北山造山带南带中元古代副变质岩的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究

——对北山造山带南带前寒武纪物质演化的探索

周海,陈亮,孙勇

大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质学系,西安,710069

内容提要:北山造山带位于中亚造山带南缘,主要由一系列俯冲增生杂岩体构成。在其宽缓的造山区内,零散 地分布着前寒武纪岩石。由于古生代以来强烈的造山作用和随后的陆内造山作用的改造,造成北山内的前寒武纪 岩石和古生代以来的造山带产物难以区分。因此,关于北山造山带内的前寒武系归属问题,一直以来争议很大。 本文在详细野外地质工作的基础上,报道了位于北山造山带中部的马鬃山地块内前寒武纪副变质岩的岩相学、锆 石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素研究。该岩石较高的变质程度、岩石组合、碎屑锆石年龄谱特征均显示其和北山造山 带内古生代的残余被动大陆边缘产物不同,属于北山造山带内残余的前寒武纪基底,且沉积时代在中元古代约1.1 ~1.45 Ga 之间。结合前人的研究,得出以下认识:北山的前寒武纪物质在中元古(约1.0 Ga)之后,显示出和塔里 木克拉通、蒙古地块均相似的特征,表明三者均卷入了 Rodina 超大陆的聚散事件。在中元古代及其之前(约1.1 Ga 之前)则显示多源区的特征。本文中的北山造山带中元古代副变质岩显示了中元古代及其之前(约1.1 通不同,与蒙古地块相似的特征。锆石的 Hf 同位素分析进一步揭示了北山造山带前寒武纪副变质岩和敦煌地块 均记录了古太古代中晚期的新生地壳加入事件,显示了与塔里木克拉通的差异。这也暗示了敦煌地块和北山造山 带在中元古代(约1.45 Ga)之前可能具有统一的前寒武纪基底。

关键词:中亚造山带;北山造山带;前寒武纪亲缘性;蒙古地块;敦煌地块

中亚造山带(Central Asia Orogenic Belt)作为 世界上最大且演化时间最长的增生型造山带,南北 两侧分别与华北、塔里木克拉通和西伯利亚克拉通 相邻,具有宽缓的造山区。中亚造山带以其"多期次 的增生造山和巨量的新元古代一显生宙陆壳增生事 件"为显著特征(Xiao Wenjiao et al., 2004, 2010a, 2010b, 2013, 2014, 2015; Cawood et al., 2007, 2009;Kröner et al., 2007, 2008, 2014)。前人研究 认为中亚造山带的演化起始于新元古代(约1.0 Ga), 以古亚洲洋的打开为标志(Khain et al., 2003),在古生代,伴随着一系列的微陆块(具有前寒 武纪基底),以及岛弧,部分洋壳及大陆边缘增生杂 岩体不断碰撞、拼贴在其南北两侧的克拉通之上,并 在二叠纪末期到三叠纪初期,在中亚造山带的南缘 (包括南天山缝合带、内蒙古索伦缝合带)完成最终 的拼合(图 1)(Sengör et al., 1993; Jahn Bor-ming et al., 2004; Xiao Wenjiao et al., 2004, 2015). 此外,天山及其邻区的二叠纪大火成岩省及中亚造 山带范围内晚二叠世到白垩纪的碱性、过碱性花岗 岩的大量发育表明中亚造山带晚期及造山结束后的 板内岩浆活动,和前述的多期岛弧增生事件都表明 中亚造山带从古生代以来有显著的陆壳增生(Jahn Bor-ming et al., 2004; Xia Linqi et al., 2004, 2008)。

在整个中亚造山带内,分布大量具有前寒武纪 基底的微陆块,它们不同程度地经历了整个造山带 的演化,包括其两侧古亚洲洋分支的俯冲及闭合。 前人对这些微陆块及其两侧的岛弧增生体系进行了 大量的研究(Windley et al., 1990, 2007; Kröner et al., 2007, 2008, 2011; Safonova et al., 2008, 2009; Wilhem et al., 2012; Eizenhöfer et al., 2014; Xu Bei et al., 2013; Xu Bing et al., 2017)。 然而,对这些微陆块的前寒武纪演化及亲缘性和它 们在造山过程中的作用,却仍然具有争议(如 Su

收稿日期:2017-04-11;改回日期:2017-06-28;责任编辑:周健。

注:本文为中国地质调查局项目(编号 1212011121137),国家自然科学基金项目(编号 40602023,41072147)资助成果。

作者简介:周海,男,1988年生。博士生,从事中亚造山带及前寒武纪地质研究。Email:zhouhainwu@foxmail.com。通讯作者:陈亮,男,1975年生。博士,副教授,从事前寒武纪地质与岩石学研究。Email:turik@163.com。



Fig. 1 Sketch map of Central Asia orogenic belt (modified from Jahn Bor-ming et al., 2004)
1一中亚造山带;2一中亚造山带周缘克拉通;3一扬子克拉通;4一青藏高原及其周缘造山带;5-新元古代增生造山带;
6一乌拉尔造山带;7-太古宙至早元古代岩石;8-太平洋褶皱带;9-大洋

1—Central Asia orogenic belt; 2—cratons around Central Asia orogenic belt; 3—Yangtz craton; 4—Tibet Plateau; 5—Late Proterozoic acretionary belt; 6—Uralides orogenic belt; 7—Archean to Early Proterozoic rocks; 8—Pacific fold belts; 9—oceans

Benxun et al., 2011)。例如,北山造山带中的前寒 武纪物质的归属,有非塔里木地块亲缘性(Song Dongfang et al., 2013),亲塔里木地块(Lu Songnian et al., 2008)等争议。中亚造山带中微陆 块的前寒武纪亲缘性的探讨,对揭示中亚造山带中微陆 均造格局、造山过程具有非常重要的意义。因此,目 前关于中亚造山带的造山模式,仍然具有争议。有 三种比较主流的观点:①单一弧,弧前系统的增生 模式(Sengör et al., 1993);②岛弧、微陆块等的多 期增生和拼合模式(e.g. Kröner et al., 2007; Glorie et al., 2011; Safonova et al., 2011; Wilhem et al., 2012);③群岛-山弯造山模式(an archipelago-orocline model),即多期的群岛(包括岛 弧及微陆块等)拼合叠加后期的山弯构造的造山模 式(Xiao Wenjiao et al., 2015)。本文通过研究位 于北山造山带内马鬃山地块东段的副变质岩的野外 地质和锆石 U-Pb 年代学,在前人工作的基础上,制 约和探讨北山造山带南带内残余的前寒武纪基底的 归属。

1 区域地质背景

1.1 北山造山带

北山造山带位于中亚造山带南缘,地理上位于 甘肃、内蒙、新疆三省交界地区。东西两侧分别与内 蒙古造山带和东天山造山带相邻(Zuo Guochao et al.,1990; Gong Quansheng et al.,2002,2003), 其南、北两侧分别与敦煌地块、南蒙古增生体系相邻 (Xiao Wenjiao et al.,2010)。北山造山带由南向 北分布着一系列岛弧及微陆块,由南向北包括石板 山、花牛山及双鹰山岛弧增生带,中天山-旱山及马 鬃山地块,黑鹰山及雀儿山岛弧增生带(Li Jinyi et al., 2006b; Xiao Wenjiao et al., 2010b; Song Dongfang et al., 2013a, 2013b; Wang Guoqiang et al., 2016; Zheng Rongguo et al., 2016)。这些岛 弧增生带和微陆块被一系列近东西向分布的蛇绿混 杂岩分隔,由南向北主要包括包括柳园、红柳河、石 板井、红石山蛇绿混杂岩带,详细内容见图 2。传统 上,以红石山-黑鹰山-六驼山蛇绿混杂岩带为界,将 北山从南向北依据亲缘性划分为塔里-敦煌木地块 增生造山部分和哈萨克斯坦(Gong Quansheng et al., 2002, 2003; He Shiping et al., 2002, 2005; Zhao Zhixiong et al., 2015)或南蒙古地块增生造 山部分(Li Jinyi et al., 2006a)。

北山造山带长期以来被认为是天山造山带的东 延部分,和天山造山带一样,也分布有残余的微陆块 如马鬃山地块和旱山地块(Zuo Guochao et al., 1992; Hu Aiqin et al., 2000, 2006, 2010; He Zhenyu et al., 2012; Song Dongfang et al., 2013b; Tian Zhonghua et al., 2013)。马鬃山地块 北邻中天山-旱山地块,向南则与北山造山带南带 (亦称为亲敦煌岛弧增生体系)相邻并被红柳河蛇绿 混杂岩带分隔。前人研究认为,北山造山带内尤其 是南带分布着一系列变质程度较高的岩石,通常前 人称其为"敦煌杂岩"或"北山杂岩",主要包括正、副 变质片麻岩、混合岩、角闪岩、石英岩、片岩及大理 岩,但北山杂岩的形成时代极具争议,传统上,认为 北山杂岩的形成时代为新太古代到古元古代和中元 古代到新元古代时期,并经历了古生代的变质作用 (Zuo Guochao et al., 1990, 1992; Zuo Guochao and Li Maosong, 1996; Wei Xueping et al., 2000),但亦有学者强调古生代造山作用的改造,通 过对北山造山带内"北山杂岩"进行精细的锆石 U-



图 2 北山及其西侧邻区构造地质简图(据 Xiao Wenjiao et al., 2010b; Song Dongfang et al., 2013a,2013b 修改) Fig. 2 Simplified tectonic map of the Beishan orogenic collage and its west adjacent region

(modified after Xiao Wenjiao et al. , 2010b; Song Dongfang et al. , 2013a,2013b)

1-雀儿山弧;2-黑鹰山弧;3-中天山-旱山地块;4-马鬃山地块;5-双鹰山弧;6-花牛山弧;7-石板山弧;8-敦煌地块;9-蛇绿混杂 岩带;10-枕状熔岩;11-元古宙副变质岩;12-北山杂岩;13-断裂;14-采样位置; [-红石山蛇绿混杂岩带; [-石板井蛇绿混杂岩 带; []-红柳河蛇绿混杂岩带; N-柳园蛇绿混杂岩带

1—Queershan arc; 2—Heiyinshan arc; 3—Central Tianshan-Hanshan block; 4—Mazongshan block; 5—Shuangyingshan arc; 6— Huaniushan arc; 7—Shibanshan arc; 8—Dunhuang block; 9—ophiolitic mélange; 10—pillow lava; 11—Proterozoic metasedimentary rock; 12—Beishan complex; 13—fault; 14—sample location; I—Hongshishan mélange; II—Shibanjing mélange; II—Hongliuhe mélange; IV— Liuyuan mélange Pb年代学和 Hf 同位素研究后,认为其主要形成时 代应为 494 Ma, 465 Ma 和 375 Ma,其形成过程中 既有古老地壳又有新生地壳物质的卷入,是中亚造 山作用对北山前寒武基底改造的产物(Song Dongfang et al., 2013a)。在北山造山带中间隆起 带和南带,还分布着一系列变沉积岩系,其变质程度 总体较低,普遍达到低绿片岩相,主要由板岩、千枚 岩、片岩、变砂岩、石英岩及大理岩组成。岩石均呈 岩块状产出,出露不连续,并通过有限的年代学和化 石资料认为其形成于中新元古代,前人将这一系列 副变质岩自下而上,分别命名为古洞井岩群(或白湖 岩群)、平头山组、大豁落山组和野马街组(甘肃省区 域地质志,1989),亦代表了北山造山带内残留的前 寒武纪残余物质(Zuo Guochao et al., 1992;甘肃省 区域地质志,1989)。然而,近年来对北山造山带内 的这一系列副变质岩的野外地质和锆石 U-Pb 年代 学研究表明,其中既有古生代浅变质的被动大陆边 缘残余沉积物(Gong Quansheng et al., 2002),又 有变质程度略高的前寒武纪原岩为成熟度较高的碎 屑岩的副变质岩(Song Dongfang et al., 2013b)。 综上所述,北山杂岩和造山带内的前寒武纪副变质 岩共同构成了塔里木克拉通东部北缘残余前寒武纪 基底的主体,且经过了中亚造山作用的改造(Song Dongfang et al., 2013a, 2013b).

1.2 塔里木克拉通

塔里木克拉通位于中国新疆自治区境内,是中 国西部最大的克拉通。塔里木克拉通主体被塔克拉 玛干沙漠覆盖,仅克拉通边缘的库鲁克塔格、阿克 苏、铁克里克、北阿尔金等地区出露前寒武纪岩石 (Lu Songnian et al., 2008; Long Xiaoping et al., 2015)。塔里木最古老的岩石为 2.8~2.5 Ga 的 TTG 花岗片麻岩及表壳岩系,出露在库鲁克塔格和 北阿尔金地区(Hu Aiqin et al., 2000; Guo Zhaojie et al., 2003; Lu Songnian et al., 2008; Shu Liangshu et al., 2011, 2013; Long Xiaoping et al., 2011),前人对该期次岩石的锆石 Hf 同位素 (Ge Rongfeng et al., 2014a, 2014b) 和来自前寒武 纪副变质岩的锆石 U-Pb 年龄(Lu Songnian et al., 2008;Long Xiaoping et al., 2015)均表明塔里木克 拉通有大于 3.5Ga 的硅铝质陆壳记录。元古宙的 岩石记录则分布广泛,包括古元古代 2.45~2.35 Ga正变质岩,随后塔里木经历了 2.0~1.8Ga 和 1.85~1.77 Ga两期构造热事件。中元古代时期, 塔里木现今的北侧为被动大陆边缘环境而南侧为主 动大陆边缘环境。塔里木大约在1.05~0.90 Ga 经 历了格林威尔造山事件,基底和盖层之间具有明显 的沉积间断,而在大约0.82~0.74 Ga 则发育和拉 张裂解环境相关的岩石如双峰式火山岩、碱性花岗 岩等,表明塔里木克拉通经历了 Rodina 大陆的聚合 和裂解的过程(Lu Songnian et al., 2008)。

2 野外地质特征及岩相学分析

研究区在大地构造位置上属于马鬃山地块, 即北山造山带的中间隆起区,前人称为库米什增 生杂岩带(Xiao Wenjiao et al., 2004, 2010b)。其 北侧与中天山-旱山地块相邻,二者在西段和东段 分别被星星峡断裂、石板井蛇绿混杂岩带分隔。 通过前人对马鬃山地块和中天山-旱山地块的大量 研究,马鬃山地块与其北侧的中天山-旱山地块共 同代表了北山造山带内的前寒武纪残余的地质体 (如,Zuo Guochao et al., 1992; Xiao Wenjiao et al., 2010b; Song Dongfang et al., 2013b)。马鬃 山地块南侧和亲塔里木-敦煌地块岛弧增生体系中 的花牛山岛弧相邻,二者最终拼贴并形成红柳河蛇 绿混杂岩带。

研究区马鬃山地块东段自南向北包括主要库米 什增生杂岩带和前寒武纪基底两部分。南侧库米什 增生杂岩带内主要岩石为志留纪的复理石和火山碎 屑岩、二叠纪的碎屑岩(图 3)。区内岩石普遍发育 叠瓦状构造,反映来自两侧的挤压环境下的逆冲推 覆作用。野外地质研究发现,研究区地形较为平缓, 以近东西向的山丘、洼地间隔构成主要地貌样式。 岩石普遍风化强烈,发育新生代的松散沉积物,不整 合覆盖于库米什增生杂岩之上。北侧主要为马鬃山 地块内残留的少量前寒武纪基底岩石。区内亦普遍 发育新生代的的松散沉积物。距星星峡镇以南约 10km 附近,出露少量变质程度较高的副变质岩,并 构成的独立山头(图 4a)。南北宽约 500m,南侧山 头以基本无劈理化的灰白色石英岩夹少量云母石英 片岩为主(图 4b),北侧主要为劈理化不强的灰绿色 云母石英片岩,与新生代的松散沉积物构成的戈壁 接触界限模糊,推测呈断层接触关系。采样位置为 山头南侧(图 3), GPS 坐标位置为 E41°45′26.1″, N94°20′49″。

样品 XX12 灰白色粗粒石英岩。岩石呈浅灰白 色,残余变晶粒状结构,条带状构造,块状构造(图 4c,d)。主要由石英颗粒及少量杂基变质形成的泥 质矿物组成,石英的残余粒状结构极不明显,暗示其





Fig. 3 Xingxingxia—Yushishan tectonic cross-section (modified from Li Jinyi et al., 2003)

Ⅰ一中天山地块;Ⅱ一马鬃山地块;Ⅱ1一前寒武纪基底;Ⅱ2一库米什增生杂岩带;Ⅲ一敦煌增生体系;Ⅲ1一双鹰山弧;1一前寒武纪变质岩;
 2一大理岩;3一碎屑岩;4一志留纪复理石和火山碎屑岩;5一新生代沉积物;6一花岗片麻岩;7一蛇纹岩;8一橄榄辉石岩;9一玄武岩;10一断裂;11一地名;12一采样位置

I — Central Tianshan block; II — Mazongshan block; II 1 — Precambrian basement; II 2 — Kumishi accretionary complex belt; III — Dunhuang accretionary system; III 1 — Shuangyingshan arc; 1 — Precambriam metamorphic rocks; 2 — marble; 3 — clastic rocks; 4 — Silurian flysch and volcanic rocks; 5 — Cenozoic sedments; 6 — granitic gneiss; 7 — serpentinite; 8 — gabbro pyroxenite; 9 — basalt; 10 — fault; 11 — toponym; 12 — sample location



图 4 星星峡以南古洞井组副变质岩野外照片(a,b)及其中灰白色粗粒石英岩(样品 XX12)镜下特征(c,d) Fig. 4 Field photos (a,b) of metasediementary rocks from Gudongjing Formation and the representative photomicrograph (c,d) of grey coarse-grained quartzite (sample XX12) in Xingxingxia

变质程度可能较高。石英颗粒显示明显的压扁拉长 和次生加大,且显示明显的定向性,部分颗粒见明显 的波状消光,大小(0.2~0.5)mm×(0.3~0.6) mm,约占95%。其他矿物包括黑云母、磷灰石、白云母等,分布在石英颗粒之间,具明显定向性,总体约占5%。亦见少量的夕线石。

3

3.1 分析方法

将野外采集的岩石样品清洗、挑选新鲜且无脉体的样品送至河北省廊坊市区域地质矿产研究所进 行锆石的挑选。从岩石样品中随机挑选出足够数量 的锆石。

锆石制靶、锆石 U-Pb 年龄测试及数据分析均 在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。将锆 石在显微镜下用环氧树脂固定,待固化后将锆石颗 粒精细抛光至三分之一或一半左右,完成锆石样品 的制靶。随后拍摄锆石颗粒的反射光和阴极发光 (CL)显微图像,锆石样品 CL 显微图像是通过由英 国 Gatan 公司生产的 Mono CL3+阴极发光(CL)照 相的装置完成的,用来揭示锆石的内部结构和结晶 特征。

锆石 U-Pb 年龄测定上机测试之前用 3%的稀 HNO3清洗样品以除去抛光过程可能存在的污染。 锆石 U-Pb 年龄的分析仪器为 Agilent 7700 四极杆 质谱仪和 Geolas 200M 激光剥蚀系统,激光器为 193nm ArF 准分子激光器,单脉冲能量 210mJ;最 高重复频率 20Hz;平均功率 4W。经光学系统匀光 和聚焦,到达样品表面的激光束具有平顶的特点,对 不同斑束可以提供相同的能量密度,最高可达 20J/ cm²,激光斑束直径可在 4~120µm 内变化。在本文 中剥蚀样品的激光斑束直径为 32µm。锆石年龄计 算采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采 用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,²⁹ Si 作为内标进行计算。测试 结果通过 GLITTER 软件(Macquarie University, 2006) 计算得出²⁰⁷ Pb/²⁰⁶ Pb、²⁰⁷ Pb/²³⁵ U、²⁰⁶ Pb/²³⁸ U 和²⁰⁸ Pb/²³² Th 四组同位素比值、年龄及其误差,最 后用 Isoplot 软件绘制 U-Pb 年龄谐和图,副变质岩 样品绘制年龄分布直方图(Ludwig, 2001)。相关仪 器的优化参数、空白情况、检出限和锆石原位 U-Pb 分析方法介绍见 Liu Xiaoming et al. (2008)。

在锆石 U-Pb 的微区测点附近,进一步完成锆石的 Lu-Hf 同位素测试。锆石的 Lu-Hf 同位素测试。锆石的 Lu-Hf 同位素测试在配备了 Geolas2500 激光剥蚀系统的多接收电感耦合等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上完成。激光斑束直径为 32μ m,激光的脉冲频率为 8~10Hz,每个测点的剥蚀时间大约为 30 s,剥蚀厚度大约 20~30 μ m。模式年龄的计算以现今的球粒陨石和亏损地 幔的 176 Hf/ 177 Hf 和 176 Lu/ 177 Hf 值(分别为

0.282772 和 0.0332,0.28325 和 0.0384)作为参照 (Chu Nanchin et al., 2002)。两阶段模式年龄是建 立在认为母岩浆是从平均地壳(现今平均地壳的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷ Hf = 0.015)中产生的(Rudnick et al., 2003),并将锆石的初始¹⁷⁶ Hf/¹⁷⁷ Hf 值投影到亏损 地幔线上得到的(Griffin et al., 2000)。 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值的 计算采用¹⁷⁶ Lu 衰变常数为 1.867 × 10⁻¹¹ a⁻¹ (Albarède et al., 2006),和现今球粒陨石的 ¹⁷⁶ Hf/¹⁷⁷ Hf 和¹⁷⁶ Lu/¹⁷⁷ Hf 的值,分别为 0.282772 和 0.0332 来计算(BlichertToft and Albarede, 1997)。本文的灰白色粗粒石英岩样品 XX12 的锆 石 U-Pb 年代学、Hf 同位素数据分别见表 1,2。

3.2 样品分析

3.2.1 锆石年代学分析

灰白色粗粒石英岩样品 XX12 锆石形态、大小 差异均较大,磨圆均较为明显,粒径较大,一般在50 ~250µm之间;CL图像显示样品中大多数锆石均 具有核边结构,且边部均为变质边。锆石内部结构 差异较大,部分锆石核部具有典型中酸性岩浆锆石 清晰的震荡环带,而部分锆石的核部则具有基性岩 浆锆石所具有的宽缓的震荡环带;少量锆石的核部 具有典型变质锆石特有的面状结构或扇状结构(图 5)。所有锆石的 Th/U 比值大于 0.1,分布在 0.16 ~1.76 之间,结合其CL图像,表明样品中主体应该 为岩浆锆石,伴有少量的变质锆石。该样品共获得 72个有效单颗粒锆石 U-Pb 年龄,样品中最年轻的 谐和锆石年龄为1447±9 Ma,代表了其最大沉积年 龄;约1.6~2.1 Ga之间为锆石年龄直方图中最为 明显的连续峰期,约占总体 55%的年龄;该连续峰 期中最明显的年龄峰值约 1.91 Ga,其次约为 1.73、 1.84 和 2.0 Ga。约 2.3~2.7 Ga 间断地分布着一 些较为和谐的年龄,构成了年龄谱中第二个连续峰 期,约占总体 45% 的年龄;其中在约 2.36 Ga、约 2.49 Ga、约 2.63 Ga 呈依次增强的年龄峰值, 最老 的年龄记录为 2.67 Ga (图 6a, b)。从样品 XX12 的 U-Pb 年龄谐和图可知(图 6a),大部分 U-Pb 年龄位 于谐和线上或谐和线附近,而其余少量 U-Pb 年龄 则落在谐和线之下并形成两条明显 Pb 丢失不一 致线。

3.2.2 Hf 同位素分析

选取了 35 个具谐和锆石 U-Pb 年龄的样点进 行了 Lu-Hf 同位素分析。样品的 ε_{Hf}(t)值介于 +8.69~+6.34 之间。根据样品的锆石 U-Pb 年

表 1 北山造山带中元古代石英岩样品 XX12 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据

Table 1 LA-ICP MS U-Pb data on zircons of Mesoproterozoic quartzite sample XX12 in Beishan orogen

样品号 207 Pb/ 207 Pb/ 206 Pb/ 207 Pb/ 207 Pb/ 207 Pb/ 206 Pb/		
$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $	gma Pb*	²³² Th ²³⁸ U
XX12-01 0.10792 0.00224 4.5565 0.0881 0.30625 0.00316 0.50 1765 37 1741 16 1722 1	6 78.1	96.7 193.8
XX12-02 0.16502 0.00261 10.1845 0.1456 0.44769 0.00437 0.53 2508 26 2452 13 2385 1	9 97.0	84.1 157.5
XX12-03 0. 17207 0. 00315 10. 4572 0. 1798 0. 44086 0. 00500 0. 48 2578 30 2476 16 2355 2	22 121.4	95.9 201.0
XX12-04 0. 13139 0. 00304 5. 6004 0. 1225 0. 30920 0. 00372 0. 36 2117 40 1916 19 1737 1	8 80.7	71.8 199.8
XX12-05 0.11119 0.00334 4.2438 0.1228 0.27686 0.00389 0.54 1819 54 1683 24 1576 2	20 42.7	62.6 115.3
XX12-06 0 11820 0 00215 5 6207 0 0939 0 34497 0 00335 0 56 1929 32 1919 14 1911 1	6 88.0	105.8 190.2
XX12-07 0. 10804 0. 00156 4. 6707 0. 0580 0. 31361 0. 00248 0. 38 1767 26 1762 10 1758 1	2 84.0	78.7 209.7
XX12-08 0, 10566 0, 00156 4, 1381 0, 0524 0, 28411 0, 00225 0, 24 1726 27 1662 10 1612 1	1 86.5	59.8 246.9
XX12-09 0.10835 0.00153 4.7863 0.0572 0.32046 0.00249 0.38 1772 26 1783 10 1792 1	2 90.5	83.5 221.3
XX12-10 0. 10184 0. 00168 4. 3470 0. 0637 0. 30968 0. 00264 0. 54 1658 30 1702 12 1739 1	3 79.5	105.7 194.8
XX12-11 0. 12441 0. 00217 6. 3191 0. 1006 0. 36848 0. 00353 1. 05 2020 31 2021 14 2022 1	7 56.6	107.5 102.1
XX12-12 0. 15802 0. 00183 9. 6424 0. 0865 0. 44269 0. 00322 0. 58 2435 19 2401 8 2363 1	4 187.8	177. 2 306. 8
XX12-13 0. 14489 0. 00225 8. 4602 0. 1169 0. 42361 0. 00388 0. 93 2287 26 2282 13 2277 1	8 76.1	113.0 121.2
XX12-14 0 18056 0 00298 12 4877 0 1907 0 50177 0 00531 1 56 2658 27 2642 14 2621 2	23 55 5	100 6 64 7
XX12-15 0. 11636 0. 00159 4. 9234 0. 0561 0. 30698 0. 00235 0. 57 1901 24 1806 10 1726 1	2 111.8	156. 2 273. 1
XX12-16 0 11981 0 00189 5 6422 0 0784 0 34168 0 00295 0 34 1953 28 1923 12 1895 1	4 73.0	56.3 167.8
XX12-17 0. 16614 0. 00214 10. 4394 0. 1114 0. 45589 0. 00367 0. 57 2519 21 2475 10 2421 1	6 135.6	122.1 214.6
XX12-18 0.17821 0.00218 12.0243 0.1190 0.48954 0.00382 1.17 2636 20 2606 9 2569 1	7 198.5	300. 2 255. 9
XX12-19 0.11141 0.00282 5.1417 0.1245 0.33484 0.00416 0.87 1823 45 1843 21 1862 2	20 30.8	55.7 64.2
XX12-20 0.17434 0.00215 11.3415 0.1131 0.47199 0.00368 0.38 2600 20 2552 9 2492 1	6 153.2	93.1 242.5
XX12-21 0. 12307 0. 00219 5. 9739 0. 0966 0. 35217 0. 00337 0. 51 2001 31 1972 14 1945 1	6 54.6	59.8 116.9
XX12-22 0, 11994 0, 00192 5, 9536 0, 0846 0, 36015 0, 00316 0, 52 1955 28 1969 12 1983 1	5 72.9	79.9 152.5
XX12-23 0. 11149 0. 00150 4. 8968 0. 0544 0. 31868 0. 00240 0. 16 1824 24 1802 9 1783 1	2 138.6	58.6 360.5
XX12-24 0.10807 0.00173 4.6031 0.0649 0.30905 0.00260 0.54 1767 29 1750 12 1736 1	3 69.5	91.6 170.4
XX12-25 0. 14441 0. 00217 8. 7417 0. 1159 0. 43920 0. 00391 0. 66 2281 26 2311 12 2347 1	8 75.2	80.8 123.0
XX12-26 0.11778 0.00157 5.6539 0.0620 0.34829 0.00264 0.60 1923 24 1924 9 1926 1	3 144.4	185.1 307.7
XX12-27 0.11053 0.00151 4.8449 0.0551 0.31803 0.00242 0.55 1808 25 1793 10 1780 1	2 124.9	162.1 296.0
XX12-28 0. 18328 0. 00218 12. 9572 0. 1219 0. 51294 0. 00390 1. 77 2683 20 2677 9 2669 1	7 226.7	448.4 253.6
XX12-29 0. 10902 0. 00144 3. 7821 0. 0408 0. 25170 0. 00184 0. 40 1783 24 1589 9 1447	9 114.6	140.9 353.7
XX12-30 0.11357 0.00138 4.8337 0.0459 0.30880 0.00218 0.28 1857 22 1791 8 1735 1	1 168.5	121.5 439.0
XX12-31 0.10934 0.00141 3.1375 0.0325 0.20820 0.00149 0.26 1788 23 1442 8 1219	8 168.5	169.2 657.2
XX12-32 0.16886 0.00335 11.5755 0.2202 0.49735 0.00612 0.69 2546 33 2571 18 2602 2	26 40.9	39.8 57.5
XX12-33 0.18356 0.00297 12.8238 0.1899 0.50687 0.00523 1.05 2685 26 2667 14 2643 2	60.8	81.7 77.7
XX12-34 0.11955 0.00195 6.1113 0.0886 0.37087 0.00329 0.48 1950 29 1992 13 2034 1	5 73.5	71.8 149.6
XX12-35 0.18583 0.00266 12.0043 0.1492 0.46868 0.00423 0.28 2706 23 2605 12 2478 1	9 73.1	33.5 118.1
XX12-36 0. 15763 0. 00233 10. 1088 0. 1312 0. 46527 0. 00417 0. 51 2430 25 2445 12 2463 1	59.9	48.2 95.2
XX12-37 0.14260 0.00189 7.3420 0.0800 0.37353 0.00291 0.32 2259 23 2154 10 2046 1	4 130.4	86.7 271.9
XX12-38 0.11693 0.00238 5.2687 0.0998 0.32690 0.00339 0.68 1910 36 1864 16 1823 1	6 38.0	58.0 84.7
XX12-39 0.17993 0.00259 11.8854 0.1488 0.47921 0.00431 1.45 2652 24 2595 12 2524 1	9 97.2	177.6 122.8
XX12-40 0.11780 0.00200 5.5770 0.0849 0.34346 0.00310 1.18 1923 30 1913 13 1903 1	63.5	143.0 120.9
XX12-41 0.11833 0.00195 5.3558 0.0786 0.32835 0.00289 0.47 1931 29 1878 13 1830 1	62.0	67.6 144.9
XX12-42 0.11921 0.00152 5.4157 0.0553 0.32959 0.00241 0.72 1944 23 1887 9 1836 1	145.5	230. 2 320. 8
XX12-43 0.12193 0.00173 6.0906 0.0732 0.36238 0.00289 0.75 1985 25 1989 10 1993 1	4 120.9	180.7 239.6
XX12-44 0. 12018 0. 00223 5. 7509 0. 0976 0. 34714 0. 00338 0. 79 1959 33 1939 15 1921 1	6 51.7	83.5 105.6
XX12-45 0.12194 0.00190 5.8750 0.0798 0.34951 0.00297 0.54 1985 27 1958 12 1932 1	4 69.6	80.5 150.3
XX12-46 0.16276 0.00202 9.3534 0.0925 0.41687 0.00315 0.04 2485 21 2373 9 2246 1	4 148.5	12.1 293.6
XX12-47 0. 16532 0. 00240 10. 1123 0. 1275 0. 44373 0. 00391 0. 62 2511 24 2445 12 2367 1	106.0	105.9 171.0
XX12-48 0. 12279 0. 00180 6. 1245 0. 0771 0. 36182 0. 00295 0. 55 1997 26 1994 11 1991 1	4 83.9	95.4 174.7
XX12-49 0.11549 0.00232 5.1782 0.0961 0.32522 0.00329 0.65 1888 36 1849 16 1815 1	6 32.2	47.6 73.6
XX12-50 0. 15614 0. 00184 8. 6235 0. 0777 0. 40061 0. 00287 0. 46 2414 20 2299 8 2172 1	13 190.6	163.5 356.2
XX12-51 0. 12011 0. 00213 5. 7816 0. 0926 0. 34914 0. 00326 0. 50 1958 31 1944 14 1931 1	42.8	46.4 93.5
XX12-52 0.20281 0.00260 14.0158 0.1476 0.50127 0.00409 0.47 2849 21 2751 10 2619 1	115.0	78.5 166.3

しち しちちょう しょうしょう しょう	=	- 1
Z 尘	ক	- 1

		比值					年龄(Ma)							含量(×10 ⁻⁶)			
zoe pb righn zighn zighn <t< td=""><td>样品号</td><td>²⁰⁷ Pb/</td><td>1 eigma</td><td>²⁰⁷ Pb/</td><td>1 sigma</td><td>²⁰⁶ Pb/</td><td>1 eigma</td><td>Th/II</td><td>$^{207}\mathrm{Pb}/$</td><td>leigma</td><td>$^{207}\mathrm{Pb}/$</td><td>1 sigma</td><td>$^{206}\mathrm{Pb}/$</td><td>leigma</td><td>Ph *</td><td>²³² Th</td><td>238 T I</td></t<>	样品号	²⁰⁷ Pb/	1 eigma	²⁰⁷ Pb/	1 sigma	²⁰⁶ Pb/	1 eigma	Th/II	$^{207}\mathrm{Pb}/$	leigma	$^{207}\mathrm{Pb}/$	1 sigma	$^{206}\mathrm{Pb}/$	leigma	Ph *	²³² Th	238 T I
XX12-53 0.16613 0.00231 10.4992 0.1241 0.45837 0.00387 0.49 2519 23 2480 11 2432 17 104.2 82.8 168.3 XX12-54 0.17289 0.0026 10.3672 0.0957 0.43492 0.0021 0.66 1918 26 1909 11 1900 13 85.4 121.8 183.6 XX12-55 0.11748 0.0017 5.556 0.6689 0.34267 0.0027 166 1918 26 1909 11 1900 13 85.4 121.8 183.6 XX12-57 0.1179 0.0021 5.4945 0.089 0.33781 0.0031 0.27 1926 32 1900 14 1861 12 81.2 13.8 14.5 15.3 XX12-56 0.1159 0.0185 4.9139 0.657 0.2979 0.0245 0.7 192 185 11 1681 12 81.4 13.1 16.3 15.3 XX12-56 0.1226 0.0175 5.7684 0.679 0.33781 0.0235 <td></td> <td>$^{206}\mathrm{Pb}$</td> <td>1 Sigina</td> <td>$^{235}\mathrm{U}$</td> <td>1 Sigina</td> <td>²³⁸ U</td> <td>1 Sigina</td> <td>1 11/ 0</td> <td>$^{206}\mathrm{Pb}$</td> <td>rəigina</td> <td>$^{235}\mathrm{U}$</td> <td>Toigina</td> <td>²³⁸ U</td> <td>1 Sigina</td> <td>10</td> <td></td> <td>0</td>		$^{206}\mathrm{Pb}$	1 Sigina	$^{235}\mathrm{U}$	1 Sigina	²³⁸ U	1 Sigina	1 11/ 0	$^{206}\mathrm{Pb}$	rəigina	$^{235}\mathrm{U}$	Toigina	²³⁸ U	1 Sigina	10		0
XX12-540.172890.0020610.36720.036720.0434920.003190.58258620024689232814176.1171.3293.2XX12-550.117480.001715.5560.66890.342670.002740.6619182619091119001385.4121.8183.6XX12-550.114270.001745.37490.07110.341120.00281.0518692718811118921378.1161.5154.3XX12-570.117960.002125.49450.6890.337810.003160.27192632190014187615538.424.391.6XX12-580.119590.01854.91390.06570.297990.02450.6719502718851116811281.213.0.8195.8XX12-500.12260.01281.13100.06970.357890.02950.4219922718821119721471.064.115.4XX12-600.12290.012911.33100.10600.45120.03251.162672002519421018881390.367.021.0XX12-610.12290.01755.7840.06760.34160.30300.311894291910121921457.760.512.3XX12-620.15630.01935.7840.3640.34	XX12-53	0.16613	0.00231	10.4992	0.1241	0.45837	0.00387	0.49	2519	23	2480	11	2432	17	104.2	82.8	168.3
XX12-55 0.11748 0.00171 5.5506 0.0689 0.34267 0.00274 0.66 1918 26 1909 11 1900 13 85.4 121.8 183.6 XX12-56 0.11427 0.00174 5.3749 0.0711 0.34112 0.00280 1.05 1869 27 1881 11 1892 13 78.1 161.5 154.3 XX12-57 0.11796 0.00212 5.4945 0.0895 0.33781 0.00316 0.27 1926 32 1900 14 1876 15 38.4 24.3 91.6 XX12-58 0.11959 0.00185 4.9139 0.0657 0.29799 0.00245 0.67 1950 27 1885 11 1972 14 71.0 64.1 154.3 XX12-59 0.1226 0.00172 5.7684 0.0676 0.3476 0.0035 1.16 267 20 2551 9 2401 15 189.4 312.3 268.7 XX12-64 0.1167 0.02019 5.784 0.667 0.3476 0.00301 <	XX12-54	0.17289	0.00206	10.3672	0.0957	0.43492	0.00319	0.58	2586	20	2468	9	2328	14	176.1	171.3	293.2
XX12-56 0.11427 0.00174 5.3749 0.0711 0.34112 0.00280 1.05 1869 27 1881 11 1892 13 78.1 161.5 154.3 XX12-57 0.11796 0.00212 5.4945 0.0895 0.33781 0.00316 0.27 1926 32 1900 14 1876 15 38.4 24.3 91.6 XX12-58 0.11959 0.00185 4.9139 0.0657 0.29799 0.0228 0.67 1950 27 1865 11 1681 12 81.2 130.8 195.8 XX12-59 0.12246 0.00186 6.0434 0.077 0.35789 0.00298 0.42 1992 27 1982 11 1972 14 71.0 64.1 154.3 XX12-60 0.18210 0.00172 5.7684 0.0676 0.34016 0.0265 0.32 2000 25 1942 10 1888 13 90.3 67.0 211.0 XX12-63 0.12070 0.0195 5.7432 0.0804 0.3476 0.0209	XX12-55	0.11748	0.00171	5.5506	0.0689	0.34267	0.00274	0.66	1918	26	1909	11	1900	13	85.4	121.8	183.6
XX12-57 0.11796 0.00212 5.4945 0.0895 0.33781 0.00316 0.27 1926 32 1900 14 1876 15 38.4 24.3 91.6 XX12-58 0.11959 0.00185 4.9139 0.0657 0.29799 0.00245 0.67 1950 27 1805 11 1681 12 81.2 130.8 195.8 XX12-59 0.12246 0.00186 6.0434 0.0797 0.35789 0.0028 0.42 1992 27 1982 11 1972 14 71.0 64.1 154.3 XX12-60 0.1226 0.00172 5.7684 0.0676 0.34016 0.00265 0.32 2000 25 1942 10 1888 13 90.3 67.0 211.0 XX12-61 0.12067 0.00195 5.7432 0.0804 0.3476 0.0029 0.49 1866 29 1910 12 1923 14 54.1 38.6 124.7 XX12-64 0.11467 0.00203 5.2657 0.0839 0.33296 0.0304	XX12-56	0.11427	0.00174	5.3749	0.0711	0.34112	0.00280	1.05	1869	27	1881	11	1892	13	78.1	161.5	154.3
XX12-58 0.11959 0.00185 4.9139 0.0657 0.29799 0.00245 0.67 1950 27 1805 11 1681 12 81.2 130.8 195.8 XX12-59 0.12246 0.00186 6.0434 0.0797 0.35789 0.00298 0.42 1992 27 1982 11 1972 14 71.0 64.1 154.3 XX12-60 0.18210 0.00172 5.7684 0.0676 0.34016 0.00265 0.32 2000 25 1942 10 1888 13 90.3 67.0 211.0 XX12-61 0.12296 0.00172 5.7684 0.0676 0.3406 0.00265 0.32 2000 25 1942 10 1888 13 90.3 67.0 211.0 XX12-62 0.1167 0.00195 5.7432 0.0804 0.34766 0.0030 1.41 1875 32 1863 14 1853 15 50.8 57.5 116.8 XX12-64 0.11467 0.00203 5.2657 0.0839 0.3296 0.0024	XX12-57	0.11796	0.00212	5.4945	0.0895	0.33781	0.00316	0.27	1926	32	1900	14	1876	15	38.4	24.3	91.6
XX12-59 0.12246 0.00186 6.0434 0.0797 0.35789 0.00298 0.42 1992 27 1982 11 1972 14 71.0 64.1 154.3 XX12-60 0.18210 0.00219 11.3310 0.1060 0.45123 0.00335 1.16 2672 20 2551 9 2401 15 189.4 312.3 268.7 XX12-61 0.12296 0.00172 5.7684 0.0676 0.34016 0.00265 0.32 2000 25 1942 10 1888 13 90.3 67.0 211.0 XX12-62 0.11593 0.00190 5.5584 0.0804 0.34766 0.0029 0.49 1966 29 1938 12 1911 14 55.7 60.5 123.5 XX12-64 0.11467 0.00203 5.2657 0.0839 0.33296 0.00204 0.63 1862 23 1714 9 1596 10 179.6 297.7 475.3 XX12-66 0.13267 0.00203 6.2681 0.0911 0.36717 0.00325	XX12-58	0.11959	0.00185	4.9139	0.0657	0.29799	0.00245	0.67	1950	27	1805	11	1681	12	81.2	130.8	195.8
XX12-600.0182100.0021911.33100.10600.451230.003351.1626722025519240115189.4312.3268.7XX12-610.122960.001725.76840.06760.340160.002650.3220002519421018881390.367.0211.0XX12-620.115930.001905.55840.08040.347660.003010.3118942919101219231454.138.6124.7XX12-630.120670.001955.74320.08200.345090.002990.4919662919381219111455.760.5123.5XX12-640.114670.002035.26570.08390.332960.002490.4918753218631418531550.857.5116.8XX12-650.113860.001494.41000.04630.280830.00240.6318622317149159610179.6297.7475.3XX12-660.123770.002036.26810.09110.367170.003250.6420112920141320161573.494.6146.8XX12-670.114340.002045.14000.08260.325900.002980.5618703218431418191466.287.6155.9XX12-680.120440.001995.85910.0853<	XX12-59	0.12246	0.00186	6.0434	0.0797	0.35789	0.00298	0.42	1992	27	1982	11	1972	14	71.0	64.1	154.3
XX12-61 0.0122 5.7684 0.0676 0.34016 0.00265 0.32 2000 25 1942 10 1888 13 90.3 67.0 211.0 XX12-62 0.11593 0.00190 5.5584 0.0804 0.34766 0.00301 0.31 1894 29 1910 12 1923 14 54.1 38.6 124.7 XX12-63 0.12067 0.00195 5.7432 0.0820 0.34509 0.00299 0.49 1966 29 1938 12 1911 14 55.7 60.5 123.5 XX12-64 0.11467 0.00203 5.2657 0.0839 0.33296 0.00204 0.49 1875 32 1863 14 1853 15 50.8 57.5 116.8 XX12-65 0.11366 0.00149 4.4100 0.0463 0.28083 0.00204 0.63 1862 23 1714 9 1506 10 179.6 297.7 475.3 XX12-67 0.11434 0.00204 5.1400 0.0826 0.32590 0.00298 0.56	XX12-60	0.18210	0.00219	11.3310	0.1060	0.45123	0.00335	1.16	2672	20	2551	9	2401	15	189.4	312.3	268.7
XX12-62 0.11593 0.00190 5.5584 0.0804 0.34766 0.00301 0.31 1894 29 1910 12 1923 14 54.1 38.6 124.7 XX12-63 0.12067 0.00195 5.7432 0.0820 0.34509 0.00299 0.49 1966 29 1938 12 1911 14 55.7 60.5 123.5 XX12-64 0.11467 0.00203 5.2657 0.0839 0.33296 0.00204 0.49 1875 32 1863 14 1853 15 50.8 57.5 116.8 XX12-65 0.11386 0.00149 4.4100 0.0463 0.28083 0.00204 0.63 1862 23 1714 9 1506 10 179.6 297.7 475.3 XX12-66 0.12377 0.00203 6.2681 0.911 0.36717 0.00325 0.64 2011 29 2014 13 2016 15 73.4 94.6 146.8 XX12-67 0.11434 0.00204 5.490 0.35122 0.00308 0.39	XX12-61	0.12296	0.00172	5.7684	0.0676	0.34016	0.00265	0.32	2000	25	1942	10	1888	13	90.3	67.0	211.0
XX12-63 0.12067 0.00195 5.7432 0.0820 0.34509 0.00299 0.49 1966 29 1938 12 1911 14 55.7 60.5 123.5 XX12-64 0.11467 0.00203 5.2657 0.0839 0.33296 0.00304 0.49 1875 32 1863 14 1853 15 50.8 57.5 116.8 XX12-65 0.11386 0.00149 4.4100 0.0463 0.28083 0.00204 0.63 1862 23 1714 9 1596 10 179.6 297.7 475.3 XX12-66 0.12377 0.00203 6.2681 0.0911 0.36717 0.00325 0.64 2011 29 2014 13 2016 15 73.4 94.6 146.8 XX12-67 0.11434 0.00204 5.1400 0.0826 0.32590 0.00298 0.56 1870 32 1843 14 1819 14 66.2 87.6 155.9 XX12-68 0.12094 0.00199 5.8591 0.0853 0.35122 0.00308	XX12-62	0.11593	0.00190	5.5584	0.0804	0.34766	0.00301	0.31	1894	29	1910	12	1923	14	54.1	38.6	124.7
XX12-64 0.11467 0.00203 5.2657 0.0839 0.33296 0.00304 0.49 1875 32 1863 14 1853 15 50.8 57.5 116.8 XX12-65 0.11386 0.00149 4.4100 0.0463 0.28083 0.00204 0.63 1862 23 1714 9 1596 10 179.6 297.7 475.3 XX12-66 0.12377 0.00203 6.2681 0.0911 0.36717 0.00325 0.64 2011 29 2014 13 2016 15 73.4 94.6 146.8 XX12-67 0.11434 0.00204 5.1400 0.0826 0.32590 0.00298 0.56 1870 32 1843 14 1819 14 66.2 87.6 155.9 XX12-68 0.12094 0.00199 5.8591 0.0853 0.35122 0.00308 0.39 1970 29 1955 13 1940 15 67.8 58.9 151.9 XX12-69 0.17148 0.00214 9.6326 0.0950 0.40722 0.00306	XX12-63	0.12067	0.00195	5.7432	0.0820	0.34509	0.00299	0.49	1966	29	1938	12	1911	14	55.7	60.5	123.5
XX12-65 0.011386 0.00149 4.4100 0.0463 0.28083 0.0024 0.63 1862 23 1714 9 1596 10 179.6 297.7 475.3 XX12-66 0.12377 0.00203 6.2681 0.0911 0.36717 0.00325 0.64 2011 29 2014 13 2016 15 73.4 94.6 146.8 XX12-67 0.11434 0.00204 5.1400 0.0826 0.32590 0.00298 0.56 1870 32 1843 14 1819 14 66.2 87.6 155.9 XX12-68 0.12094 0.00199 5.8591 0.0853 0.35122 0.00308 0.39 1970 29 1955 13 1940 15 67.8 58.9 151.9 XX12-69 0.17148 0.00214 9.6326 0.0950 0.40722 0.00306 0.65 2572 21 2400 9 2202 14 168.2 192.5 296.1 XX12-70 0.11639 0.00155 5.0541 0.0546 0.31478 0.00233	XX12-64	0.11467	0.00203	5.2657	0.0839	0.33296	0.00304	0.49	1875	32	1863	14	1853	15	50.8	57.5	116.8
XX12-66 0.12377 0.00203 6.2681 0.0911 0.36717 0.00325 0.64 2011 29 2014 13 2016 15 73.4 94.6 146.8 XX12-67 0.11434 0.00204 5.1400 0.0826 0.32590 0.00298 0.56 1870 32 1843 14 1819 14 66.2 87.6 155.9 XX12-68 0.12094 0.00199 5.8591 0.0853 0.35122 0.00308 0.39 1970 29 1955 13 1940 15 67.8 58.9 151.9 XX12-69 0.17148 0.00214 9.6326 0.0950 0.40722 0.00306 0.65 2572 21 2400 9 2022 14 168.2 192.5 296.1 XX12-70 0.11639 0.00155 5.0541 0.0546 0.31478 0.00233 0.27 1902 24 1828 9 1764 11 134.8 95.2 347.2 XX12-70 0.11855 0.00212 5.5427 0.0894 0.33892 0.00314	XX12-65	0.11386	0.00149	4.4100	0.0463	0.28083	0.00204	0.63	1862	23	1714	9	1596	10	179.6	297.7	475.3
XX12-67 0.11434 0.00204 5.1400 0.0826 0.3259 0.00298 0.56 1870 32 1843 14 1819 14 66.2 87.6 155.9 XX12-68 0.12094 0.00199 5.8591 0.0853 0.35122 0.00308 0.39 1970 29 1955 13 1940 15 67.8 58.9 151.9 XX12-69 0.17148 0.00214 9.6326 0.0950 0.40722 0.00306 0.65 2572 21 2400 9 2202 14 168.2 192.5 296.1 XX12-70 0.11639 0.00155 5.0541 0.0546 0.31478 0.00233 0.27 1902 24 1828 9 1764 11 134.8 95.2 347.2 XX12-70 0.11855 0.00212 5.5427 0.0894 0.33892 0.00314 0.48 1935 32 1907 14 1882 15 47.0 51.3 106.5 XX12-72 0.11565 0.00162 5.3328 0.0626 0.33423 0.00257	XX12-66	0.12377	0.00203	6.2681	0.0911	0.36717	0.00325	0.64	2011	29	2014	13	2016	15	73.4	94.6	146.8
XX12-68 0.12094 0.00199 5.8591 0.0853 0.35122 0.00308 0.39 1970 29 1955 13 1940 15 67.8 58.9 151.9 XX12-69 0.17148 0.00214 9.6326 0.0950 0.40722 0.00306 0.65 2572 21 2400 9 2202 14 168.2 192.5 296.1 XX12-70 0.11639 0.00155 5.0541 0.0546 0.31478 0.00233 0.27 1902 24 1828 9 1764 11 134.8 95.2 347.2 XX12-71 0.11855 0.00212 5.5427 0.0894 0.33892 0.00314 0.48 1935 32 1907 14 1882 15 47.0 51.3 106.5 XX12-72 0.11565 0.00162 5.3328 0.0626 0.33423 0.00257 0.35 1890 25 1874 10 1859 12 96.7 79.9 228.8 8	XX12-67	0.11434	0.00204	5.1400	0.0826	0.32590	0.00298	0.56	1870	32	1843	14	1819	14	66.2	87.6	155.9
XX12-69 0.17148 0.00214 9.6326 0.0950 0.40722 0.00306 0.65 2572 21 2400 9 2202 14 168.2 192.5 296.1 XX12-70 0.11639 0.00155 5.0541 0.0546 0.31478 0.00233 0.27 1902 24 1828 9 1764 11 134.8 95.2 347.2 XX12-71 0.11855 0.00212 5.5427 0.0894 0.33892 0.00314 0.48 1935 32 1907 14 1882 15 47.0 51.3 106.5 XX12-72 0.11565 0.00162 5.3328 0.0626 0.33423 0.00257 0.35 1890 25 1874 10 1859 12 96.7 79.9 228.8	XX12-68	0.12094	0.00199	5.8591	0.0853	0.35122	0.00308	0.39	1970	29	1955	13	1940	15	67.8	58.9	151.9
XX12-70 0. 11639 0. 00155 5. 0541 0. 0546 0. 31478 0. 00233 0. 27 1902 24 1828 9 1764 11 134.8 95.2 347.2 XX12-71 0. 11855 0. 00212 5.5427 0.0894 0.33892 0.00314 0.48 1935 32 1907 14 1882 15 47.0 51.3 106.5 XX12-72 0. 11565 0. 00162 5.3328 0.0626 0.33423 0.00257 0.35 1890 25 1874 10 1859 12 96.7 79.9 228.8	XX12-69	0.17148	0.00214	9.6326	0.0950	0.40722	0.00306	0.65	2572	21	2400	9	2202	14	168.2	192.5	296.1
XX12-71 0.11855 0.00212 5.5427 0.0894 0.33892 0.00314 0.48 1935 32 1907 14 1882 15 47.0 51.3 106.5 XX12-72 0.11565 0.00162 5.3328 0.0626 0.33423 0.00257 0.35 1890 25 1874 10 1859 12 96 7 79 9 228 8	XX12-70	0.11639	0.00155	5.0541	0.0546	0.31478	0.00233	0.27	1902	24	1828	9	1764	11	134.8	95.2	347.2
XX12-72 0 11565 0 00162 5 3328 0 0626 0 33423 0 00257 0 35 1890 25 1874 10 1859 12 96 7 79 9 228 8	XX12-71	0.11855	0.00212	5.5427	0.0894	0.33892	0.00314	0.48	1935	32	1907	14	1882	15	47.0	51.3	106.5
	XX12-72	0.11565	0.00162	5.3328	0.0626	0.33423	0.00257	0.35	1890	25	1874	10	1859	12	96.7	79.9	228.8

 $1447 \pm 9Ma$ $1792 \pm 12Ma$ $1612 \pm 11Ma$ $1911 \pm 16Ma$ $2385 \pm 19Ma$ $1739 \pm 13Ma$ $2277 \pm 18Ma$ $2022 \pm 17Ma$ $2022 \pm 17Ma$ $2621 \pm 23Ma$ $100\mu m$

图 5 北山造山带中元古代石英岩样品 XX12 代表性锆石的 CL 图像(圆圈代表锆石 U-Pb 微区分析点位) Fig. 5 CL images of representative zircons of Mesoproterozoic quartzite sample XX12 in Beishan orogen (the circles denote U-Pb analysis spots)

龄、 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值和 Hf 模式年龄之间的相互关系,可将 其分为 A1、A2、A3、B、C 五个部分,如图 7 所示。在 A1 区域,锆石 U-Pb 年龄和 Hf 模式年龄接近且分 别在 1739 ±15~2034 ±15 Ma 之间和在 2048~2642 Ma 之间。其对应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 为正值或 0,为 0~5.9; 在 A2 区域,锆石 U-Pb 年龄和 Hf 模式年龄接近, 且分别介于 2347 ±18~2432 ±17 Ma 之间和 2600~ 2932 Ma之间,而对应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 均为正值,为 0.3~ 4.7;在 A3 区域,共有两个测点,锆石 U-Pb 年龄和 Hf 模式年龄亦接近,且分别为 2643±22 Ma、2669 ±17 Ma 和 2983 Ma、3079 Ma,而对应的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 均 为正值,为 0.8~2.1;在 B 区域,锆石 U-Pb 年龄和 Hf 模式年龄差距较大,分别介于 1576±20~2022 ±17 Ma 之间和 2510~2986 Ma 之间,而对应的

表 2 北山造山带中元古代石英岩样品 XX12 锆石的 Lu-Hf 同位素数据

e 2	Zircon Lu-Hf isotopic	data on zircons of	' Mesoproterozoic	quartzite sam	ole XX12 in	Beishan	orogen
-----	-----------------------	--------------------	-------------------	---------------	-------------	---------	--------

样品名称	年龄(Ma)	1Sigma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2SE	$\varepsilon_{\rm Hf}(t)$	2SE	$T_{\rm DM2}$	$f_{ m Lu/Hf}$
XX12-01	1722	16	0.021933	0.000828	0.281609	0.000012	-3.8	0.43	2634	-0.98
XX12-02	2385	19	0.019159	0.000714	0.281149	0.000009	-5.2	0.34	3225	-0.98
XX12-03	2355	22	0.019147	0.000811	0.281450	0.000015	4.7	0.52	2600	-0.98
XX12-04	1737	18	0.037816	0.001430	0.281468	0.000013	-9.1	0.45	2975	-0.96
XX12-05	1576	20	0.031223	0.001145	0.281561	0.000011	-9.0	0.40	2846	-0.97
XX12-06	1911	16	0.016171	0.000584	0.281410	0.000009	-6.4	0.31	2936	-0.98
XX12-08	1612	11	0.018933	0.000762	0.281694	0.000012	-3.1	0.42	2510	-0.98
XX12-10	1739	13	0.032627	0.001224	0.281884	0.000010	5.9	0.36	2048	-0.96
XX12-11	2022	17	0.032414	0.001159	0.281486	0.000009	-1.9	0.32	2751	-0.97
XX12-12	2363	14	0.035028	0.001317	0.281197	0.000013	-4.9	0.45	3193	-0.96
XX12-18	2569	17	0.013848	0.000489	0.280885	0.000010	-10.0	0.36	3660	-0.99
XX12-19	1862	20	0.016214	0.000600	0.281405	0.000010	-7.6	0.35	2978	-0.98
XX12-20	2492	16	0.012764	0.000443	0.281083	0.000010	-4.6	0.37	3275	-0.99
XX12-21	1945	16	0.028063	0.001042	0.281509	0.000011	-2.7	0.39	2736	-0.97
XX12-22	1983	15	0.013505	0.000496	0.281428	0.000009	-4.0	0.32	2844	-0.99
XX12-23	1783	12	0.016549	0.000727	0.281636	0.000011	-1.3	0.38	2529	-0.98
XX12-24	1736	13	0.031346	0.001128	0.281577	0.000008	-5.0	0.29	2717	-0.97
XX12-25	2347	18	0.012123	0.000450	0.281370	0.000009	2.2	0.33	2744	-0.99
XX12-28	2669	17	0.011996	0.000449	0.281124	0.000009	0.8	0.31	3079	-0.99
XX12-33	2643	22	0.006847	0.000256	0.281166	0.000007	2.1	0.25	2983	-0.99
XX12-34	2034	15	0.013000	0.000527	0.281508	0.000007	0.0	0.26	2642	-0.98
XX12-36	2463	18	0.023230	0.000871	0.281179	0.000008	-2.6	0.30	3129	-0.97
XX12-39	2524	19	0.017605	0.000628	0.281052	0.000010	-5.3	0.34	3342	-0.98
XX12-40	1903	15	0.011139	0.000430	0.281666	0.000011	2.8	0.41	2369	-0.99
XX12-43	1993	14	0.023764	0.000845	0.281449	0.000012	-3.5	0.43	2821	-0.97
XX12-46	2246	14	0.001448	0.000044	0.281143	0.000013	-7.5	0.45	3260	-1.00
XX12-48	1991	14	0.013011	0.000485	0.281439	0.000011	-3.4	0.39	2816	-0.99
XX12-52	2619	18	0.016998	0.000650	0.280988	0.000012	-5.5	0.44	3423	-0.98
XX12-53	2432	17	0.020214	0.000742	0.281274	0.000011	0.3	0.38	2930	-0.98
XX12-54	2328	14	0.021426	0.000774	0.281202	0.000011	-4.7	0.39	3151	-0.98
XX12-56	1892	13	0.028359	0.000989	0.281406	0.000012	-7.4	0.43	2986	-0.97
XX12-58	1681	12	0.017846	0.000671	0.281520	0.000012	-7.6	0.43	2841	-0.98
XX12-59	1972	14	0.009687	0.000359	0.281447	0.000009	-3.4	0.33	2800	-0.99
XX12-60	2401	15	0.017012	0.000646	0.280998	0.000011	-10.1	0.41	3534	-0.98
XX12-61	1888	13	0.017229	0.000593	0.281571	0.000013	-1.2	0.46	2599	-0.98
XX12-62	1923	14	0.015477	0.000588	0.281426	0.000013	-5.5	0.45	2892	-0.98

4 讨论

4.1 沉积时代的探讨

在北山造山带中段的马鬃山、旱山地区,分布有 北山地区最古老的岩石组合,包括具有较高变质程 度(达到高绿片岩相)正、副变质岩和具有较低变质 程度(达到低绿片岩相)的副变质岩(Zuo Guochao et al.,1992;Zuo Guochao and Li Maosong,1996; Wei Xueping et al.,2000; Song Dongfang et al., 2013a)。 前人将北山造山带内变质程度较高,达到高绿 片岩相的岩石均划入"北山杂岩",并依据少量的同 位素年代学数据认为其形成于新太古代到古元古代 和中元古代到新元古代时期(Zuo Guochao et al., 1992;Wei Xueping et al., 2000),而略低于北山杂 岩的副变质岩,依据区域地层、构造接触关系和有限 的化石资料(叠层石),前人认为其形成时代应为中 新元古代时期(甘肃省区域地质志,1989)。这套副 变质岩以大理岩、板岩、千枚岩、片岩和石英岩等为 主的岩石组合可能代表了一个浅变质的被动大陆边 缘的构造环境(Gong Quansheng et al., 2002)。然 而,和天山造山带类似,作为中亚造山带南缘的一部 分,伴随着古生代以来多期俯冲增生造山及随后的 陆内造山活动,北山造山带亦经历了很强的变质变

Tab



图 6 北山造山带中元古代石英岩样品 XX12 的锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及锆石 U-Pb 年龄谱(b) Fig. 6 U-Pb concordia diagrams (a) and U-Pb age spectrum (b) of zircon in Mesoproterozoic quartzite sample XX12 in Beishan orogen



- 图 7 北山造山带中元古代石英岩样品 XX12 的锆石 ε_{Hf}(t)-U-Pb 年龄图
- Fig. 7 Zircon $\varepsilon_{Hf}(t)$ U-Pb age diagrams of Mesoproterozoic quartzite sample XX12 in Beishan orogen

黄色区域和红色虚线分别代表了塔里木地块前寒武纪岩石(据 Long Xiaoping et al., 2015及其参考文献)和本文样品 XX12 揭示 的北山造山带前寒武纪岩石的锆石 ε_{Hf}(t)和 U-Pb 年龄的分布区 域。其中绿色、红色、粉色、紫色和蓝色数据分别对应于 A1、A2、 A3、B、C 五个数据部分

The yellow area and the red dotted line represent the distribution of the zircon $\epsilon_{Hf}(t)$ -U-Pb data from the Precambrian rocks in Tarim block (after Long Xiaoping et al., 2015 and references therein) and from Precambrian rocks in Beishan reported in this work. The green, red, pink, purple and blue correspond to the 5 data sections including A1, A2, A3, B, and C, respectively

形作用,造成北山造山带中前寒武纪岩石分布零散, 且多以断层互相接触,亦以断层和围岩相互接触 (Zuo Guochao et al., 1992; Zheng Yadong et al., 1996; Zhang Jian et al., 2012)。例如,在北山造山 带南带中,一些古生代岛弧增生杂岩带中,残留了早 古生代的被动大陆边缘沉积组合,可见大理岩夹石 英岩层或透镜体,与周围围岩即晚古生代岛弧杂岩 体呈断层接触关系(Song Dongfang et al., 2013b; Zhou Hai et al., in press)。因此,北山造山带副变 质岩既有前人依据有限化石资料确定的形成时代应 为中新元古代时期的前寒武纪岩石,代表北山前寒 武纪基底物质;又有古生代残余的被动大陆边缘沉 积组合。本文中的样品 XX12 最小的有效锆石年龄 为1447±9 Ma,代表了该样品的最大沉积年龄。关 于该副变质岩原岩形成时代的下限年龄的估计,本 文认为其至少在新元古代之前已经形成。证据如 下:①总结前人的研究工作,北山造山带内残余的古 生代的变质被动大陆边缘沉积组合中的副变质岩的 U-Pb 锆石年龄谱中,均显示明显而连续(1.2~1.8 Ga)的中元古代的年龄峰,且往往具有少量新元古 代的年龄信息(Xiao Wenjiao et al., 2010b; Song Dongfang et al., 2013b; Zhou Hai et al., in press),本样品缺乏新元古代的年龄信息。②北山 造山带南带广泛出露前寒武纪正变质岩,其变质程 度均较高,例如,北山造山带南带中1.4 Ga 的黑云 斜长片麻岩(He Zhenyu et al., 2015)。本文报道 的位于马鬃山地块东段的副变质岩,主体以石英岩, 云母石英片岩为主,对样品 XX12 显微镜下观察表 明,其石英具有明显的压扁拉长或波状消光,呈明显 的定向排列,其沉积结构、构造则为变质作用彻底置 换。而与前人关于典型的古生代变质被动大陆边缘 沉积组合的岩性描述,主要包括大理岩、结晶灰岩、 板岩、千枚岩、石英岩等低绿片岩相的岩石组合明显 不同(Zuo Guochao et al., 1990)。综上所述,位于

马鬃山地块东段的副变质岩样品 XX12 的沉积时代 应该在中元古代即约 1.1~1.45 Ga 之间。

4.2 北山造山带前寒武纪基底物质的亲缘性探讨

中亚造山带作为世界上最大的俯冲增生型造山 带,在其宽缓的造山区内,零散地分布着大量的前寒 武纪岩石,代表了中亚造山带内微陆块残余的前寒 武纪基底 (Safonova et al., 2008, 2009; Xiao Wenjiao et al., 2010a, 2010b, 2013, 2014, 2015; Xu Bei et al., 2013; Eizenhöfer et al., 2014)。然 而,中亚造山带内的前寒武纪岩石普遍经历了古生 代强烈的增生造山作用的改造,显示了前寒武纪物 质和其显生宙围岩界限模糊,难以区分的特征。例 如中天山地块(He Zhenyu et al., 2012, Zhou Hai et al., 2016)和北山造山带(Song Dongfang et al., 2013a, 2013b; He Zhenyu et al., 2015)内的古生 代岛弧杂岩,显示了较高的变质程度,且与前寒武纪 岩石界限模糊,难以区分(Song Dongfang et al., 2013a, 2013b),这为北山造山带前寒武基底物质亲 缘性的研究带来了很大的困难。

多数前人的研究工作表明,塔里木克拉通中的 前寒武纪岩石主要出露于库鲁克塔格地区、柯坪地 区、敦煌地区等(Lu Songnian et al., 2008; Long Xiaoping et al., 2011, 2014; Shu Liangshu et al., 2013),并认为敦煌地块是塔里木克拉通的一部分 (Lu Songnian et al., 2008)。最近的一系列工作表 明,中天山地块的前寒武纪基底显示了强烈的塔里 木亲缘性,表明其曾经亦为塔里木克拉通的一部分 (Shu Liangshu et al., 2013; Zhou Hai et al., in press),而对敦煌地块内的前寒武纪岩石的研究表 明,敦煌地块表现出了与塔里木不同的一些独特的 地质演化特征 (Song Dongfang et al., 2013a, 2013b; Zong Keqing et al., 2013; Zhang Jianxin et al., 2013; Zhao Yan et al., 2015)。因此,了解北 山造山带与塔里木克拉通和同在造山带内相邻的微 陆块即敦煌地块之间的亲缘性是非常有必要的。

20世纪90年代,依据详细的区域地质调查工作和有限的同位素数据,一些学者提出北山造山带 曾经有统一的前寒武纪基底,其代表性岩石即为前 人称为的"敦煌杂岩"或"北山杂岩",形成时代约为 新太古代到古元古代和中元古代到新元古代时期, 在随后的中亚造山过程中被改造破坏(Zuo Guochao et al.,1990, 1992; Zuo Guochao and Li Maosong, 1996; Dai Wenjun, 2000; Wei Xueping et al., 2000)。然而,目前关于北山造山带中的前 寒武纪岩石高精度年代学数据,仅有少量报道,如北 山造山带南带中 0.9 Ga 的眼球状花岗岩和 1.4 Ga 的花岗片麻岩(He Zhenyu et al., 2015)。近年来, 有学者通过对北山造山带内广泛分布的副变质岩进 行系统的锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素分析,得出 北山造山带中的副变质岩前寒武纪锆石年龄谱主体 显示了以古元古代到中元古代(约 1.2~2.0 Ga)为 主的稳定的年龄峰值和新太古代时期为次的年龄峰 值(约 2.5~2.7 Ga),最明显的年龄峰值依次约为 1760、1458,及 2500~2700 Ma 之间平缓的峰(图 8c 部分数据),并认为北山造山带中的副变质岩样品之 间差异较大,极有可能暗示了北山造山带内前寒武 纪年龄信息和物质多源的特点,且表现出不同于塔 里木地块的亲缘性(Song Dongfang et al., 2013b)。 Rojas-Agramonte et al. (2011)总结了中亚造山带 中主要克拉通的锆石年龄分布特征。塔里木克拉通 的前寒武纪锆石的年龄信息除了最明显的新元古代 时期(约 0.7~1.0 Ga)的年龄峰值之外,还表现出 中元古代中晚期连续且以峰值约为 1.4 Ga、中元古 代早期到古元古代晚期(约1.6~1.9 Ga)峰值约为 1729 Ma 和古元古代早期(约 2.3~2.5 Ga)峰值为 2.47 Ga 三个依次变弱的年龄峰。值得指出的是, 中元古代时期以约 1.4 Ga 为峰值的年龄信息基本 来自中天山地块(Shu Liangshu et al., 2013)。而 蒙古地块的前寒武纪年龄信息除了新元古代末期 (约 0.8~0.6 Ga)的年龄峰之外,表现出了中元古 代早期到古元古代末期(约1.6~1.8 Ga)峰值约为 1.6Ga 和 1.8 Ga, 古元古代中晚期(约 1.8~2.1 Ga)峰值年龄约为 2.05 Ga,和古元古代早期到新太 古代时期(约 2.4~2.8Ga)峰值年龄约为 2.45 和 2.7 Ga 三个主要年龄峰(Rojas-Agramonte et al., 2011)。结合前人关于北山造山带内副变质岩前寒 武纪年龄信息的报道(Song Dongfang et al., 2013b)(图 8),中元古代(约 1.0 Ga)之后,北山造山 带内显示了明显的新元古代年龄信息峰值约为 0.93 和 0.8 Ga,这和塔里木克拉通、蒙古地块均相 似, 共同记录了 Rodina 超大陆的聚散事件 (Hoffman, 1991; Meert et al., 2003); 而在中元古 代及其之前,北山造山带内的副变质岩的前寒武纪 信息总体上则显示多源区的特征,整体上表现出与 塔里木克拉通、蒙古地块明显的差异。而本文中副 变质岩样品 XX12 则表现为以中元古代早期到古元 古代中期(约1.6~2.1 Ga)为主要且逐渐增强的年 龄峰和以古元古代早期到新太古代时期(约2.3~





蒙古地块和塔里木地块数据来自 Rojas-Agramonte et al., (2011); 北山造山带中副变质岩数据来自 Song Dongfang et al., (2013b)和 本文样品,其中虚线代表本文样品 XX12

Data sourses: Tarim and Mongolia, from Rojas-Agramonte et al., (2011); Beishan metamorphic rocks, from Song Dongfang et al., (2013b) and this work. The dotted line represents sample XX12 in this work

2.7 Ga)为次要年龄峰的特征,最明显的年龄峰值依 次约为1.91Ga、1.73Ga、1.84Ga、2.0Ga、2.36Ga、 2.63Ga和2.49Ga等(图6)。对比塔里木克拉通和 蒙古地块的前寒武纪年龄信息,可以得出,其在中元 古代之前表现出和塔里木克拉通不同,和蒙古地块 相似的特征(图 8)。

对本文副变质岩样品的 Hf 同位素分析显示, 其物源区可能存在的古太古代时期的岩石(约 3.53 Ga),并经历了新太古代时期的对中太古代早期到 古太古代的古老地壳(约 3.13~3.5 Ga)再造和新 太古代约 2.6 Ga 新生地壳的加入事件,以及古元古 代早期时期(约 2.3~2.4 Ga)和古元古代晚期(约 1.7~2.0 Ga) 两次新生地壳的加入和几乎同时期 (约1.6~2.0 Ga)对中新太古代时期(约2.5~2.9 Ga)古老地壳的再造事件。Long Xiaoping et al., 2015 对塔里木克拉通北缘库鲁克塔格地区的古元 古代副变质岩兴地塔格群和托格杂岩的研究表明, 塔里木克拉通在古元古代(约1.6 Ga)之前经历了 三次的陆壳增长事件,分别在古太古代晚期(约3.0 Ga),新太古代早期(约2.7 Ga),和新太古代到古元 古代早期(约2.5 Ga),同时在古元古代时期(约1.6 ~2.3 Ga)和新太古代时期(约 2.5~2.7 Ga)则经 历了古老地壳的再造(Long Xiaoping et al., 2015)。进一步将本文中的样品和塔里木古元古代 代表壳岩和其他副变质岩碎屑锆石的 Hf 同位素两 阶段模式年龄对比表明(图 9),北山造山带中元古 代副变质岩和塔里木克拉通之上的古元古代副变质 岩(Long Xiaoping et al., 2015)的两阶段模式年龄 共同记录了新太古代中期新生地壳加入及新太古代 到古元古代时期、古元古代中期到晚期两期古老地 壳再造事件,不同的是,前者亦反映了古元古代早期 和古元古代晚期的新生地壳加入事件。因此,北山 造山带内的中元古代之前的前寒武纪基底和塔里木 克拉通亲缘性不强。北山造山带南侧敦煌地块内前 寒武纪岩石的 Hf 同位素则表明,敦煌地块经历了 新太古代的地壳生长和古老地壳再造事件,以及古 元古代中期(约2.0 Ga)的地壳增生、古元古代晚 期(1.85~1.75Ga)的地壳再造事件(He Zhenyu et al., 2013; Zong Keqing et al., 2013; Zhang Jianxin et al., 2013)。因此,敦煌地块的前寒武纪 基底和北山造山带内的前寒武纪副变质岩的源区均 记录了古太古代中晚期的新生地壳加入事件,表明 敦煌地块内的残余前寒武纪岩石极有可能为北山造 山带副变质岩的一个物源区,即北山造山带内的前 寒武纪基底在中元古代及其之前和敦煌地块可能具 有很强的亲缘性。

综上所述,北山造山带内副变质岩中的前寒武 纪信息在中元古代之后(约1.0 Ga)显示出和塔里



- 图 9 北山造山带前寒武纪岩石(a)与邻区敦煌地块(b)、 塔里木地块北缘前寒武纪岩浆(c)锆石 Hf 二阶段 模式年龄分布直方图
 - Fig. 9 Zircon Hf two-stage model age spectrum of Precambrian rocks in Beishan orogen compared(a) to those of igneous zircons from northern Tarim block (c) and Dunhuang block (b)
- (a)—数据来自本文;(b)—数据来自 Long Xiaoping et al., 2010, 2011;(c)—数据来自 Zong Keqing et al., 2013 和 Long Xiaoping et al., 2014
- (a)—Data from this contribution; (b)—data from Long Xiaoping et al., 2010, 2011; (c)—data from Zong Keqing et al., 2013 and Long Xiaoping et al., 2014

木克拉通、蒙古地块均相似的特征,表明三者均卷入 了 Rodina 超大陆的聚散事件;在中元古代及其之前 (>约1.1 Ga),则显示多源区的特征,本文中的样 品显示北山造山带前寒武纪基底和塔里木克拉通不 同而与蒙古地块相似的特征。锆石的 Hf 同位素分 析进一步揭示了北山造山带前寒武纪副变质岩和敦 煌地块均记录了古太古代中晚期的新生地壳加入事 件,显示了和塔里木克拉通的差异。这也暗示了敦 煌地块和北山造山带在中元古代(约1.45 Ga)之前 可能具有统一的前寒武纪基底。

5 结论

(1)北山造山带副变质岩既有形成时代为中新 元古代的前寒武纪岩石,代表北山前寒武纪基底物 质;又有古生代以来残余的被动大陆边缘沉积组合。 本文报道的位于马鬃山地块东段的古洞井岩群的副 变质岩属于前寒武纪岩石,其沉积时代在中元古代 约1.1~1.45 Ga之间。

(2)依据现有文献和本文的研究工作,在中元 古代之后(约 1.0 Ga)北山前寒武纪基底物质显示 出和塔里木克拉通、蒙古地块均相似的特征,三者均 卷入了 Rodina 超大陆的聚散事件;在中元古代及其 之前(>约 1.1 Ga),则显示多源区的特征,本文中 的中元古代副变质岩则显示出和塔里木克拉通不 同,和蒙古地块相似的特征。锆石的 Hf 同位素分 析进一步揭示了北山造山带前寒武纪副变质岩和敦 煌地块均记录了古太古代中晚期的新生地壳加入事 件,显示了和塔里木克拉通的差异。这也暗示了敦 煌地块和北山造山带在中元古代(约 1.45 Ga)之前 可能具有统一的前寒武纪基底。

致谢:西北大学大陆动力学实验室张红、戴梦 宁、宗春蕾、弓化栋工程师在锆石样品的制靶及 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试, Hf 同位素测试方面的帮助,匿名审稿人对稿件提出宝贵意见,在此一并表示 诚挚的感谢。

References

- Albarède F, Scherer E E, Blichert-Toft J, Rosing M, Simionovici A, Bizzarro M. 2006. γ-ray irradiation in the early Solar System and the conundrum of the 176Lu decay constant. Geochimica et Cosmochimica Acta, 70: 1261~1270.
- BGMRG (Bureau of Geology and Mineral Resources of Gansu Province). 1989. Regional Geology of Gansu Province. Beijing: Geological Publishing House, 1~690 (in Chinese).
- Blichert Toft J, Albarede F. 1997. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system. Earth and Planetary Science Letters, 148 (1-2): 243~258.
- Cawood P A, Buchan C. 2007. Linking accretionary orogenesis with supercontinent assembly. Earth Science Reviews, 82: 217 $\sim\!256.$
- Cawood P A, Kröner A, Collins W J, Kusky T M, Mooney W D,

Windley B F. 2009. Earth accretionary orogens through Earth history. In: Cawood P A, Kröner A. eds. Earth Accretionary Systems in Space and Time. Geological Society of London, Special Publications, 318: $1 \sim 36$.

- Chu Nanchin, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C R, Bayon G, Burton K. 2002. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 17: 1567~1574.
- Dai Wenjun, Gong Quansheng. 2000. Redividing of Lebaquan Group in Beishan area of Gansu Province and its geological implication. Acta Geologica Gansu, 9: 23~29 (in Chinese with English abstract).
- Eizenhöfer P R, Zhao Guochun, Zhang Jian, Sun Min. 2014. Final closure of the Paleo-Asian Ocean along the Solonker Suture Zone: Constraints from geochronological and geochemical data of Permian volcanic and sedimentary rocks. Tectonics, 33: 441 \sim 463.
- Glorie S, De Grave J, Buslov M M, Zhumulev F I, Izmer A, Vandoorne W, Ryabinnin A, Van den haute, Vanhaecke F, Elburg M A. 2011. Formation and Palaeozoic evolution of the Gorny-Altai-Altai-Mongolia suture zone (South Siberia): zircon U/Pb constraints on the igneous record. Gondwana Research, 20: 465~484.
- Gong Quansheng, Liu Mingqiang, Li Hailin, Liang Minghong, Dai Wenjun. 2002. The type and basic characteristic of Beishan orogenic belt, Gansu. Northwestern Geology, 35(3): 28~34 (in Chinese with English abstract).
- Gong Quansheng, Liu Mingqiang, Liang Minghong, Li Hailin. 2003. The tectonic facies and tectonic evolution of Beishan orogenic belt, Gansu. Northwestern Geology, 36(1): 11∼17 (in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, Van-Achterbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICP-MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochimica et Cosmochimica Acta, 64: 133~147.
- Guo Zhaojie, Zhang Zhicheng, Liu Shuwen, Li Huimin. 2003. U-Pb geochronological evidence for the early Precambrian complex of the Tarim Craton, NW China. Acta Petrologica Sinica, 19 (3): $537 \sim 542$ (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Ren Bingchen, Yao Wenguang, Fu Lifu. 2002. The division of tectonic units of Beishan area, Gansu- Inner Mongolia. Northwestern Geology, 35(4): 30~40 (in Chinese with English abstract).
- He Shiping, Zhou Huiwu, Ren Bingchen, Yao Wenguang, Fu Lifu. 2005. Crustal evolution of Palaeozoic in Beishan area, Gansu and Inner Mongolia, China. Northwestern Geology, 38(3):6~ 15 (in Chinese with English abstract).
- He Zhenyu, Zhang Zeming, Zong Keqing, Wang Wei, Yu Fei. 2012. Zircon geochronology of Xingxingxia quartz dioritic gneisses: implications for the tectonic evolution and

Precambrian basement affinity of Chinese Tianshan orogenic belt. Acta Petrologica Sinica, 28: 1857~1874 (in Chinese with English abstract).

- He Zhenyu, Zhang Zeming, Zong Keqing, Dong Xin. 2013. Paleoproterozoic crustal evolution of the Tarim Craton: Constrained by zircon U-Pb and Hf isotopes of meta-igneous rocks from Korla and Dunhuang. Journal of Asian Earth Science, 78: 54~70.
- He Zhenyu, Sun Lixin, Mao Lingjuan, Zong Keqing, Zhang Zeming. 2015. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneiss and granodiorite from the southern Beishan orogenic collage: Mesoproterozoic magmatism and crustal growth. China Science Bulletin, 60: 389~399 (in Chinese with English abstract).
- Hoffman P F. 1991. Did the breakout of Laurentia turn Gondwanaland inside-out? Science, 252: 1409~1412..
- Hu Aiqin, Jahn Bor-Ming, Zhang Guoxin, Chen Yibing, Zhang Qianfeng. 2000. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotope evidence. Part I. Isotopic characterization of basement rocks. Tectonophysics, 328: 15~51.
- Hu Aiqin, Wei Gangjian, Deng Wenfeng, Zhang Jibin, Chen Linli. 2006. 1.4 Ga SHRIMP U-Pb age for zircons of granodiorite and its geological significance from the eastern segment of the Tianshan Mountains, Xinjiang, China. Geochimica, 35: 333~ 345 (in Chinese with English abstract).
- Hu Aiqin, Wei Gangjian, John Bor-Ming, Zhang Jibin, Deng Wenfeng, Chen Linli. 2010. Formation of the 0. 9 Ga Neoproterozoic granitoids in the Tianshan Orogen, NW China: constraints from the SHRIMP zircon age determination and its tectonic significance. Geochemica, 39: 197~212 (in Chinese with English abstract).
- Jahn Bor-Ming. 2004. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic. Geological Society of London (Special Publications), 226: 73~100.
- Khain E V, Bibikova E V, Salnikova E B, Kröner A, Gibsher A S, Didenko A N, Degtyarev K E, Fedotova A A. 2003. The Palaeo-Asian ocean in the Neoproterozoic and early Palaeozoic: new geochronologic data and palaeotectonic reconstructions. Precambrian Research, 122: 329~358.
- Kröner A, Windley B F, Badarch G, Tomurtogoo O, Hegner E, Jahn Bor-Ming, Gruschka S, Khain E V, Demoux A, Wingate M T D. 2007. Accretionary growth and crust formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian-Nubian shield. Geological Society of America Memoir, 200: 181~209.
- Kröner A, Hegner E, Lehmann B, Heinhorst J, Wingate M T D, Liu Dunyi, Emelov P. 2008. Palaeozoic arc magmatisim in the Central Asian Orogenic Belt of Kazakhstan: SHRIMP zircon ages and whole-rock Nd isotopic systematics. Journal of Asian Earth Sciences, 32(2-4): 118~130.
- Kröner A, Demoux A, Zack T, Rojas-Agramonte Y, Jian Ping, Tomurhuu D, Barth M. 2011. Zircon ages for a felsic volcanic

rock and arc-related early Palaeozoic sediments on the margin of the Baydrag microcontinent, central Asian orogenic belt, Mongolia. Journal of Asian Earth Sciences, 42: 1008~1017.

- Kröner A, Kovach V, Belousova E, Hegner E, Armstrong R, Dolgopolova A, Seltmann R, Alexeiev D V, Hoffmann J E, Wong J, Sun Min, Tong Y, Wilde S A, Degtyarev K E, Rytsk E. 2014. Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research, 25: 103~125.
- Li Jinyi, Xiao Wenjiao, Wang Kezhuo, Sun Guihua, and Gao Liming. 2003. Neoproterozoic-Paleozoic tectonostratigraphic framework of Eastern Xinjiang, NW China [C] //In: Mao Jingwen, Goldfarb, R., Seltmann, R., Wang Denghong, Xiao Wenjiao, and Hart, C (editors), Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan, IGCP 473 Workshop. 2003. Urumuqi. International Association on the Genesis ofOre Deposits (IAGDO), CERAMS: London, Natural History Museum, 31~74.
- Li Jinyi, He Guoqi, Xu Xin, Li Huaqin, Sun Guihua, Yang Tiannan, Gao Liming, Zhu Zhixin. 2006a. Crustal Tectonic Framework of Northern Xinjiang and Adjacent Regions and Its Formation. Acta Geologica Sinica, 80(1): 148~168.
- Li Jinyi, Wang Kezhuo, Li Yaping, Sun Guihua, Chu Chunhua, Li Liqun, Zhu Zhixin. 2006b. Geomorphological features, crustal composition and geological evolution of the Tianshan Mountains. Geological Bulletin of China, 25(8): 895~909 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaoming, Gao Shan, Diwu Chunrong, Ling Wenli. 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze craton as revealed by detrital zircon studies. American Journal of Science, 308: 421 ~468.
- Long Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, Zhao Guochun, Xiao Wenjiao, Wang Yujing, Yang Yueheng, Hu Aiqin. 2010. Archean crustal evolution of the northern Tarim Craton NW China: ZirconU-Pb and Hf isotopic constraints. Precambrian Research, 180: 272~284.
- Long Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, Xiao Wenjiao, Zhao Guochun, Zhou Kefa, Wang Yujing, Hu Aiqin. 2011. The discovery of the oldest rocks in the Kuluketage area and its geological implications. Science China: Earth Science, 54: 342 ~348.
- Long Xiaoping, Yuan Chao, Sun Min, Kröner A, Zhao Guochun. 2014. New geochemical and com-bined zircon U-Pb and Lu-Hf isotopic data of orthogneisses in the northern AltynTagh, northern margin of the Tibetan plateau: implication for Archean evolu-tion of the Dunhuang Block and crust formation in NW China. Lithos, (200-201): 418~431.
- Long Xiaoping, Wilde S A, Yuan Chao, Hu Aiqin, Sun Min. 2015. Provenance and depositional age of Paleoproterozoic metasedimentary rocks in the Kuluketage Block, northern Tarim Craton: Implications for tectonic setting and crustal growth. Precambrian Research, 260: 76~90

- Lu Songnian, Li Huaikun, Zhang Chuanlin, Niu Guanghua. 2008. Geological and geochronological evidence for the Precambrian evolution of the Tarim Craton and surrounding continental fragments. Precambrian Research, 160: 94~107.
- Ludwig K R. 2001. Users Manual for Isoplot/Ex Rev. 2. 49. Berkeley Geochronology Centre Special Publication, 1~56.
- Meert J G, Torsvik T H. 2003. The making and unmaking of a supercontinent: Rodinia revisited. Tectonophysics, 375: 261 ~288.
- Rojas-Agramonte Y, Kröner A, Demoux A, Xia Xiaoping, Wang Wei, Donskaya T, Liu Dunyi. 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: 751 ~763.
- Rudnick R L, Gao Shan. 2003. Composition of the continental crust. In: Heinrich D H, Karl K T, eds. Treatise Geochemistry. Oxford: Pergamon, 1~64.
- Safonova I Y, Simonov V A, Buslov M M, Ota T, Maruyama S. 2008. Neoproterozoic basalts of the Paleo-Asian Ocean (Kurai accretionary zone, Gorny Altai, Russia): geochemistry, petrogenesis, and geodynamics. Russian Geology and Geophysics, 49: 254~271.
- Safonova I Y, Buslov M M, Iwata K, Kokh D A. 2009. Fragments of Vendian-early Carboniferous oceanic crust of the Paleo-Asian Ocean in fold belts of the Altai-Sayan region of Central Asia: Geochemistry, biostratigraphy and structural setting. Gondwana Research, 7: 771~790.
- Safonova I, Seltmann R, Kröner A. Gladkochub D, Schulmann K, Xiao Wenjiao, Kim J, Komiya T, Sun Min. 2011. A new concept of continental construction in the Central Asian Orogenic Belt (compared to actualistic examples from the Western Pacific). Episodes, 34 (3), 186~196.
- Sengör A C, Natal'in B A, Burtman V S. 1993. Evolution of the Altaid tectonic collage and Palaeozoic crustal growth in Eurasia. Nature, 364: 299~306.
- Shu Liangshu, Deng Xingliang, Zhu Wenbin, Ma Dongsheng, Xiao, Wenjiao. 2011. Precambrian tectonic evolution of the Tarim Block, NW China: new geochronological insights from the Quruqtagh domain. Journal of Asian Earth Sciences, 42: 774~ 790.
- Shu Liangshu, Zhu Wenbin, Wang Bo, Wu Changzhi, Ma Dongsheng, Ma Xuxuan, Ding Haifeng. 2013. The formation and evolution of ancient blocks in Xinjiang. Geology in China, 40(1): 43~60. (in Chinese with English abstract).
- Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Han Chunming, Li Jiliang, Qu Junfeng, Guo Qianqian, Lin Lina, Wang Zhongmei. 2013a. Progressive accretionary tectonics of the Beishan orogenic collage, southern Altaids: Insights from zircon U-Pb and Hf isotopic data of high-grade complexes. Precambrian Research, 227: 368~388.
- Song Dongfang, Xiao Wenjiao, Han Chunming, Tian Zhonghua,

Wang Zhongmei. 2013b. Provenance of metasedimentary rocks from the Beishan orogenic collage, southern Altaids: Constraints from detrital zircon U-Pb and Hf isotopic data. Gondwana Research, 24: 1127~1151.

- Su Benxun, Qin Kezhang, Sakyi P A, Liu Pingping, Tang Dongmei, Malaviarachchi S P K, Xiao Qinghua, Sun He, Dai Yucai, Yan Hu. 2011. Geochemistry and geochronology of acidic rocks in the Beishan region, NW China: petrogenesis and tectonic implications. Journal of Asian Earth Sciences, 41: 31 ~43.
- Tian Zhonghua, Xiao Wenjiao, Shan, Yehua, Windley B, Han Chunming, Zhang Ji'en, Song Dongfang. 2013. Mega-fold interference patterns in the Beishan orogen (NW China) created by change in plate configuration during Permo-Triassic termination of the Altaids. Journal of Structural Geology, 52: 119~135.
- Wang Guoqiang, Li Xiangmin, Xu Xueyi, Yu Jiyuan, Guo Lei, Yan Qiaojuan, Ji Bo, Wu Peng. 2016. Geochemistry of Gongpoquan Group in the Beishan Area, Gansu Province: Constraints on Petrogenesis and Tectonic Setting. Acta Geologica Sinica, 90 (10): 2603~2619 (in Chinese with English abstract).
- Wei Xueping, Gong Quansheng, Liang Minghong, Dai Wenjun. 2000. Metamorphic-deformational and evolutionary characteristics of pre- Changcheng Dunhuang Terrain occurring on Mazongshan upwelling area. Acta Geological Gansu, 9(1): 36~43 (in Chinese with English abstract).
- Wilhem C, Windley B F, Stampfli G M. 2012. The Altaids of Central Asia: A tectonic and evolutionary innovative review. Earth Science Reivews, 113: 303~341.
- Windley B F, Allen M B, Zhang Min, Zhao Junping, Wang, Jian. 1990. Paleozoic accretion and Cenozoic redeformation of the Chinese Tien Shan Range, central Asia. Geology, 18(2): 128 ~131.
- Windley B F, Alexeiev D, Xiao Wenjiao, Kröner A, Badarch G. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic belt. Journal of the Geological Society of London, 164: 31~47.
- Xia Linqi, Xu Xueyi, Xia Zuchun, Li Xiangmin, Ma Zhongping, Wang Lishe. 2004. Petrogenesis of Carboniferous rift-related volcanic rocks in the Tianshan, northwestern China. Geological Society of America Bulletin, 116: 419~433.
- Xia Linqi, Xia Zuchong, Xu Xueyi, Li Xiangmin, Ma Zhongping. 2008. Relative contributions of crust and mantle to the generation of the Tianshan Carboniferous rift-related basic lavas, northwestern China. Journal of Asian Earth Sciences, (31): 357~378.
- Xiao Wenjiao, Zhang Lianchang, Qin Kezhang, Sun Shu, Li Jiliang. 2004. Paleozoic accretionary and collisional tectonics of the Eastern Tianshan (China): implications for the continental growth of central Asia. American Journal of Science, 304: 370 ~395.
- Xiao Wenjiao, Huang Baochun, Han Chunming, Sun Shu, Li

Jiliang. 2010a. A review of the western part of the Altaids: a key to understanding the architecture of accretionary orogens. Gondwana Research, $18: 253 \sim 273$.

- Xiao Wenjiao, Mao Qigui, Windley B F, Han Chunming, Qu Junfeng, Zhang Ji'en, Ao Songjian, Guo Qianqian, Cleven N R, Lin Shoufa, Shan Yehua, Li Jiliang. 2010b. Paleozoic multiple accretionary and collisional processes of the Beishan orogenic collage. American Journal of Science, 310: 1553 ~1594.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Allen M B, Han Chunming. 2013. Paleozoic multiple accretionary and collisional tectonics of the Chinese Tianshan orogenic collage. Gondwana Research, 23: 1316~1341.
- Xiao Wenjiao, Santosh M. 2014. The western Central Asian Orogenic Belt: A window to accretionary orogenesis and continental growth. Gondwana Research, 25: 1429~1444.
- Xiao Wenjiao, Windley B F, Sun Shu, Li Jiliang, Huang Baochun, Han Chunming, Yuan Chao, Sun Min, Chen Hanlin. 2015. A Tale of Amalgamation of Three Permo-Triassic Collage Systems in Central Asia: Oroclines, Sutures, and Terminal Accretion. Annual Review Earth Planetary Science, 43: 477~507.
- Xu Bei, Charvet J, Chen Yan, Zhao Pan, Shi Guanzhong. 2013. Middle Paleozoic convergent orogenic belts in western Inner Mongolia (China): framework, kinematics, geochronology and implications for tectonic evolution of the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research, 23: 1342~1364.
- Xu Bing, Zhao Guochun, Li Jianhua, Liu Dongxing, Wang Bo, Han Yigui, Eizenhöfer P R, Zhang Xiaoran, Hou Wenzhu, Liu Qian. 2017. Ages and Hf isotopes of detrital zircons from Paleozoic strata in the Chagan Obo Temple area, Inner Mongolia: Implications for the evolution of the Central Asian Orogenic Belt. Gondwana Research, 43: 149~163.
- Zhang Jian, Cunningham D. 2012. Kilometer-scale refolded folds caused by strike-slip reversal and intraplate shortening in the Beishan region, China. Tectonics, 31(3): 60~73.
- Zhang Jianxin, Yu Shengyao, Gong Jianghua, Li Huaikun, Hou Kejun. 2013. The latest Neoarchean-Paleoproterozoic evolution of the Dunhuang block, eastern Tarim Craton, northwesternChina: Evidence from zircon U-Pb dating and Hf isotopic analyses. Precambrian Research, 226: 21~42.
- Zhao Yan, Diwu Chunrong, Ao Wenhao, Wang Hongliang, Zhu Tao, Sun Yong. 2015. Ca. 3. 06 Ga granodioritic gneiss in Dunhuang block. China Science Bulletin, 60(1): $75 \sim 87$ (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhixiong, Jia Yuanqin, Xu Hai, Wang Jinrong, Wang Xinliang, Liu Qiang. 2015. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of Quartz diorite from the Jiaochagou area of the Beishan orogenic belt and its tectonic significances. Acta Geologica Sinica, 89 (7): 1210~1218 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Rongguo, Wu Tairan, Xiao Wenjiao, Zhang Wen, Meng Qingpeng. 2016. Geochronology, geochemistry and tectonic implications of the Shuangjizi composite pluton in the Northern

Beishan. Acta Geologica Sinica, 90 (11): 3153 \sim 3172 (in Chinese with English abstract).

- Zheng Yadong, Zhang Qing, Liu Ruixun, Wang Yufang, Wang Shiguang, Zuo Guochao, Wang Shizheng, Lkaasuren B, Badarch G, Badamgarav Z. 1996. Great Jurassic thrust sheets in Beishan (North Mountains)-Gobi areas of China and southern Mongolia. Journal of Structural Geology, 18: 1111~1126.
- Zhou Hai, Chen Liang, Sun Yong, Zhu Tao. 2016. Tectonic framework of Late Paleozoic intrusions in Xingxingxia: implications for final closure of South Tianshan Ocean in East Tianshan. Acta Geologica Sinica (English Edition), 90(2): 800 ~840.
- Zong Keqing, Liu Yongsheng, Zhang Zeming, He Zhenyu, Hu Zhaochu, Guo Jingliang, Chen Kang. 2013. The generation and evolution of Archean continental crust in the Dunhuang block, northeastern Tarim craton, northwestern China. Precambrian Research, 235: 251~263.
- Zuo Guochao, Zhang Shulin, He Guoqi, Zhang Yang. 1990. Early Paleozoic plate tectonics in Beishan area. Scientia Geologica Sinica, 4: 305~315 (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Feng Yongzhong, Liu Chunyan, Li Maosong, Guo Zhaojie. 1992. Old continental crust feature of Proterozoic era and crust type of early Paleozoic era in Gansu-Menggu Beishan area and eastern Xinjiang Tianshan Mts. Acta Geologica Gansu, 1(1): 55~67. (in Chinese with English abstract).
- Zuo Guochao, Li Maosong. 1996. Formation and Evolution of the Early Paleozoic Lithosphere in the Beishan Area, Gansu-Inner Mongolia, China. Gansu Science and Technology Press, 0~120 (in Chinese with detailed English summary).

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 ~690.
- 代文军,龚全胜. 2000. 甘肃北山"勒巴泉群"的解体及地质意义. 甘 肃地质学报,9:23~29.
- 龚全胜,刘明强,李海林,梁明宏,代文军. 2002. 甘肃北山造山带类 型及其基本特征. 西北地质,35(3): 28~34.
- 龚全胜,刘明强,梁明宏,李海林. 2003. 北山造山带大地构造相及 构造演化.西北地质,36(1):11~17.
- 郭召杰,张志诚,刘树文,李惠民. 2003. 塔里木克拉通早前寒武纪 基底层序与组合:颗粒锆石 U-Pb 年龄新证据. 岩石学报,19 (3):537~542.
- 何世平,任秉琛,姚文光,付力浦. 2002.甘肃内蒙古北山地区构造

单元划分. 西北地质,35(4):30~40.

- 何世平,周会武,任秉琛,姚文光,付力浦. 2005. 甘肃内蒙古北山 地区构造单元划分. 西北地质,38(3):6~15.
- 贺振宇,张泽明,宗克清,王伟,于飞. 2012. 星星峡石英闪长质片麻 岩的锆石年代学:对天山造山带构造演化及基底归属的意义. 岩石学报,28(06):1857~1874.
- 贺振宇,孙立新,毛玲娟,宗克清,张泽明. 2015. 北山造山带南部片 麻岩和花岗闪长岩的锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素:中元古代 的岩浆作用与地壳生长.科学通报,60:389~399.
- 胡霭琴,韦建刚,邓文峰,张积斌,陈林丽. 2006. 天山东段 1.4Ga 花 岗闪长质片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义.地球 化学,35(4):333~345.
- 胡霭琴,韦刚健,江博明,张积斌,邓文峰,陈林丽. 2010. 天山 0.9 Ga 新元古代花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义. 地球化学, 39(3):197~212.
- 李锦轶,何国琦,徐新,李华芹,孙桂华,杨天南,高立明,朱志新. 2006a. 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,王克卓,李亚萍,孙桂华,褚春华,李丽群,朱志新. 2006b. 天山山脉地貌特征、地壳组成与地质演化. 地质通报,25(8), 895~909.
- 舒良树,朱文斌,王博,吴昌志,马东升,马绪宣,丁海峰. 2013. 新疆 古块体的形成与演化.中国地质,40(1):43~60.
- 王国强,李向民,徐学义,余吉远,过磊,闫巧娟,计波,武鹏. 2016. 甘蒙北山志留纪公婆泉群火山岩的地球化学及其对岩石成因 和构造环境的制约.地质学报,90(10):2603~2619.
- 魏学平,龚全胜,梁明宏,代文军. 2000. 马鬃山隆起区前长城系敦 煌岩群变质变形和演化特征.甘肃地质学报,9(1):36~43.
- 赵燕,第五春荣,敖文昊,王洪亮,朱涛,孙勇. 2015. 敦煌地块发现 ~3.06 Ga 花岗闪长质片麻岩. 科学通报,60(1):75~87.
- 赵志雄,贾元琴,许海,王金荣,王新亮,刘强. 2015. 北山交叉沟石 英闪长岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及构造意义. 地质学报, 89(7):1210~1218.
- 郑荣国,吴泰然,肖文交,张文,孟庆鹏. 2016. 北山北部双井子复式 岩体年代学、地球化学及其大地构造意义. 地质学报,90(11): 3153~3172.
- 左国朝,张淑玲,何国琦,张扬. 1990. 北山地区早古生代板块构造 特征. 地质科学,4: 305~315.
- 左国朝,冯永忠,刘春燕,李茂松,郭召杰. 1992. 甘蒙北山-东疆天山 元古代古陆壳特征及其早古生代地壳类型.甘肃地质学报,1 (1):55~67.
- 左国朝,李茂松. 1996. 甘蒙北山地区早古生代岩石圈形成与演化. 兰州:甘肃科技出版社,0~120.

Zircon U-Pb Chronology and Hf Isotopic Study on the Mesoproterozoic Metasedimentary Rocks: Insight into the Evolution of Precambrian Materials in the South Section of Beishan Orogen

ZHOU Hai, CHEN Liang, SUN Yong

State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an, 710069

Abstract

TheBeishan orogen, located in the southern Central Asia Orogenic Belt (CAOB), mainly consists of a series of subduction-accretionary complexes. Some Precambrian rocks are sporadically distributed within the wide accretionary zone of Beishan. Due to the metamorphism and deformation during the strong orogensis and subsequent intracontinental orogensis since the Paleozoic, it is difficult to distinguish the Precambrian rocks and the products of orogensis in Beishan. Thus, the Precambrian affinity in the Beishan orogen is still controversial. Based on detailed field work, we carried out petrographic, zircon U-Pb geochronological and Hf isotopic analysis on Precambrian metasedimentary rocks from the Mazongshan block in the central Beishan area. The relatively high metamorphic degree, rock assemblage and detrital zircon U-Pb age spectrum show significant differences from that of Paleozoic passive continental margin products, indicating that the metasedimentary rock in Beishan is remnant part of the Precambrian basement rocks formed between ~ 1.1 and 1.66 Ga. Combined with previous studies, the following understanding can be summarized; the Beishan area presents similar features as the Tarim and Mongolia blocks in material sources, suggesting that the three involved into the assembly and break-up event of the Rodina supercontinent after the Neoproterozoic, but show multiple sources before the Neoproterozoic (>1.1 Ga). The Mesoproterozoic para-metamorphic rock in the Beishan orogen in this study shows that it is different from the Tarim craton, but similar to the Mongolia block. The Hf isotopic analysis further reveals that the Precambrian para-metamorphic rocks and Dunhuang block in the Beishan orogenic belt all record the history of new-born crust event during the middle and late Paleoproterozoic and show differences from the Tarim craton. This also implies that the Dunhuang block and the beishan orogenic belt probably have a uniform Precambrian basement before the Mesoproterozoic (~ 1.58 Ga).

Key words: Central Asia orogenic belt; Beishan orogen; Precambrian affinity; Mongolia block; Dunhuang block