

湘中长安组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄 及其地质意义

杜秋定, 汪正江, 王剑, 卓皆文, 谢尚克, 邓奇, 杨菲

中国地质调查局成都地质矿产研究所, 成都, 610082

内容提要:我国南方扬子板块是国际上新元古代冰期地层最具代表性的地区之一,冰期地层出露广泛,为国内外学者所关注。对扬子地块东南缘湘中大乘山地区长安组二段底部的凝灰质板岩中所获得的碎屑锆石的 U-Pb LA-ICP-MS 同位素年代分析研究结果显示,长安组碎屑锆石年龄主要为 831 ~ 720 Ma,少数为新元古早期 1005 ~ 842 Ma,含有少量古元古—中元古的 2500 ~ 1933 Ma 的锆石。长安组较年轻的两组锆石加权年龄为 769 Ma (2σ , $n = 9$, $MSWD = 11.3$) 和 828 Ma (2σ , $n = 16$, $MSWD = 7.9$),最小年龄 720.2 ± 12 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄)。长安组碎屑锆石的 U-Pb 年代学表明,该地层最早形成时代 < 770 Ma,那么长安冰期的启动年龄应不大于 770 Ma。组成碎屑锆石年龄谱中最大碎屑锆石群体的年龄组构 750 ~ 830 Ma 为华南在新元古代时期的生长和再造时代,可能与 Rodinia 超大陆的裂解有关。古元古代 2500 ~ 1933 Ma 年龄信息在长安组碎屑锆石的出现,则暗示了湘中大乘山地区或扬子东南缘的一次地壳再造事件。

关键词: 扬子东南缘;新元古代;冰期地层;长安组;碎屑锆石 LA-ICP-MS 年龄

南华盆地是中国南方最大的新元古代沉积盆地,它同时也是成冰纪(南华纪)地层(850 ~ 635 Ma)和新元古代火山活动记录保存最完好的沉积盆地(Wang Jian and Li Zhengxiang, 2003; Li Zhengxiang et al., 2008; Li Xianhua et al., 2010)。扬子地块成冰纪地层分布广泛且保存完整,为华南前寒武纪地壳演化(郑永飞等,2007,2009a,2009b;张少兵等,2007;Liu Xiaoming et al., 2008; Wang Lijuan et al., 2010a),Rodinia 超大陆的拼合和裂解(Wang Jian and Li Zhengxiang, Li Zhengxiang et al., 1999, 2003, 2008)以及新元古代雪球事件研究(Hoffman and Schrag, 2002; Chen Duofu et al., 2004; Zhou Chuanming et al., 2004; Zhang Shihong et al., 2005; Zhang Qirui et al., 2008; Dobrzinski and Bahlburg, 2007; Hoffman and Li, 2009)提供了重要的地质信息。

近年来,国际上普遍接受新元古代有两次全球性冰期(Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期)的观点,在国内,一般认为长安冰期与南沱冰期分别与之相对

比(刘鸿允等,1980)。目前,南沱冰期可与 Marinoan 冰期对比已得到确认(黄晶等,2007),但对于长安冰期是否能对比于 Sturtian 冰期仍有不同的意见。一些学者提出以“古城冰期”代替长安冰期,以“大塘坡间冰期”代替富禄间冰期(马国干等,1983;陆松年等,1985);古城组、铁丝坳组、两界河组都被认为是可替代长安组的中国南方南华纪下冰期沉积的地层单元。这样产生分歧的关键在于对南华纪间冰期——长安冰期与南沱冰期之间的富禄间冰期存在的不同认识(林树基,2010)。

本文通过对扬子地块东南缘大乘山地区长安组二段底部所采的凝灰质板岩中所获得的碎屑锆石作了 LA-ICP-MS U-Pb 同位素年代分析:① 拟确定长安组碎屑锆石 U-Pb 年代学特征,约束了该地层的最早沉积时代,为 Sturtian 冰期的下限提供了年代学依据;② 根据新元古代锆石年代学记录与华南陆块新元古代事件进行对比,通过长安组碎屑锆石 U-Pb 年代学谱系的分析,探讨扬子地块新元古代构造—岩浆事件与华南陆块同期演化的关系。

注:本文为国家自然科学基金重点资助项目(编号 41030315)、国家自然科学基金资助项目(编号 41072088)和中国地质调查局基础地质科研项目(编号 1212011121111)的成果。

收稿日期:2012-03-23;改回日期:2013-01-16;责任编辑:章雨旭。

作者简介:杜秋定,男,1983年生。硕士,沉积学及沉积地球化学专业。Email:dqiuding@163.com。

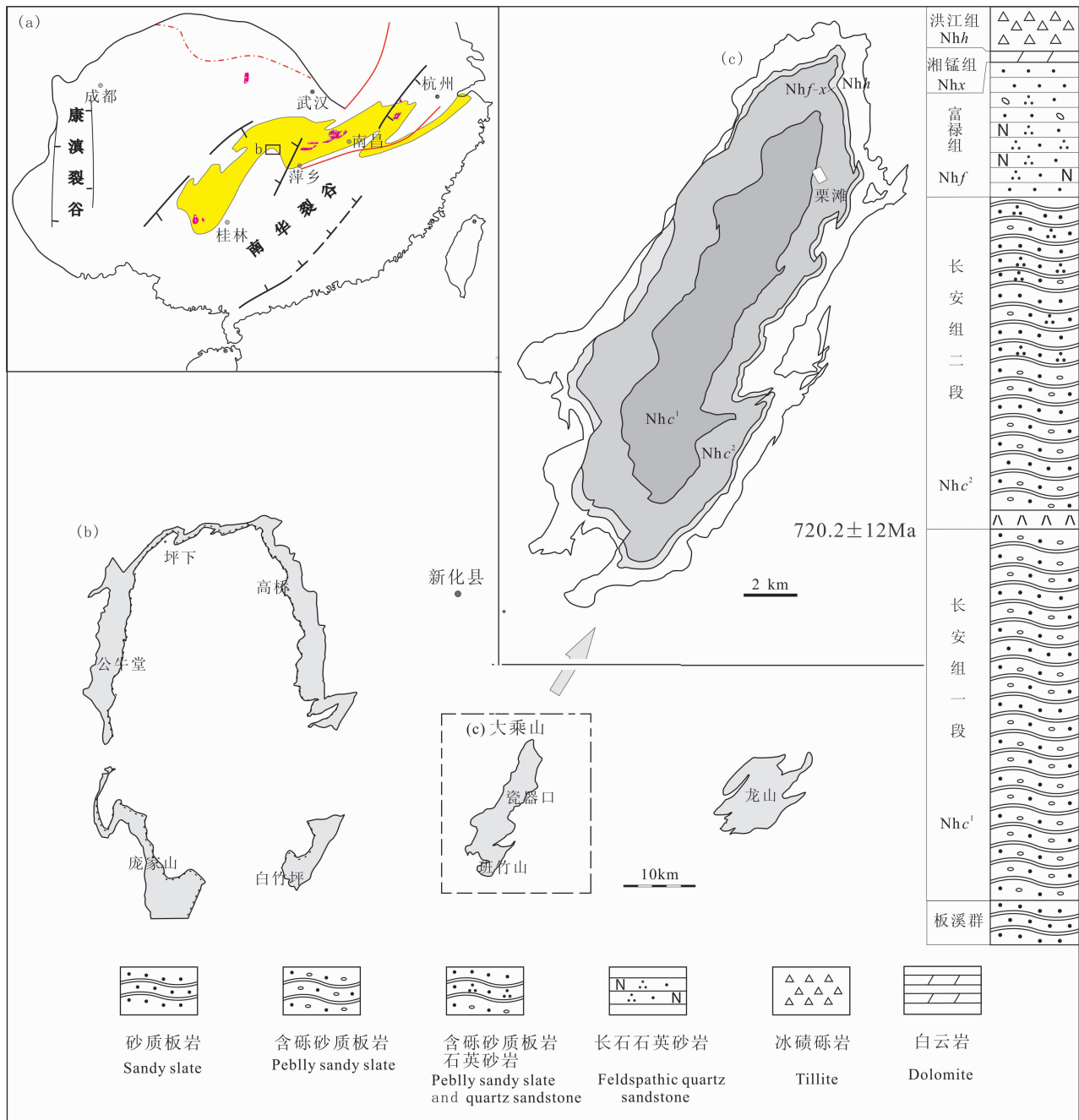


图 1 湘中及大乘山地区江口群分布图: (a)南华裂谷盆地; (b)湘中江口群分布; (c)大乘山江口群分布及地层柱状图
 Fig. 1 Distribution of the Neoproterozoic Jiangkou Group in central Hunan area: (a) rift basins in south China; (b) distribution of the Jiangkou Group in central Hunan area; (c) stratigraphic column and distribution of the Jiangkou Group in the Dacheng Mts.

1 区域地质特征

大乘山位于扬子地块东南缘湘中地区(图 1), 该区新元古代冰期地层为长安组、富禄组(原江口组)、洪江组(南沱组), 间冰期地层为湘锰组(大塘坡组)。原江口组指整合或假整合于高涧群和大塘坡组(湖南省原称“湘锰组”)之间(湖南省地质矿

产局,1988)的一套大部分地区为正常海洋与冰川海洋混合,小部分地区(湘北)为海洋冰川沉积的地层。不少学者(Zhang Qirui et al., 2003; 湖南省地质矿产局,1997;王剑,2000)都认为江口组相当于长安组和富禄组之和,张启锐等(2006)建议以“江口群”取代原“江口组”,使之成为扬子地区代表下冰期沉积的统一地层单元。

江口群岩性主要由含砾板岩(砾泥岩或泥砾岩)构成, 依次为砂岩、含砾砂岩和少量板岩及碳酸盐岩透镜体。在湘中、湘西一带与下伏高洞群呈平行不整合接触, 厚度上变化较大, 最厚可达 2512 m, 局部仅 9.6 m。该区江口群分为三段: 长安组一段(Nhc¹) 浅灰绿色含砾砂质板岩夹砾质板岩, 偶夹粉砂岩与白云岩透镜体。长安组二段(Nhc²) 上部浅灰绿色含砾砂质板夹石英砂岩, 条带状砂质板岩; 下部浅灰绿色块状含砾含硅质砂质板岩, 含砾砂质板岩, 底部 20 m 变余晶屑凝灰岩。富禄组(Nhf) 浅灰、浅灰绿色中厚层长石石英砂岩, 石英砂质夹砂质板岩、含砾石英砂岩。与上覆地层湘锰组(Nhx) 整合接触, 岩性为一套硅质板岩、钙质板岩与粉晶质白云岩互层。其中含砾板岩砾岩均悬浮于基质之中, 分布比较均匀。整体无层理, 局部因砾石大小变化而呈现粒序层理, 并见有砾岩透镜体和细小不连续的泥质条带。

江口群块状冰碛岩层分选很差, 含有大量毫米级到厘米级碎屑。冰碛岩中的碎屑主要是沉积来源, 包括板岩、砂岩、粉砂岩和脉石英等形成的砾石, 砾石含量一般为 3% ~ 8%, 直径以 0.2 ~ 1 cm 为主, 少数 2 ~ 3 cm, 多呈次棱角状、次圆状。冰碛岩一般呈杂基支撑。一些冰碛岩中富含次生碳酸盐, 这些碳酸盐充填了冰碛岩中开放的孔洞。冰碛岩相底部是渐变的, 而且与块状或发育交错层理的砂岩共生。一些冰碛岩在颜色和粒度上呈现层状分布(赵彦彦等, 2011; Dobrzinski and Bahlburg, 2007)。

2 样品与分析方法

本次研究的碎屑锆石选自邵阳栗滩地区长安组二段底部的凝灰质板岩。实验在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成, 仪器采用激光剥蚀系统为 GeoLas 200M, 配置 193nm 的 ArF 准分子激光器, 测量系统为 Agilent 7500a ICP-MS。

锆石挑选和实验步骤如下: ① 锆石的分选采用传统的比重和磁性方法进行淘选, 并在双目显微镜下对获取的重矿物进行人工挑纯。② 将挑选的锆石颗粒与标准锆石 91500 和硅酸盐玻璃标准样品 NIST610 一起用环氧树脂进行固定。③ 对固结的样品进行表面抛光, 并进行透反射光和阴极发光照像(西北大学, Quanta 400FEG), 观察各锆石颗粒晶体形态和内部结构(核、边、包裹体结构以及裂缝)以用于进行锆石原位 U-Pb 同位素分析时选择测量打点的依据。④ 采用激光剥蚀—等离子体质谱

(LA-ICP-MS)原位分析方法进行锆石 U-Pb 同位素测量, 测量时采用的激光斑束为 30 μ m, 测量过程包括约 30s 的背景信号采集和约 80s 的样品信号采集。⑤ 实验结果原始数据应用软件 GLITTER (Rev. 4.0) 处理 (Van, 1999), 而表面年龄和不一致年龄计算采用软件 ISOPLLOT (Rev. 2.49) (Ludwig, 2001)。年龄数据处理采用 91500 标样作为外部标准, 其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 (1064.2 \pm 1.7) Ma (1 σ) (Yuan et al., 2004, 2008) 而锆石 U, Th 和 Pb 含量采用 NIST610 作为外部标准计算。

3 锆石 U-Pb 同位素年代学

3.1 锆石 CL 图像特征

凝灰质板岩中锆石的 CL 图像(图 3) 显示大部分颗粒较自形, 粒状、短柱状、长柱状, 晶体长宽比为 1 ~ 3: 1, 且大部分颗粒核部呈现不均一亮度的环带, 具岩浆结晶锆石特征; 个别颗粒无分带、弱分带, 可能为变质成因的锆石; 所有锆石边部形态不规则, 但多为浑圆状, 表明锆石经历了后期搬运磨蚀作用。同时, 在锆石周围可见较窄的白色蚀变边, 说明锆石可能又受到后期变质热液的溶蚀作用。

3.2 锆石 U-Pb 年龄

对样品中 34 颗锆石分析, 获得了 36 组 U-Pb 年龄, 范围在 2.5 Ga ~ 720 Ma, 且锆石年龄测点均在谐和线上。有关测试结果见表 1 及图 2。第一组 10 颗锆石给出了 2500 ~ 1933 Ma 较老年龄 (²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄), 这些锆石呈磨圆状, 内部结构呈: ① 无分带—弱分带(图 3 中 2、7、9、10、22) 且具有细的小的包体(图 3 中 10); ② 溶蚀结构(图 3 中 29、30); ③ (图 3 中 15、34、36) 具有典型岩浆成因锆石中具有的震荡环带; Th 含量 23.81×10^{-6} ~ 225.46×10^{-6} , U 含量 23.79×10^{-6} ~ 238.7×10^{-6} , Th/U 值 0.55 ~ 9.48; 其中点 2 的具有 Th/U 高达 9.48 (U 含量比较低为 23.81×10^{-6}), 表面年龄为 2473 Ma。第二组锆石年龄均为新元古代年龄 (26 个点), 范围在 1005 ~ 720 Ma。这些年龄可以分为两组 1005 ~ 842 Ma (5 个点) 和 831 ~ 720 Ma (21 个点)。前者锆石呈磨圆状无分带—弱分带, 后者锆石一般呈长柱状, 内部结构有典型岩浆成因锆石的震荡环带, 个别锆石外部边缘有溶蚀边。Th 含量 23.26×10^{-6} ~ 249.87×10^{-6} , U 含量 35.17×10^{-6} ~ 449.81×10^{-6} , Th/U 值 0.20 ~ 1.82; 其中最年轻的年龄是 720 ± 12 Ma (²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄) (图 3 中 8), 锆石呈自形, 无分带, 边缘有稍微的溶蚀特

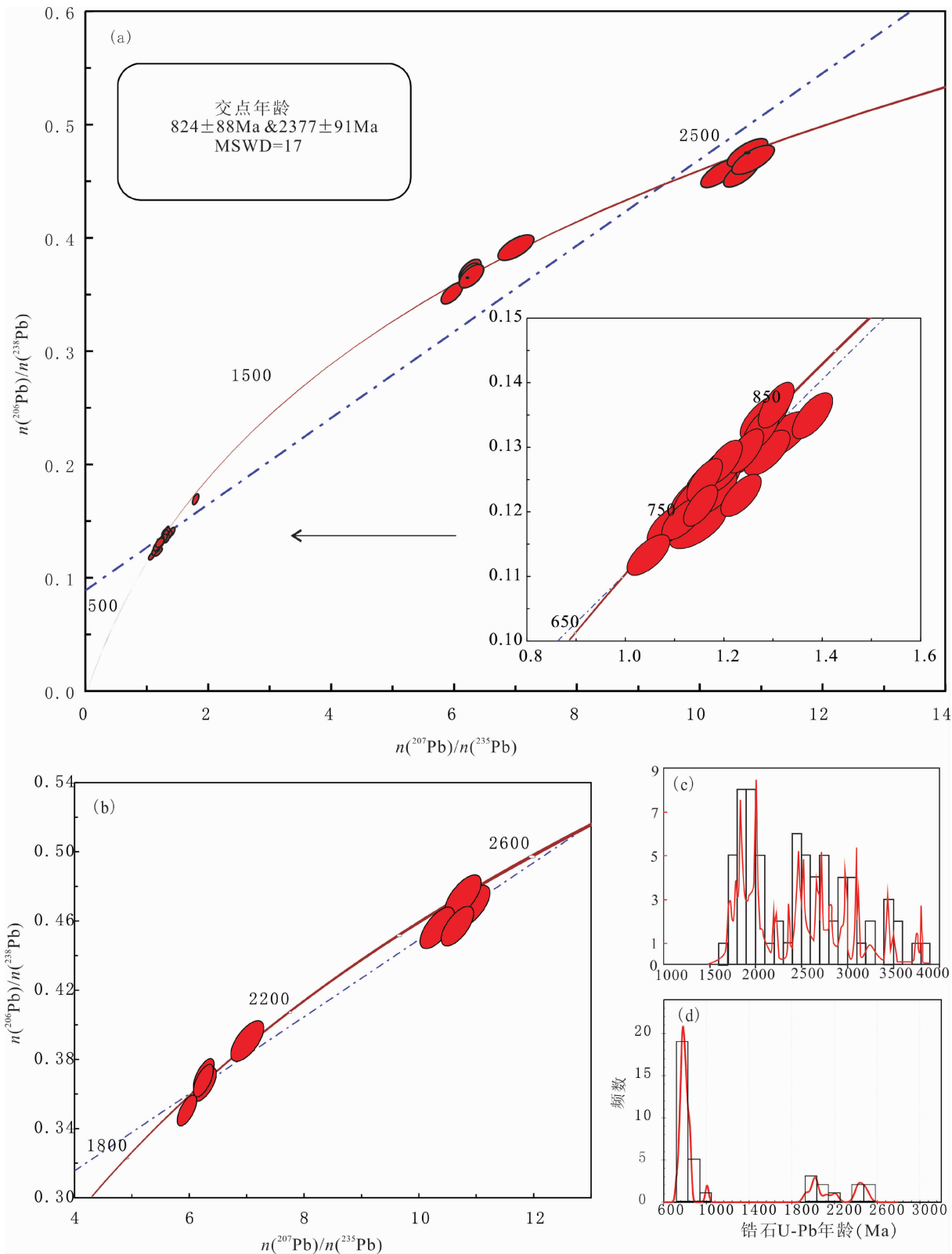


图 2 (a,b)长安组碎屑锆石 U-Pb 谐合曲线图, (c) 华南太古宙和元古代锆石 U-Pb 年龄统计直方图 (郑永飞,2007), (d) 长安组碎屑锆石 U-Pb 年龄统计直方图

Fig. 2 (a,b) Detrital zircon data U - Pb concordia diagrams from the Chang' an Formation, (c) Histogram of U - Pb ages of Archean—Proterozoic(Zheng Yongfei ,2007) , (d) Histogram of U - Pb ages of Chang' an Formation

表 1 湘中长安组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定结果

Table 1 Data of the LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from the Neoproterozoic Chang'an Formation in central Hunan Province

序号	同位素比值								Th、U 含量及比值			表面年龄 (Ma)							
	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$		^{232}Th	^{238}U	Th/U	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$	
	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ
1	0.076	0.00243	1.76949	0.03255	0.16886	0.0028	0.05027	0.00081	90.18	296.27	0.3044	1095.1	62.62	1034.3	11.9	1005.8	15	991.3	15.6
2	0.16865	0.00566	10.87265	0.23407	0.46756	0.00848	0.12991	0.00197	225.46	23.79	9.4771	2544.3	55.19	2512.3	20	2472.8	37	2468.7	35.2
3	0.07025	0.0024	1.23437	0.027	0.12743	0.00216	0.03721	0.00063	78.12	120.09	0.6505	935.8	68.42	816.3	12.3	773.2	12	738.4	12.3
4	0.0665	0.00243	1.18846	0.0302	0.12961	0.00225	0.03729	0.00065	77.18	78.9	0.9782	822.2	74.49	795.2	14	785.6	13	740.1	12.6
5	0.12217	0.00415	2.38642	0.05168	0.14167	0.00245	0.06898	0.00118	60.41	93.67	0.6449	1988.1	59.28	1238.5	15.5	854.1	14	1348.2	22.4
6	0.0678	0.0029	1.14613	0.03835	0.12259	0.00227	0.03627	0.00067	52.19	35.27	1.4797	862.6	86.18	775.4	18.1	745.5	13	720.2	13.1
7	0.16476	0.00535	10.76265	0.2119	0.47376	0.00826	0.12966	0.00221	38.28	42.54	0.8999	2505.1	53.6	2502.8	18.3	2500	36	2464.1	39.5
8	0.06416	0.00244	1.04572	0.02876	0.11821	0.00208	0.03574	0.00064	63.71	66.53	0.9576	746.8	78.37	726.8	14.3	720.2	12	709.7	12.5
9	0.12438	0.00414	6.25983	0.13122	0.36501	0.00639	0.10033	0.00169	75.59	66.61	1.1348	2019.9	57.88	2012.9	18.4	2005.9	30	1932.5	31.1
10	0.1301	0.00485	6.99799	0.18996	0.3901	0.00767	0.11335	0.00236	41.02	38.81	1.0569	2099.3	64.05	2111.2	24.1	2123.3	36	2170.3	42.9
11	0.06707	0.00237	1.18346	0.02827	0.12797	0.0022	0.03912	0.00065	128.48	111.64	1.1508	840	72	792.9	13.2	776.2	13	775.6	12.6
12	0.06667	0.00245	1.28295	0.03327	0.13956	0.00244	0.04254	0.00071	102.41	70.91	1.4442	827.4	74.98	838.2	14.8	842.2	14	842.1	13.8
13	0.06622	0.0022	1.19935	0.02498	0.13135	0.00222	0.03894	0.00061	213.66	177.04	1.2068	813.3	68.09	800.3	11.5	795.5	13	772.2	11.9
14	0.06534	0.0022	1.18345	0.0255	0.13136	0.00223	0.04016	0.00065	148.71	168.36	0.8833	785.2	69.31	792.9	11.9	795.6	13	795.8	12.7
15	0.16933	0.00529	10.66174	0.18818	0.45663	0.00763	0.12613	0.00199	70.83	129.14	0.5485	2551	51.44	2494.1	16.4	2424.7	34	2401	35.7
16	0.06541	0.0024	1.11629	0.02887	0.12377	0.00216	0.036	0.00059	192.09	105.39	1.8227	787.5	75.27	761.2	13.9	752.2	12	714.9	11.5
17	0.06563	0.00278	1.17962	0.03918	0.13034	0.00241	0.03965	0.00084	39.59	50.14	0.7896	794.7	86.42	791.1	18.3	789.8	14	786	16.2
18	0.06492	0.00251	1.13895	0.03248	0.12723	0.00226	0.03766	0.00071	35.34	40.45	0.8737	771.7	79.37	772	15.4	772.1	13	747.2	13.8
19	0.06559	0.00216	1.19957	0.02447	0.13263	0.00223	0.03809	0.00063	249.87	449.81	0.5555	793.3	67.6	800.4	11.3	802.9	13	755.6	12.3
20	0.06637	0.00216	1.15192	0.02278	0.12586	0.00211	0.03725	0.00059	149.68	182.61	0.8197	818.2	66.54	778.1	10.8	764.2	12	739.1	11.5
21	0.06437	0.00254	1.09152	0.03219	0.12297	0.00221	0.03754	0.00065	116.43	70.59	1.6494	753.8	81.05	749.2	15.6	747.6	13	744.8	12.7
22	0.1233	0.00393	5.94713	0.11244	0.3498	0.00594	0.09838	0.00157	77.83	75.45	1.0315	2004.5	55.59	1968.1	16.4	1933.6	28	1896.7	28.9
23	0.0673	0.00243	1.24559	0.03141	0.13422	0.00235	0.03909	0.0007	75.82	87.94	0.8622	847	73.49	821.4	14.2	811.9	13	775.1	13.6
24	0.06966	0.002	1.28738	0.03	0.13403	0.0023	0.04161	0.0007	74.3	87.36	0.85	918.3	71	840.1	13.65	810.8	13.2	824	14
25	0.06714	0.002	1.2751	0.03	0.13772	0.0023	0.04033	0.0007	122	181.4	0.674	842.2	66	834.7	11.36	831.8	13.1	799.2	12.7
26	0.065	0.002	1.13974	0.03	0.12715	0.0022	0.03883	0.0007	56.8	70.96	0.8	774.4	75	772.4	13.8	771.6	12.7	770	13.6
27	0.06712	0.002	1.24366	0.02	0.13437	0.0023	0.04073	0.0007	171	232.4	0.734	841.5	66	820.5	10.98	812.7	12.8	806.9	12.6
28	0.06996	0.003	1.31945	0.04	0.13676	0.0025	0.04282	0.0009	23.3	35.17	0.661	927.3	77	854.3	16.23	826.3	13.9	847.5	16.6
29	0.16413	0.005	10.31159	0.2	0.45562	0.0079	0.12127	0.0022	23.8	39.41	0.604	2498.6	53	2463.1	17.81	2420.2	35	2313.6	39

(续表 1)

序号	同位素比值								Th、U 含量及比值			表面年龄 (Ma)							
	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$		^{232}Th	^{238}U	Th/U	$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{208}\text{Pb})}{n(^{232}\text{Th})}$	
	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ				测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ
30	0.12224	0.004	6.24065	0.12	0.37022	0.0063	0.10412	0.0017	85.2	69.08	1.233	1989.2	56	2010.2	16.68	2030.4	29.8	2002	30.5
31	0.06518	0.002	1.14594	0.03	0.12751	0.0023	0.0409	0.0008	29.9	45.1	0.662	780	76	775.3	14.38	773.6	12.9	810.3	15.2
32	0.0648	0.002	1.16001	0.02	0.12981	0.0022	0.0402	0.0006	157	154.9	1.013	767.9	68	782	11.3	786.8	12.5	796.7	12.5
33	0.06694	0.002	1.30574	0.02	0.14145	0.0024	0.04146	0.0007	75.2	371	0.203	836	64	848.3	10.58	852.9	13.3	821.1	13.7
34	0.12318	0.004	6.23568	0.11	0.36713	0.0062	0.10321	0.0016	153	121.3	1.261	2002.7	54	2009.5	15.62	2015.9	29.1	1985.4	29.2
35	0.07155	0.002	1.37918	0.03	0.13979	0.0024	0.04489	0.0007	123	166.6	0.738	973.1	65	880.1	11.6	843.5	13.3	887.5	14
36	0.15957	0.005	8.98571	0.16	0.40837	0.0068	0.11086	0.0017	146	238.7	0.61	2451.1	51	2336.6	15.79	2207.5	31.2	2125	31.2

表 1 续

征。Th 含量为 63.71×10^{-6} , U 含量为 66.53×10^{-6} , Th/U 值为 0.96。

4 讨论

4.1 新元古代 Sturtian 冰期时限

Sturtian 冰期沉积的分布范围可能较广,但是典型的 Sturtian 冰期沉积仅发育在纳米比亚北部、澳大利亚南部和加拿大西北部等地区。中国南方和塔里木板块也有 Sturtian 冰期沉积的相关资料报道(高维, 2012; 杨瑞东, 2007; Hoffman and Schrag, 2002; Xiao Shuhai et al., 2004; Zhang Qirui et al., 2009)。Sturtian 冰期的期次和时限现在仍存在较大争议(Hoffman and Li Zhengxiang, 2009; Xu Bei et al., 2009)。

Hoffman (1996) 从纳米比亚北部地区 Ombombo 亚群 Naauwpoort 火山岩获得的锆石 U-Pb 年龄为 746 ± 2 Ma, 以此作为 Sturtian 冰期的最大年龄, 但是该层火山岩位于冰碛岩 Chuos 组之下 700 m, 因此 Halverson (2005) 认为他测得的 Ombombo 亚群中部火山灰的锆石 U-Pb 年龄 760 ± 1 Ma 才是比较精确可靠的。Zhou Chuanming (2004) 在对中国南方长安组和铁丝坳组研究中认为 Sturtian 冰期应该在 761 ± 8 Ma 和 663 ± 4 Ma 之间。

一些年轻的数据如:阿曼北部 Sultanate 地区 Huqf 超群中 Gubrah 组冰碛岩夹凝灰质杂砂岩中锆石的 SHRIMP 年龄是 $723 + 16 / - 10$ Ma (Allen et al., 2002; Braiser et al., 2000), 后来获得同一层位的锆石更精确的 TIMS 年龄是 711.8 ± 1.6 Ma 和 711.5 ± 0.3 Ma (Bowring et al., 2007)。加拿大西北部 Rapitan 群中冰期沉积物之下 MountBerg 组的花岗质碎屑岩中, 锆石的 U-Pb 年龄是 755 ± 18 Ma (Ross and Villeneuve, 1997), 而加拿大西北部 MountHarper 群上部冰碛岩之下 D 段火山杂岩中锆石的 U-Pb 年龄是 717.43 ± 0.14 Ma (Macdonald et al., 2010), 其内部所含角砾状凝灰岩中的锆石 U-Pb 年龄是 716.47 ± 0.24 Ma, 由于该段火山杂岩之下没有再出现冰期沉积, 因此这些年龄应该是低纬度 Sturtian 冰期的最大年龄。美国 Pocatello 南部 Porteuf Narrow 地区 Pocatello 组 Scout Mountain 段的上冰碛岩中斑状流纹岩的岩浆锆石 U-Pb 年龄是 717 ± 4 Ma (Fanning and Link, 2004)。劳伦西亚大陆可与 Yukon 的 Hyland 群进行对比的长英质火山碎屑岩中, 锆石的 U-Pb 年龄是 $688.6 + 9.5 / - 6.2$ Ma (Ferri et al., 1999)。

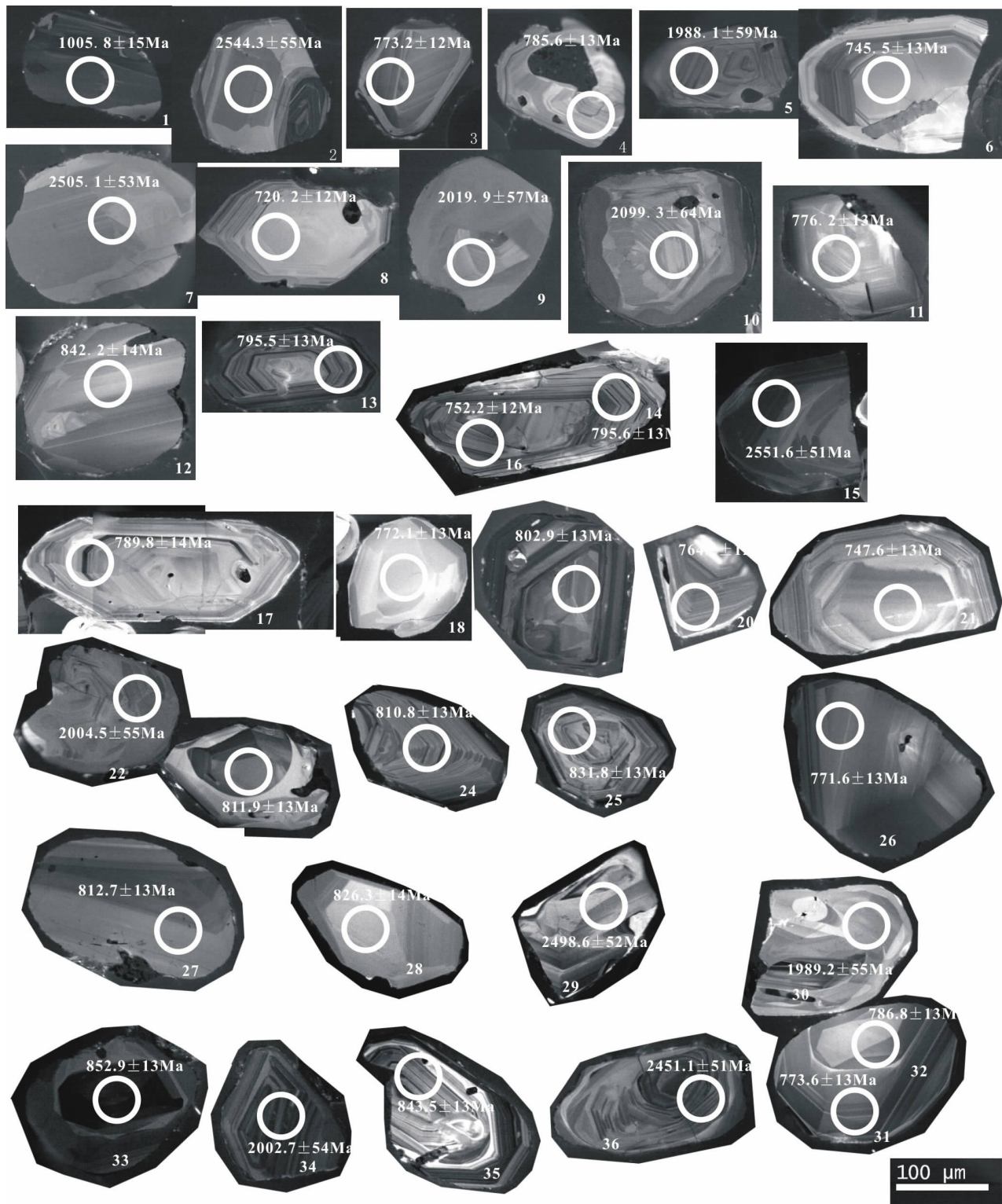


图3 湘中长安组碎屑锆石阴极发光图

Fig. 3 Representative cathodoluminescence images for Chang'an Formation samples in central Hunan

中国华南地区 Sturtian 冰期的沉积地层一直存在着争议。中国新元古代冰川活动,刘鸿允等

(1980,1991)称为“南华冰期”,“南华大冰期”。在20世纪80年代以前,一般认为新元古代有两个冰

期和一个间冰期,即长安冰期、南沱冰期和富禄间冰期(刘鸿允等,1980;王曰伦等,1980;Wang Yuelun et al., 1981;Liao Shifan, 1981)。陆松年(1985)提出以“古城冰期”取代冰筏海洋沉积的“长安冰期”。其实长安组不等于下冰期的全部,而只相当于下冰期的中一下部,而古城组只不过是冰期末的一个特殊的、短暂的冰阶段,也不适合代表整个冰期。这样产生分歧的关键在于对南华纪间冰期——长安冰期与南沱冰期之间的富禄间冰期存在的不同认识(林树基,2010)。张启锐和储雪蕾(2006)将中国华南地区的长安组、富禄组和与之相关的地层单元放在一起,组成“江口群”,使之成为华南地区代表下冰期沉积的统一地层单元。国内还有其它不少学者(Zhang Qirui et al., 2003;湖南省地质矿产局,1997;王剑,2000)都认为江口组相当于长安组和富禄组之和。

中国新疆东天山库鲁克塔格群,一些学者已对它的冰碛岩的成因(何金有等,2007;寇晓威等,2008),沉积环境(高振家等,1980,2000,2003;段吉业等,2005),冰期地层地球化学特征(刘兵等,2007;Xu Bei et al., 2003;Xiao Shuhai et al., 2004;杨瑞东,2007)做出了相关的研究。库鲁克塔格群已成为全球新元古代冰期研究的典范剖面,它可能代表存在3~4期冰碛岩地层出露,即贝义西期、阿拉通沟期、特瑞爱肯期和汉格尔乔克期的冰碛岩。贝义西期冰碛岩上、下两套火山岩 SHRIMP 年龄为 740 ± 7 Ma 和 725 ± 10 Ma,因此推测该层冰碛岩沉积始于 730 Ma;特瑞爱肯期和汉格尔乔克期冰碛岩之间火山岩年龄为 615 ± 10 Ma (Xu Bei et al., 2009)。西天山东北段伊犁地区,高维等(2011)获得侵入于塔里萨依组(相当与特瑞艾肯组冰碛岩)顶部的花岗斑岩中岩浆锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 642 ± 10 Ma。

Hoffman (2009)认为 Sturtian 冰期的最大年龄为 726 ± 1 Ma (Bowring et al., 2007) 最小年龄为 659.7 ± 5.3 Ma (Fanning and Link, 2008) 是比较可靠的。值得一提的是,Zhang Qirui and Li Xianhua (2008)从板溪群顶部牛牯坪组获得的 SHRIMP U-Pb 年龄为 725 ± 10 Ma。郑永飞(2003)认为 Namibia 和 Oman 的冰成岩层年龄 746 ± 6 Ma 和 723 ± 13 Ma,那么成冰纪时期的局部冰川沉积至少在 740 Ma 左右已经开始了。Wang Xuance (2011)在丹洲群洪洞组砂岩碎屑锆石的最年轻组所获得的数据为 731.3 ± 4.4 Ma (2σ , $n = 8$, MSWD =

1.3),他认为江口冰期的启动年龄不大于 730 Ma。但是,他所测的板溪组顶部岩门寨 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的加权年龄为 782.3 ± 4.3 Ma (2σ , $n = 50$, MSWD = 2.3),其中最小的一个年龄 719 ± 10 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$)。长安组底部碎屑锆石年龄 751.7 ± 3.7 Ma (2σ , $n = 32$, MSWD = 0.4)和谐年龄为 751.1 ± 3.6 Ma (MSWD of concordia = 0.32)。

大乘山地区长安组碎屑锆石较年轻的两个组加权年龄为 769 Ma (2σ , $n = 9$, MSWD = 11.3) 和 828 Ma (2σ , $n = 16$, MSWD = 7.9),最小年龄 720 ± 12 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄)。据此年代数据,长安冰期的年龄则不大于 770 Ma,而最小年龄 720 Ma 能不能代表长安冰期的启动年龄,值得做进一步的研究。但是综合现有的资料,冰碛岩中的火山岩或同沉积的凝灰岩的很多年龄不一致的,假设这些冰碛岩都是同属于 Sturtian 冰期,我们有理由认为,可能说明了 Sturtian 冰期是由多个小冰期幕次旋回组成的一个大冰期,这些小的冰期幕开始和结束的差异,导致了这些冰碛岩中的火山岩或同沉积的凝灰岩年龄不一致。

4.2 华南新元古岩浆事件与 Rodinia 裂解

从已发表的锆石 U-Pb 年龄资料来看,华南以新元古代岩浆广泛产出为特征,但也同样存在古元古代—太古宙年龄(1.7~3.4Ga)的岩石或者残骸,分别在 1.9~2.0 Ga, 2.4~2.5 Ga 和 2.8~2.9 Ga 出现聚集(郑永飞,2003)。

本次研究长安组碎屑锆石年龄直方图分为三组:① 2500~1933 Ma;② 1005~842 Ma 和③ 831~720 Ma;古元古代的年龄信息在长安组碎屑锆石的出现,则暗示了湘中大乘山地区或扬子东南缘的一次地壳再造事件。郑永飞等(2007)认为 2.0~1.8 Ga 期间变质作用和岩浆活动事件在扬子陆块北部同时出现,指示了华南在 Columbia 超大陆聚合事件中出了像俯冲—碰撞这样的板块构造过程。而组成年龄谱中最大碎屑锆石群体的年龄组构为新元古代 750~850 Ma,其中只有一个 1005 Ma。而该组年龄对应了华南陆块大规模发育的构造—岩浆活动,也是区分扬子与华北陆块元古宙演化事件的重要标志(郑永飞等,2003,2007)。但是,对于新元古代岩浆活动所代表的意义理解是一样的。Li Xianhua 等(2003), Li Zhengxiang 等(2003)认为 0.83~0.78 Ga 这次岩浆事件与陆内裂解有关,而 Zheng Yongfei 等(2008)认为华南 ~0.75 Ga 从 Rodinia 裂解时,只有其北部(现在方位)发生减薄裂

开,而中部的江南造山带只是岩石圈拉张塌陷形成碰撞后岩浆作用。虽然对新元古代岩浆活动形成的时间和机制上仍存在不同的认识,但是值得注意的是,820 Ma 和 750 Ma 这两期大规模的岩浆活动事件记录了华南在新元古代时期的生长和再造,可能与 Rodinia 超大陆的裂解有关。大乘山地区长安组碎屑锆石较年轻的两个组加权年龄为 769 Ma (2σ , $n = 9$, MSWD = 11.3) 和 828 Ma (2σ , $n = 16$, MSWD = 7.9)。Li Zhengxiang 等 (2003, 2008) 认为,825Ma 岩浆活动事件与 Rodinia 超大陆初始裂件相关,而华南裂谷可能于 780 Ma 开始脱离 Laurentia (Zheng Yongfei et al., 2008)。

5 结论

本文通过对扬子地块东南缘大乘山地区长安组二段底部的凝灰质板岩中所获得的碎屑锆石的 U-Pb 同位素年代分析研究,认为长安冰期的年龄不大于 770 Ma,最小年龄 720 Ma 能不能代表长安冰期的启动年龄,值得做进一步的研究,但是 Sturtian 冰期冰碛岩中的火山岩或同沉积的凝灰岩年龄不一致,可能说明 Sturtian 冰期是由多个小冰期幕次旋回组成的一个大冰期。古元古代 2500 ~ 1933 Ma 的年龄信息在江口组碎屑锆石的出现,则暗示了湘中大乘山地区或扬子东南缘的一次地壳再造事件。而组成碎屑年龄谱中最大碎屑锆石群体的年龄组构 750 ~ 830Ma 为华南在新元古代时期的生长和再造,可能与 Rodinia 超大陆的裂解有关。

参 考 文 献 / References

段吉业,夏德馨,安素兰. 2005. 新疆库鲁克塔格新元古代—早古生代裂陷槽深水沉积与沉积构造古地理. 地质学报,79(1):7 ~ 14.

高维,张传恒,李永安. 2011. 伊犁地区果子沟南华系塔里萨依组冰碛岩顶部花岗岩年龄及其意义. 地质论评,54(4):495 ~ 504.

高振家,李永安,彭昌文,钱建新,朱诚顺. 1980. 新疆库鲁克塔格震旦纪冰川沉积. 见:朱士兴,主编. 中国震旦界. 天津:天津科学技术出版社,186 ~ 211.

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.

湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志. 北京:地质出版社,25 ~ 40.

湖南省地质矿产局. 1997. 湖南省岩石地层. 武汉:中国地质大学出版社,41 ~ 52.

黄晶,储雪蕾,张启锐,冯连君. 2007. 新元古代冰期及其年代. 地学前缘,11(2):249 ~ 256.

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何黄羊组:新识别的冰期何间冰期?. 岩石学报,24(12):

2863 ~ 2868.

林树基,肖加飞,卢定彪,刘爱民,牟世勇,陈仁,易成兴,王兴理. 2010. 湘黔桂交界区富禄组与富禄间冰期的再划分. 地质通报,29(2~3):195 ~ 204.

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.

刘鸿允,董榕生,李建林. 1980. 论震旦系划分与对比问题. 地质科学,(4):307 ~ 321.

刘鸿允. 中国震旦系. 1991. 北京:科学出版社,1 ~ 388.

陆松年,马国干,高振家,林蔚兴. 1985. 中国晚前寒武纪冰成岩系初探. 前寒武纪地质第 1 号中国晚前寒武纪冰成岩论文集第 1 号. 北京:地质出版社,1 ~ 86.

马国干,王砚耕. 1983. 鄂湘黔毗邻地区早震旦世冰川地质问题的讨论. 北京:地质出版社,43 ~ 52.

王剑等. 2000. 华南新元古代裂谷盆地沉积演化——兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京:地质出版社,1 ~ 146.

王曰伦,储雪蕾,陆宗斌,邢裕盛,高振家,林蔚兴,马国干,张录易,陆松年. 1980. 中国上前寒武系的划分和对比(中国震旦界). 天津:天津天津科技出版社,1 ~ 30.

杨瑞东,张传林,罗新荣,魏怀瑞,王伟. 2007. 新疆库鲁克塔格地区新元古代末期汉格尔夫克冰期成因新证据. 地质论评,53(2):228 ~ 233.

张启锐,储雪蕾. 2006. 扬子地区江口冰期地层的划分对比与南华系层型剖面. 地层学杂志,30(4):306 ~ 314.

张少兵,郑永飞. 2007. 扬子陆核的生长和再造:锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素研究. 岩石学报,23(3):393 ~ 402. ??

赵彦彦,郑永飞. 2011. 全球新元古代冰期的时限和记录. 岩石学报,27(2):545 ~ 565.

郑永飞,吴福元. 2009. 克拉通岩石圈的生长和再造. 科学通报,54(14):1945 ~ 1949.

郑永飞,叶凯,张立飞. 2009. 发展板块构造:从洋壳俯冲到大陆碰撞. 科学通报,54(13):1799 ~ 1803.

郑永飞,张少兵. 2007. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化. 科学通报,52(1):1 ~ 10.

Allen P A, Bowring S, Leather J, Braiser M D, Cozzi A, Grotzinger J P, McCarron Gand, Amthor J E. 2002. Chronology of Neoproterozoic glaciations: New insights from Oman. The 16th International Sedimentological Congress, Abstract Volume. Johannesburg, South Africa, 7 ~ 8.

Bowring S A, Grotzinger J P, Condon D J, Ramezani J, Newall M. 2007. Geochronologic constraints on the chronostratigraphic framework of the Neoproterozoic Huqf Supergroup, Sultanate of Oman. American Journal of Science, 307:1097 ~ 1145.

Brasier M, McCarron G, Tucker R, Leather J, Allen P, Shields G. 2000. New U-Pb zircon dates for the Neoproterozoic Gubrah glaciation and for the top of the Huqf Supergroup, Oman. Geology, 28:175 ~ 178.

Chen Duofu, Dong Wei-quan, Zhu Binqun, Chen Xianpei. 2004. Pb - Pb ages of Neoproterozoic Doushantuo phosphorites in South China: constraints on early metazoan evolution and glaciation events. Precambrian Research, 132:123 ~ 132.

Dobrzinski N, Bahlburg H. 2007. Sedimentology and environmental significance of the Cryogenian successions of the Yangtze platform, South China block. Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 254:100 ~ 122.

Fanning C M, Link P K. 2008. Age constraints for the Sturtian glaciation: data from the Adelaide Geosyncline, South Australia and Pocatello

- Formation, Idaho, USA. Geological Society of Australia Abstracts, Selwyn Symposium 2008, Melbourne, 91:57 ~ 62.
- Fanning C M, Link P K. 2004. U - Pb SHRIMP ages of Neoproterozoic (Sturtian) glaciogenic Pocatello Formation, southeastern Idaho. *Geology*, 32:881 ~ 884.
- Ferri F, Rees C J, Nelson J L, Legun A S. 1999. Geology and mineral deposits of the northern Kechika Trough between Gataga River and the 60th parallel, Bulletin 107. British Columbia Ministry of Energy and Mines, 1 ~ 122.
- Halverson G P, Hoffman P F, Schrag D P, Maloof A C, Rice A H N. 2005. Toward a Neoproterozoic composite carbon-isotope record. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 117:1181 ~ 1207.
- Hoffman P F, Hawkins D P, Isachsen C E, Bowring S A. 1996. Precise U-Pb zircon ages for early Damaran magmatism in the Summas Mountains and Welwitschia Inlier, northern Damara belt, Namibia. *Communications of the Geological Survey of Namibia*, 11:47 ~ 52.
- Hoffman P F, Li Zhengxiang. 2009. A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, 277:158 ~ 172.
- Hoffman P F, Schrag D P. 2002. The snowball Earth hypothesis: testing the limits of global change. *Terra Nova*, 14:129 ~ 155.
- Liao Shifan. 1981. Sinian glacial deposits of Guizhou Province. In: Hambrey M J & Harland W B eds. *Earth's pre-Pleistocene glacial record*. Cambridge: Cambridge University Press, 414 ~ 423.
- Li Xianhua, Li Wuxian, Li Qiuli, Wang Xuance, Liu Yu, Yang Yueheng. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of the ~ 850 Ma Gangbian alkaline complex in South China; evidence from in situ zircon U-Pb dating Hf—O isotopes and whole-rock geochemistry. *Lithos*, 114:1 ~ 15.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, Wang Jian, Zhang Shihong, Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents; evidence for an mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122 (1 - 4):85 ~ 109.
- Li Zhengxiang, Bogdanova S V, Collins A S, Davidson A, De Waele B, Ernst R E, Fitzsimons I C W, Fuck R A, Gladkochub D P, Jacobs J, Karlstrom K E, Lu S, Natapov L M, Pease V, Pisarevsky S A, Thrane K, Vernikovsky V. 2008. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia; a synthesis. *Precambrian Research*, 160:179 ~ 210.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua, Kinny P D, Wang Jian. 1999. The breakup of Rodinia; did it start with a mantle plume beneath South China? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 173:171 ~ 181.
- Liu Xiaoming, Gao Shan, Diwu Chunrong, Ling Wenli. 2008. Precambrian crustal growth of Yangtze Craton as revealed by detrital zircon studies. *Am. J. Sci.*, 308:421 ~ 468.
- Ludwig K R. 2001. Users manual for Isoplot/Ex (rev. 2.49): A geochronological toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication, 1a:1 ~ 55.
- Macdonald F A, Schmitz M D, Crowley J L, Roots C F, Jones D S, Maloof A C, Strauss J V, Cohen P A, Johnston D T, Schrag D P. 2010. Calibrating the Cryogenian. *Science*, 327:1241 ~ 1243.
- Ross G W, and Villeneuve M E. 1997. U-Pb geochronology of stranger stones in Neoproterozoic diamictites, Canadian Cordillera; Implications for provenance and ages of deposition, in: *Radiogenic Age and Isotopic Studies, Report 10*; Geological Survey of Canada Current Research, 1997F:141 ~ 155.
- Van Archerbergh E, Ryanm C G, Griffin W L. 1999. GLITTER: On-line interactive data reduction for the laser ablation ICP-MS microprobe. In: *Proceedings of the 9th V. M. Goldschmidt Conference*, Cambridge, Massachusetts, 305 ~ 306.
- Wang Yuelun, Lu Songnian, Gao Zhenjia, Lin Weixian, Ma Guogan. 1981. Sinian tillites of China. In: Hambrey M J & Harland W B eds. *Earth's pre-Pleistocene glacial record*. Cambridge: Cambridge University Press, 386 ~ 401.
- Wang Jian, Li Zhengxiang. 2003. History of Neoproterozoic rift basins in South China; implications for Rodinia break-up. *Precambrian Research*, 122:141 ~ 158.
- Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai, O'Reilly S Y. 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 177:131 ~ 144.
- Wang Xuance, Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Qiuli, Tang Guoqing, Gao Yuya, Zhang Qirui, Liu Yu. 2011. Episodic Precambrian crust growth: Evidence from U-Pb ages and Hf—O isotopes of zircon in the Nanhua Basin, central South China. *Precambrian Research*, 222 ~ 223:386 ~ 403.
- Xiao Shuhai, Bao Huiming, Wang Haifeng, Kaufman A J, Zhou Chuanming, Li Guoxiang, Yuan Xunlai, Ling Hongfei, 2004. The Neoproterozoic Quruqtagh Group in eastern Chinese Tianshan: evidence for a post-Marinoan glaciation. *Precambrian Research*, 130:1 ~ 26.
- Xu Bei, Zheng Haifei, Yao Hai Tao, Li Yongan. 2003. C-isotope composition and significance of the Sinian on the Tarim plate. *Chin. Sci. Bull.*, 48 (4) :385 ~ 389.
- Xu Bei, Xiao Shuhai, Zou Haibo, Chen Yan, Li Zhengxiang, Song Biao, Liu Dunyi, Zhou Chuanming, Yuan Xunlai. 2009. SHRIMP zircon U - Pb age constraints on Neoproterozoic Quruqtagh diamictites in NW China. *Precambrian Research*, 168:247 ~ 258.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Dai Mengning, Zong Chunlei, Günther D, Fontaine G H, Liu Xiaoming, Diwu Chunrong. 2008. Simultaneous determinations of U-Pb age, Hf isotopes and trace element compositions of zircon by excimer laser-ablation quadrupole and multiple-collector ICP-MS. *Chemical Geology*, 147:100 ~ 118.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, Li H M, Günther D, Wu Fuyuan. 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostand. Geoanal. Res.*, 28:353 ~ 370.
- Zhang Qirui, Chu Xulei, Bahlburg H, Feng Lianjun, Dobrzinski N, Zhang Tonggang. 2003. Stratigraphic architecture of the Neoproterozoic glacial rocks in the "Xiang—Qian—Gui" region of the central Yangtze Block, South China. *Progress in Natural Science*, 13:783 ~ 787.
- Zhang Qirui, Chu Xulei, Feng Lianjun. 2009. Discussion on the Neoproterozoic glaciations in the South China Block and their related paleolatitudes. *Chinese Science Bulletin*, 54:1786 ~ 1796.
- Zhang Qirui, Li Xianhua, Feng Lianjun, Huang Jing, Song Biao. 2008. A new age constraint on the onset of the Neoproterozoic glaciations in the Yangtze Platform, South China. *J. Geol.*, 116:423 ~ 429.
- Zhang Shihong, Jiang Ganqing, Zhang Junming, Song Biao, Kennedy M J, Christie-Blick N. 2005. U - Pb sensitive high-resolution ion microprobe ages from the Doushantuo Formation in south China; constraints on late Neoproterozoic glaciations. *Geology*, 33:473 ~ 476.
- Zheng Yongfei, Wu Rongxin, Wu Yuanbao, Zhang Shaobin, Yuan Honglin, Wu Fuyuan. 2008. Rift melting of juvenile arc-derived

crust: Geochemical evidence from Neoproterozoic volcanic and granitic rocks in the Jiangnan Orogen, South China. *Precambrian Research*, 163:351 ~ 383.

Zhou Chuanming, Tucker R, Xiao Shuhai, Peng Zhanxiang, Yuan Xunlai, Chen Zhe. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China. *Geology*, 32:437 ~ 440.

LA-ICP-MS U-Pb Ages of Detrital Zircons from the Neoproterozoic Chang' an Formation in Central Hunan and Its Geological Implications

DU Qiuding, WANG Zhengjiang, WANG Jian, ZHUO Jiewen, XIE Shangke, DENG Qi, YANG Fei
Chengdu Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Chengdu, 610082

Abstract: The Yangtze Block in South China is one of the important regions in the world where the Neoproterozoic glacial sediments are well developed and well studied. In this paper, we report and analyse the LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital Zircon grains from the Jiangkou Group in the Central Hunan, Southeastern Yangtze Block. Together with compilations of all available high precision zircon U - Pb data on tuff beds in the Nanhua Basin, our work demonstrates that the Cryogenian deposition in South China had three depositional cycles at 831 ~ 720 Ma, 1005 ~ 842 Ma and 2500 ~ 1933 Ma. The dominant age group can be further divided into two sub-groups with weighted mean age of 769 and 828 Ma, the youngest grain gives a $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 720 Ma. The youngest age population gives a mean $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of 769 Ma that constrains the onset time of the Sturtian (Chang' an) glaciation to < 770 Ma. The largest age group 750 ~ 830 Ma from the Cryogenian sedimentary rocks maybe compare global episodic continental growth and reworking events with possibly coupled Rodinia supercontinent break up. The late Paleoproterozoic (1.9 ~ 2.5 Ga) thus appears to have witnessed significant of continental reworking in central Hunan Province.

Key words: The Yangtze Block of South China; Neoproterozoic; Cryogenian sedimentary; Chang' an Formation; detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages