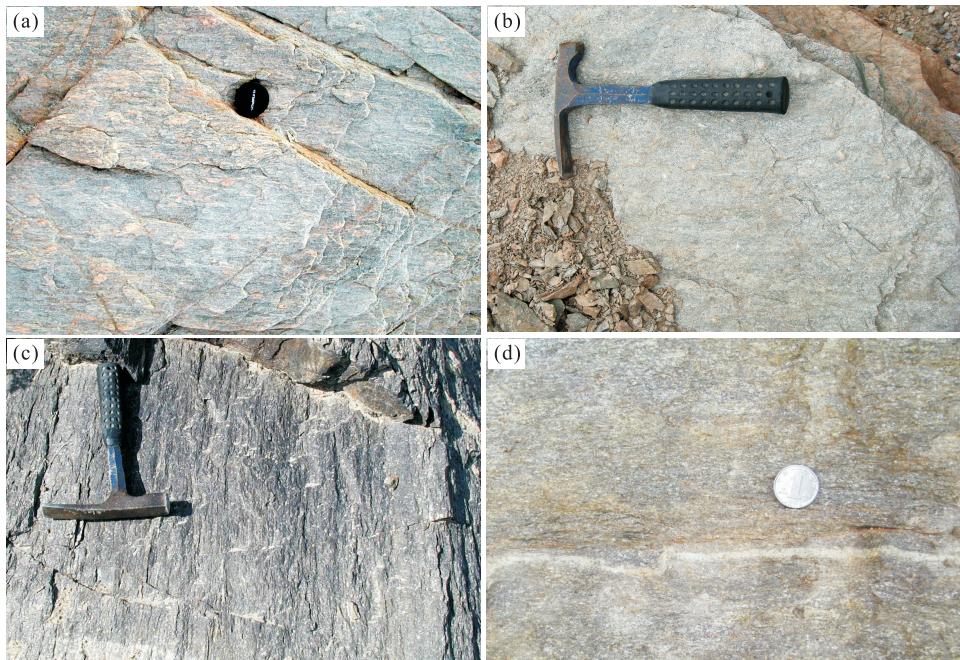


图 4 采集样品的野外照片

Fig.4 The outcrop photographs from some samples

a.No.180, 钾长花岗片麻岩; b.No.184, 黑云斜长片麻岩; c.No.691, 杂砂质千枚岩; d.No.726, 粗砂质板岩

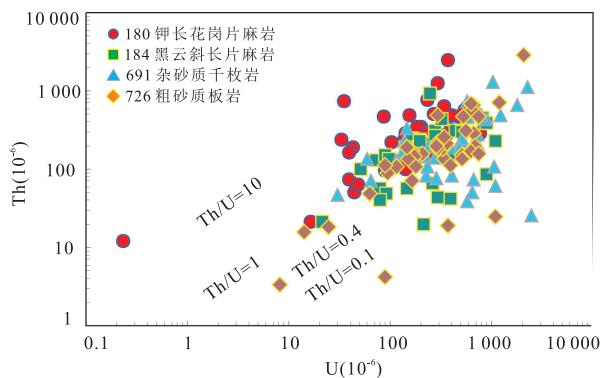


图 5 四件样品锆石的 Th/U 比值投影图

Fig.5 The plots of Th/U values of zircons from four samples

$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄来代表相对古老( $>1.0\text{ Ga}$ )岩石的成岩年龄(Black *et al.*, 2003; Griffin *et al.*, 2004). 锆石 U-Pb 及 Hf 数据的测试方法与处理过程参照 Wu *et al.*(2006). 本文按照这一方法, 对 $<1.0\text{ Ga}$  的和 $>1.0\text{ Ga}$  的测年数据分别采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  和  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  计算流程一一求取其谐和年龄. 本研究获得的锆石 U-Pb 同位素数据, 列于表 1.

### 3 锆石 U-Pb 年代学测试结果

钾长花岗片麻岩样 180: 该样品采自干沟中部. 本文对该样品 40 粒锆石进行了 U-Pb 定年测试. 结

果显示, 数据的年龄变化区间较大, 绝大多数分布在  $903\sim2598\text{ Ma}$ , 说明岩石中的锆石是多来源的. 这些锆石大多具有较好的谐和性, 在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  投影图上, 基本落在谐和线上或者附近(图 6a), 代表它们的真实形成年龄. 在锆石数据的年龄频率直方图上(图 6b), 绝大多数测年数据集聚成 3 个峰. 最显著的年龄值分布于  $850\sim1130\text{ Ma}$ (峰值为  $930\text{ Ma}$ ), 其次是  $2340\sim2600\text{ Ma}$ (峰值为  $2450\text{ Ma}$ ) 和  $1750\sim1950\text{ Ma}$  的次峰期(峰值为  $1880\text{ Ma}$ ) 以及形成于  $1460\sim1680\text{ Ma}$  的小峰期(峰值为  $1620\text{ Ma}$ ). 在这 40 组数据中, 发现 1 颗  $2722\pm10\text{ Ma}$  的浑圆锆石, 并有 2 颗  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄分别为  $793\pm11\text{ Ma}$  和  $459\pm10\text{ Ma}$  的半自形锆石(谐和度为  $98\%\sim100\%$ ), 是全球 Rodinia 裂解事件和早古生代碰撞造山事件的特征年龄值信息.

黑云斜长片麻岩样 184: 该样品采自干沟南侧, 共获得 40 组谐和性良好的碎屑锆石年龄数据; 除 1 颗锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在  $622\pm23\text{ Ma}$  之外, 主要分布在  $850\sim2500\text{ Ma}$ . 在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}-^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  投影图上, 所有数据均落在谐和线上或附近(图 6a); 在年龄频率直方图中(图 6b), 该样品的前寒武纪地壳演化信息和样品 180 的非常相似, 不同的是  $950\text{ Ma}$  和  $1580\text{ Ma}$  的年龄信息更加集中. 按年龄峰值大小, 可依次排序为  $950\text{ Ma}, 1580\text{ Ma}, 1730\text{ Ma},$

表1 中天山前寒武纪变质岩碎屑锆石U-Pb同位素成分数据

Table 1 The U-Pb isotopic compositions for the detrital zircons from Pre-Cambrian metamorphic rocks in the Central Tianshan

点位	同位素比值			年龄(Ma)			$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$			$^{238}\text{U}(10^{-6})$			$\text{Th}/\text{U}$			和谐		
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}(10^{-6})$	$^{238}\text{U}(10^{-6})$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}/(10^{-6})$	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}/(10^{-6})$		
样品 180, 钟长花岗岩 180-1	0.07289±0.00236	1.69679±0.05513	0.16889±0.00462	1.011±18	1.007±21	1.006±25	142	290	0.49	100								
180-2	0.07981±0.00161	2.23570±0.04917	0.20324±0.00518	1.192±38	1.192±15	1.193±28	269	506	0.53	100								
180-3	0.07224±0.00122	1.66295±0.03261	0.16699±0.00423	993±35	995±12	996±23	371	2431	0.15	100								
180-4	0.07048±0.00129	1.49093±0.02970	0.15347±0.00227	942±19	927±12	920±13	312	265	1.18	98								
180-5	0.08363±0.00283	2.56391±0.08640	0.22157±0.00389	1.284±39	1.290±25	1.290±21	574	611	0.94	100								
180-6	0.10408±0.00175	4.12604±0.07610	0.28771±0.00429	1.698±15	1.659±15	1.630±21	203	343	0.59	96								
180-7	0.07176±0.00268	1.61473±0.05547	0.16321±0.00241	979±28	976±22	975±13	88	476	0.18	100								
180-8	0.12382±0.00404	6.15976±0.20007	0.36094±0.00670	2.011±28	2.003±23	1.989±28	394	324	1.22	99								
180-9	0.13784±0.01019	7.58416±0.52616	0.40062±0.01446	2.201±63	2.186±61	2.176±57	16	22	0.75	101								
180-10	0.10813±0.00210	4.76444±0.10093	0.31962±0.00491	1.763±17	1.773±18	1.778±22	230	755	0.30	101								
180-11	0.09563±0.00168	3.52811±0.06649	0.26763±0.00373	1.541±17	1.531±15	1.529±19	44	51	0.85	99								
180-12	0.08152±0.00377	2.37247±0.10282	0.21128±0.00403	1.234±55	1.236±31	1.236±21	112	108	1.04	100								
180-13	0.11934±0.00281	5.41901±0.12522	0.32967±0.00508	1.948±18	1.898±21	1.867±29	0	12	0.02	94								
180-14	0.15988±0.00226	9.35716±0.14160	0.42496±0.00519	2.453±12	2.378±16	2.292±25	103	223	0.46	93								
180-15	0.07432±0.00215	1.89945±0.05300	0.18546±0.00281	1.050±32	1.081±19	1.097±15	237	225	1.06	96								
180-16	0.16316±0.00219	10.36323±0.15792	0.46055±0.00613	2.491±11	2.473±14	2.463±21	289	148	1.95	98								
180-17	0.06561±0.00110	1.18321±0.02160	0.11308±0.00186	794±35	792±10	793±11	43	189	0.23	100								
180-18	0.05534±0.00302	0.56134±0.02933	0.07372±0.00163	426±77	452±19	459±10	356	280	1.27	98								
180-19	0.07552±0.00115	1.92749±0.02895	0.18514±0.00235	1.082±14	1.091±10	1.095±13	466	467	1.00	99								
180-20	0.15055±0.00243	6.29453±0.10033	0.30426±0.00401	2.346±12	2.018±14	1.712±20	279	266	1.05	107								
180-21	0.07825±0.00183	2.10216±0.04736	0.19485±0.00315	1.153±22	1.150±16	1.148±17	550	560	0.98	100								
180-22	0.16824±0.00257	11.39633±0.19689	0.49129±0.00707	2.542±12	2.552±15	2.568±28	39	73	0.54	101								
180-23	0.06997±0.00094	1.50597±0.02016	0.15611±0.00203	927±12	933±8	935±11	137	238	0.58	100								
180-24	0.17414±0.00210	11.88033±0.14112	0.49483±0.00612	2.598±9	2.595±11	2.592±26	129	117	1.10	100								
180-25	0.06971±0.00115	1.40141±0.02249	0.14582±0.00187	920±15	890±10	877±11	154	492	0.31	101								
180-26	0.11479±0.00187	4.98936±0.09095	0.31516±0.0046	1.878±16	1.822±13	1.778±26	33	240	0.14	94								
180-27	0.07488±0.00170	1.89548±0.04179	0.18365±0.00272	1.065±22	1.080±15	1.087±15	49	63	0.78	98								
180-28	0.18873±0.00259	13.47204±0.18020	0.51778±0.00709	2.732±10	2.716±15	2.636±23	89	95	0.93	102								
180-29	0.07694±0.00123	2.09451±0.03617	0.19741±0.00267	1.120±16	1.147±12	1.161±14	772	291	1.59	104								
180-30	0.07710±0.00124	2.07218±0.03549	0.19495±0.00257	1.124±16	1.140±12	1.148±14	217	176	0.41	102								
180-31	0.09935±0.00111	3.90625±0.03644	0.28505±0.00442	1.612±21	1.615±8	1.617±22	89	111	0.80	98								
180-32	0.06914±0.00086	1.44049±0.01527	0.15103±0.00235	903±23	906±6	907±13	35	736	0.05	100								
180-33	0.10229±0.00158	4.17323±0.06366	0.29589±0.00387	1.666±13	1.666±12	1.671±19	213	287	0.74	100								
180-34	0.09967±0.00105	3.88285±0.03258	0.28258±0.00419	1.618±20	1.610±7	1.604±21	39	164	0.02	100								
180-35	0.16010±0.00163	10.20770±0.08934	0.46251±0.00682	2.455±17	2.454±7	2.452±28	182	348	0.41	100								
180-36	0.07572±0.00234	1.46760±0.04323	0.14062±0.00219	1.088±35	917±18	848±12	293	1273	0.23	108								
180-37	0.06970±0.00096	1.50726±0.02020	0.15687±0.00205	920±12	933±8	939±11	327	543	0.60	99								
180-38	0.07388±0.00138	1.71558±0.03339	0.16843±0.00231	1.038±19	1.014±12	1.003±13	405	480	0.20	97								
180-39	0.07061±0.00141	1.40622±0.02893	0.14444±0.00205	946±21	892±12	870±12	342	634	1.07	92								
180-40	0.09469±0.00254	3.40127±0.08619	0.26055±0.00397	1.522±26	1.505±20	1.493±20	143	101	1.41	102								

续表 1

点位	同位素比值			年龄(Ma)			$^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}$
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$			
样品 184, 黑云斜长片麻岩 ( $42^{\circ}19'23''\text{N}, 88^{\circ}24'30''\text{E}$ )									
184-1	0.05942 ± 0.0085	1.40993 ± 0.01987	0.14733 ± 0.00186	9.11 ± 13	893 ± 8	886 ± 10	228	1.107	0.21
184-2	0.07349 ± 0.00121	1.75088 ± 0.03120	0.17280 ± 0.00251	1.027 ± 16	1.027 ± 12	1.028 ± 14	315	275	1.15
184-3	0.17460 ± 0.00167	11.08161 ± 0.10801	0.46038 ± 0.00567	2.602 ± 9	2.550 ± 9	2.441 ± 25	213	292	0.73
184-4	0.18524 ± 0.00451	9.58432 ± 0.22229	0.37543 ± 0.00546	2.700 ± 20	2.396 ± 21	2.055 ± 26	209	251	0.83
184-5	0.07629 ± 0.00113	2.05174 ± 0.03316	0.19508 ± 0.00256	1.103 ± 15	1.133 ± 11	1.149 ± 14	128	87	0.97
184-6	0.07552 ± 0.00145	1.73580 ± 0.03428	0.16678 ± 0.00228	1.082 ± 20	1.022 ± 13	0.994 ± 13	456	572	0.68
184-7	0.07166 ± 0.00109	1.61242 ± 0.02636	0.16328 ± 0.00212	9.76 ± 15	9.75 ± 10	9.75 ± 12	245	165	0.34
184-8	0.07347 ± 0.00212	1.71973 ± 0.04702	0.16980 ± 0.00241	1.027 ± 19	1.016 ± 18	1.011 ± 13	42	393	0.11
184-9	0.15584 ± 0.00443	9.70157 ± 0.24112	0.45158 ± 0.00927	2.414 ± 22	2.410 ± 23	2.404 ± 33	130	73	1.79
184-10	0.15012 ± 0.00465	9.13397 ± 0.27665	0.44135 ± 0.00958	2.349 ± 23	2.351 ± 16	2.355 ± 39	102	104	0.98
184-11	0.13720 ± 0.00130	6.89483 ± 0.06761	0.36452 ± 0.00462	2.192 ± 10	2.098 ± 9	2.004 ± 22	307	437	0.70
184-12	0.09758 ± 0.00157	3.69835 ± 0.05783	0.27492 ± 0.00363	1.578 ± 13	1.571 ± 12	1.566 ± 18	931	244	3.82
184-13	0.15344 ± 0.00184	7.27669 ± 0.08734	0.34398 ± 0.00446	2.387 ± 11	2.142 ± 12	1.910 ± 19	225	257	0.87
184-14	0.10695 ± 0.00108	4.59583 ± 0.03778	0.31152 ± 0.00473	1.748 ± 19	1.749 ± 7	1.748 ± 23	304	511	0.59
184-15	0.03287 ± 0.00147	3.33559 ± 0.04653	0.26041 ± 0.00439	1.485 ± 29	1.489 ± 11	1.492 ± 22	238	196	1.22
184-16	0.09766 ± 0.00123	3.75926 ± 0.04006	0.27907 ± 0.00438	1.580 ± 524	1.584 ± 9	1.587 ± 22	151	90	1.68
184-17	0.14227 ± 0.00136	6.45540 ± 0.04767	0.32902 ± 0.00482	2.255 ± 17	2.040 ± 6	1.834 ± 23	20	214	0.09
184-18	0.07052 ± 0.00084	1.54318 ± 0.01859	0.15873 ± 0.00211	9.44 ± 12	9.48 ± 7	9.50 ± 12	168	355	0.47
184-19	0.10093 ± 0.00327	4.02082 ± 0.12512	0.28889 ± 0.00523	1.641 ± 38	1.638 ± 25	1.636 ± 26	219	239	0.92
184-20	0.08193 ± 0.00203	2.03233 ± 0.04803	0.17990 ± 0.00236	1.244 ± 30	1.126 ± 16	1.066 ± 13	44	290	0.15
184-21	0.10373 ± 0.00353	4.23428 ± 0.13925	0.29602 ± 0.00563	1.692 ± 32	1.681 ± 27	1.672 ± 28	392	834	0.47
184-22	0.10946 ± 0.00225	4.77693 ± 0.09487	0.31654 ± 0.00501	1.790 ± 17	1.781 ± 17	1.773 ± 25	134	98	1.37
184-23	0.03803 ± 0.00242	3.77117 ± 0.03505	0.27906 ± 0.00467	1.587 ± 47	1.587 ± 20	1.587 ± 24	99	52	1.93
184-24	0.09757 ± 0.00174	3.73944 ± 0.07246	0.27797 ± 0.00416	1.578 ± 34	1.580 ± 16	1.581 ± 21	56	80	0.70
184-25	0.11759 ± 0.00199	5.63954 ± 0.10323	0.34783 ± 0.00523	1.920 ± 15	1.922 ± 16	1.924 ± 25	86	885	0.10
184-26	0.10833 ± 0.00172	4.64470 ± 0.08057	0.31100 ± 0.00433	1.772 ± 14	1.757 ± 14	1.746 ± 21	458	808	0.57
184-27	0.09629 ± 0.00166	3.58856 ± 0.00532	0.27034 ± 0.00367	1.553 ± 16	1.547 ± 14	1.543 ± 19	192	142	1.36
184-28	0.07204 ± 0.00103	1.57536 ± 0.02454	0.15863 ± 0.00204	987 ± 14	961 ± 10	949 ± 11	186	202	0.74
184-29	0.08814 ± 0.00199	2.57184 ± 0.05787	0.21171 ± 0.00311	1.386 ± 23	1.293 ± 16	1.238 ± 16	209	237	0.11
184-30	0.21301 ± 0.00244	17.04614 ± 0.19712	0.58057 ± 0.00773	2.930 ± 9	2.935 ± 10	2.949 ± 29	48	90	0.53
184-31	0.07253 ± 0.00871	1.61718 ± 0.02255	0.16170 ± 0.00206	1.001 ± 13	0.977 ± 9	0.966 ± 11	383	891	0.43
184-32	0.06909 ± 0.00110	1.52658 ± 0.02394	0.16032 ± 0.00215	9.01 ± 14	9.41 ± 10	9.59 ± 12	166	209	0.79
184-33	0.10086 ± 0.00188	3.95758 ± 0.07630	0.28457 ± 0.00397	1.640 ± 17	1.626 ± 16	1.614 ± 20	57	147	0.39
184-34	0.07262 ± 0.00111	1.63540 ± 0.02719	0.16335 ± 0.00216	1.003 ± 15	0.984 ± 10	0.975 ± 12	230	196	1.18
184-35	0.15772 ± 0.00382	9.28405 ± 0.21943	0.42662 ± 0.00693	2.334 ± 22	2.370 ± 21	2.294 ± 28	21	21	1.02
184-36	0.06568 ± 0.00287	1.23216 ± 0.05178	0.13607 ± 0.00257	7.96 ± 57	8.15 ± 24	8.22 ± 15	40	78	0.51
184-37	0.10669 ± 0.00149	4.45154 ± 0.07050	0.30264 ± 0.00406	1.744 ± 13	1.722 ± 13	1.704 ± 20	153	379	0.65
184-38	0.15097 ± 0.00351	7.80605 ± 0.13689	0.37500 ± 0.00513	2.353 ± 36	2.213 ± 19	2.052 ± 23	271	279	0.26
184-39	0.06569 ± 0.00763	9.91830 ± 0.09592	0.10136 ± 0.00391	7.97 ± 155	6.61 ± 51	6.22 ± 23	66	261	0.25
184-40	0.16175 ± 0.00308	10.23621 ± 0.20295	0.45862 ± 0.00640	2.474 ± 16	2.433 ± 28	2.432	317	1.36	1.02

和谐

续表1

点位	同位素比值			年龄(Ma)			$^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
样品 691, 杂砂质千枚岩 (42°51'51"N, 86°26'17"E)											
691-1	0.16272±0.00181	10.51614±0.09631	0.46907±0.00713	2.486±17	2.483±10	2.480±28	165	329	0.50	100	
691-2	0.17056±0.00172	11.47356±0.08918	0.48828±0.00712	2.562±17	2.557±9	2.561±27	336	148	0.31	97	
691-3	0.26314±0.00515	23.89114±0.49318	0.65868±0.01747	3.263±30	3.263±23	3.261±33	560	732	0.76	100	
691-4	0.12286±0.00287	6.12596±0.15841	0.36182±0.01003	1.998±39	1.994±23	1.991±34	496	1225	0.41	100	
691-5	0.03658±0.00274	3.65395±0.01056	0.27450±0.00750	1.55953	1.561±23	1.561±38	199	242	0.82	100	
691-6	0.08452±0.00200	1.85123±0.03744	0.15885±0.00195	1.305±47	1.064±13	950±11	83	408	0.20	112	
691-7	0.11211±0.00104	5.10403±0.03722	0.33005±0.00492	1.834±17	1.837±6	1.839±24	107	234	0.46	99	
691-8	0.07043±0.00158	1.54561±0.03538	0.15918±0.00232	941±24	949±14	952±13	141	281	0.50	100	
691-9	0.07232±0.00085	1.62837±0.01621	0.16322±0.00251	995±23	981±6	975±14	226	498	0.45	98	
691-10	0.09677±0.00148	3.77994±0.06216	0.28335±0.00370	1.563±14	1.588±13	1.608±19	232	294	0.79	97	
691-11	0.07894±0.00216	2.14680±0.05822	0.19714±0.00318	1.171±29	1.164±19	1.160±17	84	224	0.38	101	
691-12	0.11138±0.00189	5.02454±0.08959	0.32725±0.00430	1.822±15	1.823±15	1.825±21	230	508	0.45	100	
691-13	0.20916±0.00229	13.09595±0.11911	0.45488±0.00706	2.897±17	2.685±10	2.423±29	107	232	0.46	100	
691-14	0.07853±0.00186	1.767971±0.04127	0.16331±0.00228	1.160±25	1.034±15	1.034±15	194	292	0.66	106	
691-15	0.11961±0.00125	5.84415±0.04872	0.35439±0.00531	1.950±19	1.953±7	1.956±25	227	138	1.65	99	
691-16	0.03629±0.00238	3.38920±0.08600	0.25536±0.00397	1.553±25	1.502±20	1.466±20	478	576	0.83	106	
691-17	0.11609±0.00128	5.45976±0.04911	0.34111±0.00515	1.897±20	1.894±8	1.892±25	73	672	0.11	98	
691-18	0.10278±0.00205	3.84503±0.07921	0.27143±0.00400	1.675±18	1.602±17	1.548±20	136	59	2.31	108	
691-19	0.09514±0.00178	3.50141±0.07379	0.26699±0.00689	1.531±36	1.528±17	1.526±33	195	754	0.26	100	
691-20	0.07535±0.00113	1.90157±0.03053	0.18310±0.00231	1.078±15	1.082±11	1.084±13	1321	1038	1.27	99	
691-21	0.07092±0.00341	1.62340±0.07580	0.16591±0.00338	955±62	957±29	990±19	46	30	1.55	99	
691-22	0.10349±0.00233	4.07754±0.08937	0.28565±0.00386	1.688±22	1.650±18	1.620±19	187	149	1.26	104	
691-23	0.07848±0.00594	1.75770±0.12891	0.16209±0.00465	1.159±100	1.030±47	968±26	61	1091	0.06	106	
691-24	0.10525±0.00163	4.18753±0.07013	0.28863±0.00384	1.719±14	1.672±14	1.635±19	129	115	1.13	105	
691-25	0.03658±0.00188	1.58049±0.03405	0.11871±0.00306	1.559±37	963±13	723±18	109	1049	0.10	75	
691-26	0.06613±0.00147	1.21035±0.02896	0.13278±0.00345	810±38	805±13	804±20	443	898	0.49	100	
691-27	0.07463±0.00112	1.71861±0.02796	0.16709±0.00216	1.059±15	1.016±10	996±12	238	308	0.77	102	
691-28	0.06973±0.00117	1.43029±0.02496	0.14879±0.00191	920±17	902±10	894±11	181	299	0.61	101	
691-29	0.04605±0.00175	0.87201±0.03298	0.13748±0.00442	830±23	637±17	830±25	244	505	0.48	130	
691-30	0.11290±0.00176	5.11402±0.08058	0.32852±0.00389	1.847±13	1.838±13	1.831±19	77	282	0.27	101	
691-31	0.06384±0.00086	1.07544±0.01573	0.12216±0.00150	736±14	741±8	743±9	38	582	0.07	100	
691-32	0.19016±0.00371	13.91136±0.30721	0.53071±0.01405	2.741±31	2.742±22	2.743±31	487	788	0.62	100	
691-33	0.06868±0.00163	1.40026±0.03580	0.14791±0.00398	889±43	889±15	889±22	51	646	0.08	100	
691-34	0.16422±0.00298	10.22268±0.18451	0.45148±0.00584	2.501±16	2.456±16	2.405±23	72	64	1.13	104	
691-35	0.09664±0.00176	3.64406±0.07598	0.27355±0.00711	1.560±35	1.559±17	1.559±36	26	2483	0.01	100	
691-36	0.03680±0.00231	3.31574±0.07812	0.24840±0.00337	1.563±25	1.485±18	1.430±17	477	477	0.41	109	
691-37	0.25514±0.00728	22.24427±0.62044	0.63261±0.00942	3.213±23	3.197±23	3.164±33	151.598	71	0.68	102	
691-38	0.15551±0.00304	9.69405±0.21411	0.45220±0.01196	2.407±34	2.406±20	2.405±33	272	734	0.37	100	
691-39	0.07543±0.00211	1.88492±0.05477	0.18128±0.00497	1.080±37	1.076±19	1.074±27	192	389	0.49	100	
691-40	0.07189±0.00047	1.66182±0.01242	0.16695±0.00072	983±14	994±5	995±4	1.107.092	5	2.251	100	
691-41	0.07645±0.00137	1.96547±0.04029	0.18651±0.00479	1.107±37	1.104±14	1.102±26	649	1768	0.37	100	
691-42	0.07863±0.00081	2.22977±0.02558	0.20404±0.00086	1.168±21	1.190±8	1.197±5	734.203	25	583	1.26	98
691-43	0.26314±0.00515	23.89114±0.53168	0.65868±0.01747	3.261±30	3.262±24	3.261±36	560	732	0.76	100	
691-44	0.08104±0.00234	2.32893±0.06502	0.20559±0.00361	1.222±29	1.221±20	1.221±19	167	135	1.23	100	
691-45	0.08724±0.00216	2.80090±0.066817	0.23280±0.003557	1.366±18	1.349±19	1.349±19	145	195	0.74	101	

续表 1

点位	同位素比值			年龄(Ma)			$^{232}\text{Th}/(10^{-6})$	$^{238}\text{U}/(10^{-6})$	$\text{Th/U}$	和谐
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$				
样品 726, 粗砂质板岩( $42^{\circ}46'18''\text{N}, 86^{\circ}19'06''\text{E}$ )										
726-1	0.156 72±0.004 49	9.246 76±0.043 12	0.428 49±0.012 76	2.424±21	2.353±26	2.303±28	153	518	0.29	97
726-2	0.168 50±0.009 67	11.293 79±0.612 06	0.486 99±0.011 96	2.543±58	2.518±51	2.558±52	4	89	0.05	99
726-3	0.104 39±0.001 07	4.330 21±0.051 12	0.300 92±0.002 71	1.704±19	1.699±8	1.696±13	652	671	0.97	100
726-4	0.056 76±0.001 02	1.285 67±0.019 41	0.139 75±0.001 99	830±14	839±9	843±11	2.916	2.043	1.43	100
726-5	0.070 78±0.001 54	1.488 18±0.031 15	0.152 50±0.002 06	951±22	926±13	915±12	218	294	0.74	101
726-6	0.076 14±0.001 55	1.943 39±0.043 58	0.185 15±0.004 81	1.099±34	1.095±15	1.095±26	292	672	0.43	100
726-7	0.074 88±0.001 70	1.895 48±0.041 79	0.183 65±0.002 72	1.065±22	1.080±15	1.087±15	49	63	0.78	98
726-8	0.158 73±0.002 59	13.472 04±0.180 20	0.517 78±0.007 09	2.735±15	2.717±16	2.696±26	89	95	0.93	102
726-9	0.076 86±0.001 74	2.004 54±0.049 67	0.189 20±0.005 09	1.118±43	1.117±17	1.117±28	575	648	0.89	100
726-10	0.147 43±0.001 60	5.805 88±0.033 19	0.285 70±0.003 64	2.318±11	1.948±11	1.613±21	198	675	0.29	143
726-11	0.070 33±0.001 42	1.517 87±0.029 32	0.156 59±0.002 29	9.38±19	9.38±12	9.38±13	462	526	0.88	100
726-12	0.082 37±0.002 45	2.432 31±0.069 51	0.214 14±0.003 23	1.254±30	1.252±21	1.251±17	463	752	0.62	100
726-13	0.067 27±0.001 42	1.340 35±0.026 90	0.144 52±0.001 98	846±21	863±12	870±11	158	209	0.76	99
726-14	0.105 73±0.001 68	4.484 12±0.088 48	0.307 56±0.003 38	1.727±30	1.728±13	1.729±17	168	635	0.26	100
726-15	0.109 33±0.001 74	4.743 07±0.072 83	0.314 69±0.004 12	1.788±13	1.775±13	1.764±20	167	165	1.01	101
726-16	0.117 15±0.003 32	5.560 28±0.163 23	0.344 72±0.010 17	1.913±22	1.910±27	1.909±29	133	338	0.39	100
726-17	0.068 47±0.000 99	1.339 29±0.019 20	0.141 87±0.001 89	883±13	863±8	855±11	145	173	0.84	101
726-18	0.072 35±0.001 27	1.588 29±0.027 93	0.159 21±0.001 97	996±17	966±11	952±11	114	391	0.29	101
726-19	0.138 68±0.001 53	5.922 89±0.005 44	0.309 77±0.003 95	2.211±10	1.965±10	1.740±19	106	116	0.91	127
726-20	0.156 77±0.011 34	9.942 50±0.670 05	0.459 40±0.017 47	2.421±64	2.429±62	2.437±77	18	24	0.75	99
726-21	0.114 31±0.003 89	3.650 33±0.114 72	0.231 61±0.003 04	1.869±63	1.561±25	1.313±16	181	335	0.54	139
726-22	0.072 22±0.001 05	1.601 90±0.022 92	0.160 87±0.002 10	992±13	971±9	962±12	211	363	0.58	101
726-23	0.087 26±0.001 67	2.826 29±0.051 33	0.234 88±0.002 69	1.366±38	1.363±14	1.360±14	184	298	0.62	100
726-24	0.094 63±0.001 91	3.467 65±0.071 93	0.265 80±0.003 72	1.521±39	1.520±16	1.519±19	310	566	0.55	100
726-25	0.067 66±0.001 20	1.248 45±0.022 54	0.133 85±0.001 72	858±18	823±10	810±10	697	625	1.12	102
726-26	0.248 30±0.006 04	21.655 36±0.501 55	0.632 13±0.009 24	3.173±19	3.168±22	3.158±36	138	508	0.27	101
726-27	0.064 13±0.001 85	1.084 94±0.031 20	0.122 71±0.001 65	746±32	746±14	746±9	19	376	0.05	100
726-28	0.107 74±0.002 86	4.649 80±0.120 91	0.313 05±0.005 12	1.762±51	1.758±22	1.756±25	72	165	0.44	100
726-29	0.074 35±0.001 10	1.777 89±0.026 11	0.173 48±0.002 34	1.051±13	1.037±10	1.031±13	136	149	0.92	102
726-30	0.095 43±0.000 91	3.554 51±0.030 86	0.270 12±0.002 29	1.537±18	1.539±7	1.541±12	159	752	0.21	100
726-31	0.075 38±0.001 49	1.648 03±0.031 45	0.158 58±0.002 14	1.079±19	988±12	949±12	25	1076	0.02	104
726-32	0.117 53±0.002 42	5.627 98±0.123 88	0.347 29±0.005 46	1.919±38	1.920±19	1.922±26	197	283	0.70	100
726-33	0.105 91±0.004 67	4.317 08±0.181 15	0.295 58±0.006 34	1.730±46	1.697±35	1.669±32	16	14	1.12	104
726-34	0.157 96±0.006 06	9.212 37±0.336 14	0.423 11±0.009 28	2.434±33	2.359±33	2.275±42	3	8	0.41	107
726-35	0.073 81±0.003 13	1.817 97±0.072 83	0.178 62±0.003 41	1.036±45	1.052±26	1.059±19	106	177	0.60	99
726-36	0.183 86±0.002 78	13.102 19±0.212 58	0.517 01±0.006 81	2.682±13	2.685±17	2.684±23	110	88	1.29	100
726-37	0.116 70±0.001 73	5.505 04±0.088 87	0.342 17±0.004 46	1.906±13	1.901±14	1.897±21	701	1191	0.69	100
726-38	0.071 79±0.000 94	1.568 35±0.023 41	0.158 43±0.002 06	980±14	958±9	948±11	492	291	1.69	97
726-39	0.077 14±0.002 57	1.997 11±0.005 11	0.187 83±0.003 35	1.125±33	1.115±22	1.110±18	189	145	1.31	99
726-40	0.071 57±0.001 11	1.567 22±0.043 80	0.158 82±0.002 06	974±14	957±10	950±11	261	344	0.76	98

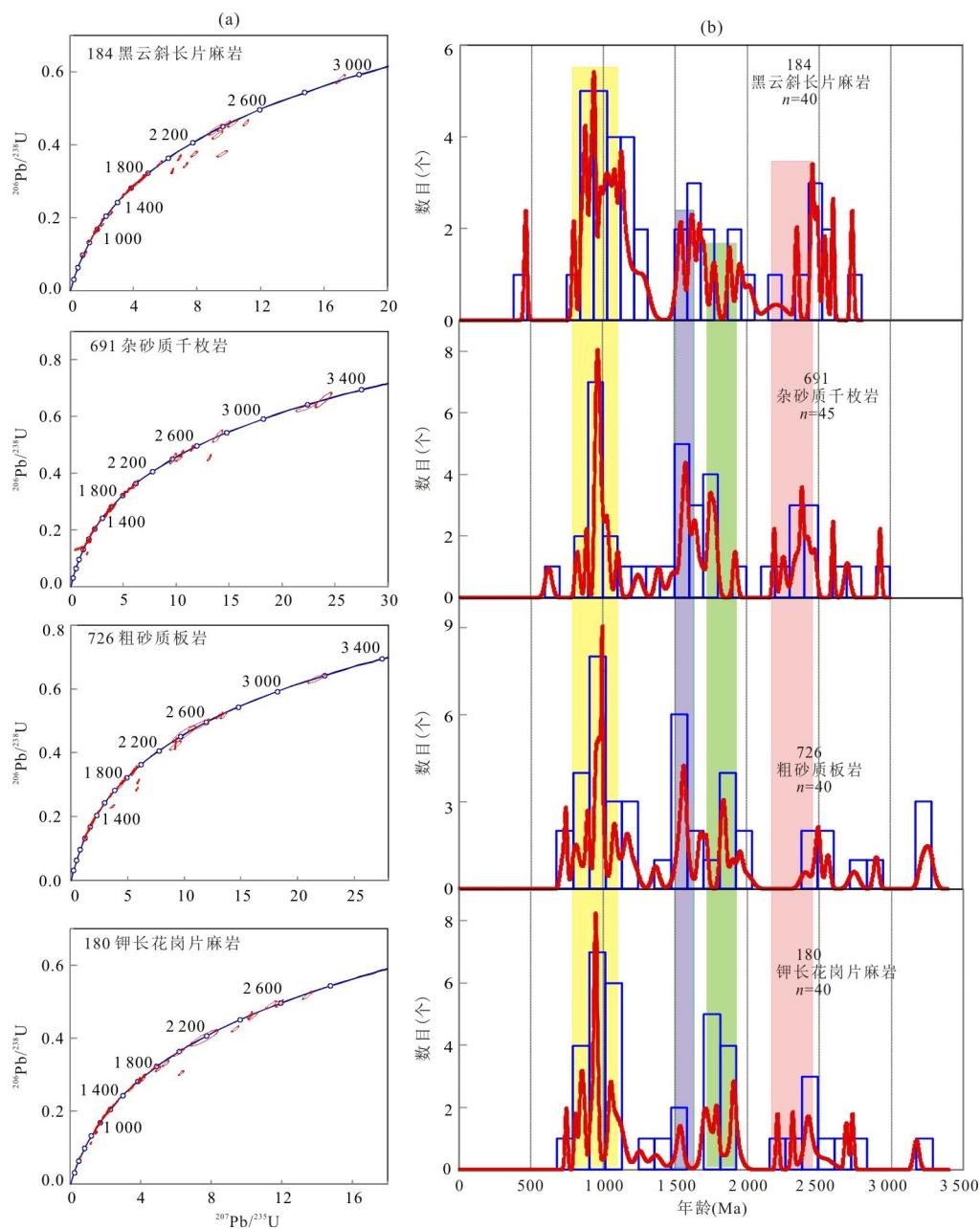


图 6 四件样品碎屑锆石的 U-Pb 谱和图(a)和年龄直方图(b)

Fig.6 Concordia diagrams (a) and distributions (b) of zircon U-Pb ages from the four samples

2 380 Ma. 该样品还获得了蚀源区为太古代岩石的 3 组锆石年龄信息 (2 602±9 Ma、2 700±20 Ma、2 930±9 Ma), 为半自形、具振荡环带的锆石. 其中, 锆石 184-30 的测年值 2 930 Ma 是出现在干沟地区最老源区岩石的信息.

杂砂质千枚岩样 691: 该样品采自巴仑台北侧近东西走向的阿拉沟, 锆石以自形一半自形的长柱状为主, 部分锆石呈浑圆形、不规则状. 锆石的粒径为 80~200 μm, 以 100~150 μm 者居多. 45 颗锆石中, CL 发光强度中等偏暗, 振荡环带发育; 有 18 颗

锆石具有核一环构造, 但 CL 亮边较窄, 无法测年. 除 2 颗年龄值 743±9 Ma、723±18 Ma 的锆石之外, 主要分布在 860~2 550 Ma. 在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  投影图上, 所有数据均落在谐和线上或附近(图 6a); 在年龄频率直方图中(图 6b), 可分出 4 个年龄区间, 分别是 860~1 150 Ma(峰值为 980 Ma)、1 460~1 700 Ma(峰值为 1 560 Ma)、1 800~1 960 Ma(峰值为 1 850 Ma) 和 2 450~2 550 Ma(峰值为 2 500 Ma). 本样品测得蚀源区为太古代岩石的 5 组半自形锆石年龄, 其中大于

3.0 Ga 的 3 组, 分别是  $2\ 741 \pm 31$  Ma、 $2\ 897 \pm 17$  Ma、 $3\ 213 \pm 23$  Ma、 $3\ 261 \pm 30$  Ma、 $3\ 263 \pm 30$  Ma, 揭示巴仑台地下深部可能存在太古代的地壳物质。

粗砂质板岩样 726: 该样品采自巴仑台北侧, 镍石以半自形的长柱状为主, 粒径以  $100\sim160\ \mu\text{m}$  者居多, 40 颗镍石中, CL 发光强度中等偏暗, 振荡环带发育; 有 15 颗镍石发育窄亮边的核—环构造。除 1 颗年龄值  $746 \pm 9$  Ma 的镍石之外, 其余镍石的年龄主要分布在  $850\sim2\ 480$  Ma。在  $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} - ^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  投影图上, 所有数据均落在谐和线上或附近(图 6a); 在年龄频率直方图中(图 6b), 集中在 4 个年龄区间, 分别是  $850\sim1\ 040$  Ma(峰值为 950 Ma)、 $1\ 500\sim1\ 600$  Ma(峰值为 1 550 Ma)、 $1\ 720\sim1\ 950$  Ma(峰值为 1 920 Ma) 和  $2\ 230\sim2\ 480$  Ma(峰值为 2 430 Ma)。该样品测得 3 颗年龄值为太古代的半自形镍石, 分别是  $2\ 682 \pm 13$  Ma、 $2\ 735 \pm 15$  Ma、 $3\ 173 \pm 19$  Ma, 表明巴仑台基底具有太古代地壳的亲缘性。

上述定年结果表明, 中天山干沟和巴仑台阿拉沟的变质岩记录了多期前寒武纪构造—岩浆活动与演化信息。

## 4 结果解释及讨论

### 4.1 综合年龄谱特征

将上述 4 件样品的所有镍石 U-Pb 数据整合在一个投影图上(图 7), 则发生在中天山地区的构造—岩浆活动信息及其演化规律就显得更加明显。除 6 颗镍石小于 8 亿年、12 颗镍石大于 26 亿年外, 165 组谐和年龄数据(147 组, 占 89.1%)源自 0.8~

2.6 Ga 的古元古代—新元古代早期形成的岩石; 主要集中在 4 个时间段, 分别是:  $850\sim1\ 080$  Ma(峰值为 952 Ma)、 $1\ 500\sim1\ 630$  Ma(峰值为 1 550 Ma)、 $1\ 700\sim2\ 000$  Ma(峰值为 1 920 Ma) 和  $2\ 400\sim2\ 600$  Ma(峰值为 2 480 Ma)。分析对比认为,  $2\ 400\sim2\ 600$  Ma 相当于地球早期造陆事件的时间,  $1\ 700\sim2\ 000$  Ma 很可能与全球哥伦比亚超大陆的聚合事件密切关联,  $1\ 500\sim1\ 630$  Ma 对应于哥伦比亚超大陆裂解事件的时间, 而  $850\sim1\ 080$  Ma 则是全球 Rodinia 超大陆聚合的特征年龄值。

值得注意的是, 本次研究除了获得  $2\ 602\sim3\ 263$  Ma 的 12 组年龄数据、揭示中天山地区接受了来自太古代基底源区剥蚀搬运的物质组分外, 还发现了 4 组晚于原岩时代(青白口纪)、与 Rodinia 超大陆裂解事件有关( $793\sim723$  Ma), 以及 1 组与泛非事件(622 Ma)有关、1 组与早古生代构造事件(459 Ma)有关的年代学信息, 其测年谐和度高, 数据可靠, 区域上均有对应的地质体和岩浆岩分布, 是中天山在新元古代晚期和早古生代遭受了 3 期构造—岩浆活动再造的有力证据。

### 4.2 中天山块体与塔木陆块连接的证据: 前寒武纪年龄谱对比

结合上述对塔北缘库鲁克塔格块体地质情况的描述的和前人的研究成果, 库鲁克塔格是塔里木陆块的一个重要单元, 两者基底是相连一致的(邓兴梁等, 2008; Shu *et al.*, 2011)。换言之, 塔里木陆块出露了从 2.8 Ga 的 TTG 组合岩浆岩(Zhang *et al.*, 2013)到 2.5 Ga 的变质闪长岩和片麻状花岗岩(Shu *et al.*, 2011)、1.9 Ga 的花岗质片麻岩(Shu *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2011)和含金蓝石英花岗岩(Lei *et al.*, 2012)再到 1.0~0.9 Ga 的片麻状花岗岩和面理化花岗岩(Shu *et al.*, 2011)和 0.8~0.7 Ga 的双峰式岩浆岩(Zhang *et al.*, 2007; Shu *et al.*, 2011), 表明它是一个典型的古大陆克拉通。相似地, 在中天山地块上, 也有 2.5 Ga 的古老岩石, 并叠加 1.8 Ga 的角闪岩相变质作用(Wang *et al.*, 2017), 1.0~0.9 Ga 的花岗片麻岩(Huang *et al.*, 2013, 2015)和 0.8~0.7 Ga 的辉长岩和花岗质岩墙(Gao *et al.*, 2015)。在镍石 U-Pb 年龄谱上(图 8), 除了中天山块体因出露地层及采样岩石都老于南华纪而缺少 0.8 Ga 峰期构造—岩浆活动记录外, 它的年龄谱以及 4 期构造—岩浆活动的时间峰值 950 Ma、1 550 Ma、1 920 Ma 和 2 480 Ma 均能与库鲁克塔格块体很好对比(图 8a 和 8d), 推测中天山

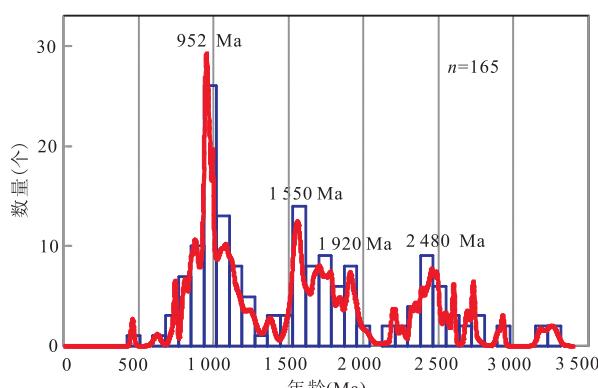


图 7 中天山碎屑镍石 U-Pb 年龄谱

Fig.7 The distributions of zircon U-Pb ages from metamorphic rock samples in the Central Tianshan

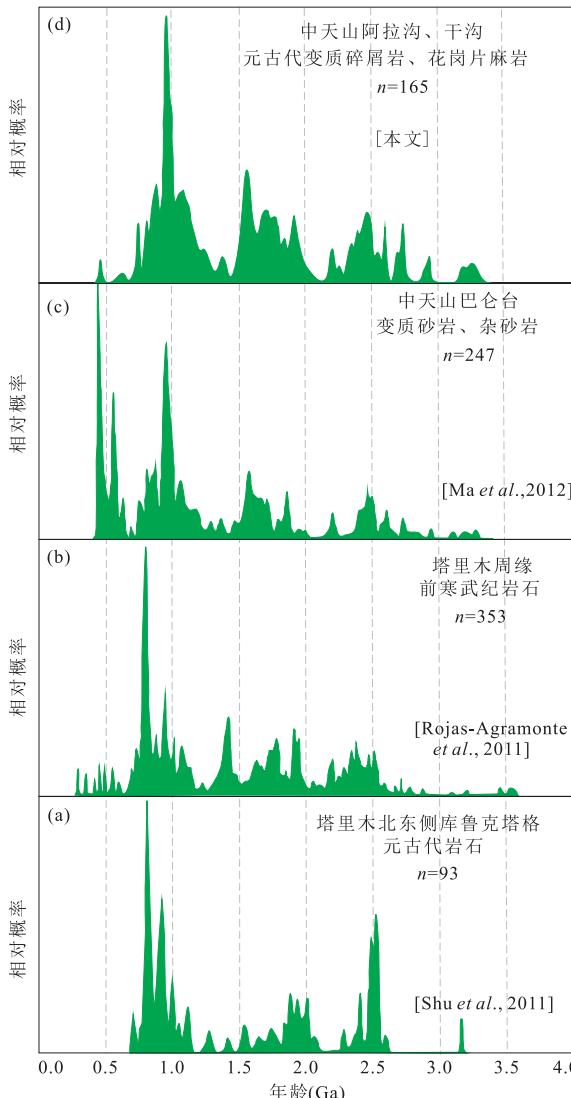


图8 中天山、塔里木北东缘以及新疆其他地区前寒武纪年龄谱对比

Fig. 8 Precambrian age distributions from the Central Tianshan (this study), the northeastern Tarim and other areas in Xinjiang

地块本身和其南侧的塔里木陆块是产生这些年龄数据碎屑锆石的蚀源;根据大部分碎屑锆石呈半自形甚至自形、较少磨圆的形态学特征,认为它们属近源搬运产物。一些学者(Shu *et al.*, 2011; Zhu *et al.*, 2011)通过区域地质与岩浆岩发育的分析对比,提出塔里木陆块在 830 Ma 开始发生裂解,导致中天山块体不断朝北拉张运移,进而在两者之间形成早古生代南天山边缘海。

#### 4.3 中天山块体与塔里木周缘地区前寒武纪年龄谱的对比

通过收集和分析近年发表的有关中天山和塔里木前寒武纪地质体高质量测年数据(Xu *et al.*,

2005, 2009; Rojas-Agramonte *et al.*, 2011; Shu *et al.*, 2011; Ma *et al.*, 2014),大致可以在新疆地区圈定出几个元古代古陆残块的露头范围,即分布于塔里木周缘的库鲁克塔格、阿克苏、阿尔金、铁克里克等块体和中天山巴仑台—阿拉沟—干沟块体。这些块体具有一定范围,元古代岩石组合发育。其中,塔里木周缘块体出露的岩层要比中天山块体巴仑台、阿拉沟、干沟等区段的岩层时代更老,但碎屑锆石年龄谱基本一致。图8展示了本研究区(中天山阿拉沟、干沟)与塔里木克拉通周缘以及中天山巴仑台地区前寒武纪年龄谱的对比。从图8中可以看出,本研究区和这几个地区的年龄谱基本上是一致的。不仅峰值时间相似,而且源区时代下限(最老年龄)也基本相同,表明它们在前南华纪存在较好的亲缘性,均属同一块体,据此可以概略恢复并重建为一个更大的块体——原塔里木大陆。

不同的是本次青白口系碎屑锆石缺少约 800 Ma 裂解期的信息,推测正是这次裂解事件,造成了中天山与塔里木的大规模分离。但是,从巴仑台泥盆纪砂岩中得到的碎屑锆石 U-Pb 年龄谱,已经追踪到这个裂解期(峰值为 805 Ma)以及泛非期(峰值为 560 Ma)以及早古生代(峰值为 445 Ma)的构造—岩浆信息(Ma *et al.*, 2012);本研究获得的几组后期再造事件的数据(720~790 Ma, ~620 Ma, ~460 Ma)也支持这一认识。因此有理由推测,先前人们认为的中天山青白口纪的老地层,其内部可能存在新元古代中晚期甚至早古生代的地层或岩浆岩。

鉴于以下 3 点地质事实:(1)塔里木陆块太古代—早古生代地层连续,露头发育,震旦纪—早古生代沉积环境稳定,泥砂质沉积岩发育而火山岩罕见;(2)中天山块体发育古元古代—新元古代早期青白口纪岩层,青白口纪岩中碎屑锆石年龄谱与塔里木一致,缺失南华纪—寒武纪地层序列,而中天山奥陶纪中基性火山岩发育,具大陆弧特征,志留纪泥砂质复理石分布广,厚度大,经历了低绿片岩相变质作用,其上被早石炭世红色磨拉石不整合覆盖;(3)在塔里木和中天山之间发育一个志留纪—早泥盆世南天山洋壳盆地(红柳河—库米什—乌瓦门边缘海)(Jiang *et al.*, 2014),由蛇纹石化超镁铁质岩、基性熔岩、凝灰岩、硅质岩和碳酸盐岩组成,我们认为,发生在 830 Ma 以来的双峰式岩浆活动、多世代基性岩墙侵入作用,反映塔里木陆块北缘经历的一次漫长裂解事件。正是这一超岩石圈的裂解事件,致使中天山

向北裂离并形成南天山边缘海。到奥陶纪,中天山才变成活动大陆边缘的构造背景(沟—弧—盆体系)。

## 5 结论

(1)地层序列和岩石组合研究表明,塔里木北缘与中天山的中元古代—新元古代早期变质基底(长城系—青白口系)的组成和岩石组合特征基本相同,可以对比。塔里木北缘奥陶纪地层序列为稳定的浅海碳酸盐岩和泥砂质复理石,缺失志留纪地层,而中天山奥陶纪地层序列为中—基性火山岩组合,志留纪为泥砂质复理石组合,两者不能对比。

(2)从采自中天山阿拉沟和干沟的4件变质砂岩样品中,获得了165组碎屑锆石U-Pb年龄数据,从中产生了4个年龄峰值,分别为950 Ma、1 550 Ma、1 920 Ma和2 480 Ma,表明中天山岩石记录了前南华纪4次构造—岩浆活动信息。本研究还获得了少量太古代物质的记录,年龄为2 600~3 260 Ma。

(3)年龄谱对比表明,中天山块体前南华纪的年龄谱以及4期构造—岩浆活动的时间峰值均能与塔里木克拉通周缘块体以及中天山巴仑台区块很好对比,彼此之间具有明显的构造亲缘性。根据大部分碎屑锆石呈半自形甚至自形、较少磨圆的形态学特征,认为它们属近源搬运产物,推测中天山及其南侧的塔里木陆块是产生这些年龄数据碎屑锆石的蚀源区。

(4)结合区域构造分析,认为中天山陆块是在~800 Ma(南华纪)以来逐渐从塔里木克拉通拉张裂离出来的。正是这一超岩石圈的裂解事件,致使中天山向北裂离并形成南天山洋壳边缘海。到奥陶纪,中天山才变成活动大陆边缘的构造背景的沟—弧—盆体系。

**致谢:**特以此文纪念马杏垣教授诞辰100周年!感谢金振民院士对作者的撰文邀请!两位匿名审稿专家对本文提出修改意见和建议,制样与测年以及数据处理得到姚金龙博士的帮助,一并致谢!

## References

- Black, L.P., Kamo, S.L., Williams, I.S., et al., 2003. The Application of SHRIMP to Phanerozoic Geochronology: A Critical Appraisal of Four Zircon Standards. *Chemical Geology*, 200 (1~2): 171~188. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(03\)00166-9](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(03)00166-9)
- Charvet, J., Shu, L. S., Laurent-Charvet, S., 2007. Paleozoic Structural and Geodynamic Evolution of Eastern Tianshan (NW China): Welding of the Tarim and Junggar Plates. *Episodes*, 30(3): 162~186.
- Che, Z.C., Liu, H.F., Liu, L., et al., 1994. The Formation and Evolution of the Central Tianshan Orogenic Belt. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, Z.F., Liang, Y.H., 1985. Research on Several Problems of Structural Geology Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 3(2): 1~13 (in Chinese with English abstract).
- Deng, X. L., Shu, L. S., Zhu, W. B., et al., 2008. Precambrian Tectonism, Magmatism Deformation and Geochronology of Igneous Rocks in the Xingdi Fault Zone, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12): 2800~2808 (in Chinese with English abstract).
- Gao, J., Wang, X.S., Klemd, R., et al., 2015. Record of Assembly and Breakup of Rodinia in the Southwestern Altaids: Evidence from Neoproterozoic Magmatism in the Chinese Western Tianshan Orogen. *Journal of Asian Earth Sciences*, 113: 173~193. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.02.002>
- Griffin, W. L., Belousova, E. A., Shee, S. R., et al., 2004. Archean Crustal Evolution in the Northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-Isotope Evidence from Detrital Zircons. *Precambrian Research*, 131 (3~4): 231~282. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2003.12.011>
- Guo, J., Shu, L. S., Jaques, C., et al., 2002. Geochemical Features of the Two Early Paleozoic Ophiolitic Zones and Volcanic Rocks in the Central-Southern Tianshan Region, Xinjiang. *Chinese Journal of Geochemistry*, 21 (4): 308~321. <https://doi.org/10.1007/bf02831532>
- He, G.Q., Li, M.S., Liu, D.Q., et al., 1994. Paleozoic Crustal Evolution and Mineralization in Xinjiang of China. Xinjiang People's Publishing House, Urumqi (in Chinese).
- Hu, A.Q., Zhang, G.X., Zhang, Q.F., et al., 1999. Constraints on the Age of Basement and Crustal Growth in Tianshan Orogen by Nd Isotope Composition. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 29(2): 104~112 (in Chinese).
- Huang, B.T., He, Z.Y., Zong, K.Q., et al., 2013. Zircon U-Pb and Hf Isotopic Study of Neoproterozoic Granitic Gneisses from the Alatage Area, Xinjiang: Constraints on the Precambrian Crustal Evolution in the Central Tianshan Block. *Chinese Science Bulletin*, 59(1): 100~112. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-0010-y>
- Huang, Z. Y., Long, X. P., Kröner, A., et al., 2015. Neoproterozoic Granitic Gneisses in the Chinese Central Tianshan Block: Implications for Tectonic Affinity and Precambrian Crustal Evolution. *Precambrian Research*, 269: 73~89. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.08.005>

- Jahn, B.M., Windley, B., Natal'in, B., et al., 2004. Phanerozoic Continental Growth in Central Asia. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23(5): 599–603. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(03\)00124-x](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(03)00124-x)
- Jahn, B.M., Wu, F., Chen, B., 2000. Massive Granitoid Generation in Central Asian: Nd Isotope Evidence and Implication for Continental Growth in the Phanerozoic. *Episodes*, 23: 82–92.
- 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: 106–127. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.11.038>
- 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): 1009–1032. <https://doi.org/10.1029/2001tc901047>
- Lei, R.X., Wu, C.Z., Chi, G.X., et al., 2012. Petrogenesis of the Palaeoproterozoic Xishankou Pluton, Northern Tarim Block, Northwest China: Implications for Assembly of the Supercontinent Columbia. *International Geology Review*, 54(15): 1829–1842. <https://doi.org/10.1080/00206814.2012.678045>
- Li, J.Y., 1995. Main Characteristics and Emplacement Processes of the East Junggar Ophiolites, Xinjiang, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(Suppl.): 73–84 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., He, G.Q., Xu, X., et al., 2006. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation. *Acta Geologica Sinica*, 80(1): 148–168 (in Chinese with English abstract).
- Li, J.Y., Xiao, W.J., Wang, K.Z., et al., 2003. Neoproterozoic-Paleozoic Tectonostratigraphy, Magmatic Activities and Tectonic Evolution of Eastern Xinjiang, NW China, In: Mao, J.W., Goldfarb, Seltman, et al., eds., Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan. IAGOD Guidebook Series 10; CERCAM/NHM, London, 31–74.
- Li, J.Y., Xu, X., 2004. Major Problems on Geologic Structures and Metallogenesis of Northern Xinjiang, Northwest China. *Xinjiang Geology*, 22(2): 119–124 (in Chinese with English abstract).
- Ma, R.S., Shu, L.S., Sun, J.Q., 1997. Tectonic Evolution and Metallogeny of Eastern Tianshan Mountains. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Ma, R.S., Wang, C.Y., Ye, S.F., 1993. The Outline of Plate Tectonics and Crustal Evolution in the Eastern Tianshan Belt, China. Nanjing University Press, Nanjing (in Chinese).
- Ma, X.X., Shu, L.S., Meert, J.G., 2015. Early Permian Slab Break-off 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 Fingerprint of Precambrian Basement in the Chinese Central Tianshan: Evidence from Inherited/Xenocrystic Zircons of Magmatic Rocks. *Geological Magazine*, 152(1): 176–183. <https://doi.org/10.1017/s0016756814000314>
- Ma, X.X., Shu, L.S., Santosh, M., et al., 2012. 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>
- Möller, A., O'Brien, P.J., Kennedy, A., et al., 2003. Linking Growth Episodes of Zircon and Metamorphic Textures to Zircon Chemistry: An Example from the Ultrahigh-Temperature Granulites of Rogaland (SW Norway). *Geological Society, London, Special Publications*, 220(1): 65–81. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2003.220.01.04>
- Rojas-Agramonte, Y., Kröner, A., Demoux, A., et al., 2011. Detrital and Xenocrystic Zircon Ages from Neoproterozoic to Palaeozoic Arc Terranes of Mongolia: Significance for the Origin of Crustal Fragments in the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research*, 19(3): 751–763. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2010.10.004>
- Shi, Y.R., Liu, D.Y., Zhang, Q., et al., 2007. SHRIMP Zircon U-Pb Dating of the Gangou Granitoids, Central Tianshan Mountains, Northwest China and Tectonic Significances. *Chinese Science Bulletin*, 52(11): 1507–1516. <https://doi.org/10.1007/s11434-007-0204-2>
- Shu, L.S., Charvet, J., Lu, H.F., et al., 2010. Paleozoic Accretion-Collision Events and Kinematics of Ductile Deformation in the Eastern Part of the Southern-Central Tianshan Belt, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 76(3): 308–323. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2002.tb00547.x>
- Shu, L.S., Charvet, J., Ma, R.S., 1998. Study of a Large Scale Paleozoic Dextral Strike-Slip Ductile Shear Zone along the Northern Margin of the Central Tianshan, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 16(4): 326–336 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L.S., Deng, X.L., Zhu, W.B., et al., 2011. Precambrian Tectonic Evolution of the Tarim Block, NW China: New

- Geochronological Insights from the Quruqtagh Domain. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42 (5): 774 – 790. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.08.018>
- Shu, L. S., Lu, H. F., Yin, D. H., et al., 2001. Late Paleozoic Continental Accretionary Tectonics in Northern Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 19 (1): 59 – 63 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., Wang, B., Yang, F., et al., 2003. Polyphase Tectonic Events and Mesozoic-Cenozoic Basin-Range Coupling in the Chinese Tianshan Belt. *Acta Geologica Sinica*, 77 (4): 457 – 467.
- Shu, L. S., Wang, B., Zhu, W. B., 2007. Age of Radiolarian Fossils from the Heiyingshan Ophiolitic Mélange, Southern Tianshan Belt, NW China, and Its Tectonic Significance. *Acta Geologica Sinica*, 81 (9): 1161 – 1168, 1305 – 1306 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., Yu, J. H., Charvet, J., et al., 2004. Geological, Geochronological and Geochemical Features of Granulites in the Eastern Tianshan, NW China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24 (1): 25 – 41. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2003.07.002>
- Simon, E. J., Norman, J. P., William, L. G., 2004. The Application of Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to In-Situ U-Pb Zircon Geochronology. *Chemical Geology*, 211: 47 – 69.
- Wang, B., Shu, L. S., Faure, M., et al., 2007. Paleozoic Tectonics and Magmatism of Kekesu-Qiongkushitai Section in Southwestern Chinese Tianshan and Their Constraints on the Age of the Orogeny. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (6): 1354 – 1368 (in Chinese with English abstract).
- Wang, B., Shu, L. S., Faure, M., et al., 2014. Phanerozoic Multistage Tectonic Rejuvenation of the Continental Crust of the Cathaysia Block: Insights from Structural Investigations and Combined Zircon U-Pb and Mica  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology of the Granitoids in Southern Jiangxi Province. *The Journal of Geology*, 122 (3): 309 – 328. <https://doi.org/10.1086/675664>
- Wang, Q. C., Shu, L. S., Charvet, J., et al., 2010. Understanding and Study Perspectives on Tectonic Evolution and Crustal Structure of the Paleozoic Chinese Tianshan: Report on the International Excursion and Workshop, Urumqi, China. *Episodes*, 33 (4): 242 – 265.
- 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>
- Wu, F. Y., Yang, Y. H., Xie, L. W., et al., 2006. Hf Isotopic Compositions of the Standard Zircons and Baddeleyites Used in U-Pb Geochronology. *Chemical Geology*, 234 (1–2): 105 – 126. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2006.05.003>
- Wu, W. K., Jiang, C. Y., Yang, F., 1992. The Paleozoic Tectonic Evolution and Metallogeny in the Kumux Region, Xinjiang. Shanxi Science and Technology Press, Xi'an (in Chinese).
- Xiao, W. J., Kusky, T., 2009. Geodynamic Processes and Metamorphism of the Central Asian and Related Orogenic Belts: Introduction. *Gondwana Research*, 16 (2): 167 – 169. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.05.001>
- Xiao, W. J., Shu, L. S., Gao, J., et al., 2008. Continental Dynamics of the Central Asian Orogenic Belt and Its Metamorphism. *Xinjiang Geology*, 26 (1): 4 – 8 (in Chinese with English abstract).
- Xu, B., Jian, P., Zheng, H. F., et al., 2005. U-Pb Zircon Geochronology and Geochemistry of Neoproterozoic Volcanic Rocks in the Tarim Block of Northwest China: Implications for the Breakup of Rodinia Supercontinent and Neoproterozoic Glaciations. *Precambrian Research*, 136 (2): 107 – 123. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.09.007>
- Xu, B., Xiao, S., Zou, H., et al., 2009. SHRIMP Zircon U-Pb Age Constraints on Neoproterozoic Quruqtagh Diamictites in NW China. *Precambrian Research*, 168 (3–4): 247 – 258. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.10.008>
- Yuan, H. L., Gao, S., Dai, M. N., et al., 2008. Simultaneous Determinations of U-Pb Age, Hf Isotopes and Trace Element Compositions of Zircon by Excimer Laser-Ablation Quadrupole and Multiple-Collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 247 (1–2): 100 – 118. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2007.10.003>
- Zhang, C., Li, X., Li, Z., et al., 2007. Neoproterozoic Ultramafic-Mafic-Carbonatite Complex and Granitoids in Quruqtagh of Northeastern Tarim Block, Western China: Geochronology, Geochemistry and Tectonic Implications. *Precambrian Research*, 152 (3 – 4): 149 – 169. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.11.003>
- Zhang, C. L., Zou, H. B., Li, H. K., et al., 2013. Tectonic Framework and Evolution of the Tarim Block in NW China. *Gondwana Research*, 23 (4): 1306 – 1315. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.05.009>
- Zhou, D. W., Su, L., Jian, P., et al., 2004. Zircon U-Pb SHRIMP Ages of High-Pressure Granulite in Yushugou Ophiolitic Terrane in Southern Tianshan and Their Tectonic Implications. *Chinese Science Bulletin*, 49 (13): 1415 – 1419. <https://doi.org/10.1360/03wd0598>
- Zhu, W. B., Wu, H. L., Shu, L. S., et al., 2011. A Paleoprotero-

zoic Tectonothermal Event Recorded in Precambrian Basement Rocks of the Kuluketage Uplift, Northeastern Tarim, China. *Mineralogical Magazine*, 2278—2278.

## 附中文参考文献

- 车自成,刘洪福,刘良,等,1994.中天山造山带的形成与演化.北京:地质出版社.
- 陈哲夫,梁云海,1985.新疆天山地质构造几个问题的探讨.新疆地质,3(2): 1—13.
- 邓兴梁,舒良树,朱文斌,等,2008.新疆兴地断裂带前寒武纪构造—岩浆—变形作用特征及其年龄.岩石学报,24(12): 2800—2808.
- 何国琦,李茂松,刘德权,等,1994.中国新疆古生代地壳演化及成矿.乌鲁木齐:新疆人民出版社.
- 胡霭琴,张国新,张前锋,等,1999.天山造山带基底时代和地壳增生的 Nd 同位素制约.中国科学(D辑:地球科学),29(2): 104—112.
- 李锦轶,1995.新疆东准噶尔蛇绿岩的基本特征和侵位历史.岩石学报,11(增刊): 73—84.
- 李锦轶,何国琦,徐新,等,2006.新疆北部及邻区地壳构造格架及其形成过程的初步探讨.地质学报,80(1):

148—168.

李锦轶,徐新,2004.新疆北部地质构造和成矿作用的主要问题.新疆地质,22(2): 119—124.

马瑞士,舒良树,孙家齐,1997.东天山构造演化与成矿.北京:地质出版社.

马瑞士,王赐银,叶尚夫,1993.东天山构造格架及其演化.南京:南京大学出版社.

舒良树,雅克夏飞,马瑞士,1998.中天山北缘大型右旋走滑韧剪带研究.新疆地质,16(4): 326—336.

舒良树,卢华复,印栋浩,等,2001.新疆北部古生代大陆增生构造.新疆地质,19(1): 59—63.

舒良树,王博,朱文斌,2007.南天山蛇绿混杂岩中放射虫化石的时代及其构造意义.地质学报,81(9): 1161—1168, 1305—1306.

王博,舒良树,Faure, M., 等,2007.科克苏穹库什太古生代构造岩浆作用及其对西南天山造山时代的约束.岩石学报,23(6): 1354—1368.

吴文奎,姜常义,杨复,1992.库米什地区古生代地壳演化及成矿规律.西安:陕西科学技术出版社.

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.