

# 塔里木板块上元古界火山岩 SHRIMP 定年及其对新元古代冰期时代的制约\*

徐备<sup>1</sup> 寇晓威<sup>2</sup> 宋彪<sup>3</sup> 卫巍<sup>1</sup> 王宇<sup>1</sup>

XU Bei<sup>1</sup>, KOU XiaoWei<sup>2</sup>, SONG Biao<sup>3</sup>, WEI Wei<sup>1</sup> and WANG Yu<sup>1</sup>

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 吉林省第三地质调查所, 四平 136000

3. 北京离子探针中心, 北京 100037

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, MOE; School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China

2. Jilin Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration and Development, Siping 136000, China

3. Beijing SHRIMP Center, Beijing 100037, China

2008-08-29 收稿, 2008-11-16 改回.

**Xu B, Kou XW, Song B, Wei W and Wang Y. 2008. SHRIMP dating of the upper Proterozoic volcanic rocks in the Tarim plate and constraints on the Neoproterozoic glaciation. *Acta Petrologica Sinica*, 24(12):2857–2862**

**Abstract** The SHRIMP analyses of zircons from the volcanic rocks at the top of the Beiyisi Formation, in Quruqtagh area, Xinjiang, yield a weighted mean  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age of  $732 \pm 7\text{Ma}$ , which gives the upper limit for the Beiyixi glaciation. Considering a previous age from volcanic rocks below the Beiyisi diamictites, the Beiyisi glaciation has been constrained between 740Ma and 732Ma. Combining with previous SHRIMP data from other three volcanic rock levels of the Neoproterozoic in study area, four tillite-contained formations of the Neoproterozoic can be divided into three durations from 740 to 732Ma of the Beiyixi Formation, from 732 to 615Ma of the Altungul and Tereeken formations and from 615 to 542Ma of the Hangelchaok Formation, respectively, which suggests that isolated glaciations occur during the Neoproterozoic in Quruqtagh. Data analyses related with glaciation indicate that the Beiyixi, Altungol and Tereekan and Hangelchaok glaciations could be correlated with the Kaigas, Sturtian and Elatina, and Gaskiers glaciations, respectively.

**Key words** Tarim plate; Upper Proterozoic volcanic rock; SHRIMP data; Neoproterozoic glaciation

**摘要** 新疆库鲁克塔格地区贝义西组顶部火山岩锆石的 SHRIMP 定年结果为  $732 \pm 7\text{Ma}$ , 它表明贝义西冰期的上限。考虑该组杂砾岩之下火山岩已有的定年结果, 贝义西冰期的时限为 740~732Ma。综合上元古界三层火山岩 SHRIMP 定年结果, 可以明确地将库鲁克塔格地区上元古界四个含杂砾岩的组限定在三个时间段内, 即 740Ma 到 732Ma 的贝义西组, 732Ma 到 615Ma 之间的阿勒通沟组和特瑞爱肯组, 以及 615Ma 到 542Ma 之间的汉格尔乔克组, 这些年龄段代表了库鲁克塔格地区新元古代各冰期的时代范围。与冰期有关的同位素年代学资料分析表明, 贝义西冰期可与 Kaigas 冰期对比; 阿勒通沟冰期和特瑞爱肯冰期可能与 Sturtian 冰期和 Elatina 冰期对比; 而汉格尔乔克冰期和 Gaskiers 冰期可以对比。

**关键词** 塔里木板块; 上元古界火山岩; SHRIMP 年代学; 新元古代冰期

中图法分类号 P597.3

\* 本研究受国家自然科学基金项目(批准号:40572133,40032010)资助。

第一作者简介: 徐备, 男, 1954 年生, 博士, 教授, 大地构造学专业, E-mail: bxu@pku.edu.cn

## 1 引言

近年来新元古代冰期及其引发的新元古代全球气候变化研究受到广泛关注。目前已有的研究表明新元古代曾发生四次冰期,第一期称为 Kaigas 冰期,以纳米比亚和赞比亚地区的 Kaigas 杂砾岩命名,其发生时间从 765Ma 到 735Ma (Kay *et al.*, 2001; Cailteux *et al.*, 2005; Hoffmann *et al.*, 2006)。第二期称为 Sturtian 冰期,发生时代可能从 717Ma 延至 685Ma (Fanning and Link, 2004; Lund *et al.*, 2003)。第三次冰期称为 Elatina 或 Marinoan 冰期 (Halverson, 2006),时限从 657Ma 到 635Ma (Kendall *et al.*, 2006; Condon *et al.*, 2005)。由于结束时间(635Ma)具有全球一致性,故被认为属全球性冰期。第四次冰期是 Gaskiers 冰期,其沉积分布范围局限,以纽芬兰 Gaskiers 组(580~575Ma, Bowring *et al.*, 2003)和北美的 Squantum 杂砾岩(595±2Ma, Thompson and Bowring, 2000)为代表。

我国新疆塔里木板块库鲁克塔格地区是研究新元古代冰期的典型地区,上元古界出露连续,层序完整,尤以具有四套杂砾岩而受到晚前寒武纪研究界的瞩目。学者们已经从冰川岩相学、古生物学、层序地层学和化学地层学等方面对这些杂砾岩开展了研究,将它们代表的冰期自下而上分别称贝义西、特瑞爱肯和汉克尔乔克冰期(高振家等, 1984; 徐备等, 2002; 何金有等, 2007; Gao and Qian, 1985; Xiao *et al.*, 2004; Shen *et al.*, 2008)。近年来有研究认为原特瑞爱肯冰期可分为阿勒通沟冰期和特瑞爱冰期,故库鲁克塔格地区可能存在四次新元古代冰期(曹仁关等, 1991; 高振家和陈克强, 2003; 刘兵等, 2007)。然而由于缺乏系统的同位素定年数据,库鲁克塔格地区上元古界各套杂砾岩的准确时代尚不能限定,且无法与世界范围的新元古代各次冰期进行年代对比(Xu *et al.*, 2005)。因此,选取合适的定年样品,分别限定这四套杂砾岩的时代,是开展新元古代冰期划分和对比的重要途径。

目前限定冰期年代的方法有两种,常用的方法是用 SHRIMP 锆石定年法测定杂砾岩上、下火山岩的时代以大致限定冰期时代,另一种是用单颗粒锆石 TIMS 法测定紧邻杂砾岩的火山灰层(ash bed)的年代以精确限定冰期开始和结束时代(Condon *et al.*, 2005)。新疆库鲁克塔格地区上元古界中含五层火山岩,它们分隔了四套杂砾岩,其中第一层和第二层火山岩分别位于贝义西组杂砾岩之上、下层位,因此这两层火山岩的定年结果将会直接限定贝义西冰期的时代。本文介绍了库鲁克塔格地区东部赛马山大气象沟剖面中第二层火山岩的定年结果,并结合已有的 SHRIMP 定年结果,讨论库鲁克塔格地区新元古代冰期时代及其世界对比。

## 2 地质概况及采样

库鲁克塔格地区位于塔里木盆地的东北部,区内上元古

界分布广泛,从东向西主要见于赛马山、辛格尔、兴地、西山口等地,层序完整,构造简单。上元古界不整合于中元古宙变质岩系之上,并被寒武系平行不整合覆盖(图 1)。高振家等(1984)将上元古界自下而上划分为贝义西组、照壁山组、阿勒通沟组、特瑞爱肯组、扎莫克提组、育肯沟组、水泉组和汉格尔乔克组(图 2)。贝义西组底部和顶部为火山岩,中部以杂砾岩和砂砾岩沉积为主。照壁山组下部为石英砂岩、粉砂岩沉积,上部以页岩、砂页岩互层沉积为主。阿勒通沟组下部主要为含杂砾岩建造的砂岩、粉砂岩和泥岩,上部主要为以页岩、砂岩为主的碎屑岩,含 2~3 层火山岩或凝灰岩。特瑞爱肯组为巨厚层杂砾岩,夹少量页岩、白云岩,顶部为厚度约 5m 的浅褐色白云岩。扎莫克提组下部为复理石沉积,发育不完整鲍马序列,上部为厚层火山岩。育肯沟组沉积岩性较为单一,由灰绿色的粉砂质泥岩及泥页岩组成。水泉组以薄层状白云岩、灰岩沉积为主,上部夹银灰色粉砂岩和泥岩,顶部含数米厚的火山岩。层序顶部的汉格尔乔克组为巨厚的浅褐色到灰绿色冰碛砾岩,顶部以厚约 4m 的灰色白云岩结束。

上述层序中,贝义西组、阿勒通沟组、特瑞爱肯组和汉格尔乔克组均为杂砾岩沉积,并分别被命名为贝义西、阿勒通沟、特瑞爱肯和汉格尔乔克冰期,代表塔里木板块四次冰期(高振家等, 1984; 曹仁关, 1991; 高振家和陈克强, 2003)。在这些杂砾岩之间出现了五层火山岩,分别见于贝义西组底部和顶部、阿勒通沟组上部、扎莫克提组上部和水泉组顶部(在图 2 中用 V1 到 V5 表示),本文研究的火山岩为其中的第二层。

研究样品(样品号 4-1A)采自库鲁克塔格东部地区赛马山西南的气象大沟(GPS: N40°51'10", E89°2'9'45")。野外露头观察显示,样品所在的火山岩厚约 20m,与上、下地层呈整合关系(图 3A,虚线示出露宽度)。火山岩新鲜,呈鲜绿色,无变质,块状结构,节理较发育。

## 3 样品分析及结果

全岩标本经过破碎后挑出锆石颗粒,其粒径约 80~150 $\mu\text{m}$ 。测试标样为 TEMORA1,年龄为 417Ma,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} = 0.6688$ 。按照宋彪等(2002)描述的方法,首先将这些锆石和标样贴在用环氧树脂做成的样品靶上。再经过抛光、超声波处理和镀金后准备测试。锆石的 SHRIMP U-Pb 分析在国土资源部北京离子探针中心的 SHRIMP II 上完成。样品分析过程参见 Compston *et al.* (1992) 的文章。测试数据处理采用 Kenneth R. Ludwig 编写的 SQUID (1.03 版本)和 ISOPLOT (2.49S 版本)程序(详见 Berkeley Geochronology Center 的网址 kludwig@bgc.org)。

测试结果见表 1。表中单个数据的误差均为  $1\sigma$ ,普通铅校正用实测的  $^{204}\text{Pb}$ 。各点的计算均采用  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄,其加权平均值为 95% 的置信度。锆石样品的 U、Th 含量分别介于  $63 \times 10^{-6} \sim 407 \times 10^{-6}$  和  $48 \times 10^{-6} \sim 1555 \times 10^{-6}$  之间,

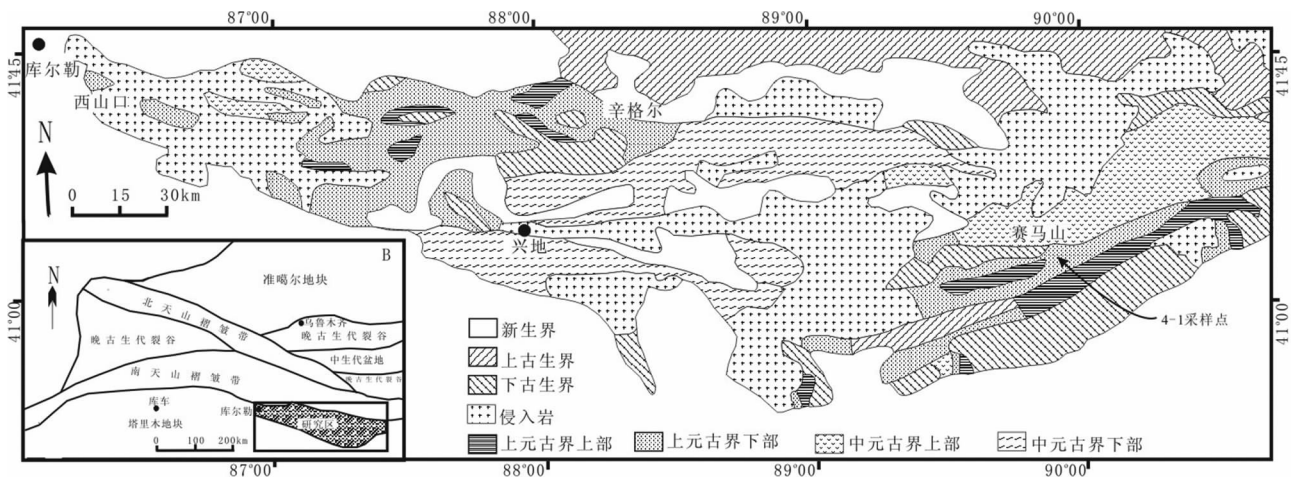


图1 新疆库鲁克塔格地区地质简图

Fig.1 Simplified geological map of the Quruqtagh area

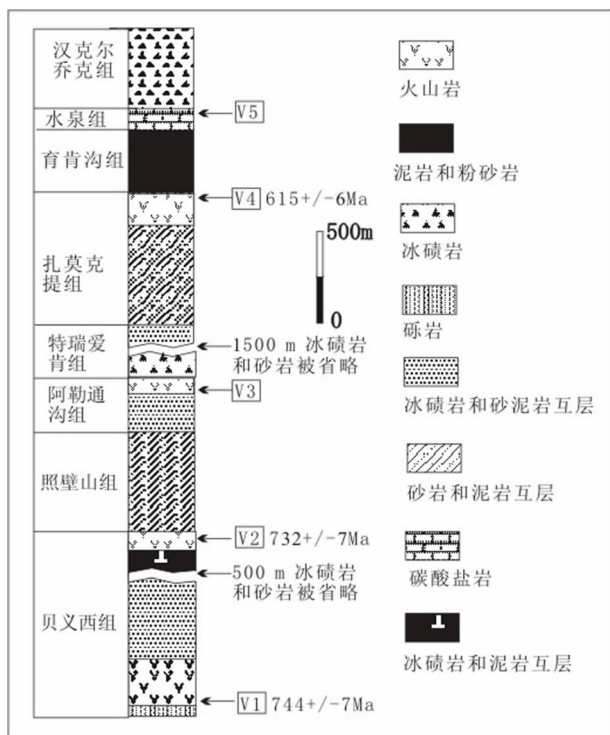


图2 新疆库鲁克塔格地区上元古界地层柱和火山岩

Fig.2 The Neoproterozoic stratigraphic column and volcanic rocks in the Quruqtagh area

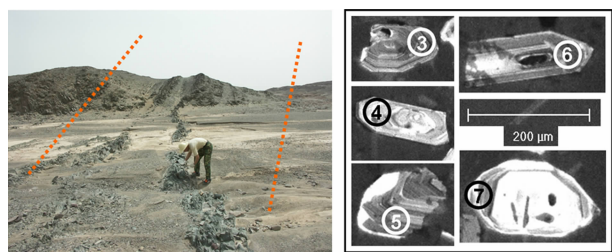


图3 大气象沟火山岩及其锆石 CL 图像 (A: 采样层野外产状; B: 测试锆石 CL 图像)

Fig.3 Volcanic rock in Daqixianggou and its zircon CL image

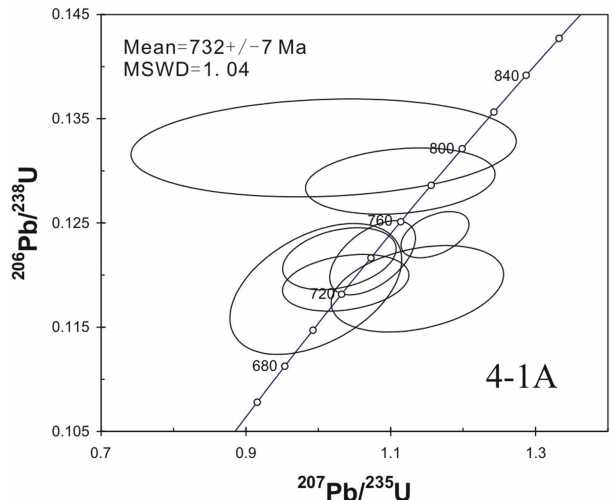


图4 大气象沟火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 Zircon U-Pb Concordia diagram from volcanic rock in Daqixianggou

Th/U 比为 0.77 ~ 3.94, 属于岩浆型锆石。样品的 CL 图像显示清晰的环带结构, 也表明为岩浆岩锆石 (图 3B)。本次测试的 9 个锆石测点中, 4-1A-2.1 和 4-1A-9.1 的年龄分别为 782Ma 和 800Ma, 均不在点群范围之内; 4-1A-8.1 年龄为 753Ma 且偏离谐和线, 而 4-1A-1.1 所获年龄为 1787Ma, 显然属于继承性锆石, 故笔者在计算年龄时未考虑这 4 个点的年龄数据。其余 5 个测点构成集中的点群, 计算得到的年龄为 732 ±

7Ma, MSWD 为 1.04 (图 4)。综上所述, 笔者认为 732 ± 7Ma 的年龄值代表了贝义西组顶部火山岩的形成时间。

表1 大气象沟火山岩锆石 SHRIMP 分析

Table 1 Zircon SHRIMP analyses from volcanic rock in Daqixiangou

Spot	U ( $\times 10^{-6}$ )	Th ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{232}\text{Th}}{^{238}\text{U}}$	$^{206}\text{Pb}_c$ ( $\times 10^{-6}$ )	$^{206}\text{Pb}^*$ ( $\times 10^{-6}$ )	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$ Age, Ma	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$ Age, Ma	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{206}\text{Pb}^*}$ ± %	$\frac{^{207}\text{Pb}^*}{^{235}\text{U}}$ ± %	$\frac{^{206}\text{Pb}^*}{^{238}\text{U}}$ ± %	Error correlation			
4-1A-1.1	97	72	0.77	0.31	26.6	1,787 ± 44	1,807 ± 31	0.1104	1.7	4.86	2.8	.852	2.8	.852
4-1A-2.1	178	246	1.43	0.76	19.9	782.3 ± 7.4	694 ± 100	0.0626	4.7	1.113	1.0	.210	1.0	.210
4-1A-3.1	210	195	0.96	0.37	21.6	726.3 ± 6.4	712 ± 70	0.0631	3.3	1.038	0.93	.272	0.93	.272
4-1A-4.1	63	48	0.79	0.26	6.44	723.0 ± 9.8	913 ± 83	0.0695	4.0	1.137	1.4	.334	1.4	.334
4-1A-5.1	160	164	1.06	0.45	16.8	739.6 ± 7.0	653 ± 63	0.0614	2.9	1.029	10	.321	10	.321
4-1A-6.1	228	250	1.13	0.37	24.0	740.1 ± 8.4	744 ± 40	0.0641	1.9	1.075	1.2	.531	1.2	.531
4-1A-7.1	103	91	0.92	0.62	10.6	723 ± 15	636 ± 94	0.0609	4.4	0.997	2.2	.445	2.2	.445
4-1A-8.1	407	1555	3.94	0.16	43.4	752.8 ± 5.2	868 ± 31	0.0680	1.5	1.161	0.73	.443	0.73	.443
4-1A-9.1	86	78	0.93	1.69	9.99	800 ± 11	423 ± 240	0.0553	11	1.01	1.5	.134	1.5	.134

注:  $\text{Pb}_c$  和  $\text{Pb}^*$  分别代表普通铅和放射性成因铅, 标准校正值的误差为 0.37%

## 4 问题讨论

### 4.1 塔里木板块上元古界火山岩的年龄及其对冰期划分的意义

本次对赛马山地区大气象沟第二层贝义西组顶部火山岩的定年结果表明库鲁克塔格东部贝义西组的年龄不小于 732Ma。而在库鲁克塔格西部西山口地区, 该层火山岩出露厚度大于 300 m (高振家等, 1984), 其中上部获得了  $725 \pm 10\text{Ma}$  的 SHRIMP 年龄 (Xu *et al.*, 2008)。这两个来自东、西部不同地点同层位的年代测试结果在误差范围内可对比, 这不但表明它们属同期火山活动, 而且共同限定了贝义西冰期的上限。对于贝义西冰期的下限, 徐备等获得第一层贝义西组底部的火山岩年代为  $755 \pm 15\text{Ma}$  (Xu *et al.*, 2005), 最近这个数据被修正为  $740 \pm 7\text{Ma}$  (Xu *et al.*, 2008)。尽管这些数据还不能精确限定库鲁克塔格地区新元古代第一次冰期, 但它们可以大致限定贝义西冰期的发生时代应为 740 ~ 732Ma。

第三层火山岩位于阿勒通沟组上部, 其下的阿勒通沟组下部主要由厚约 791 m 的多层杂砾岩组成, 其上的特瑞爱肯组则又出现一套超过千米的巨厚杂砾岩。近年来曹仁关 (1991) 和高振家和陈克强 (2003) 提出这两套杂砾岩应各代表一个冰期, 并命名为“阿勒通沟冰期”和“特瑞爱肯冰期”, 寇晓威等 (2008) 进一步研究了阿勒通沟冰期和其上黄羊沟间冰期的特征。这些研究表明库鲁克塔格地区新元古代可能存在四个冰期, 而第三层火山岩可限定第二冰期即阿勒通沟冰期的上限和第三冰期特瑞爱肯冰期的下限, 但目前尚无定年数据发表。

特瑞爱肯组杂砾岩之上的扎莫克提组顶部发育第四层火山岩, 由 80 ~ 330 m 厚的基性和中性火山岩组成, Xu *et al.* (2008) 已从中获得  $615 \pm 6\text{Ma}$  的锆石 SHRIMP 年龄。第五层火山岩在水泉组顶部呈薄层状产出, 目前也无定年结果。尽管如此, 利用第四层火山岩的测年结果, 我们仍可大致限定

阿勒通沟冰期、特瑞爱肯冰期和汉格尔乔克冰期的时代范围, 即前两者发育于 732 ~ 615Ma 之间, 而汉格尔乔克冰期发育于 615Ma 到寒武纪底界的 542Ma 之间。另一方面, 根据 Ir 含量所推测的新元古代冰期时限为 3 ~ 12 Ma (Bodiselsch *et al.*, 2005), 而特瑞爱肯组和汉格尔乔克组之间有三个组, 其延续时间早已经超过这个时限; 层序地层学研究也表明它们分属不同的沉积层序 (何金有等, 2007), 故这两个组的杂砾岩不可能归入一次冰期, 而应分属两个冰期。

综上所述, 根据目前已有的三层火山岩 SHRIMP 定年结果和其他证据, 可以明确地将库鲁克塔格地区上元古界四个冰期限定在三个时间段内, 即 740Ma 到 732Ma 的贝义西冰期, 732Ma 到 615Ma 之间的阿勒通沟冰期和特瑞爱肯冰期, 以及 615Ma 到 542Ma 之间的汉格尔乔克冰期。本次对第二层火山岩的定年结果表明贝义西冰期发生于 740 ~ 732Ma, 但后三个冰期的精确时限尚待进一步工作。

### 4.2 塔里木板块新元古代冰期的世界对比

前已述及, 在新元古代可能有四个主要冰期, 即 Kaigas 冰期、Sturtian 冰期、Elatina 或 Marinoan 冰期和 Gaskiers 冰期。Kaigas 冰期的时代证据包括纳米比亚 Chuos 杂砾岩之下的火山灰层锆石年龄为  $759 \pm 4\text{Ma}$  (Hoffman *et al.*, 1998)、南纳米比亚 Kaigas 杂砾岩被限定在大约 754Ma (Hoffmann *et al.*, 2006) 和赞比亚地区的 Kaigas 杂砾岩之下、上分别获  $765 \pm 5\text{Ma}$  和  $735 \pm 5\text{Ma}$  (Kay *et al.*, 2001; Cailteux *et al.*, 2005; Hoffmann *et al.*, 2006)。根据本文的研究结果, 贝义西冰期的发生时代为 740 ~ 732Ma, 故可与 Kaigas 冰期对比。

Sturtian 冰期时代测定得到一系列更年轻的年龄, 例如北美的中 Idaho 已获得 Raptian 冰期的上限为  $685 \pm 7\text{Ma}$  和  $684 \pm 4\text{Ma}$  (Lund *et al.*, 2003)、南 Idaho 则为  $667 \pm 5\text{Ma}$  和  $709 \pm 5\text{Ma}$  (Fanning and Link, 2004)、对阿曼地区 Gubrah 组的最新测定结果为  $711.8 \pm 1.6\text{Ma}$  等 (Allen *et al.*, 2002)。Zhang *et al.* (2008) 最近获华南江口冰期的年龄下限为  $725 \pm 10\text{Ma}$ , 并认为可与 Sturtian 冰期对比。关于 Elatina 冰期的时

代,在澳大利亚的 Adelaide 和 Amadeus 地区,已从 Sturtian 冰期沉积后的黑色页岩中获 Re-Os 年龄为  $643.0 \pm 2.4\text{Ma}$  和  $657.2 \pm 5.4\text{Ma}$  (Kendall *et al.*, 2006); 我国大塘坡组凝灰岩得到  $663 \pm 4\text{Ma}$  的年龄 (Zhou *et al.*, 2004), 这些年龄给出了 Elatina 或 Marinoan 冰期的下限。而对冰期上限的研究则得到惊人的全球一致性,如 Hoffmann *et al.* (2004) 从纳米比亚 Ghaub 杂砾岩顶部获  $635.5 \pm 1.2\text{Ma}$  的数据, Condon *et al.* (2005) 从三峡地区陡山沱组底部获  $635.4 \pm 1.3\text{Ma}$  的年龄, 储雪蕾等 (2005) 在江西上饶南沱组之上火山灰层获得的年龄为  $635.5 \pm 5.4\text{Ma}$ , 尹崇玉等 (2003) 也在湖北九曲脑剖面相同层位的火山灰层获  $628.3 \pm 5.8\text{Ma}$  的年龄。这些来自不同板块的高质量数据揭示以南沱杂砾岩和 Ghaub 杂砾岩为代表的 Elatina 冰期不但是全球性的,而且是同时结束的,其  $657 \sim 635\text{Ma}$  的发育时期已经得到公认。

库鲁克塔格地区贝义西冰期之后发育照壁山组为代表的间冰期,故阿勒通沟冰期应晚于  $732\text{Ma}$ , 而特瑞爱肯冰期早于  $615\text{Ma}$ , 因此阿勒通沟冰期和特瑞爱肯冰期可能与 Sturtian 冰期和 Elatina 冰期对比。

第四次冰期即 Gaskiers 冰期。目前它的发现地区和时代证据较少,如在纽芬兰 Gaskiers 组获得  $580 \sim 575\text{Ma}$  的年龄 (Bowring *et al.*, 2003), 北美的 Squantum 杂砾岩的时代为  $595 \pm 2\text{Ma}$  (Thompson *et al.*, 2000)。新疆库鲁克塔格地区汉格尔乔克冰期发育于  $615\text{Ma}$  到  $542\text{Ma}$  之间,由于 Gaskiers 冰期也发生在这个时间范围内,故二者可以对比且均代表新元古代的最后一次冰期。

## 5 结论

新疆库鲁克塔格赛马山地区贝义西组顶部火山岩的定年结果为  $732 \pm 7\text{Ma}$ , 它表明贝义西冰期的上限。结合该组下部已有的定年结果,贝义西冰期的时限为  $740 \sim 732\text{Ma}$ 。综合上元古界三层火山岩 SHRIMP 定年结果,可以明确地将库鲁克塔格地区上元古界四个含杂砾岩的组限定在三个时间段内,即  $740\text{Ma}$  到  $732\text{Ma}$  的贝义西组,  $732\text{Ma}$  到  $615\text{Ma}$  之间的阿勒通沟组和特瑞爱肯组,以及  $615\text{Ma}$  到  $542\text{Ma}$  之间的汉格尔乔克组,这些年龄段代表了库鲁克塔格地区新元古代各冰期的时代范围。与冰期有关的同位素年代学资料分析表明,贝义西冰期可与 Kaigas 冰期对比;阿勒通沟冰期和特瑞爱肯冰期可能与 Sturtian 冰期和 Elatina 冰期对比;而汉格尔乔克冰期和 Gaskiers 冰期可以对比且均属新元古代的最后一次冰期。

致谢 感谢储雪蕾和另一位审稿人为本文提出的宝贵修改意见。

## References

Allen PA, Bowring SA, Leather J, Brasier M, Cozzi A, Grotzinger JP,

- McCarron G and Amthor J. 2002. Chronology of Neoproterozoic glaciations: New insights from Oman. Abstract Volume, 16th International Sedimentological Congress: Johannesburg, International Association of Sedimentologists, 7-8
- Beodiselitsch B, Koeberl C, Master S and Reimold WU. 2005. Estimating duration and intensity of Neoproterozoic Snowball Glaciations from Ir anomalies. *Science*, 308: 239-242
- Bowring S, Myrow P, Landing E, Ramezani J and Grotzinger J. 2003. Geochronological constraints on terminal Neoproterozoic events and the rise of metazoans. *Geophys. Res. Abs.*, 5:13219
- Cailteux JLH, Kampunzu ABH and Batumike MJ. 2005. Lithostratigraphic position and petrographic characteristics of R. A. T. ("Roches Argilo-Talqueuses") Subgroup, Neoproterozoic Katangan Belt (Congo). *Journal of African Earth Sciences*, 42:82-94
- Cao RG. 1991. New observations of the Sinian system in the southern Yardang Mountains, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 1: 30-34 (in Chinese with English abstract)
- Chu XL, Todt W, Zhang QR, Chen FK and Huang J. 2005. U-Pb zircon age of the Nanhua-Sinian boundary. *Chinese Science Bulletin*, 50 (6): 600-603 (in Chinese)
- Compston W, Williams IS, Kirschvink JL, Zhang Z and Ma G. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. *J. Geol. Soc. London*, 149:171-184
- Condon D, Zhu M, Bowring S, Wang W, Yang A and Jin Y. 2005. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation. *China. Science*, 308:95-98
- Fanning CM and Link PK. 2004. U-Pb SHRIMP ages of Neoproterozoic (Sturtian) glaciogenic Pocatello Formation, southeastern Idaho. *Geology*, 32:881-884
- Gao Z and Qian J. 1985. Sinian glacial deposits in Xinjiang, Northwest China. *Precambrian Res.* 29:143-147
- Gao Z, Zhu S and Li YA. 1984. *Precambrian Geology in Xinjiang, China*. Urumqi: Xinjiang People's Publishing House, 151 (in Chinese with English abstract)
- Gao ZJ and Chen KQ. 2003. The Nanhua System of Xinjiang and some geological issues of Nanhua System in China. *Geological Survey and Research*, 26(1): 8-14 (in Chinese with English abstract)
- Halverson G. 2006. A Neoproterozoic Chronology. In: Xiao S and Kaufman AJ (eds.). *Neoproterozoic Geobiology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 231-172
- He JY, Xu B, Meng XY, Kou XW, Liu B, Wang Y and Mi H. 2007. Neoproterozoic sequence stratigraphy and correlation in Quruqtagh area, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (7): 1645-1654 (in Chinese with English abstract)
- Hoffman PF, Kaufman AJ and Halverson GP. 1998. Comings and goings of global glaciations on a Neoproterozoic tropical platform in Namibia. *GSA Today*, 8 (5): 1-9
- Hoffmann KH, Condon DJ, Bowring SA and Crowley JL. 2004. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: Constraints on Marinoan glaciation. *Geology*, 32: 817-820
- Hoffmann KH, Condon DJ, Bowring SA, Prave AR and Fallick A. 2006. Lithostratigraphic, carbon ( $\delta^{13}\text{C}$ ) isotope and U-Pb zircon age constraints on early Neoproterozoic (ca. 755 Ma) glaciation in the Gariep Belt, southern Namibia. *Snowball Earth Conference*, July 16-21, 2006, Monte Verita, Ticino, Switzerland, 51
- Kay RM, Liyungu AK, Njamu FM, Somwe V, Banda J, Mosley PN and Armstrong RA. 2001. The western arm of the Lufilian Arc in NW Zambia and its potential for copper mineralization. *Journal of African Earth Sciences*, 33:503-528
- Kendall B, Ceaser RA and Selby D. 2006. Re-Os geochronology of postglacial black shales in Australia: Constraints on the timing of "Sturtian" glaciation. *Geology*, 34(9): 729-732
- Kou XW, Wang Y, Wei W, He JY and Xu B. 2008. The Neoproterozoic Altungol and Huangyanggou formations in Tarim plate: Recognized newly glaciation and interglaciation? *Acta Petrologica Sinica*, 24 (12): 2863-2868 (in Chinese with English abstract)
- Liu B, Xu B, Meng XY, Kou XW, He JY, Wei W and Mi H. 2007.

- Study on the chemical index of alteration of Neoproterozoic strata in the Tarim plate and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23 (7): 1664 – 1670 (in Chinese with English abstract)
- Lund K, Aleinkoff JN, Evans KV and Fanning CM. 2003. HRIMP U-Pb geochronology of Neoproterozoic Windermere Supergroup, central Idaho: Implications for rifting of western Laurentia and synchronicity of Sturtian glacial deposits. *GSA Bull.* 115: 349 – 372
- Ludwig KR. 2001. SQUID version 1.02: A geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkley Geochronological Centre Special Publication no. 2, 1 – 19
- Ludwig KR. 2001. Users manual for Isoplot/Ex rev. 2.49. Berkeley Geochronology Centre Special Publication no. 1a, 1 – 56
- Shen B, Xiao S, Kaufman AJ, Bao H, Zhou C and Wang H. 2008. Stratification and mixing of a post-glacial Neoproterozoic ocean: Evidence from carbon and sulfur isotopes in a cap dolostone from northwest China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 265:209 – 228
- Song B, Zhang YH, Wan YS and Jian P. 2002. Mounting and analytical procedure of zircon SHRIMP dating. *Geol. Rev.*, 48(supp.):26 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Thompson MD and Bowring SA. 2000. Age of the Squantum “tillite”, Boston Basin, Massachusetts: U-Pb zircon constraints on terminal Neoproterozoic glaciation. *Am. J. Sci.*, 300:630 – 655
- Xiao S, Bao H, Wang H, Kaufman A, Zhou C, Li G, Yuan X and Ling H. 2004. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan: Evidence for a post-Marinoan glaciation. *Precambrian Res.*, 130:1 – 26
- Xu B, Zheng H, Yao H and Li Y. 2003. C-isotope composition and significance of the Sinian on the Tarim plate. *Chinese Sci. Bull.*, 48 (4):385 – 389
- Xu B, Jian P, Zheng HF, Zou HB, Zhang LF and Liu DY. 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 Res.*, 136:107 – 123
- Xu B, Xiao SH, Zou HB, Chen Y, Li ZX, Song B, Liu DY, Zhou CM and Yuan XL. 2008. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China. *Precambrian Res.*, (in press)
- Yin CY, Tang F, Liu YG, Gao LZ, Liu PJ, Xing YS, Yang ZQ, Wang YS and Wang ZQ. 2005. U-Pb zircon age from the base of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges, South China: Constraint on the age of Marinoan glaciation. *Geol. Bull. China*, 24:393 – 400
- Zhang QR, Li XH, Feng LJ, Huang J and Song B. 2008. A new age constraint on the onset of the Neoproterozoic Glaciations in the Yangtze Platform, South China. *Journal of Geology*, 116(4): 423 – 429
- Zhou C, Tucher R, Xiao S, Peng Z, Yuan X and Chen Z. 2004. New constrains on the ages of Neoproterozoic glaciations in South China. *Geology*, 32:437 – 440

#### 附中文参考文献

- 曹仁关. 1991. 新疆南雅尔当山震旦系的新观察. *地质通报*, 1:30 – 34
- 储雪蕾, Wolfgang T, 张启锐, 陈福坤, 黄晶. 2005. 南华-震旦系界线的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 50(6): 600 – 603
- 高振家, 陈克强. 2003. 新疆的南华系及我国南华系的几个地质问题: 纪念恩师王日伦先生诞辰一百周年. *地质调查与研究*, 26 (1): 8 – 14
- 高振家, 朱诚顺, 李永安. 1984. 新疆前寒武纪地质. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1 – 151
- 何金有, 徐备, 孟祥英, 寇晓威, 刘兵, 王宇, 米合. 2007. 新疆库鲁克塔格地区新元古代层序地层学研究及对比. *岩石学报*, 23(7): 1645 – 1654
- 寇晓威, 王宇, 卫巍, 何金有, 徐备. 2008. 塔里木板块上元古界阿勒通沟组和黄羊沟组: 新识别的冰期和间冰期? *岩石学报*, 24(12): 2863 – 2868
- 刘兵, 徐备, 孟祥英, 寇晓威, 何金有, 卫巍, 米合. 2007. 塔里木板块新元古代地层化学蚀变指数研究及其意义. *岩石学报*, 23(7): 1664 – 1670
- 宋彪, 张玉海, 万渝生, 简平. 2002. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 48(增刊): 26 – 40
- 徐备, 郑海飞, 姚海涛, 李永安. 2002. 塔里木板块碳同位素组成及其意义. *科学通报*, 47(22): 1740 – 1744
- 尹崇玉, 刘敦一, 高林志. 2003. 南华系底界与古城冰期的年龄: SHRIMP II 定年证据. *科学通报*, 48:1721 – 1725