

新疆库鲁克塔格地区特瑞艾肯冰期时代的碎屑锆石年代学制约

罗志文¹ 徐备^{1,†} 何金有²

1. 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. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; † 通信作者, E-mail: bxu@pku.edu.cn

摘要 通过对特瑞艾肯组冰碛岩顶部含砾粉砂岩的碎屑锆石年代学分析, 得到最年轻锆石的年龄为 629 ± 8 Ma, 代表特瑞艾肯冰碛岩的沉积时代上限。该年龄限定了特瑞艾肯冰期的结束时代, 并可与扬子板块的南沱冰期以及全球范围的 Elatina 冰期或 Marinoan 冰期对比。其余较老年龄集中分布在 718~887 Ma, 1822~2092 Ma 和 2345~2613 Ma, 暗示库鲁克塔格地区前寒武纪的 3 个主要岩浆活动时期。

关键词 库鲁克塔格; 冰碛岩; 碎屑锆石年龄; 新元古代冰期

中图分类号 P581

U-Pb Detrital Zircon Age Constraints on the Neoproterozoic Tereeken Glaciation in the Quruqtagh Area, Northwestern China

LUO Zhiwen¹, XU Bei^{1,†}, HE Jinyou²

1. The Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083;

† Corresponding author, E-mail: bxu@pku.edu.cn

Abstract U-Pb dating of detrital zircons from the pebbly siltstone at the top of the Tereeken Formation yielded the youngest zircon ages of 629 ± 8 Ma, representing the maximum depositional age of the Tereeken glaciation. This result indicates that the Tereeken glaciation might be correlated with the Nantuo glaciation in the Yangtze Platform and the global Elatina or Marinoan glaciation. The remaining older zircons fall into three age-groups: 718–887 Ma, 1822–2092 Ma and 2345–2613 Ma, indicating three main Precambrian magmatic events in the Quruqtagh area.

Key words Quruqtagh; tillites; detrital zircon dating; Neoproterozoic glaciation

晚元古代全球气候变化的重要特征是晚元古代冰期的发育, 有科学家提出“雪球地球”(Snowball Earth)的假说^[1-3]。该假说涉及晚元古代时期地球大气圈、水圈、生物圈、岩石圈的演变, 试图揭示 Rodinia 超大陆裂解与晚前寒武纪全球环境、气候变化及生命发展之间的时间和空间关系, 是晚前寒武纪研究中亟待验证的关键科学问题^[4-8]。

我国塔里木板块发育世界罕见、中国唯一的晚元古代连续沉积剖面, 是开展“雪球地球”研究的理

想地区。该区上元古界已划分出 4 次冰期沉积, 由下至上以贝义西组、特瑞艾肯组和阿勒通沟组、汉克尔乔克组为代表^[9-12]。这 4 个冰期的发育时代尚待进一步研究。徐备等^[13-15]通过对库鲁克塔格地区上元古界 3 层火山岩 SHRIMP 的定年结果, 将上述 4 个冰期限定在 3 个时间段内, 即 740~725 Ma 的贝义西期、725~615 Ma 之间的阿勒通沟期和特瑞艾肯期以及 615~542 Ma 之间的汉格尔乔克期, 从而证明库鲁克塔格地区晚元古代至少有过 4 次独

立的冰期。但是, 由于在冰碛岩上、下层位缺乏足够的可以直接限定冰期时代的火山岩层, 使得冰期的精确定年受到限制。在这种情况下, 利用冰碛岩中沉积岩的碎屑锆石年龄限定冰碛岩的形成时代, 推测冰期的发育时期, 不失为有效的冰期时代研究方法。

本文利用 ICP-MS 定年方法, 对采自特瑞艾肯冰碛岩顶部沉积岩中的碎屑锆石进行年龄分析, 并据此推定特瑞艾肯冰期的结束时间。

1 区域地质及地层层序

库鲁克塔格地区位于塔里木地块东北部, 区内上元古界分布广泛, 见于赛马山、辛格尔、兴地、西山口等地。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^[9]与曹仁关^[11]最早建立了上元古界的基本剖面, 自下而上划分为贝义西组、照壁山组、阿勒通沟组、黄洋沟组、特瑞艾肯组、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, 后者的 SHRIMP 定年结果为 732 ± 7 Ma, 中部以冰碛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 主要为含冰碛岩建造的砂岩、粉砂岩和泥岩。

黄羊沟组 主要为以页岩、砂岩为主要组分的碎屑岩。

特瑞艾肯组 巨厚层冰碛岩(图 3(b)), 顶部为含小砾石的灰色粉砂岩(图 3(d))。其上连续沉积厚 3~5 m 的浅褐色白云岩, 即“盖帽碳酸盐”(图 3(a)中褐色岩层, 图 3(c))。

扎莫克提组 整合于特瑞艾肯组之上, 下部为巨厚复理石沉积(图 3(a)的上部), 发育鲍马序列; 上部为厚层火山岩, 其 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 615 ± 6 Ma^[14]。

育肯沟组 岩性较单一, 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, 顶部含厚数米的火山岩。

汉格尔乔克组 位于层序顶部, 为巨厚的浅褐色到灰绿色冰碛砾岩, 以厚约 4 m 的灰色“盖帽碳酸盐”结束。

上述层序中, 贝义西组、阿勒通沟组、特瑞艾肯组和汉格尔乔克组均为冰期沉积, 并分别被命名为贝义西冰期、阿勒通沟冰期、特瑞艾肯冰期和汉格尔乔克冰期^[11-12]。

2 样品采集和测试方法

样品 62445 为特瑞艾肯组巨厚冰碛岩顶部的灰色粉砂岩, 采样点的 GPS 地理坐标为 $41^{\circ}27'02''\text{N}$,

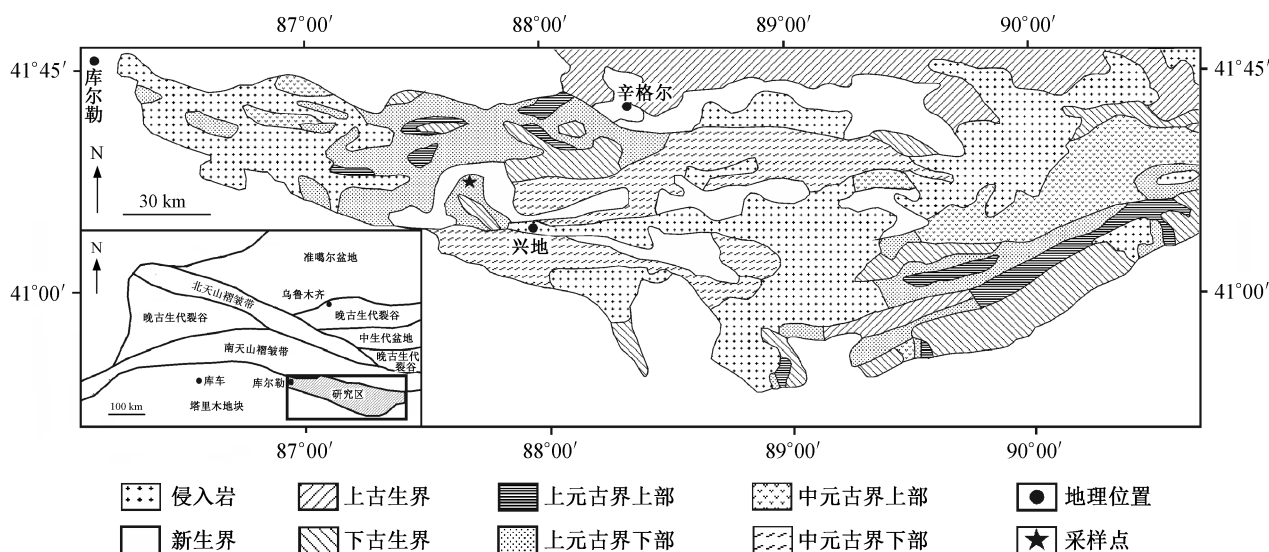


图 1 新疆库鲁克塔格地区地质简图
Fig. 1 Simplified geological map of the Quruqtagh area

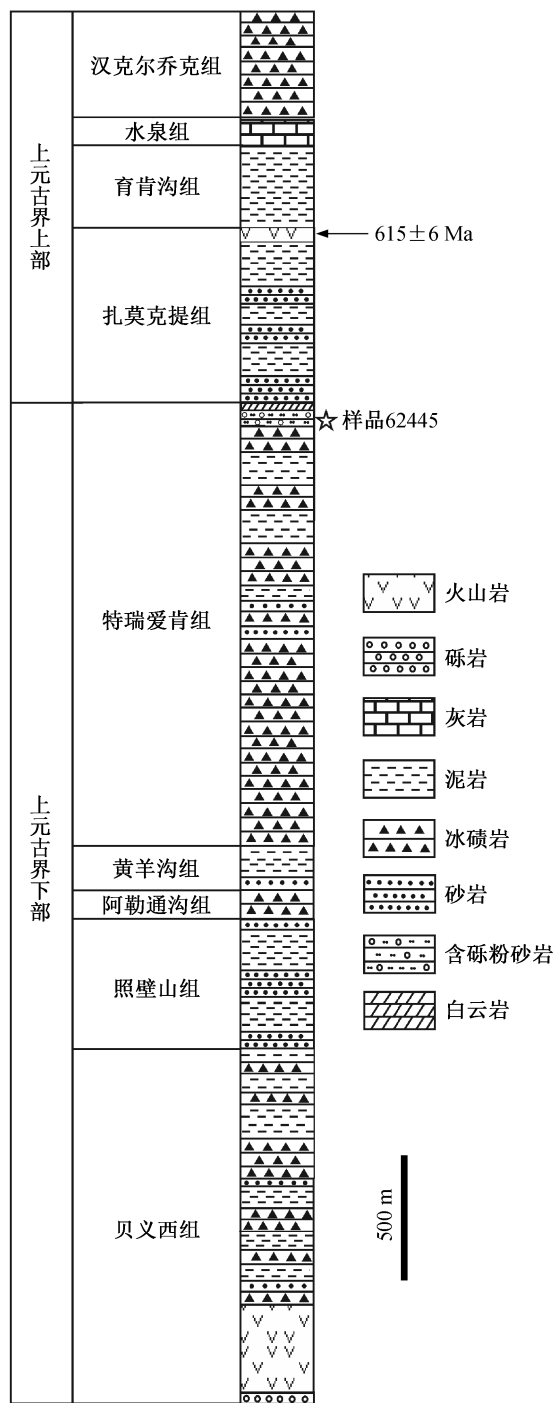


图2 新疆库鲁克塔格地区上元古界地层柱和火山岩
Fig. 2 The Neoproterozoic stratigraphic column and volcanic rocks in the Quruqtagh area

87°48'45"E。对样品采用常规方法进行破碎,经浮选和磁选后,再在双目显微镜下挑选出晶型和透明度较好的锆石颗粒制成样品靶。锆石样品靶的制备与 SHRIMP 定年锆石样品制备方法^[16]基本上相同。锆石的阴极发光(CL)显微照相(图4)在北京大学造

山带与地壳演化教育部重点实验室完成。

锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 同位素年龄分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。测试仪器为电感耦合等离子体质谱仪(Agilent 7500c)与准分子激光剥蚀系统(COMPEXPro102)联机,激光器为 ArF 准分子激光器。激光剥蚀束斑直径为 32 μm , 激光能量密度为 10 J/cm², 剥蚀频率为 5 Hz。实验中采用 He 作为剥蚀物质的载气, Ar 为辅助气。锆石年龄计算采用标准锆石 Plesovice (337 Ma)作为外标^[17], 标准锆石 91500 为监控盲样^[18]。元素含量采用国际标样 NIST610 作为外标, 对为内标元素进行校正。剥蚀样品前, 先进行 15 次激光脉冲的预剥蚀, 采集 20 秒的空白, 随后进行 60 秒的样品剥蚀, 剥蚀完成后进行 2 分钟的样品池冲洗。采样方式为单点剥蚀, 每完成 5 个测点的样品测定, 加测标样一次。在 15 个锆石样品点前、后各测 2 次 NIST610。样品的同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER4.4.2 程序计算, 普通铅校正使用 Anderson^[19]2002 年给出的程序计算, 加权平均年龄及谐和图的绘制使用 Isoplot/Ex (3.0)^[20]完成。分析数据及锆石 U-Pb 谐和图误差为 2 σ , 95%的置信度。

3 测试结果

随机选取 75 颗锆石进行测试, 结果见表 1。13, 31, 68 和 72 号锆石因误差大于 10%, 因此不参加讨论。较年轻的 3 颗锆石 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分别为 629±8 Ma (60 号锆石)、645±8 Ma (46 号锆石)和 668±8 Ma (38 号锆石), 另有两颗锆石的 ²⁰⁷Pb/²⁰⁶U 年龄分别为 1140±72 Ma (71 号锆石)和 1370±19 Ma (12 号锆石), 其余 66 颗锆石形成 3 个点群, 分别为 718~887 Ma ($n=44$, 峰值为 807 Ma)、1822~2092 Ma ($n=15$)和 2345~2613 Ma ($n=7$)。锆石年龄频率分布见图 5。

4 讨论

本研究样品中最年轻锆石年龄为 629±8 Ma, 代表特瑞爱肯组冰碛岩的沉积上限, 即该冰期的结束时期。徐备等^[15]对贝义西组顶部火山岩的 SHRIMP 定年结果为 732±7 Ma, 扎莫克提组上部厚层火山岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 615±6 Ma^[14], 将阿勒通沟冰期和特瑞爱肯冰期的形成限定于 725~615 Ma 之间。本次碎屑锆石测定结果进一步将特瑞爱



(a) 特瑞爱肯组顶部白云岩(褐色)与扎莫克提组下部复理石沉积; (b) 特瑞爱肯组中厚层;
(c) 特瑞爱肯组顶部白云岩; (d) 特瑞爱肯组顶部的含砾粉砂岩

图 3 特瑞爱肯组野外地层特征
Fig. 3 Outcrops of the Tereekan Formation

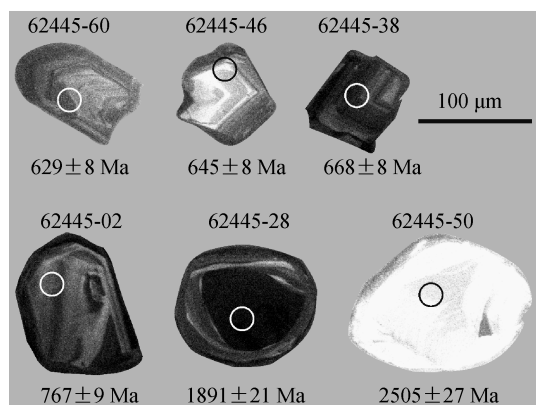


图 4 特瑞爱肯组粉砂岩样品 62445 锆石 CL 图像
Fig. 4 CL images of zircons for siltstone sample 62445 from the Tereekan Formation

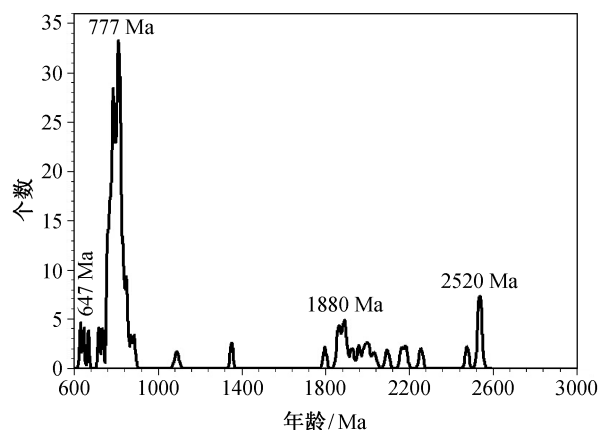


图 5 特瑞爱肯组粉砂岩样品 62445 锆石年龄频率分布
Fig. 5 Age distribution diagram for siltstone sample 62445 from the Tereekan Formation

肯冰碛岩的结束时期限定为 629 ± 8 Ma 之后和 615 ± 6 Ma 之前, 为特瑞爱肯冰期的结束时代提供了进一步的年代学制约。

本文碎屑锆石年龄测定结果也为特瑞爱肯冰碛岩上限时代的对比提供了依据。关于这次冰期上限

的研究结果是全球一致的, 如 Hoffmann 等^[21]从纳米比亚 Ghaub 冰碛岩顶部获得 635.5 ± 1.2 Ma 的年龄, Condon 等^[22]从我国三峡地区陡山沱组底部获得 635.4 ± 1.3 Ma 的年龄, 储雪蕾等^[23]在江西上饶南沱

表 1 特瑞爱肯组粉砂岩样品 62445 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 分析数据
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analyses for siltstone sample 62445 from the Tereekan Formation

测点	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
	比值	误差 (1σ)	比值	误差 (1σ)	比值	误差 (1σ)	年龄/ Ma	误差 (1σ)	年龄/ Ma	误差 (1σ)	年龄/ Ma	误差 (1σ)	年龄/ Ma	误差 (1σ)
62445-01	0.17095	0.00316	11.21438	0.21353	0.47563	0.00599	2567	16	2541	18	2508	26	2413	28
62445-02	0.06612	0.00139	1.15291	0.02472	0.12643	0.00160	810	25	779	12	767	9	769	9
62445-03	0.06248	0.00144	1.07979	0.02509	0.12530	0.00161	691	28	744	12	761	9	719	8
62445-04	0.06525	0.00122	1.20026	0.02316	0.13338	0.00165	782	21	801	11	807	9	797	10
62445-05	0.06713	0.00183	1.19434	0.03260	0.12900	0.00174	842	35	798	15	782	10	775	12
62445-06	0.06813	0.00237	1.26086	0.04354	0.13419	0.00193	873	48	828	20	812	11	831	16
62445-07	0.06634	0.00128	1.14146	0.02257	0.12476	0.00155	817	22	773	11	758	9	759	9
62445-08	0.16648	0.00293	10.45315	0.19123	0.45527	0.00561	2523	15	2476	17	2419	25	2385	25
62445-09	0.07104	0.00189	1.34874	0.03186	0.13770	0.00171	958	56	867	14	832	10	826	9
62445-10	0.06724	0.00144	1.30256	0.02831	0.14046	0.00178	845	25	847	12	847	10	832	10
62445-11	0.06572	0.00129	1.17738	0.02369	0.12991	0.00162	797	22	790	11	787	9	777	9
62445-12	0.08744	0.00164	2.78347	0.05392	0.23083	0.00287	1370	19	1351	14	1339	15	1311	14
62445-13	0.10423	0.00209	3.66013	0.07498	0.25464	0.00324	1701	20	1563	16	1462	17	1408	18
62445-14	0.06424	0.00186	1.16580	0.03367	0.13159	0.00181	750	38	785	16	797	10	784	11
62445-15	0.06711	0.00139	1.18747	0.02518	0.12830	0.00162	841	24	795	12	778	9	749	9
62445-16	0.17572	0.00309	11.17282	0.20425	0.46106	0.00566	2613	15	2538	17	2444	25	2191	23
62445-17	0.06784	0.00165	1.23552	0.03025	0.13206	0.00173	864	30	817	14	800	10	784	11
62445-18	0.06485	0.00128	1.19360	0.02425	0.13346	0.00167	769	23	798	11	808	9	801	9
62445-19	0.11460	0.00219	5.27826	0.10393	0.33399	0.00419	1874	18	1865	17	1858	20	1832	21
62445-20	0.12227	0.00224	5.88487	0.11143	0.34899	0.00433	1990	17	1959	16	1930	21	1645	18
62445-21	0.14992	0.00295	8.22116	0.16623	0.39765	0.00505	2345	18	2256	18	2158	23	2138	25
62445-22	0.06560	0.00151	1.28098	0.02985	0.14159	0.00183	794	28	837	13	854	10	822	12
62445-23	0.11136	0.00203	4.87217	0.09208	0.31726	0.00393	1822	18	1797	16	1776	19	1746	19
62445-24	0.06732	0.00171	1.21155	0.03101	0.13050	0.00173	848	32	806	14	791	10	767	10
62445-25	0.12958	0.00234	6.19406	0.11610	0.34664	0.00429	2092	17	2004	16	1919	21	1597	18
62445-26	0.06626	0.00144	1.16042	0.02566	0.12700	0.00162	815	26	782	12	771	9	777	11
62445-27	0.06649	0.00154	1.18495	0.02782	0.12924	0.00167	822	28	794	13	784	10	768	10
62445-28	0.11667	0.00219	5.48576	0.10667	0.34096	0.00427	1906	18	1898	17	1891	21	1870	21
62445-29	0.06574	0.00172	1.14731	0.03014	0.12655	0.00169	798	33	776	14	768	10	744	11
62445-30	0.13483	0.00255	7.41416	0.14502	0.39875	0.00501	2162	18	2163	18	2163	23	2091	26
62445-31	0.15903	0.00291	7.60190	0.14439	0.34664	0.00430	2445	16	2185	17	1919	21	1915	21
62445-32	0.12315	0.00230	6.06829	0.11750	0.35734	0.00446	2002	18	1986	17	1970	21	1940	21
62445-33	0.06766	0.00133	1.24711	0.02527	0.13367	0.00167	858	22	822	11	809	9	743	9
62445-34	0.06422	0.00134	1.14825	0.02456	0.12966	0.00164	749	25	776	12	786	9	782	10

续表

测点	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	
	比值	误差 (1 σ)	比值	误差 (1 σ)	比值	误差 (1 σ)	年龄/ Ma	误差 (1 σ)	年龄/ Ma	误差 (1 σ)	年龄/ Ma	误差 (1 σ)	年龄/ Ma	误差 (1 σ)
62445-35	0.06545	0.00157	1.22133	0.02972	0.13532	0.00176	789	30	810	14	818	10	794	10
62445-36	0.06643	0.00152	1.19547	0.02782	0.13051	0.00169	820	28	798	13	791	10	778	11
62445-37	0.06612	0.00145	1.19980	0.02691	0.13160	0.00168	810	26	800	12	797	10	778	10
62445-38	0.06696	0.00149	1.00869	0.02282	0.10925	0.00139	837	27	708	12	668	8	718	9
62445-39	0.06686	0.00206	1.18417	0.03638	0.12843	0.00180	833	41	793	17	779	10	739	12
62445-40	0.06797	0.00176	1.26850	0.03303	0.13534	0.00180	868	32	832	15	818	10	787	12
62445-41	0.06660	0.00187	1.24365	0.03126	0.13544	0.00170	825	60	821	14	819	10	819	9
62445-42	0.11710	0.00243	5.67108	0.12055	0.35120	0.00452	1912	21	1927	18	1940	22	1832	23
62445-43	0.06830	0.00152	1.26514	0.02868	0.13433	0.00171	878	26	830	13	813	10	822	11
62445-44	0.06621	0.00202	1.26979	0.03862	0.13908	0.00195	813	40	832	17	839	11	796	14
62445-45	0.06633	0.00162	1.14139	0.02837	0.12480	0.00161	817	31	773	13	758	9	805	10
62445-46	0.06138	0.00169	0.89076	0.02459	0.10525	0.00142	653	36	647	13	645	8	626	11
62445-47	0.06441	0.00133	1.15577	0.02458	0.13013	0.00165	755	24	780	12	789	9	765	10
62445-48	0.11717	0.00230	5.42586	0.10998	0.33583	0.00423	1913	19	1889	17	1867	20	1806	22
62445-49	0.06956	0.00172	1.38836	0.03484	0.14474	0.00187	915	31	884	15	871	11	885	12
62445-50	0.17005	0.00360	11.13778	0.24165	0.47500	0.00622	2558	20	2535	20	2505	27	2452	33
62445-51	0.07458	0.00768	1.37600	0.13906	0.13381	0.00264	1057	216	879	59	810	15	799	10
62445-52	0.06549	0.00139	1.22777	0.02666	0.13597	0.00173	790	25	813	12	822	10	814	12
62445-53	0.07076	0.00214	1.43954	0.04356	0.14754	0.00202	950	40	906	18	887	11	1029	17
62445-54	0.06658	0.00197	1.29435	0.03829	0.14098	0.00196	825	39	843	17	850	11	827	13
62445-55	0.06389	0.00227	1.20944	0.04287	0.13728	0.00193	738	51	805	20	829	11	818	14
62445-56	0.06805	0.00172	1.27060	0.03243	0.13542	0.00179	870	31	833	15	819	10	832	13
62445-57	0.06287	0.00147	1.16143	0.02764	0.13399	0.00174	704	29	783	13	811	10	773	11
62445-58	0.06626	0.00185	1.25994	0.03534	0.13791	0.00188	815	36	828	16	833	11	837	20
62445-59	0.06811	0.00235	1.27975	0.04406	0.13626	0.00190	872	48	837	20	823	11	838	15
62445-60	0.06014	0.00141	0.84964	0.02033	0.10246	0.00133	609	30	624	11	629	8	613	10
62445-61	0.16682	0.00392	11.15259	0.26555	0.48486	0.00672	2526	22	2536	22	2548	29	2412	43
62445-62	0.06754	0.00198	1.22965	0.03613	0.13205	0.00182	854	38	814	16	800	10	781	12
62445-63	0.13127	0.00269	6.87195	0.14524	0.37966	0.00482	2115	20	2095	19	2075	23	2060	28
62445-64	0.06712	0.00220	1.20056	0.03924	0.12973	0.00187	841	44	801	18	786	11	723	15
62445-65	0.11604	0.00239	5.23978	0.11143	0.32749	0.00415	1896	21	1859	18	1826	20	1792	22
62445-66	0.06326	0.00183	1.02739	0.02979	0.11779	0.00161	717	39	718	15	718	9	694	11
62445-67	0.06535	0.00170	1.09010	0.02867	0.12099	0.00161	786	33	749	14	736	9	716	10
62445-68	0.15856	0.00337	8.97765	0.19647	0.41065	0.00528	2440	20	2336	20	2218	24	2163	28
62445-69	0.06534	0.00149	1.14809	0.02672	0.12744	0.00164	785	28	776	13	773	9	779	11

续表

测点	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	
	比值	误差 (1σ)	比值	误差 (1σ)	比值	误差 (1σ)	年龄/ Ma	误差 (1σ)	年龄/ Ma	误差 (1σ)	年龄/ Ma	误差 (1σ)	年龄/ Ma	误差 (1σ)
62445-70	0.06777	0.00299	1.25435	0.05462	0.13425	0.00217	862	63	825	25	812	12	791	19
62445-71	0.07774	0.00276	1.92586	0.06319	0.17966	0.00241	1140	72	1090	22	1065	13	1061	12
62445-72	0.2116	0.00445	12.99576	0.28212	0.44544	0.00568	2918	19	2679	20	2375	25	2074	27
62445-73	0.06721	0.00153	1.23034	0.02873	0.13278	0.00172	844	28	814	13	804	10	799	16
62445-74	0.11627	0.00288	5.38206	0.13506	0.33572	0.00457	1900	26	1882	21	1866	22	1876	27
62445-75	0.12784	0.00320	6.40053	0.16252	0.36312	0.00499	2068	26	2032	22	1997	24	2164	32

组之上的火山灰层获得 635.5±5.4 Ma 的年龄, Yin 等^[24]在湖北九曲脑剖面南沱组之上的火山灰层获得 628.3±5.8 Ma 的年龄。这些来自不同板块的年龄数据揭示以南沱冰碛岩和 Ghaub 冰碛岩为代表的冰期不仅是全球性的, 而且是同时结束的^[15]。本文获得特瑞爱肯冰期的结束时代为 629±8 Ma 之后, 说明冰期开始于此年龄之前, 这间接地表明塔里木板块的特瑞爱肯冰期可以大致与扬子板块的南沱冰期以及全球范围的 Elatina 冰期或 Marinoan 冰期进行对比。

测试样品中时代较老的 3 个点群代表碎屑锆石年龄分布的集中范围, 表明研究区碎屑来源主要为相应的 3 个时期岩浆岩的剥蚀, 也暗示了库鲁克塔格地区的主要岩浆活动时期。这与已有的研究一致, 例如 Shu 等^[25]和 Zhang 等^[26]均指出塔里木板块东缘存在 2.36~2.55 Ga, 1.80~2.02 Ga 和 0.80 Ga 的 3 次岩浆事件。

5 结论

取自特瑞爱肯冰碛岩组顶部沉积岩中最年轻锆石的年龄为 629±8 Ma, 代表其沉积时代上限。该年龄限定了特瑞爱肯冰期的结束时代, 并可与扬子板块的南沱冰期以及全球范围的 Elatina 冰期或 Marinoan 冰期相对比。样品中较老锆石年龄的 3 个点群分别为 718~887 Ma, 1822~2092 Ma 和 2345~2613 Ma, 揭示了库鲁克塔格地区前寒武纪的主要岩浆活动时期。

参考文献

[1] Kirschvink J L. Late Proterozoic low-latitude global glaciation: the Snowball Earth. // Schopf J W, Klein

C, Des Maris D. The Proterozoic biosphere: a multi-disciplinary study. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 51-52

[2] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A neoproterozoic Snowball Earth. Science, 1998, 281: 1342-1346

[3] Hoffman P F. The break-up of Rodinia, birth of Gondwana, true polar wander and the Snowball Earth. Journal of African Earth Sciences, 1999, 28: 17-33

[4] 张启锐, 储雪蕾, 张同钢, 等. 从“全球冰川”到“雪球假说”: 关于新元古代冰川事件的最新研究. 高校地质学报, 2002, 8(4): 473-481

[5] 张同钢, 储雪蕾, 冯连君, 等. 新元古代“雪球”事件对海水碳、硫同位素组成的影响. 地球学报, 2003, 24(6): 487-493

[6] 郑永飞. 新元古代岩浆活动与全球变化. 科学通报, 2003, 49(8): 1705-1720

[7] 储雪蕾. 新元古代“雪球地球”. 矿物岩石地球化学通报, 2004, 23(3): 234-238

[8] 陈鹏, 徐备, 郑海飞. “雪球”假说与塔里木板块新元古代冰川事件. 新疆地质, 2004, 22(1): 87-93

[9] 高振家, 朱诚顺. 新疆前寒武地质. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1984

[10] Gao Z, Qian J. Sinian glacial deposits in Xinjiang, Northwest China. Precambrian Research, 1985, 29: 143-147

[11] 曹仁关. 新疆南雅尔当山震旦系的新观察. 地质通报, 1991(1): 30-34

[12] 寇晓威, 王宇, 卫巍, 等. 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, 2008, 24(12): 2863-2868

[13] Xu B, Jian P, Zheng H F, et al. 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*, 2005, 136: 107–123
- [14] Xu B, Xiao S H, Zhou H B, et al. SHRIMP zircon U-Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China. *Precambrian Research*, 2009, 168: 247–258
- [15] 徐备, 寇晓威, 宋彪, 等. 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. *岩石学报*, 2008, 24(12): 2857–2862
- [16] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48(增刊 1): 26–40
- [17] Sláma J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon: a new natural reference material for U-Pb and Hf isotopic microanalysis. *Chemical Geology*, 2008, 249: 1–35
- [18] Wiedenbeck M, Allé P, Corfu F, et al. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace-element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, 1995, 19(1): 1–23
- [19] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . *Chemical Geology*, 2002, 192: 59–79
- [20] Ludwig K R. Isoplot/Ex: a geochronological tool kit for Microsoft Excel version 3.00. Berkeley: Berkeley Geochronology Center, 2003: 1–70
- [21] Hoffmann K H, Condon D J, Bowring S A, et al. U-Pb zircon date from the Neoproterozoic Ghaub Formation, Namibia: constraints on marinoan glaciation. *Geology*, 2004, 32: 817–820
- [22] Condon D, Zhu M, Bowring S, et al. U-Pb ages from the Neoproterozoic Doushantou Formation, China. *Science*, 2005, 308: 95–98
- [23] 储雪蕾, Wolfgang T, 张启锐, 等. 南华-震旦系界线的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 2005, 50(6): 600–603
- [24] Yin C Y, Tang F, Liu Y G, et al. U-Pb zircon age from the base of the Ediacaran Doushantuo Formation in the Yangtze Gorges, South China: constrain on the age of marinoan glaciation. *Geol Bull China*, 2005, 24: 393–400
- [25] Shu L S, Deng X L, Zhu W B, et al. Precambrian tectonic evolution of the Tarim Block, NW China: new geochronological insights from the Quruqtagh domain. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42: 774–790
- [26] Zhang C L, Zou H B, Li H K, et al. Tectonic framework and evolution of the Tarim Block in NW China. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1306–1315