

文章编号:1009-3850(2019)01-0022-10

鄂西走马地区大塘坡组顶部泥岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义

李明龙^{1,2}, 田景春¹, 方喜林², 郑德顺³, 许克元², 陈 林²,
曹文胜², 赵 军², 冉中夏²

(1. 成都理工大学沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 2. 湖北省地质局第二地质大队, 湖北 恩施 445000; 3. 河南理工大学资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘要:地球在新元古代经历了 Rodinia 超大陆的聚合和解体,并发生了 Sturtian 和 Marinoan 两期全球规模的冰川事件。华南地区南华系古城组和南沱组冰碛岩分别对应 Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期沉积记录,大塘坡组属于其间冰期沉积。对鄂西走马地区大塘坡组顶部泥岩中的碎屑锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年,锆石具有高 Th/U 比值(0.47~1.69),并显示明显的振荡环带,为岩浆成因;62 颗锆石的 62 个数据点分析,获得的 60 个谐和年龄分布在 651~2435 Ma,主要峰值为~794 Ma。最年轻单颗锆石 U-Pb 年龄 651 ± 7.7 Ma,结合前人研究认为华南地区 Marinoan 冰期启动时间应晚于 651 Ma;碎屑锆石为亲扬子型,可能来自鄂中古陆和扬子北缘;分布最集中的 751~851 Ma 年龄段内~850 Ma 峰值记录了扬子地台与华夏褶皱带碰撞拼合事件,而~820 Ma、~800 Ma、~760 Ma 等峰值则揭示了与 Rodinia 超大陆解体有关的幕式岩浆活动。

关键词:LA-ICP-MS;U-Pb 定年;碎屑锆石;Marinoan 冰期;Rodinia 超大陆;大塘坡组;走马地区

中图分类号:P534.1

文献标识码:A

新元古代是地球历史上板块运动和气候变化最为剧烈的时期之一^[1,2]。新元古代早期生成的 Rodinia 超大陆于新元古代中晚期(820~541 Ma)经历了开裂到解体的全过程,期间伴随着强烈的岩浆活动,并体现在其重要组成部分之一的华南板块上^[3,4]。华南板块由扬子地块和华夏地块两个地体于 ca. 850 Ma 碰撞形成,ca. 820 Ma,在 Rodinia 超大陆裂解背景下,扬子地块的东南缘发育了南华裂谷,沉积了一套火山-沉积岩及冰碛岩,是研究 Rodinia 超大陆演化的重要载体^[3,5]。南华裂谷的演

化经历了四个阶段:第一个阶段出现在 ca. 820 Ma,为裂谷早期沉积,以双峰式火山岩和快速的地壳去顶作用为特征;第二阶段发生在 ca. 800 Ma,为裂谷主沉积期,发育火山岩;第三阶段是发生在 780~750 Ma 的裂谷后期;第四阶段发生在 750 Ma 之后,为裂谷转化-漂移期,在埃迪卡拉纪转化为被动大陆边缘^[5,6]。

新元古代后期还发生了至少两期全球规模的冰川事件,分别为 Sturtian 冰期和 Marinoan 冰期,被称为“雪球地球”期^[7,8]。各大陆的放射性同位素年

收稿日期:2018-10-15; 改回日期:2018-12-05

作者简介:李明龙(1988-),男,博士研究生,工程师,从事地质矿产勘查与沉积学研究。E-mail:leeminglong@126.com

资助项目:本研究受国家自然科学基金项目(41872238)和湖北省地质局科技项目(KJ2017-11)共同资助

龄直接约束了 Sturtian 冰期的起止时间,其分别是 717Ma^[9,10] 和 660 Ma^[6,11]; Marinoan 冰期的结束时间为 635Ma^[12]。华南地区南华系古城组与南沱组分别属于 Sturtian 和 Marinoan 冰期沉积^[6,13],大塘坡组为间冰期沉积。目前,Marinoan 冰期启动时间的可靠同位素年龄主要受到华南地区大塘坡组凝灰岩的锆石 U-Pb 年龄约束;湖南吉首地区大塘坡组顶部和湖北长阳地区大塘坡组中部凝灰岩中锆石 U-Pb 年龄分别为 $654.5 \pm 3.8 \text{ Ma}$ ^[14] 和 $654.2 \pm 2.7 \text{ Ma}$ ^[15],证明 Marinoan 冰期的开始时间应在 654 Ma 之后;广西三江地区南沱组底部含砾砂岩中 $649.3 \pm 6.2 \text{ Ma}$ 的最小锆石 U-Pb 年龄也将 Marinoan 冰期开始时间限定在约 649Ma 之后^[13]。此外,包秀娟通过对贵州松桃锰矿区 ZK1909 中大塘坡组岩心的高精度磁化率研究,利用旋回方法估算出大塘坡组沉积持续时间为 9.2Ma,并根据 Sturtian 冰期的结束时间(660Ma)推算出 Marinoan 冰期在华南的开始时间约为 650.8Ma^[6]。

研究新元古代全球的气候变化对了解地球的气候演变具有重要意义,而建立新元古代冰期、间冰期精确的时间框架是研究雪球地球期地球气候演化规律的基础。鄂西走马地区走马-东山峰背斜一带南华系地层发育和出露情况良好,本文在该地区芭蕉河剖面大塘坡组顶部泥岩中挑选了岩浆成因的碎屑锆石,并开展了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学研究,以期进一步约约束南沱组沉积年龄(Marinoan 冰期启动时间),同时对其物源进行了探讨,揭示源区经历的岩浆事件及其对 Rodinia 超大陆演化的响应。

1 地质背景

新元古代后期,Rodinia 超大陆发生全球性裂解作用,扬子地块从其中裂解出来的同时,在其东南缘发育扬子东南边缘主裂谷,并在康滇、上扬子、鄂中等隆起区之间发育分支裂谷^[16],研究区即位于受裂谷活动控制的鄂西海槽的东南缘(图 1)。

受控于新元古代构造格局,走马地区南华系地层发育较好,自下而上依次发育莲沱组、古城组、大塘坡组和南沱组(地层格架见图 1),并广泛出露于走马-东山峰背斜一带。其中莲沱组(Nh₁l)主要以灰绿色、紫红色层状泥质粉砂岩、细砂岩、长石石英砂岩夹粉砂质泥岩为主,局部含砾,厚度 140 ~

210m,自下而上由河流相过渡为滨海相;古城组(Nh₂g)岩性为浅灰绿色、灰褐色冰碛砾岩、冰碛含砾砂岩,砾石大小不等、成分复杂,厚度约 2 ~ 14m,属冰水海岸沉积,与莲沱组整合接触;大塘坡组(Nh₂d)下部为灰黑色含锰碳质泥岩、黑色锰矿层,上部为灰绿色粉砂质泥岩,厚度约 1 ~ 12m,属滨岸盆地相,与下伏古城组为连续沉积,该组顶部露头可见到数层灰白色泥岩;南沱组(Nh₂n)为一套厚层冰碛岩,岩性为灰色块状含砾不等粒砂岩及灰绿色、灰黄色、砖红色含砾砂质泥岩,砾石成分复杂,厚度约 160 ~ 280m,属冰水海岸和陆棚沉积,整合于大塘坡组之上。

2 样品采集及实验方法

在研究区芭蕉河剖面(图 1),大塘坡组顶部发育一层灰白色泥岩(图 2a),镜下观察为含砂屑中细砂泥质结构(图 2b),该层之上的岩石中可见大小不一、磨圆度较差、成分复杂的冰碛砾岩,为南沱组沉积。本研究采集该剖面大塘坡组顶部泥岩样品送武汉上谱分析实验室进行锆石挑选及其 U-Pb 定年。样品中锆石的分选采用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,将挑选的岩浆锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,打磨和抛光后,拍摄锆石阴极发光图像(CL),以观察锆石结构,作为锆石原位 U-Pb 同位素分析时选择测量点的依据。锆石 U-Pb 同位素定年利用 LA-ICP-MS 分析完成^[17]。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPEXPro 102 ArF 193nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成,ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置^[18]。本次分析的激光束斑和频率分别为 32 μm 和 5Hz。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICP MS DataCal^[19]完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制由 isoplot 软件完成^[20]。

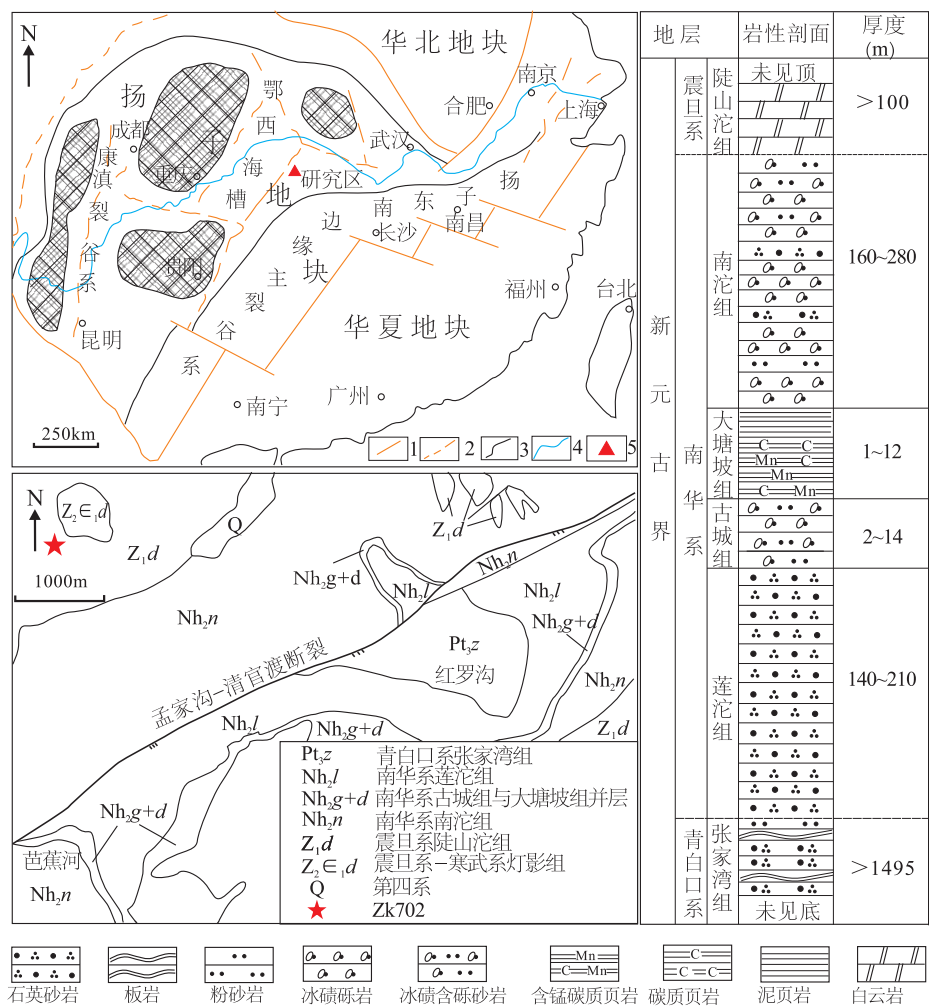


图1 研究区大地构造位置及南华系地层简图(据罗亮等,2015,有修改)

1. 控制盆地生长发育的主裂谷系断裂带;2. 克拉通内次级盆地支裂谷系断裂带;3. 古大陆边界;4. 河流;5. 研究区位置

Fig.1 Tectonic setting of the Zouma area, western Hubei (a) and simplified stratigraphic map of the Nanhuan strata (b and c) (modified from Luo Liang et al. , 2015)

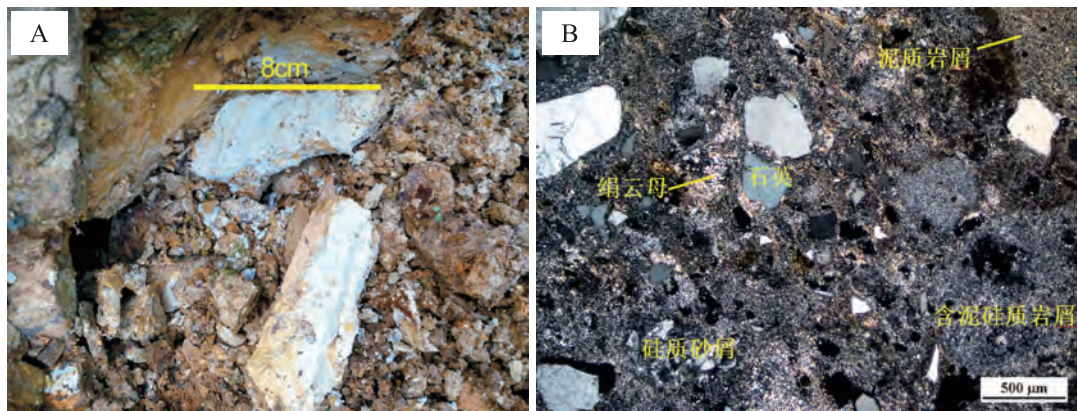


图2 研究区大塘坡组顶部泥岩宏观(A)及显微照片(B)

Fig.2 Macroscopic and microscopic features of the mudstones in the topmost part of the Datangpo Formation in the Zouma area, western Hubei

3 测试结果

3.1 锆石 CL 图像特征

样品中挑选出的 62 颗锆石颗粒大小在 50 ~ 200 μm 之间,多数集中在 80 ~ 150 μm ,颗粒表现为

次圆状到次棱角状,晶体碎片较多(图 3),反映它们经历了相当程度的机械性破坏,可能与前期的新元古代冰川磨蚀改造有关。锆石的 CL 特征表现为完整的岩浆振荡环带结构^[21],未见明亮的变质增生边,且 Th/U 值在 0.47 ~ 1.69 之间,属岩浆成因。



图 3 代表性测试锆石的 CL 图像(斑束直径 32 μm)

Fig. 3 CL images of the representative detrital zircons analyzed for LA-ICP-MS zircon U-Pb dating

3.2 锆石 U-Pb 年龄

本次研究对样品中随机选择的 62 个岩浆成因的碎屑锆石进行 U-Pb 测试,共 62 个测试数据(表 1)。采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄分别代表 < 1000Ma 和 > 1000Ma 的锆石年龄,剔除谐和度 < 90% 的两个年龄数据,其它 60 个年龄数据平均谐和度和为 98%。在 U-Pb 谐和图上(图 4),60 个年龄数据绝大部落在了谐和线上或接近于谐和线,仅个别数据明显偏离谐和线,其可能存在一定程度的 Pb 丢失。对锆石进行 U-Pb 年龄统计计算和年龄分布直方图绘制(图 5),60 个谐和锆石年龄分布较广,在 651 ~ 2435Ma 之间。其中 52 个锆石谐和年龄介于 751 ~ 851Ma 之间,最主要的年龄峰值为 ~ 800Ma,此外还存在 3 个峰值分别为 ~ 850Ma、~ 820Ma 和 ~ 760Ma。获得的最年轻的两颗锆石年龄

分别为 651 $\pm$ 7.1Ma 和 655 $\pm$ 9.0Ma,最大的两颗锆石年龄为 2009 $\pm$ 87.8Ma 和 2435 $\pm$ 46.6Ma。在 960Ma 也存在微弱峰值。

4 讨论

4.1 锆石最小年龄对 Marinoan 冰期启动时间的制约

前人的同位素年代学研究成果直接制约了 Sturtian 冰期的起止时间,分别为 ca. 717Ma 和 ca. 660Ma,Marinoan 冰期的结束时间为 ca. 635Ma。但长期以来,南沱组(Marinoan 冰期沉积)中难以找到可用于精确定年的同沉积火山岩,故其底部冰成杂砾岩最大沉积年龄的限定有赖于下伏地层大塘坡组的定年工作^[6,13]。湖南吉首地区大塘坡组顶部和湖北长阳地区大塘坡组中部凝灰岩中锆石的 U-Pb 年龄分别为 654.5 $\pm$ 3.8 Ma^[14] 和 654.2 $\pm$ 2.7 Ma^[15],

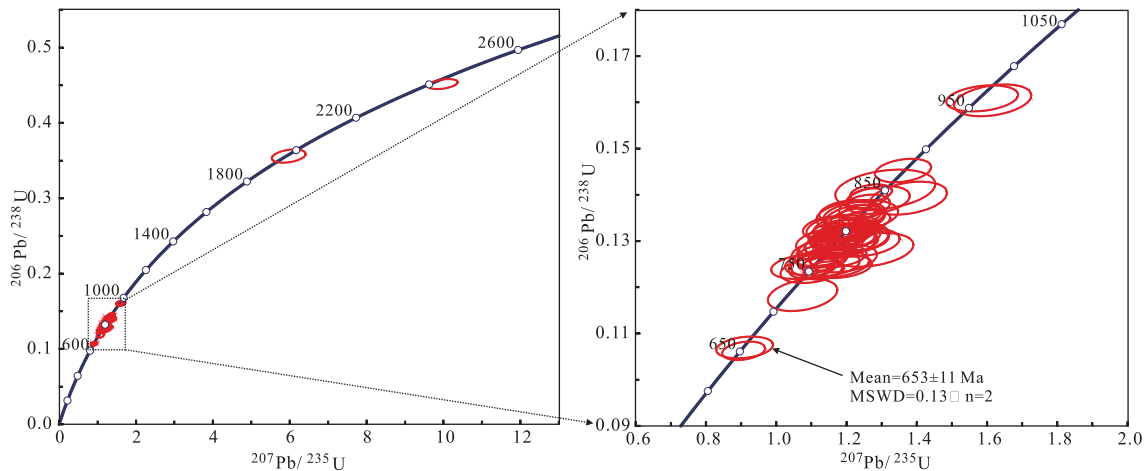


图4 碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig.4 Concordia plots of the zircon U-Pb age data

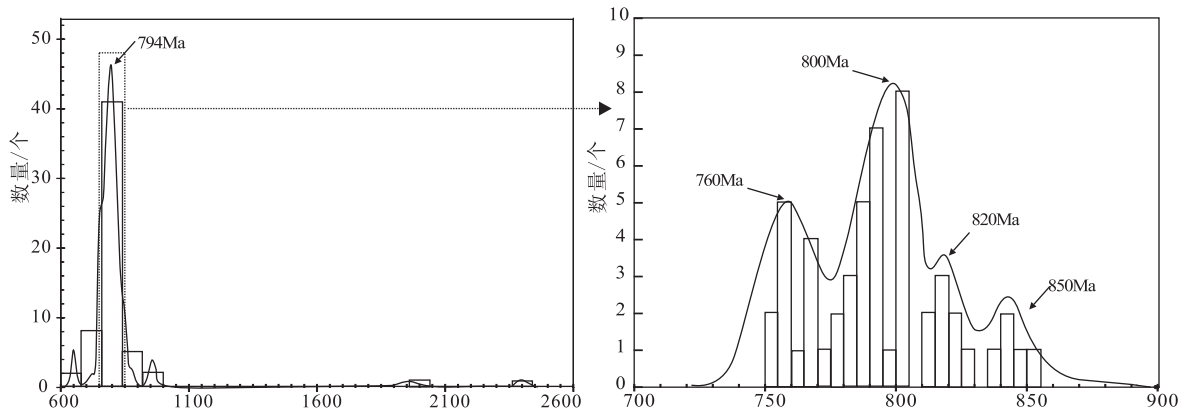


图5 碎屑锆石 U-Pb 年龄分布直方图

Fig.5 Histogram showing the distribution of the zircon U-Pb ages

说明 Marinoan 冰期的开始时间应在 654 Ma 之后；广西三江地区南沱组底部含砾砂岩中 3 颗最小锆石加权平均年龄 649.3 ± 6.2 Ma, 将 Marinoan 冰期开始时间限定在约 649 Ma 之后^[13]。高精度的旋回地层学研究成果也显示 Marinoan 冰期始于约 650.8 Ma。

前人利用美国 Colorado 高原中生代已有的凝灰岩锆石 U-Pb 年龄数据库对采自同层位地层的最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄进行对比验证后认为, 最年轻单颗锆石年龄 (YSG)、两颗以上最年轻锆石的加权平均年龄 (YC1 σ) 和三颗以上最年轻锆石加权平均年龄 (YC2 σ) 均可以用于限定地层年龄^[22]。本研究中最年轻两颗锆石年龄分别为 651 ± 7.7 Ma 和 655 ± 9.0 Ma, 两颗最年轻锆石加权平均年龄 (YC1 σ) 为 653 ± 11 Ma。可见, 本研究最年轻单颗锆石年龄和两颗最年轻锆石的加权平均年龄都与前

人获得的凝灰岩锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致, 限定了大塘坡组上部沉积的最大年龄约 651 Ma, 加之可能存在的冰川刨蚀作用, 上覆的南沱组冰碛岩应一定程度上晚于该时间。

此外, CL 图像上最年轻锆石的边界平直, 基本无磨圆, 具有高的 Th/U 比值 (1.41), 应该为仅经历了有限搬运的岩浆锆石, 可能为同喷发或是准同喷发锆石。考虑到碎屑锆石源岩开始剥蚀需适当的隆升时间以及锆石经搬运进入沉积盆地的时间等因素, 进入碎屑岩的同喷发或者准同生喷发锆石数量有限, 因此, 样品中具有谐和年龄的 60 颗锆石中仅有 1 颗锆石测出了 651 ± 7.7 Ma 的最小年龄。赵彦彦根据全球多个板块的成冰纪地层同位素和地球化学证据推测 Marinoan 冰期开始时间为 651 Ma^[23], 旋回地层学计算的 Marinoan 冰期开始时

表 1 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素测试结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic analyses for the detrital zircons

样品号	元素(10^{-6})		Th/U	同位素比值						年龄(Ma)					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
GN-01	149	267	0.56	0.0652	0.0024	1.1817	0.0408	0.1304	0.0015	783	75.9	792	19.0	790	8.6
GN-02	62	91	0.69	0.0679	0.0042	1.1829	0.0662	0.1295	0.0022	865	128	793	30.8	785	12.4
GN-03	97	144	0.67	0.0671	0.0030	1.2088	0.0536	0.1297	0.0016	840	92.6	805	24.7	786	9.3
GN-04	116	212	0.54	0.0657	0.0025	1.2074	0.0443	0.1327	0.0015	798	79.6	804	20.4	803	8.7
GN-05	394	361	1.09	0.0656	0.0021	1.2398	0.0398	0.1357	0.0014	794	68.5	819	18.0	820	8.0
GN-06	201	334	0.60	0.0663	0.0023	1.1360	0.0371	0.1236	0.0013	817	72.2	771	17.6	751	7.5
GN-07	154	178	0.86	0.0652	0.0028	1.1810	0.0492	0.1311	0.0017	783	95.4	792	22.9	794	9.5
GN-08	163	159	1.03	0.0651	0.0028	1.1327	0.0464	0.1260	0.0017	777	90.7	769	22.1	765	9.5
GN-09	76	74	1.03	0.0704	0.0040	1.2468	0.0690	0.1296	0.0020	939	119	822	31.2	786	11.4
GN-10	105	147	0.71	0.0666	0.0030	1.2032	0.0514	0.1305	0.0015	833	94.4	802	23.7	791	8.4
GN-11	86	115	0.75	0.0643	0.0030	1.1287	0.0503	0.1267	0.0017	750	103	767	24.0	769	9.7
GN-12	109	156	0.70	0.1580	0.0043	9.9797	0.2562	0.4516	0.0044	2435	46.6	2433	23.8	2402	19.4
GN-13	78	91	0.86	0.0617	0.0040	0.9102	0.0533	0.1070	0.0016	665	139	657	28.3	655	9.0
GN-14	28	36	0.79	0.0692	0.0054	1.3105	0.0940	0.1411	0.0028	906	157	850	41.3	851	16.0
GN-15	37	64	0.58	0.0679	0.0045	1.0752	0.0653	0.1183	0.0023	865	139	741	32.0	721	13.2
GN-16	54	93	0.58	0.0643	0.0035	1.1002	0.0580	0.1237	0.0018	754	117	753	28.1	752	10.4
GN-17	261	428	0.61	0.0652	0.0021	1.2591	0.0379	0.1392	0.0014	789	66.7	827	17.0	840	7.9
GN-18	89	108	0.83	0.0572	0.0032	1.0672	0.0591	0.1352	0.0019	502	124	737	29.0	817	11.0
GN-19	67	60	1.11	0.0675	0.0046	1.2308	0.0769	0.1355	0.0022	852	141	815	35.0	819	12.7
GN-20	62	62	1.00	0.0675	0.0040	1.2132	0.0700	0.1304	0.0021	854	124	807	32.1	790	12.0
GN-21	69	91	0.76	0.0645	0.0034	1.1310	0.0578	0.1275	0.0019	767	110	768	27.5	773	10.9
GN-22	174	103	1.69	0.0692	0.0034	1.1859	0.0569	0.1245	0.0016	906	106	794	26.4	756	9.4
GN-23	140	190	0.74	0.0621	0.0024	1.1432	0.0442	0.1328	0.0016	676	88.0	774	20.9	804	9.0
GN-24	216	200	1.08	0.0637	0.0028	1.0963	0.0470	0.1251	0.0016	733	99.1	752	22.8	760	9.3
GN-25	288	204	1.41	0.0621	0.0029	0.9073	0.0403	0.1063	0.0013	676	98.1	656	21.4	651	7.7
GN-26	139	116	1.20	0.0675	0.0033	1.2885	0.0607	0.1389	0.0020	854	102	841	26.9	838	11.2
GN-27	96	111	0.86	0.0668	0.0030	1.1564	0.0538	0.1250	0.0017	831	89.8	780	25.3	759	9.5
GN-28	316	236	1.33	0.0652	0.0022	1.1970	0.0396	0.1326	0.0015	789	70.4	799	18.3	803	8.3
GN-29	164	146	1.13	0.0662	0.0031	1.2074	0.0546	0.1323	0.0017	813	93.5	804	25.1	801	9.5
GN-30	172	185	0.93	0.0679	0.0028	1.2233	0.0481	0.1309	0.0015	865	85.9	811	22.0	793	8.8
GN-31	81	94	0.86	0.0656	0.0031	1.2233	0.0570	0.1348	0.0020	794	103	811	26.0	815	11.3
GN-32	128	164	0.78	0.0678	0.0027	1.3611	0.0528	0.1452	0.0017	865	83.3	872	22.7	874	9.4
GN-33	39	46	0.83	0.0725	0.0047	1.2718	0.0784	0.1281	0.0024	1000	133	833	35.1	777	13.8
GN-34	67	84	0.79	0.0630	0.0036	1.0758	0.0596	0.1244	0.0017	709	121	742	29.1	756	10.0
GN-35	209	289	0.72	0.0652	0.0021	1.2700	0.0393	0.1403	0.0013	783	62.8	832	17.6	847	7.1
GN-36	119	127	0.93	0.0662	0.0028	1.2311	0.0504	0.1347	0.0016	813	90.7	815	22.9	815	9.0
GN-37	36	58	0.63	0.0686	0.0043	1.2138	0.0706	0.1306	0.0023	887	128	807	32.4	791	12.9
GN-38	63	93	0.67	0.0664	0.0036	1.2213	0.0583	0.1355	0.0020	820	112	810	26.7	819	11.2
GN-39	99	128	0.77	0.0668	0.0032	1.1739	0.0545	0.1267	0.0016	831	100	788	25.5	769	9.0
GN-40	180	211	0.86	0.0673	0.0021	1.2273	0.0381	0.1322	0.0013	856	66.7	813	17.4	800	7.6
GN-41	122	151	0.81	0.0702	0.0023	1.2578	0.0410	0.1301	0.0014	1000	73.2	827	18.4	789	8.1
GN-42	266	322	0.83	0.0650	0.0021	1.1884	0.0382	0.1326	0.0013	776	68.5	795	17.7	803	7.2

续表 1

样品号	元素 (10^{-6})			同位素比值						年龄 (Ma)					
	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
GN-43	215	260	0.83	0.0646	0.0022	1.1668	0.0397	0.1308	0.0013	763	74.1	785	18.6	793	7.1
GN-44	89	98	0.91	0.0659	0.0032	1.1584	0.0517	0.1292	0.0017	803	101	781	24.3	783	9.4
GN-45	33	53	0.62	0.1291	0.0080	2.5154	0.1584	0.1414	0.0026	2087	109.6	1276	45.8	853	14.5
GN-46	53	67	0.79	0.0661	0.0037	1.1779	0.0605	0.1327	0.0019	809	119	790	28.2	803	11.0
GN-47	73	58	1.27	0.0722	0.0041	1.3757	0.0729	0.1393	0.0024	992	117	879	31.2	840	13.3
GN-48	68	109	0.62	0.0719	0.0032	1.5864	0.0674	0.1608	0.0019	983	86.1	965	26.5	961	10.3
GN-49	28	23	1.22	0.1235	0.0065	5.9738	0.2903	0.3559	0.0058	2009	87.8	1972	42.3	1963	27.7
GN-50	81	78	1.05	0.0653	0.0039	1.1538	0.0643	0.1297	0.0020	783	125	779	30.3	786	11.6
GN-51	33	71	0.47	0.0735	0.0035	1.6164	0.0724	0.1604	0.0023	1028	96.3	977	28.1	959	12.6
GN-52	128	106	1.21	0.0664	0.0027	1.2516	0.0477	0.1374	0.0017	820	84	824	21.5	830	9.9
GN-53	47	55	0.85	0.0679	0.0045	1.1532	0.0733	0.1250	0.0020	866	139	779	34.6	759	11.4
GN-54	161	125	1.29	0.0651	0.0030	1.1062	0.0468	0.1247	0.0018	789	96.3	756	22.6	757	10.5
GN-55	72	78	0.93	0.0687	0.0037	1.1920	0.0625	0.1262	0.0020	889	113	797	29.0	766	11.3
GN-56	412	349	1.18	0.0654	0.0023	1.1678	0.0411	0.1293	0.0015	787	75.9	786	19.3	784	8.7
GN-57	125	181	0.69	0.0673	0.0026	1.2514	0.0483	0.1343	0.0015	850	81.5	824	21.8	813	8.8
GN-58	52	70	0.75	0.0655	0.0035	1.1828	0.0601	0.1315	0.0021	791	113	793	28.0	796	12.0
GN-59	127	117	1.09	0.0640	0.0028	1.2030	0.0531	0.1363	0.0017	743	89.8	802	24.5	823	9.6
GN-60	204	225	0.90	0.0643	0.0024	1.1546	0.0404	0.1305	0.0014	754	77.8	779	19.0	791	7.9
GN-61	87	79	1.11	0.0652	0.0033	1.1991	0.0613	0.1328	0.0018	789	75	800	28.3	804	10.2
GN-62	202	276	0.73	0.0628	0.0018	1.1081	0.0318	0.1281	0.0014	702	61.1	757	15.3	777	8.2

间亦为 $650.8\text{Ma}^{[6]}$, 本次获得的锆石最小年龄为 651Ma , 推测研究区 Marinoan 冰期启动时间可能晚于 651Ma , 并与全球其它地区 Marinoan 冰期启动时间基本等时^[6,13,22]。

综上所述, 本研究中两颗最年轻锆石的 U-Pb 年龄与前人大塘坡组凝灰岩 U-Pb 年龄在误差范围内完全一致, 说明扬子地块 Marinoan 冰期开始时间在 651Ma 之后。

4.2 碎屑锆石物源分析

近年来, 碎屑锆石年代学应用于沉积物源研究愈加广泛^[24], 前人对中扬子地区南华系碎屑锆石年代学研究成果为本研究提供了重要参考依据。邻近研究区的宜昌三峡地区莲沱组及南沱组 1130 颗碎屑锆石年龄最大峰值为 $\sim 800\text{Ma}$, 此外还有 $\sim 2000\text{Ma}$ 和 $\sim 2500\text{Ma}$ 的峰值^[25]; 石门地区杨家坪剖面溇水河组 (莲沱组) 碎屑锆石年龄谱与之十分相似, 也存在 $\sim 813\text{Ma}$ (最大峰)、 $\sim 2010\text{Ma}$ 及 $\sim$

2476Ma 的年龄峰值^[4,26]。本研究获得的 60 个谐和年龄最显著的峰值加权平均年龄为 $\sim 794\text{Ma}$, 最大年龄为 2435Ma , 次为 2009Ma (图 5), 可能因物源供给的差异性造成 $\sim 2500\text{Ma}$ 和 $\sim 2000\text{Ma}$ 的年龄数据较少, 因而峰值不明显, 但与在三峡地区九龙湾剖面南沱组采集的 NT0614 砂岩样品的锆石频谱一致^[27], 属于典型的亲扬子型沉积。

受华南裂谷活动影响, 南华纪期间研究区北部为鄂中古陆, 南部为武陵裂谷盆地, 表现出北高南低的古地理格局, 物源应来自研究区北部 (图 1)。本研究中碎屑锆石 U-Pb 年龄主要集中分布于新元古代中晚期 $851 \sim 751\text{Ma}$ 内, 前人研究亦表明, 扬子地块于该时期发生了强烈的岩浆活动且具有明显的时空差异性, 陆块内部主要集中于 $820\text{Ma}^{[4]}$, 如鄂中古陆上黄陵花岗岩测年时代集中在 $900 \sim 800\text{Ma}^{[28]}$, 三斗坪岩套定年结果为 $850 \sim 800\text{Ma}^{[29]}$, 晓峰岩套年龄也为 800Ma 左右, 而扬子北缘岩浆活

动则集中于 750Ma 左右^[27]。因此,本研究中年龄为 800~851Ma 的锆石很可能来自鄂中古陆的黄陵地区,而年龄为 751~800Ma 的锆石可能来自于扬子北缘岩体或下伏地层。

4.3 源区岩浆作用

本研究获得的 60 颗具有谐和年龄的岩浆锆石反映了源区不同时期的岩浆活动。结合物源的亲扬子性,~2500Ma 锆石年龄是扬子陆块的年龄特征,可能记录了宜昌崆岭的太古代花岗片麻岩及混合岩事件^[26];~2000Ma 的年龄记录了古元古代崆岭地区经历的岩浆侵入事件^[30];年龄为 959Ma 和 961Ma 的两颗锆石记录了扬子地区四堡期的岩浆活动,与 Rodinia 超大陆聚合有关^[4];最年轻的两个年龄分别为 651 和 655Ma,可能是同喷发锆石。

统计了集中分布于 751~851Ma 的岩浆锆石年龄作直方图,主要存在 4 个峰值(图 5),除了最主要的~800Ma 峰值外,其它峰值分别为~850Ma、~820Ma 和~760Ma;而桂北三江地区南沱组底部碎屑锆石除了具有 ca. 800Ma 的最大峰值外,还存在 ca. 850、820Ma 及 750Ma 的明显峰值^[13],说明新元古代幕式岩浆活动在扬子陆块周缘普遍发育。结合前人研究不难发现,以上年龄峰值分别对应了新元古代中后期华南板块 4 次重要构造热事件:扬子地台和华夏褶皱带在~850Ma 碰撞拼合成华南板块^[31,32]、南华裂谷于~820Ma 形成(Rodinia 超大陆开始裂解)、南华裂谷主期(~800Ma)和后期(780~750Ma);而 750Ma 之后南华裂谷进入演化末期,以热沉降为主,火山活动减弱^[5],因此相关时期的碎屑岩浆锆石年龄记录较少。综上所述,碎屑锆石年龄特征清晰地反映了新元古代华南地块的生成以及 Rodinia 超大陆裂解过程中的幕式岩浆活动。

5 结论

本文对鄂西走马地区芭蕉河剖面大塘坡组顶部泥岩碎屑岩浆成因锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 定年,在前人研究成果基础上,得到以下认识:

(1)最年轻两颗锆石 U-Pb 年龄加权平均值及最年轻单颗锆石 U-Pb 年龄与前人在邻区获得的凝灰岩 U-Pb 年龄在误差范围内基本一致,虽然没有用精确的同位素年龄进一步缩小南沱冰期启动的时间范围,但为区域冰期和间冰期时间框架的建立

提供了新的数据。结合前人研究成果,推测华南地区 Marinoan 冰期启动时间应晚于 651Ma。

(2)碎屑锆石为典型的亲扬子型,主要来源于鄂中古陆和扬子北缘。锆石年龄分布最集中的 751~851Ma 年龄段内,峰值主要为~850Ma、~820Ma、~800Ma 和~760Ma,分别对应了扬子地台和华夏褶皱带拼接为华南板块、南华裂谷形成(Rodinia 超大陆开始裂解)、裂谷主期和后期 4 个构造热阶段,揭示了源区因 Rodinia 超大陆演化而引起的幕式岩浆活动。

参考文献:

- [1] 郑永飞. 新元古代岩浆活动与全球变化[J]. 科学通报, 2003, (16): 1705-1720.
- [2] 杜秋定, 汪正江, 王剑, 等. 湘中长安组碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质论评, 2013, 59(2): 334-344.
- [3] 潘桂棠, 陆松年, 肖庆辉, 等. 中国大地构造阶段划分和演化[J]. 地学前缘, 2016, 23(6): 1-23.
- [4] 李献华, 李武显, 何斌. 华南陆块的形成与 Rodinia 超大陆聚合-裂解——观察、解释与检验[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2012, 31(6): 543-559.
- [5] Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up [J]. Precambrian Research, 2003, 122(1): 141-158.
- [6] 包秀娟. 华南新元古代大塘坡组旋回地层学研究及其意义[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [7] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic snowball Earth [J]. Science, 1998, 281(5381): 1342-1346.
- [8] Hoffman, P. F, Schrag, D. P. The Snowball Earth hypothesis: Testing the limits of global change [J]. Terra Nova, 2002, 14(3): 129-155.
- [9] Lan Z, Li X, Zhu M, et al. A rapid and synchronous initiation of the widespread Cryogenian glaciations [J]. Precambrian Research, 2014, 255: 401-411.
- [10] Macdonald F A, Schmitz M D, Crowley J L, et al. Calibrating the Cryogenian [J]. Science, 2010, 327(5970): 1241-1243.
- [11] Rooney A D, Strauss J V, Brandon A D, et al. A Cryogenian chronology: Two long-lasting synchronous Neoproterozoic glaciations [J]. Geology, 2015, 43(5): 459-462.
- [12] 储雪雷, Wolfgang, Todt, 等. 南华—震旦系界线的锆石 U-Pb 年龄[J]. 科学通报, 2005, 50(6): 600-602.
- [13] 蔡娟娟, 崔晓庄, 兰中伍, 等. 华南扬子陆块成冰纪冰川作用的启动时限及其全球对比[J]. 古地理学报, 2018, 20(1): 65-86.
- [14] Zhang S, Jiang G, Han Y. The age of the Nantuo Formation and

- Nantuo glaciation in South China [J]. *Terra Nova*, 2010, 20 (4):289–294.
- [15] Liu P, Li X, Chen S, et al. New SIMS U-Pb zircon age and its constraint on the beginning of the Nantuo glaciations [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(10): 958–963.
- [16] 罗亮, 孙志明, 马志鑫, 等. 黔东南东南地区南华纪沉积序列与沉积环境演变[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(2): 27–35.
- [17] Zong K Q, Klemd R., Yuan Y, et al. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB) [J]. *Precambrian Research*, 2017, 290(12):32–48.
- [18] Hu Z, Zhang W, Liu Y, et al. "Wave" signal-smoothing and mercury-removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICPMS analysis: application to lead isotope analysis. [J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(2): 1152–1157.
- [19] Liu Y, Gao S, Hu Z, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle Xenoliths [J]. *Journal of Petrology*, 2010, 51(51): 537–571.
- [20] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00. A geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Special Publication No. 4a. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA. 2003.
- [21] 徐云飞, 丛峰, 刘军平, 等. 滇西澜沧岩群碎屑锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *沉积与特提斯地质*, 2018, 38(2): 103–112.
- [22] Dickinson W R, Gehrels G E. Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database [J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 2009, 288(1):115–125
- [23] 赵彦彦, 郑永飞. 全球新元古代冰期的记录和时限[J]. *岩石学报*, 2011, 27(2):545–565.
- [24] 郭佩, 刘池洋, 王建强, 等. 碎屑锆石年代学在沉积物源研究中的应用及存在问题[J]. *沉积学报*, 2017, 35(1):46–56.
- [25] 余振兵. 中上扬子上元古界—中生界碎屑锆石年代学研究[D]. 中国地质大学, 2007.
- [26] 宋芳, 牛志军, 何垚砚, 等. 中扬子地区南华纪早期碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对物源特征和古地理格局的约束[J]. *地质学报*, 2016, 90(10):2661–2680.
- [27] 胡蓉. 三峡地区南沱组与陡山沱组地球化学特征及其意义[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [28] 马大铨, 杜绍华, 肖志发. 黄陵花岗岩基的成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 2002, (2):151–161.
- [29] 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义——来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束[J]. *岩石学报*, 2006, 22(2):387–396.
- [30] 凌文黎, 高山, 张本仁, 等. 扬子陆核古元古代晚期构造热事件与扬子克拉通演化[J]. *科学通报*, 2000(21):2343–2348.
- [31] Ye M F, Li X H, Li W X, et al. SHRIMP zircon U-Pb geochronological and whole-rock geochemical evidence for an early Neoproterozoic Sibaoan magmatic arc along the southeastern margin of the Yangtze Block [J]. *Gondwana Research*, 2007, 12(1):144–156.
- [32] Li W X, Li X H, Li Z X, et al. Obduction-type granites within the NE Jiangxi Ophiolite: Implications for the final amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks [J]. *Gondwana Research*, 2008, 13(3):288–301.

Mudstones from the topmost part of the Datangpo Formation in the Zouma area, western Hubei: LA-ICP-MS zircon U-Pb dating and its geological implications

LI Minglong^{1,2}, TIAN Jingchun¹, FANG Xilin², ZHENG Deshun³, XU Keyuan², CHEN Lin², CAO Wensheng², ZHAO Jun², RAN Zhongxia²

(1. *Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*; 2. *No. 2 Geological Prospecting Party, Hubei Bureau of Geology and Mineral Resources, Enshi 445000, Hubei, China*; 3. *School of Resources and Environments, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China*)

Abstract: In the geological history of the assembly and breakup of the supercontinent Rodinia on the Earth during the Neoproterozoic, there once occurred two phases of global glacial events in the Sturtian and Marinoan epochs. Previous studies of isotope ages show that the initiation and termination of the Sturtian glacial epoch are dated at 717 Ma and 660 Ma, while the termination of the Marinoan glacial epoch is dated at 635 Ma. However, the initiation of the Marinoan glacial epoch remains uncertain. The tillites from the Nanhuan Gucheng Formation and Nantuo Formation in southern China respectively represent the depositional records of the Sturtian and Marinoan glacial deposits, and the Datangpo Formation is represented by the interglacial deposits. The present paper reports the LA-ICP-MS zircon U-Pb age determinations of the mudstones from the topmost part of the Datangpo Formation in the Bajiaohe section, Zouma area, western Hubei. 62 spots of 62 zircon grains give 60 concordia ages (concordancy > 90%) ranging between 651 Ma and 2435 Ma, of which 52 zircon U-Pb ages vary from 751 Ma to 851 Ma, with the peak age of about 794 Ma. The youngest zircon U-Pb age is in general agreement with that reported by the predecessors in the adjacent areas, and thus the initiation of the Marinoan glacial epoch may be deduced to be later than 651 Ma. The detrital zircons have the Yangtze affinity, and probably originated from the central Hubei palaeocontinent and northern Yangtze landmass. The peak age of about 850 Ma within the main age range of 751 Ma to 851 Ma may record the collision and amalgamation events occurred in the Yangtze platform and Cathaysia fold zone, while the peak ages of about 820 Ma, 800 Ma and 760 Ma may record the episodic magmatism associated with the breakup of the supercontinent Rodinia.

Key words: LA-ICP-MS; U-Pb dating; detrital zircon; Marinoan; Rodinia supercontinent; Datangpo Formation; Zouma area