

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.02.012

## 湖南衡阳地区长安组沉积序列及时限： 对全球斯图特冰期气候变化的响应

宋芳<sup>1,2</sup>, 牛志军<sup>1,2</sup>, 何垚砚<sup>1,2</sup>, 杨文强<sup>1,2</sup>, 周岱<sup>2</sup>, 张捷钰<sup>1,2</sup>, 段瑞春<sup>2</sup>

SONG Fang<sup>1,2</sup>, NIU Zhi-Jun<sup>1,2</sup>, HE Yao-Yan<sup>1,2</sup>, YANG Wen-Qiang<sup>1,2</sup>,  
ZHOU Dai<sup>2</sup>, ZHANG Jian-Yu<sup>1,2</sup>, DUAN Rui-Chun<sup>2</sup>

1. 古生物与地质环境演化湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430205;

2. 中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心), 湖北 武汉 430205

1. Hubei Key Laboratory of Paleontology and Geological Environment Evolution, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. Wuhan Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Central South China), Wuhan 430205, Hubei, China

**摘要:** 湖南衡阳地区位于扬子陆块东南缘, 区域上分布成冰纪最底部的长安组沉积, 在部分地区含砾粉砂岩中见板岩层位, 对研究华南江口(斯图特)冰期内部划分具有一定的意义。本文对衡阳境内的三口桥剖面开展沉积序列和碎屑锆石研究, 在长安组底部含砾粉砂岩层的碎屑锆石样品中取得最年轻一组锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄 726±7 Ma, 在含砾粉砂岩层之上的板岩层底部碎屑锆石样品中取得最年轻一组锆石<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄 671±17 Ma, 代表各自相应层位的最大沉积年龄。长安组底部含砾粉砂岩沉积时限与扬子陆块江口(斯图特)冰期开启时限(ca. 720 Ma)一致, 板岩沉积时限则与江口(斯图特)冰期内部短暂冰退的时限(ca. 690 Ma)一致; 底部含砾粉砂岩的出现是对江口(斯图特)冰期气候变冷的沉积响应, 中部板岩段沉积则反映了该冰期内部存在气候转暖的过程。碎屑锆石年龄谱显示研究区江口(斯图特)冰期的沉积物源主要来源于江南造山带。鉴于新元古代晚期下冰期过程的复杂性和较长的持续时间, 建议使用“江口冰期”指示扬子陆块下冰期的冰川活动时段, 以避免其与岩石地层单位同名产生的歧义。

**关键词:** 碎屑锆石; 成冰纪; 长安组; 斯图特冰期; 江口冰期; 扬子陆块

中图分类号: P535

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-02-0374-19

**Song F, Niu Z J, He Y Y, Yang W Q, Zhou D, Zhang J Y and Duan R C. 2025. Sedimentary Sequence and Deposition Age of the Chang'an Formation in Hengyang, Hunan Province: Responses to Climate Change within the Global Sturtian Glaciation Period. *South China Geology*, 41(2): 374–392.**

**Abstract:** Hengyang area of Hunan Province is located on the southeastern margin of the Yangtze Block, the bottommost of the Cryogenian sedimentation regionally being the Chang'an Formation, with slate interbed between tillite beds in some areas, which could be instructive for studying glacial retreat during the middle of Jiangkou (Sturtian) glaciation period in South China. This research focuses on the sedimentary sequence and detrital zircon ages of the Chang'an Formation in the Sankouqiao section in this area. The weighted average zircon <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U ages of the youngest groups, from samples of bottommost tillite and overlying slate, are

收稿日期: 2025-04-10; 修回日期: 2025-04-24

基金项目: 中国地质调查局项目(Nos. DD202401024)、国家自然科学基金项目(Nos. U2244212, 42472057)

第一作者: 宋芳(1978—), 女, 正高级工程师, 从事地层古生物学研究工作, E-mail: laurasongfang@foxmail.com

726±7 Ma and 671±17 Ma respectively. These ages correspond with the onset of the Sturtian glaciation (ca. 720 Ma) and the glacial retreat during the middle Sturtian glaciation period (ca. 690 Ma). The bottommost tillite of the Chang'an Formation is the response to the cold climate of the Sturtian glaciation period and the overlying slate to the process of getting warmer within this glaciation period. Detrital zircon age spectra show that the provenance of the Chang'an Formation of the Sankouqiao section is mainly from the Jiangnan Orogenic Belt. It is suggested that "Jiangkou glaciation period" should be used to refer to the early glaciation period (Sturtian) during the Cryogenian in the Yangtze Block, emphasizing its complex and long duration, to avoid confusion with the name of the stratigraphic unit.

**Key words:** detrital zircon; Cryogenian; Chang'an Formation; Sturtian glaciation period; Jiangkou glaciation period; Yangtze Block

成冰纪(720 ~ 635 Ma, Hoffman et al., 2017)期间, 地球经历了两次大规模冰川事件, 处于“雪球地球”状态(Williams, 1975)。这两次冰川事件分别被称为斯图特(Sturtian, 720 ~ 660 Ma)和马力诺(Marinoan, 650 ~ 635 Ma)冰期(Hoffman et al., 2017)。伴随着罗迪尼亚超大陆的裂解, 两次冰川事件在全球各主要板块保留了大量独具特色

的冰期→间冰期→冰期的沉积记录, 在沉积特征及年代学研究方面可以全球对比(Hoffman and Li Z X, 2009; 赵彦彦和郑永飞, 2011; 兰中伍, 2023)。

华南板块包括扬子陆块和华夏地块, 是新元古代晚期罗迪尼亚超大陆的重要组成部分(Zhao G C et al., 2018; 图 1), 成冰纪(在华南称为“南华纪”, 本文统称“成冰纪”)期间发育南华裂谷系(杨

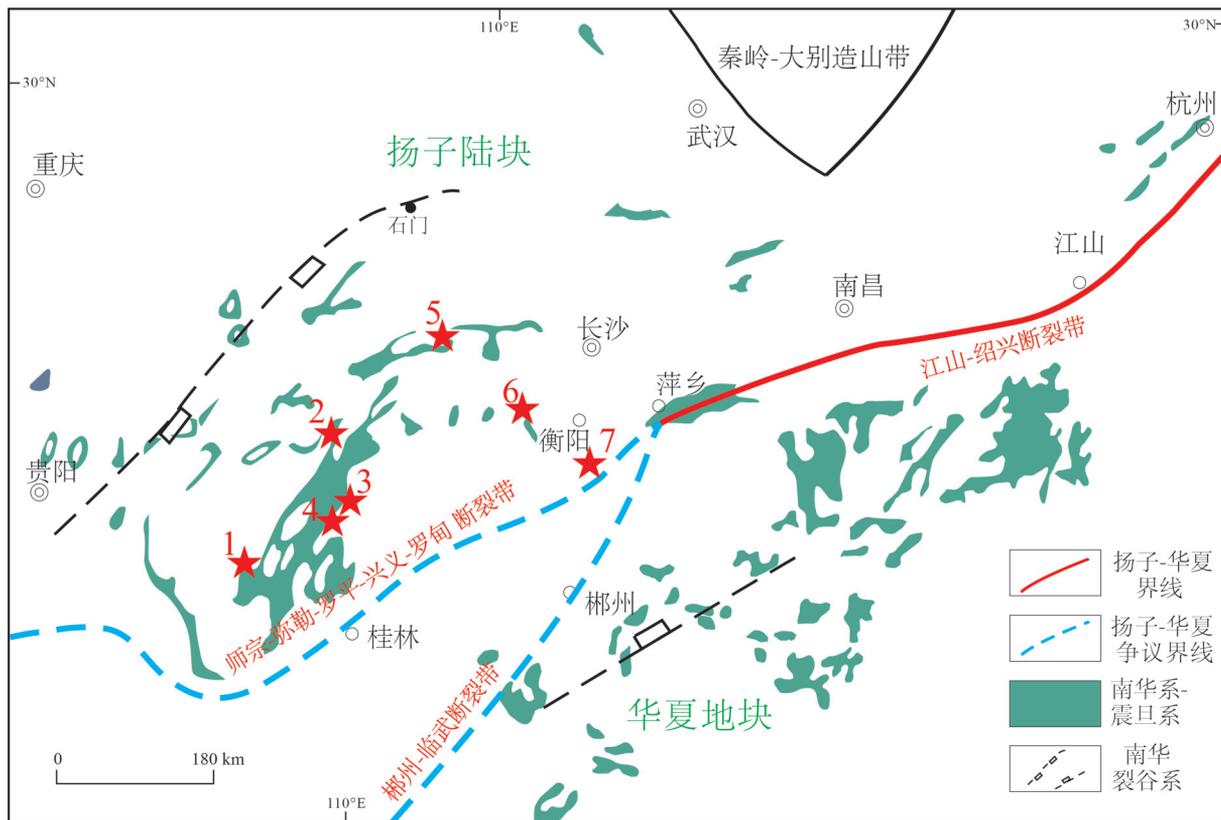


图 1 研究区大地构造背景及剖面位置示意图

Fig. 1 Geological setting of study area and locations of sections

剖面名称: 1. 桂北罗城; 2. 怀化新路河; 3. 湘西洪江; 4. 湘西黔阳; 5. 桃源马金洞; 6. 龙田菜花田; 7. 衡阳三口桥。

据 Xu Y J et al. (2016) 修改

明桂等, 2012; 杨明桂和王光辉, 2020), 保存了丰富的沉积记录, 尤其在扬子陆块, 成冰系表现为冰川沉积物(冰碛砾岩)夹间冰期碎屑沉积。受裂谷构造格局影响, 在各地具有不尽相同的沉积序列(周传明, 2016; 杨明桂和王光辉, 2020; 赵小明等, 2022; 牛志军等, 2023)。目前, 对于马力诺冰期的区域对比认识趋于一致, 而对于斯图特冰期的地层划分仍存在不同认识(王曰伦等, 1980; 刘鸿允等, 1991; 林树基等, 2010; Hu C L and Zhu M Y, 2020; 兰中伍, 2023)。

本文在前人研究的基础上, 对湖南省衡阳市境内, 地处扬子东南缘的三口桥剖面(图 1)长安组开展工作, 在重新划分沉积序列的基础上, 采集底部含砾粉砂岩和其上覆板岩的碎屑锆石样品开展 U-Pb 定年, 探讨该地区冰期沉积地层在岩性、碎屑物源上对气候变化的响应及扬子陆块长安组物源特征, 并讨论扬子陆块成冰纪下冰期名称的使用。

## 1 剖面描述及样品采集

湖南省衡阳市位于扬子陆块东南缘(图 1), 新元古代时期研究区位于钦杭裂谷西段(杨明桂等, 2012), 成冰纪沉积地层平行不整合/整合于青

白口纪高涧群之上, 顶部多为上古生界角度不整合覆盖(湖南省地质调查院, 2017b; 图 2a, 图 3)。三口桥长安组剖面位于衡阳市衡南县, 为湖南省地质调查院在开展铁丝塘等四幅 1:5 万区域地质调查工作时测制(图 2a), 沿罗星—三口桥水库的简易公路分布, 剖面出露好, 岩性特征明确, 成冰纪长安组与下伏高涧群岩门寨组整合接触, 泥盆纪跳马涧组不整合覆盖于长安组之上。本次对剖面沉积序列进行了重新划分, 并采集样品 22skq-1z(含砾粉砂岩, 地理坐标 26°46′44.4″N, 113°4′34.5″E; 图 2b)和 22skq-2z(板岩, 地理坐标 26°46′46.2″N, 113°4′36.7″E; 图 2c)用于碎屑锆石 U-Pb 定年。

## 2 测试方法及结果

锆石挑选、制靶、照相均在南京宏创地质勘查技术服务有限公司完成。锆石挑选在传统比重法淘选之后在双目镜下进行, 随机挑选锆石使用环氧树脂固定锆石并抛光至最大面, 之后进行反射光、透射光和阴极发光照相。

锆石 U-Pb 定年在中国地质调查局武汉地质调查中心实验室利用赛默飞世尔科技公司 RESOLUTION LR/SI55 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统和 iCAP-Q 型电感耦合等离子体质谱联用装

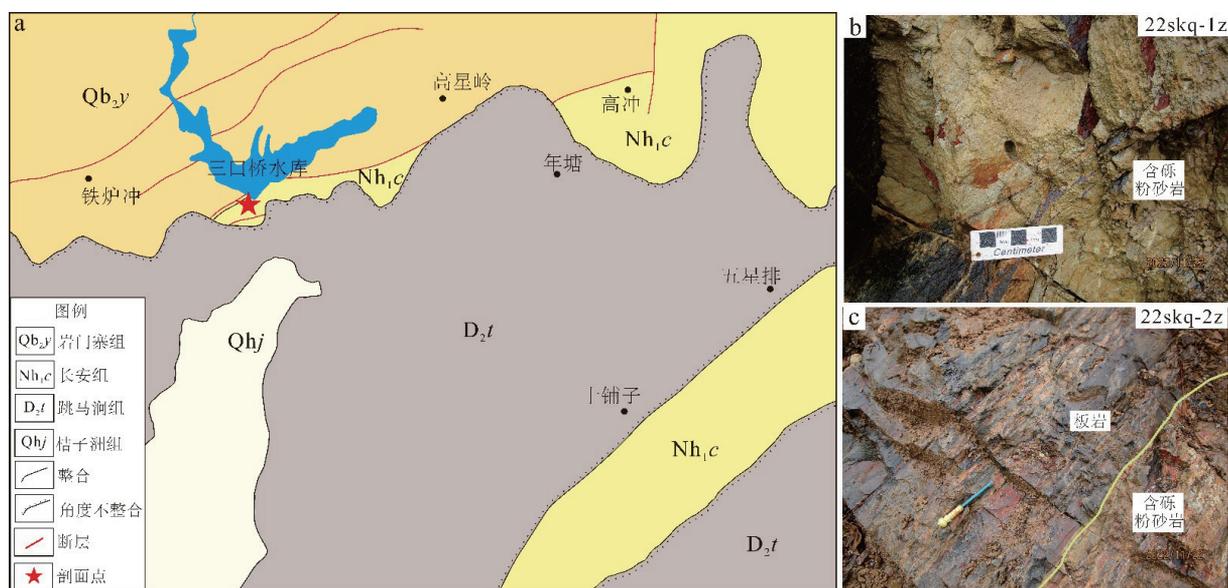


图 2 采样点区域地质简图及样品岩性

Fig. 2 Simplified regional geological maps of the sampling locations and lithology of the samples

据湖南省地质调查院(2017b)修改

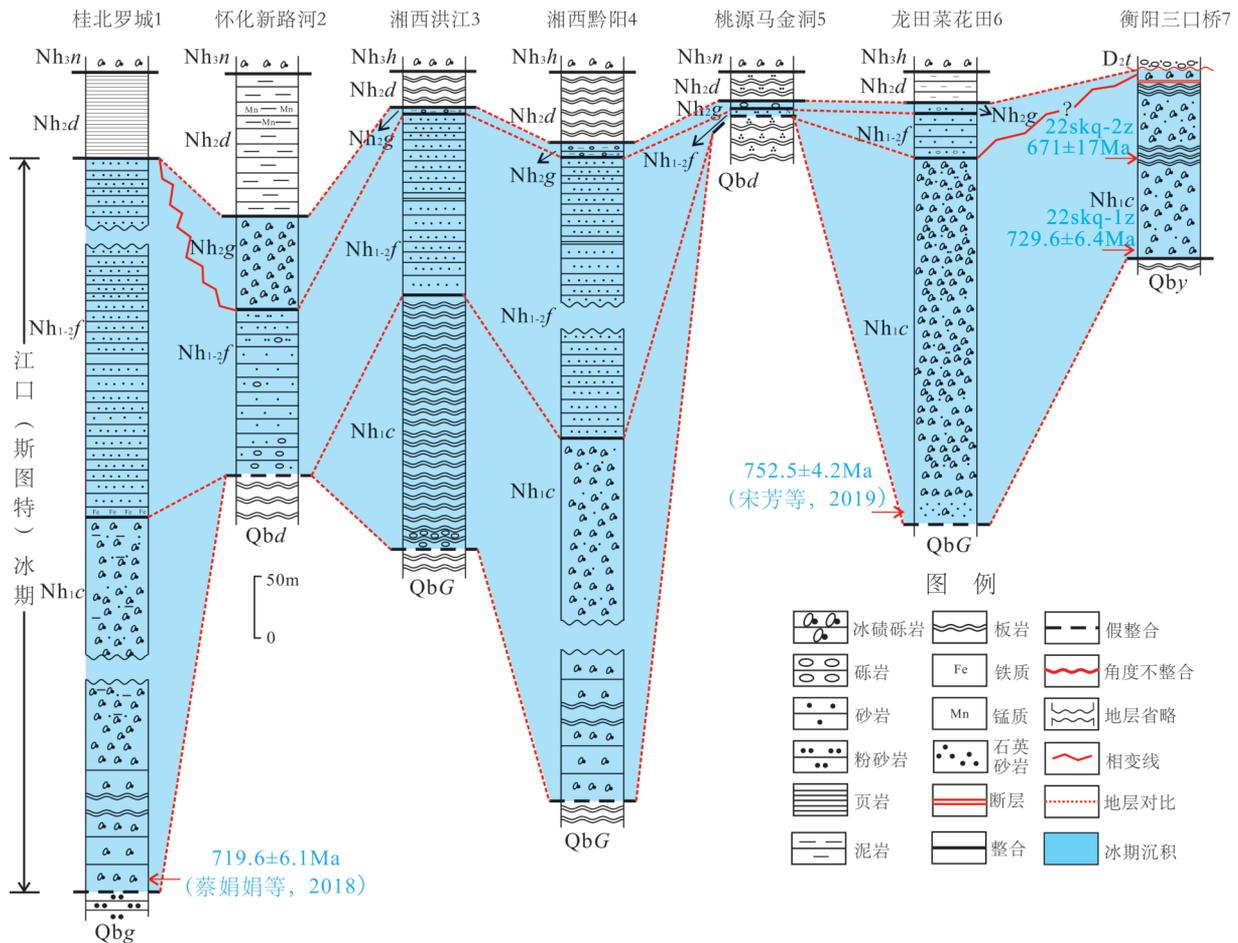


图 3 扬子东南缘成冰纪下部地层对比图

Fig. 3 Correlation of Lower Cryogenian system in the southeastern margin of the Yangtze Block

Nh<sub>1c</sub>: 长安组, Nh<sub>1-zf</sub>: 富禄组, Nh<sub>2g</sub>: 古城组, Nh<sub>2d</sub>: 大塘坡组, Nh<sub>3n</sub>: 南沱组, Nh<sub>3h</sub>: 洪江组, D<sub>2t</sub>: 跳马涧组, Qbg: 拱洞组,

Qbd: 多益塘组, QbG: 高洞群, Qby: 岩门寨组剖面位置及编号见图 1; 据宋芳等(2019)修改

置(LA-ICP-MS)分析完成。所使用的激光束斑和频率分别为 29 μm 和 4 Hz。U-Pb 同位素定年中采用锆石标准 91500 作外标 (<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄为 1064.5 ± 0.6 Ma, Wiedenbeck et al., 1995) 进行分馏校正, 测试中标准样品 91500 的 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄为 1062.6 ± 7.6 Ma (2σ, MSWD = 0.97, n = 28), 采用 Tanz 作为监控标准物质 (Hu Z C et al., 2021), 测试中监控样品 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 加权平均年龄 = 558.6 ± 5.5 Ma (2σ, MSWD = 0.96, n = 12)。每个时间分辨分析数据包括 20 ~ 30 s 空白信号和 40 s 样品信号。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)使用软件 ICPMSDataCal 12.2 (Liu Y S et al., 2008) 完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谱绘制和年龄加权平

均计算采用 Isoplot/Ex\_ver3 (Ludwig, 2003) 完成。因为 <sup>238</sup>U 和 <sup>235</sup>U 衰变为 <sup>206</sup>Pb 和 <sup>207</sup>Pb 的速率不同, 对于年龄 > 1000 Ma 的锆石 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄更为准确, 而对年龄 < 1000 Ma 的锆石 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄更为准确 (Li X H et al., 2009), 本次研究基于上述原则进行碎屑锆石年龄选择 (表 1)。

样品 22skq-1z 锆石以浅褐色、深粉色为主, 呈次棱角-次圆状, 透明度一般, 粒径 150 ~ 200 μm, 长宽比 1 : 1 ~ 3 : 1, 阴极发光 (CL) 图像显示超过 85% 的锆石具有典型的振荡环带结构 (图 4)。对锆石进行 U-Pb 同位素分析, 123 颗锆石 Th/U > 0.2, 取得 125 组谐和度大于 90% 的年龄数据, 最年轻的 4 颗 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄在 730 ~ 723 Ma 之间, 加权平均年龄 726.4 ± 7.3 Ma (2σ, MSWD = 0.25, 图 5a); 新元古代 (< 1000 Ma) 数据 95 组

表1 衡阳三口桥剖面长安组碎屑锆石 U-Pb 年龄测试结果  
Table 1 Results U-Pb dating of detrital zircons from the Chang'an Formation of Sankouqiao Section in Hengyang

点号	Th/U比值		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度 (%)
	比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	年龄(Ma)	误差	年龄(Ma)	误差	年龄(Ma)	误差	
22SKQ-IZ-1	0.47	0.0671	0.0014	1.2451	0.0271	0.1346	0.0014	840	44	821	12	814	8	99	
22SKQ-IZ-2	0.78	0.0689	0.0019	1.1999	0.0339	0.1264	0.0014	898	57	801	16	767	8	95	
22SKQ-IZ-3	0.90	0.1240	0.0017	6.0275	0.0903	0.3511	0.0033	2017	24	1980	13	1940	16	97	
22SKQ-IZ-4	0.82	0.0673	0.0016	1.1807	0.0290	0.1274	0.0014	856	52	792	14	773	8	97	
22SKQ-IZ-5	0.51	0.1141	0.0016	4.9360	0.0795	0.3121	0.0032	1866	24	1808	14	1751	16	96	
22SKQ-IZ-6	0.91	0.0648	0.0023	1.1806	0.0418	0.1326	0.0017	769	74	792	19	803	9	98	
22SKQ-IZ-7	0.54	0.1659	0.0022	10.6084	0.1612	0.4608	0.0043	2516	22	2489	14	2443	19	98	
22SKQ-IZ-8	1.07	0.1645	0.0023	10.6602	0.1654	0.4674	0.0045	2502	23	2494	15	2472	20	99	
22SKQ-IZ-9	1.07	0.0654	0.0023	1.0974	0.0372	0.1227	0.0015	787	69	752	18	746	9	99	
22SKQ-IZ-10	0.79	0.0678	0.0019	1.2104	0.0342	0.1294	0.0015	861	57	805	16	785	8	97	
22SKQ-IZ-12	1.28	0.0693	0.0019	1.1703	0.0323	0.1231	0.0014	906	58	787	15	748	8	94	
22SKQ-IZ-13	2.43	0.1621	0.0027	10.3867	0.2047	0.4622	0.0053	2477	28	2470	18	2449	23	99	
22SKQ-IZ-14	0.87	0.0644	0.0019	1.1427	0.0318	0.1300	0.0015	754	56	774	15	788	8	98	
22SKQ-IZ-15	0.70	0.0664	0.0016	1.1673	0.0283	0.1275	0.0013	817	55	785	13	773	7	98	
22SKQ-IZ-16	0.52	0.0698	0.0020	1.2835	0.0377	0.1332	0.0016	924	64	838	17	806	9	96	
22SKQ-IZ-17	1.08	0.0663	0.0014	1.1908	0.0244	0.1302	0.0012	817	43	796	11	789	7	99	
22SKQ-IZ-18	1.17	0.0673	0.0019	1.1908	0.0344	0.1286	0.0014	848	60	796	16	780	8	97	
22SKQ-IZ-19	0.87	0.0671	0.0022	1.1747	0.0371	0.1283	0.0016	839	67	789	17	778	9	98	
22SKQ-IZ-20	1.25	0.1563	0.0026	9.7763	0.1722	0.4520	0.0042	2416	28	2414	16	2404	19	99	
22SKQ-IZ-21	0.24	0.1208	0.0019	5.7448	0.0980	0.3434	0.0033	1968	27	1938	15	1903	16	98	
22SKQ-IZ-22	1.09	0.1048	0.0026	4.2014	0.1050	0.2918	0.0032	1711	51	1674	21	1651	16	98	
22SKQ-IZ-23	0.41	0.0687	0.0011	1.3471	0.0223	0.1415	0.0012	900	31	866	10	853	7	98	
22SKQ-IZ-24	1.14	0.0673	0.0020	1.1200	0.0322	0.1217	0.0014	856	63	763	15	741	8	97	
22SKQ-IZ-25	1.10	0.1250	0.0025	6.2186	0.1329	0.3599	0.0041	2029	35	2007	19	1982	19	98	
22SKQ-IZ-26	0.65	0.0671	0.0012	1.3079	0.0268	0.1406	0.0013	840	(160)	849	12	848	8	99	
22SKQ-IZ-27	0.47	0.1132	0.0016	5.0452	0.0768	0.3217	0.0027	1852	24	1827	13	1798	13	98	
22SKQ-IZ-28	0.54	0.0740	0.0019	1.7328	0.0435	0.1700	0.0018	1043	51	1021	16	1012	10	99	
22SKQ-IZ-29	2.18	0.0652	0.0011	1.1633	0.0210	0.1289	0.0012	781	35	784	10	782	7	99	
22SKQ-IZ-30	1.07	0.1232	0.0028	6.2149	0.1403	0.3661	0.0041	2003	39	2007	20	2011	19	99	
22SKQ-IZ-31	1.10	0.1053	0.0029	4.1465	0.1193	0.2855	0.0035	1720	46	1664	24	1619	17	97	
22SKQ-IZ-32	0.79	0.0652	0.0013	1.1585	0.0238	0.1286	0.0011	789	47	781	11	780	7	99	
22SKQ-IZ-33	1.14	0.0674	0.0017	1.2311	0.0307	0.1329	0.0014	852	53	815	14	804	8	98	
22SKQ-IZ-34	0.67	0.1110	0.0016	4.8223	0.0740	0.3138	0.0028	1817	26	1789	13	1759	14	98	
22SKQ-IZ-35	0.81	0.0662	0.0015	1.1918	0.0279	0.1308	0.0014	813	48	797	13	792	8	99	

续表 1

点号	Th/U 比值		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度 (%)	
	比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	年龄 (Ma)	误差	年龄 (Ma)	误差		
22SKQ-1Z-36	0.82	0.0661	0.0013	1.2297	0.0246	0.1349	0.0013	809	41	814	11	816	8	99
22SKQ-1Z-37	0.68	0.0660	0.0019	1.1370	0.0343	0.1248	0.0014	806	61	771	16	758	8	98
22SKQ-1Z-38	0.63	0.0651	0.0016	1.2105	0.0309	0.1349	0.0015	789	53	805	14	815	8	98
22SKQ-1Z-39	2.38	0.0623	0.0021	1.0676	0.0368	0.1250	0.0015	683	72	738	18	759	9	97
22SKQ-1Z-40	1.00	0.1554	0.0025	9.1300	0.2948	0.4180	0.0115	2406	28	2351	30	2251	52	95
22SKQ-1Z-41	0.52	0.0683	0.0015	1.2490	0.0265	0.1326	0.0012	877	44	823	12	803	7	97
22SKQ-1Z-42	0.70	0.0660	0.0013	1.2503	0.0257	0.1371	0.0013	806	45	824	12	828	7	99
22SKQ-1Z-43	0.36	0.1607	0.0022	10.3931	0.1761	0.4661	0.0050	2465	23	2470	16	2467	22	99
22SKQ-1Z-44	0.43	0.0628	0.0033	1.1613	0.0570	0.1355	0.0021	702	111	783	27	819	12	95
22SKQ-1Z-45	0.35	0.0670	0.0012	1.3680	0.0300	0.1473	0.0018	839	(162)	875	13	886	10	98
22SKQ-1Z-46	0.80	0.1164	0.0017	5.7234	0.0978	0.3549	0.0035	1902	26	1935	15	1958	17	98
22SKQ-1Z-47	1.00	0.1982	0.0031	15.0696	0.2555	0.5501	0.0058	2813	25	2820	16	2826	24	99
22SKQ-1Z-48	0.80	0.0672	0.0014	1.2399	0.0270	0.1334	0.0014	856	(156)	819	12	807	8	98
22SKQ-1Z-49	1.49	0.1242	0.0028	6.1616	0.1445	0.3603	0.0043	2018	40	1999	21	1983	20	99
22SKQ-1Z-50	0.39	0.0670	0.0015	1.3012	0.0286	0.1407	0.0015	839	44	846	13	849	8	99
22SKQ-1Z-51	0.81	0.0636	0.0013	1.1242	0.0242	0.1277	0.0013	728	43	765	12	774	8	98
22SKQ-1Z-52	0.88	0.0653	0.0015	1.2476	0.0294	0.1382	0.0014	783	44	822	13	834	8	98
22SKQ-1Z-53	1.51	0.0658	0.0016	1.0769	0.0267	0.1187	0.0012	1200	53	742	13	723	7	97
22SKQ-1Z-54	0.53	0.0665	0.0010	1.2632	0.0214	0.1372	0.0013	822	31	829	10	829	7	99
22SKQ-1Z-55	0.59	0.0661	0.0012	1.2362	0.0228	0.1352	0.0012	809	42	817	10	817	7	99
22SKQ-1Z-56	0.89	0.0631	0.0033	1.0473	0.0531	0.1216	0.0021	722	111	728	26	740	12	98
22SKQ-1Z-57	1.08	0.0667	0.0026	1.1841	0.0430	0.1300	0.0016	831	81	793	20	788	9	99
22SKQ-1Z-58	1.10	0.0671	0.0022	1.1653	0.0388	0.1262	0.0016	840	70	784	18	766	9	97
22SKQ-1Z-59	1.18	0.0665	0.0016	1.1570	0.0274	0.1261	0.0013	820	53	781	13	766	8	98
22SKQ-1Z-60	1.24	0.0800	0.0020	1.3479	0.0339	0.1219	0.0013	1198	55	867	15	741	7	84
22SKQ-1Z-61	1.19	0.0657	0.0018	1.1573	0.0304	0.1280	0.0015	798	56	781	14	776	9	99
22SKQ-1Z-62	1.00	0.0662	0.0019	1.1137	0.0309	0.1229	0.0014	813	60	760	15	747	8	98
22SKQ-1Z-63	1.20	0.0679	0.0016	1.1197	0.0247	0.1199	0.0012	865	53	763	12	730	7	95
22SKQ-1Z(2)-1	0.90	0.0653	0.0020	1.1542	0.0363	0.1282	0.0017	783	69	779	17	778	9	99
22SKQ-1Z(2)-2	0.99	0.0674	0.0028	1.1405	0.0454	0.1277	0.0060	850	119	773	22	775	34	99
22SKQ-1Z(2)-3	0.21	0.1190	0.0017	5.4523	0.0841	0.3300	0.0030	1943	25	1893	13	1838	14	97
22SKQ-1Z(2)-4	0.44	0.0695	0.0012	1.3682	0.0243	0.1422	0.0013	922	35	875	10	857	8	97
22SKQ-1Z(2)-5	0.51	0.0669	0.0014	1.1628	0.0251	0.1254	0.0012	835	43	783	12	761	7	97
22SKQ-1Z(2)-6	0.30	0.1200	0.0019	5.4785	0.0954	0.3285	0.0031	1967	28	1897	15	1831	15	96
22SKQ-1Z(2)-7	0.96	0.0693	0.0028	1.1650	0.0442	0.1236	0.0017	909	79	784	21	751	10	95
22SKQ-1Z(2)-8	0.92	0.0669	0.0022	1.2115	0.0397	0.1311	0.0016	835	67	806	18	794	9	98
22SKQ-1Z(2)-9	0.61	0.0668	0.0025	1.2161	0.0461	0.1319	0.0016	833	78	808	21	798	9	98

续表 1

点号	Th/U比值	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度 (%)
		比值	误差	比值	误差	比值	误差	年龄(Ma)	误差	年龄(Ma)	误差	年龄(Ma)	误差	
22SKQ-1Z(2)-10	0.80	0.0674	0.0015	1.2244	0.0285	0.1313	0.0014	850	47	812	13	795	8	97
22SKQ-1Z(2)-11	0.51	0.0670	0.0012	1.2193	0.0218	0.1317	0.0013	839	(162)	809	10	798	8	98
22SKQ-1Z(2)-12	1.01	0.0686	0.0014	1.2184	0.0265	0.1281	0.0013	887	43	809	12	777	7	95
22SKQ-1Z(2)-13	0.43	0.0673	0.0010	1.2368	0.0207	0.1324	0.0013	856	30	817	9	802	7	98
22SKQ-1Z(2)-14	1.12	0.0693	0.0023	1.1809	0.0389	0.1235	0.0014	906	67	792	18	750	8	94
22SKQ-1Z(2)-15	0.90	0.0655	0.0016	1.1736	0.0289	0.1299	0.0014	791	52	788	14	787	8	99
22SKQ-1Z(2)-16	1.03	0.0661	0.0018	1.1249	0.0312	0.1230	0.0014	809	56	765	15	748	8	97
22SKQ-1Z(2)-17	0.46	0.0660	0.0020	1.1684	0.0359	0.1291	0.0016	806	69	786	17	783	9	99
22SKQ-1Z(2)-18	0.98	0.0673	0.0016	1.2091	0.0305	0.1298	0.0013	856	49	805	14	787	8	97
22SKQ-1Z(2)-19	0.74	0.0668	0.0019	1.1505	0.0329	0.1251	0.0015	831	64	777	16	760	8	97
22SKQ-1Z(2)-20	0.71	0.0653	0.0011	1.2020	0.0220	0.1331	0.0012	783	37	801	10	805	7	99
22SKQ-1Z(2)-21	0.84	0.0664	0.0014	1.1466	0.0248	0.1250	0.0011	820	46	776	12	759	7	97
22SKQ-1Z(2)-22	0.34	0.0665	0.0011	1.2715	0.0223	0.1384	0.0013	820	35	833	10	836	8	99
22SKQ-1Z(2)-23	0.76	0.1614	0.0021	10.2205	0.1626	0.4571	0.0047	2472	23	2455	15	2427	21	98
22SKQ-1Z(2)-24	0.49	0.0660	0.0011	1.2139	0.0206	0.1330	0.0012	806	33	807	9	805	7	99
22SKQ-1Z(2)-25	0.72	0.0657	0.0013	1.2076	0.0252	0.1327	0.0013	798	34	804	12	803	8	99
22SKQ-1Z(2)-26	1.19	0.0648	0.0019	1.0575	0.0294	0.1189	0.0013	769	61	733	15	724	7	98
22SKQ-1Z(2)-27	0.88	0.1188	0.0029	5.9079	0.1503	0.3612	0.0047	1939	43	1962	22	1988	22	98
22SKQ-1Z(2)-28	0.47	0.0689	0.0029	1.2375	0.0401	0.1328	0.0017	896	88	818	18	804	10	98
22SKQ-1Z(2)-29	0.62	0.0653	0.0018	1.2074	0.0324	0.1351	0.0015	783	58	804	15	817	8	98
22SKQ-1Z(2)-30	0.14	0.0660	0.0010	1.2725	0.0223	0.1392	0.0014	809	31	834	10	840	8	99
22SKQ-1Z(2)-31	1.83	0.1210	0.0021	5.8796	0.1078	0.3520	0.0035	1972	63	1958	16	1944	17	99
22SKQ-1Z(2)-33	0.50	0.0738	0.0026	1.3930	0.0664	0.1323	0.0015	1035	71	886	28	801	9	89
22SKQ-1Z(2)-35	0.98	0.1119	0.0025	4.8272	0.1110	0.3131	0.0035	1831	41	1790	19	1756	17	98
22SKQ-1Z(2)-36	1.38	0.0692	0.0021	1.1793	0.0365	0.1244	0.0017	906	65	791	17	756	10	95
22SKQ-1Z(2)-37	0.51	0.0683	0.0022	1.2154	0.0410	0.1293	0.0018	877	67	808	19	784	10	97
22SKQ-1Z(2)-38	1.02	0.0689	0.0013	1.2655	0.0252	0.1330	0.0014	898	71	830	11	805	8	96
22SKQ-1Z(2)-40	0.66	0.0681	0.0011	1.1711	0.0208	0.1242	0.0013	872	33	787	10	755	8	95
22SKQ-1Z(2)-41	0.68	0.0700	0.0018	1.2874	0.0341	0.1335	0.0015	928	58	840	15	808	8	96
22SKQ-1Z(2)-42	0.63	0.0659	0.0018	1.1104	0.0307	0.1218	0.0013	1200	56	758	15	741	7	97
22SKQ-1Z(2)-43	0.59	0.0685	0.0017	1.1313	0.0291	0.1199	0.0016	883	51	768	14	730	9	94
22SKQ-1Z(2)-44	0.98	0.0658	0.0013	1.1213	0.0235	0.1231	0.0013	798	43	764	11	748	7	97
22SKQ-1Z(2)-45	0.07	0.1137	0.0016	4.6668	0.0916	0.2948	0.0041	1859	26	1761	16	1666	20	94
22SKQ-1Z(2)-46	0.34	0.0879	0.0016	2.4130	0.0717	0.1935	0.0038	1389	37	1246	21	1141	20	91
22SKQ-1Z(2)-47	0.62	0.0683	0.0022	1.2373	0.0390	0.1311	0.0015	877	67	818	18	794	9	97
22SKQ-1Z(2)-48	0.75	0.0653	0.0014	1.2222	0.0265	0.1354	0.0014	783	44	811	12	818	8	99
22SKQ-1Z(2)-49	0.89	0.0672	0.0029	1.1263	0.0461	0.1233	0.0019	856	92	766	22	750	11	97

续表 1

点号	Th/U 比值	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		谐和度 (%)		
		比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	年龄(Ma)	误差			
22SKQ-1Z(2)-50	0.97	0.0691	0.0017	1.4234	0.0369	0.1489	0.0016	902	52	899	15	895	9	99
22SKQ-1Z(2)-51	0.30	0.0670	0.0012	1.2507	0.0234	0.1344	0.0012	837	38	824	11	813	7	98
22SKQ-1Z(2)-52	0.76	0.0686	0.0020	1.2192	0.0369	0.1287	0.0016	887	60	809	17	780	9	96
22SKQ-1Z(2)-53	0.68	0.1283	0.0025	6.3343	0.1277	0.3564	0.0039	2076	34	2023	18	1965	19	97
22SKQ-1Z(2)-55	0.84	0.0674	0.0023	1.1220	0.0371	0.1210	0.0014	852	66	764	18	736	8	96
22SKQ-1Z(2)-56	0.54	0.1048	0.0016	4.4208	0.0705	0.3036	0.0027	1711	28	1716	13	1709	14	99
22SKQ-1Z(2)-57	1.28	0.0705	0.0024	1.2365	0.0392	0.1279	0.0015	943	69	817	18	776	9	94
22SKQ-1Z(2)-58	1.11	0.0660	0.0013	1.1311	0.0241	0.1236	0.0013	806	45	768	11	751	8	97
22SKQ-1Z(2)-59	0.72	0.0650	0.0014	1.2149	0.0257	0.1353	0.0013	774	46	807	12	818	7	98
22SKQ-1Z(2)-60	0.62	0.0657	0.0018	1.1305	0.0296	0.1248	0.0013	796	56	768	14	758	8	98
22SKQ-1Z(2)-61	0.69	0.0612	0.0021	1.0304	0.0335	0.1233	0.0015	656	74	719	17	750	8	95
22SKQ-1Z(2)-62	0.79	0.0645	0.0020	1.1859	0.0376	0.1335	0.0016	767	60	794	17	808	9	98
22SKQ-1Z(2)-63	1.16	0.0660	0.0013	1.1552	0.0243	0.1263	0.0012	806	47	780	11	767	7	98
22SKQ-1Z(2)-64	0.36	0.0673	0.0011	1.2771	0.0222	0.1370	0.0016	856	33	836	10	828	9	99
22SKQ-1Z(2)-65	0.55	0.1236	0.0017	6.1065	0.0906	0.3556	0.0032	2009	26	1991	13	1961	15	98
22SKQ-1Z(2)-66	0.67	0.0701	0.0021	1.2497	0.0372	0.1295	0.0017	931	58	823	17	785	9	95
22SKQ-1Z(2)-67	0.80	0.0688	0.0018	1.3582	0.0347	0.1427	0.0017	900	53	871	15	860	9	98
22SKQ-2Z-1	1.27	0.0672	0.0013	1.0532	0.0210	0.1130	0.0012	844	40	730	10	690	7	94
22SKQ-2Z-2	1.40	0.0655	0.0016	1.0987	0.0262	0.1213	0.0011	791	53	753	13	738	6	97
22SKQ-2Z-3	0.73	0.0672	0.0013	1.1318	0.0226	0.1213	0.0011	856	40	769	11	738	6	95
22SKQ-2Z-4	0.74	0.0662	0.0010	1.0141	0.0158	0.1104	0.0008	813	27	711	8	675	5	94
22SKQ-2Z-5	0.46	0.0726	0.0012	1.6097	0.0273	0.1598	0.0015	1006	31	974	11	956	8	98
22SKQ-2Z-7	0.69	0.1767	0.0024	11.6322	0.1913	0.4744	0.0051	2633	28	2575	15	2503	22	97
22SKQ-2Z-8	0.73	0.0661	0.0014	1.0399	0.0226	0.1136	0.0009	809	44	724	11	694	5	95
22SKQ-2Z-9	1.61	0.0648	0.0016	0.9617	0.0225	0.1077	0.0009	766	50	684	12	660	5	96
22SKQ-2Z-10	0.92	0.0664	0.0020	1.0352	0.0307	0.1129	0.0012	820	56	722	15	690	7	95
22SKQ-2Z-12	0.47	0.0658	0.0017	1.1936	0.0324	0.1317	0.0014	1200	56	798	15	798	8	99
22SKQ-2Z-13	0.80	0.0674	0.0013	1.1357	0.0221	0.1218	0.0009	850	45	770	11	741	5	96
22SKQ-2Z-14	0.81	0.0670	0.0023	1.1207	0.0373	0.1230	0.0017	839	72	763	18	748	10	97
22SKQ-2Z-15	0.51	0.0663	0.0013	1.2609	0.0251	0.1375	0.0013	817	40	828	11	831	7	99
22SKQ-2Z-16	2.57	0.0655	0.0014	1.0984	0.0239	0.1212	0.0010	791	44	753	12	737	6	97
22SKQ-2Z-18	1.35	0.0681	0.0021	1.0563	0.0310	0.1132	0.0012	872	62	732	15	691	7	94
22SKQ-2Z-19	0.27	0.0676	0.0013	1.2294	0.0234	0.1315	0.0010	857	39	814	11	797	6	97
22SKQ-2Z-20	0.86	0.0713	0.0037	1.2063	0.0673	0.1220	0.0013	965	139	803	31	742	7	92
22SKQ-2Z-21	0.97	0.0658	0.0020	1.1770	0.0349	0.1302	0.0014	798	58	790	16	789	8	99
22SKQ-2Z-23	2.20	0.0680	0.0025	1.1467	0.0397	0.1254	0.0019	878	77	776	19	761	11	98
22SKQ-2Z-24	0.71	0.0689	0.0016	1.2081	0.0296	0.1264	0.0013	898	46	804	14	767	7	95

续表 1

点号	Th/U比值		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度 (%)
	比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	年龄(Ma)	误差	年龄(Ma)	误差	年龄(Ma)	误差	
22SKQ-2Z-25	1.33	0.0643	0.0014	1.0439	0.0223	0.1177	0.0011	750	46	726	11	717	6	98	
22SKQ-2Z-26	1.14	0.0658	0.0014	1.0621	0.0220	0.1167	0.0010	1200	44	735	11	711	6	96	
22SKQ-2Z-28	0.33	0.0879	0.0013	2.6106	0.0378	0.2138	0.0015	1381	28	1304	11	1249	8	95	
22SKQ-2Z-29	1.08	0.0668	0.0022	1.2800	0.0431	0.1381	0.0016	831	69	837	19	834	9	99	
22SKQ-2Z-30	0.34	0.0688	0.0013	1.0878	0.0204	0.1137	0.0009	894	39	747	10	694	5	92	
22SKQ-2Z-32	0.31	0.0739	0.0015	1.3943	0.0257	0.1366	0.0012	1039	39	887	11	825	7	92	
22SKQ-2Z-33	0.85	0.0672	0.0022	1.2586	0.0418	0.1365	0.0018	843	75	827	19	825	10	99	
22SKQ-2Z-34	0.86	0.1622	0.0022	9.3379	0.1416	0.4139	0.0037	2480	22	2372	14	2233	17	93	
22SKQ-2Z-35	0.37	0.0732	0.0016	1.3628	0.0298	0.1340	0.0011	1020	43	873	13	811	6	92	
22SKQ-2Z-36	1.39	0.0677	0.0014	1.0735	0.0226	0.1142	0.0009	861	43	740	11	697	5	93	
22SKQ-2Z-37	0.82	0.0703	0.0017	1.3526	0.0326	0.1389	0.0013	939	50	869	14	839	7	96	
22SKQ-2Z-38	0.81	0.0672	0.0022	1.1339	0.0364	0.1224	0.0014	856	67	770	17	744	8	96	
22SKQ-2Z-39	0.88	0.0701	0.0019	1.1912	0.0314	0.1230	0.0012	931	56	797	15	748	7	93	
22SKQ-2Z-40	0.99	0.1657	0.0030	9.8690	0.2561	0.4288	0.0082	2515	31	2423	24	2300	37	94	
22SKQ-2Z-41	0.74	0.0689	0.0019	1.1506	0.0312	0.1214	0.0014	896	56	778	15	739	8	94	
22SKQ-2Z-46	1.25	0.1045	0.0019	4.1575	0.0744	0.2883	0.0025	1706	33	1666	15	1633	13	98	
22SKQ-2Z-47	0.80	0.0652	0.0017	1.1008	0.0280	0.1225	0.0012	789	56	754	14	745	7	98	
22SKQ-2Z-48	2.03	0.0691	0.0018	1.1783	0.0290	0.1246	0.0013	902	50	791	14	757	8	95	
22SKQ-2Z-49	1.75	0.0652	0.0020	1.1598	0.0348	0.1287	0.0016	781	63	782	16	780	9	99	
22SKQ-2Z-50	1.57	0.1570	0.0028	9.2826	0.1753	0.4271	0.0043	2424	29	2366	17	2293	19	96	
22SKQ-2Z-51	0.16	0.0703	0.0015	1.6616	0.0412	0.1712	0.0024	939	46	994	16	1018	13	97	
22SKQ-2Z-52	0.59	0.0723	0.0015	1.5560	0.0342	0.1555	0.0015	994	42	953	14	932	8	97	
22SKQ-2Z-54	0.96	0.0696	0.0030	1.0328	0.0400	0.1092	0.0015	917	92	720	20	668	9	92	
22SKQ-2Z-55	0.89	0.0635	0.0024	1.0397	0.0375	0.1201	0.0016	724	279	724	19	731	9	99	
22SKQ-2Z-56	1.55	0.0644	0.0024	1.0308	0.0371	0.1164	0.0015	754	78	719	19	710	9	98	
22SKQ-2Z-57	0.75	0.0712	0.0026	1.1015	0.0398	0.1125	0.0014	962	74	754	19	687	8	90	
22SKQ-2Z-58	0.74	0.0652	0.0017	1.1713	0.0324	0.1297	0.0014	789	56	787	15	786	8	99	
22SKQ-2Z-59	0.89	0.0608	0.0025	1.0586	0.0426	0.1282	0.0020	632	87	733	21	778	11	94	
22SKQ-2Z-60	1.03	0.0650	0.0025	1.0272	0.0393	0.1150	0.0015	776	80	718	20	702	9	97	
22SKQ-2Z-61	0.90	0.0614	0.0019	1.0112	0.0302	0.1198	0.0015	654	67	709	15	729	8	97	
22SKQ-2Z-62	0.83	0.0684	0.0031	1.0690	0.0465	0.1147	0.0016	880	94	738	23	700	9	94	
22SKQ-2Z-63	0.75	0.0900	0.0021	3.1985	0.0782	0.2551	0.0027	1428	43	1457	19	1464	14	99	
22SKQ-2Z-64	0.31	0.1522	0.0029	7.9458	0.1538	0.3751	0.0031	2372	33	2225	18	2053	15	91	
22SKQ-2Z-65	0.07	0.1270	0.0047	7.0301	0.2522	0.4072	0.0081	2058	65	2115	32	2202	37	95	
22SKQ-2Z-66	0.24	0.0901	0.0021	2.8547	0.0853	0.2242	0.0042	1428	44	1370	22	1304	22	95	
22SKQ-2Z-67	0.70	0.0659	0.0018	1.1963	0.0323	0.1316	0.0018	1200	58	799	15	797	10	99	
22SKQ-2Z-68	0.92	0.0679	0.0021	1.1548	0.0360	0.1219	0.0014	866	66	780	17	741	8	94	

续表 1

点号	Th/U 比值		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		谐和度 (%)
	比值	误差	比值	误差	比值	误差	比值	误差	年龄 (Ma)	误差	年龄 (Ma)	误差	年龄 (Ma)	误差	
22SKQ-2Z-69	0.94	0.0657	0.0018	1.2321	0.0341	0.1340	0.0014	796	55	815	16	811	8	99	
22SKQ-2Z-70	0.43	0.0685	0.0021	1.2454	0.0369	0.1297	0.0014	885	63	821	17	786	8	95	
22SKQ-2Z-71	0.71	0.0676	0.0021	1.3578	0.0419	0.1440	0.0017	857	65	871	18	867	9	99	
22SKQ-2Z-73	0.65	0.0683	0.0018	1.1718	0.0313	0.1226	0.0012	876	56	788	15	745	7	94	
22SKQ-2Z-74	0.78	0.0652	0.0023	1.1018	0.0382	0.1207	0.0013	781	74	754	18	735	8	97	
22SKQ-2Z-75	0.75	0.0668	0.0024	1.2277	0.0453	0.1317	0.0017	831	76	797	21	797	10	98	
22SKQ-2Z-76	0.70	0.1236	0.0033	6.2539	0.1655	0.3642	0.0050	2009	48	2012	23	2002	24	99	
22SKQ-2Z-77	1.01	0.0744	0.0032	1.2578	0.0513	0.1230	0.0019	1054	88	827	23	748	11	89	
22SKQ-2Z-79	1.59	0.0637	0.0018	1.0467	0.0278	0.1179	0.0012	731	59	727	14	719	7	98	
22SKQ-2Z-80	0.62	0.0650	0.0025	1.1953	0.0456	0.1326	0.0020	774	77	798	21	803	11	99	
22SKQ-2Z-81	0.71	0.1532	0.0038	10.0649	0.2422	0.4718	0.0058	2383	47	2441	22	2491	26	97	
22SKQ-2Z-82	1.44	0.0713	0.0020	1.3617	0.0365	0.1374	0.0016	965	56	873	16	830	9	94	
22SKQ-2Z-83	0.71	0.0632	0.0024	1.1617	0.0433	0.1333	0.0017	717	81	783	20	807	9	96	
22SKQ-2Z-84	1.04	0.0641	0.0038	1.0431	0.0577	0.1178	0.0020	743	126	725	29	718	12	98	
22SKQ-2Z-85	0.52	0.1421	0.0329	11.3562	1.4892	0.5058	0.0326	2254	410	2553	122	2639	140	96	
22SKQ-2Z-86	0.94	0.0614	0.0014	1.0777	0.0254	0.1259	0.0014	654	48	743	12	765	8	97	
22SKQ-2Z-87	1.12	0.0657	0.0017	1.1860	0.0297	0.1299	0.0011	796	53	794	14	787	7	99	
22SKQ-2Z-88	0.74	0.1440	0.0022	8.5038	0.1499	0.4235	0.0048	2276	27	2286	16	2277	22	99	
22SKQ-2Z-89	0.80	0.0659	0.0013	1.1840	0.0241	0.1295	0.0014	1200	41	793	11	785	8	98	
22SKQ-2Z-90	0.98	0.0806	0.0016	2.2585	0.0463	0.2012	0.0021	1213	39	1199	14	1182	11	98	
22SKQ-2Z-92	0.40	0.0703	0.0013	1.3903	0.0259	0.1425	0.0013	937	36	885	11	859	7	96	
22SKQ-2Z-93	1.01	0.0724	0.0018	1.2198	0.0295	0.1220	0.0012	998	54	810	14	742	7	91	
22SKQ-2Z-94	0.85	0.0619	0.0018	1.1450	0.0344	0.1341	0.0015	733	63	775	16	811	8	95	
22SKQ-2Z-95	0.66	0.0653	0.0013	1.1579	0.0216	0.1282	0.0011	783	45	781	10	778	6	99	
22SKQ-2Z-96	0.49	0.1612	0.0022	10.4593	0.1656	0.4671	0.0044	2469	18	2476	15	2471	19	99	
22SKQ-2Z-97	1.02	0.0693	0.0020	1.1713	0.0323	0.1230	0.0013	907	55	787	15	748	7	94	
22SKQ-2Z-98	1.32	0.0646	0.0015	1.1249	0.0285	0.1255	0.0013	761	50	765	14	762	8	99	

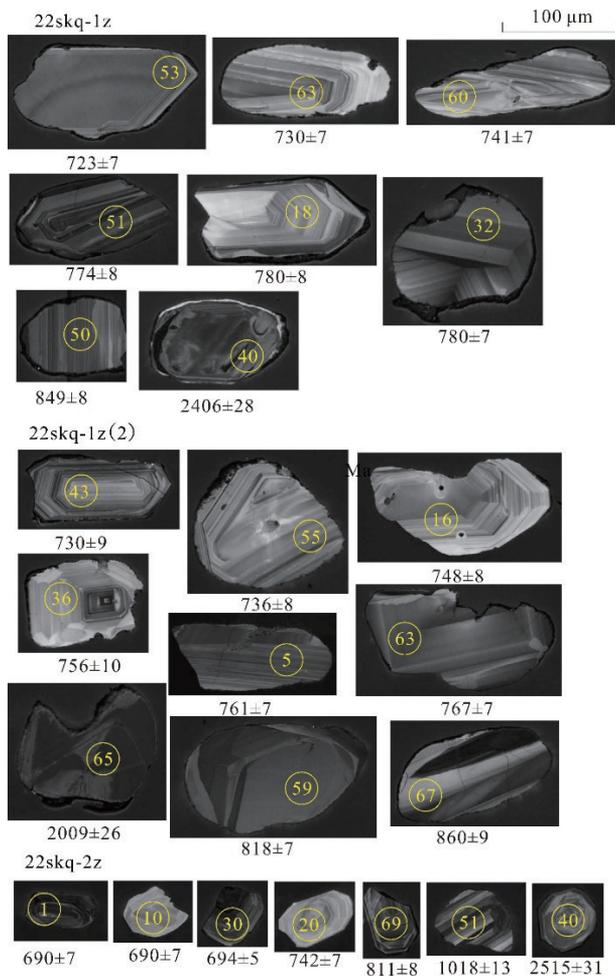


图4 样品代表性锆石阴极发光 (CL) 图像及年龄

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images and age of representative zircons from the studied samples in this paper

年龄单位: Ma; 22skq-1z 分两批进行测年, 图中点号与表1 对应

(76.0%), 中元古代(1600 ~ 1000 Ma) 数据 2 组 (1.6%), 古元古代(2500 ~ 1600 Ma) 数据 27 组 (21.6%), 太古宙(>2500 Ma) 数据 1 组 (0.8%), 形成

的年龄峰值分别为 752 Ma、780 Ma 以及 802 Ma (图 6a)。

样品 22skq-2z 锆石以淡粉色和无色透明为主, 呈棱角状、次棱角状, 粒径 70 ~ 100 μm, 长宽比 2 : 1 ~ 5 : 1, 阴极发光 (CL) 图像显示约 80% 的锆石具有典型的振荡环带结构 (图 4)。取得谐和度 > 90% 的年龄数据 84 组, 最年轻的 4 颗  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄在 660 ~ 687 Ma 之间, 加权平均年龄  $671 \pm 17 \text{ Ma}$  ( $2\sigma$ ,  $\text{MSWD} = 3.1$ , 图 5b); 其中 82 个测试点  $\text{Th}/\text{U} > 0.2$ , 其中新元古代 (<1000 Ma) 数据 67 组 (79.8%), 中元古代 (1600 ~ 1000 Ma) 数据 5 组 (6.0%), 古元古代 (2500 ~ 1600 Ma) 数据 10 组 (11.9%), 太古宙 (>2500 Ma) 数据 2 组 (2.3%), 形成的年龄峰值分别为 693 Ma、741 Ma 以及 787 Ma (图 6b)。

### 3 讨论

#### 3.1 衡阳地区长安组沉积序列对气候变化的响应

三口桥剖面长安组与下伏高洞群岩门寨组整合接触 (湖南省地质调查院, 2017b), 底部 29.67 m 为块状含砾粉砂岩, 中部出现厚达 24.34 m 的中-厚层条带状绢云母板岩 (图 2c), 上部再次出现块状含砾粉砂岩并被断层错断 (图 3)。本次从最下部含砾粉砂岩层底部和其上板岩底部采集的样品得到的碎屑锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄分别为  $726 \pm 7 \text{ Ma}$  和  $671 \pm 17 \text{ Ma}$  (图 2, 图 5)。

长安组广泛分布于扬子陆块东南缘, 代表了

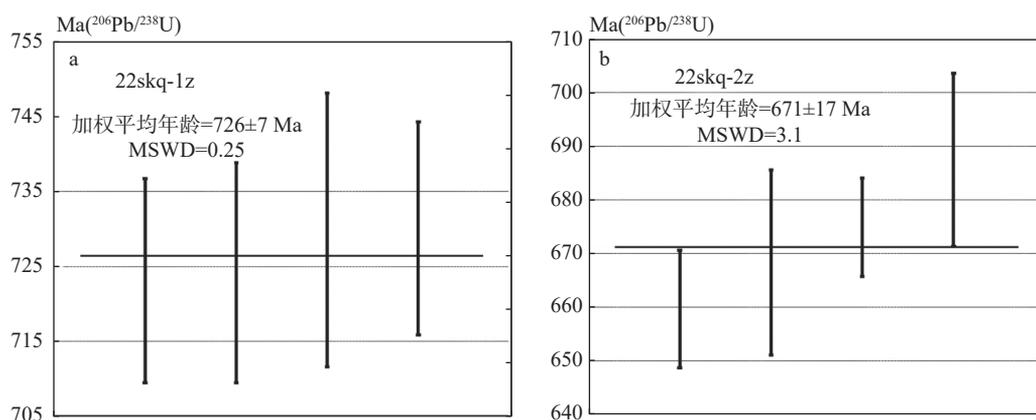


图5 三口桥剖面长安组碎屑锆石样品中最年轻一组锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  加权平均年龄

Fig. 5 Mean age of the four youngest detrital zircons of the samples from Chang'an formation of Sankouqiao section

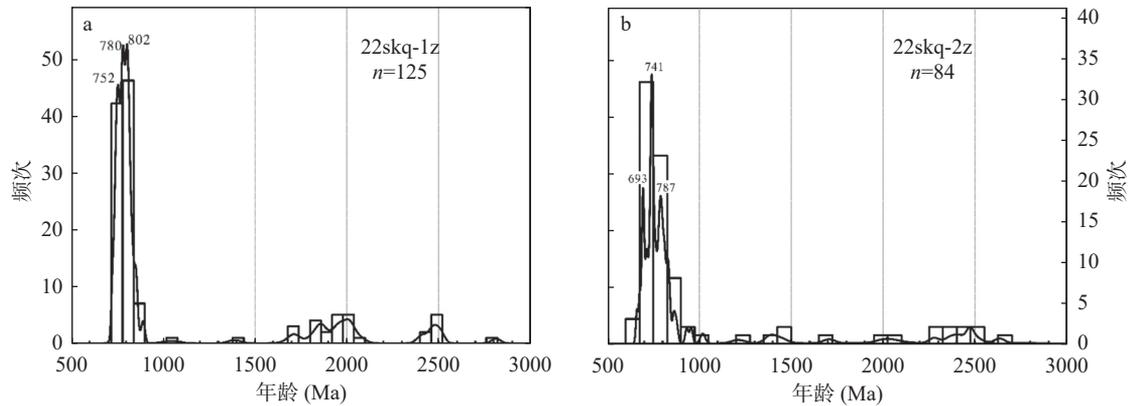


图 6 三口桥剖面长安组碎屑锆石年龄谱

Fig. 6 U-Pb relative probability density diagrams of ages with &gt;90% concordance of detrital zircon analyses of Sankouqiao section

该地区新元古代晚期最早一次冰期沉积(周传明, 2016), 对应于斯图特冰期下部(见 3.4 部分讨论)。近年来, 在澳大利亚和华南等多个地区对斯图特冰期沉积的研究均表明, 斯图特冰期内部存在一段“无冰”时期, 在沉积上显示为冰川沉积物(冰碛砾岩)之间出现了一套砂岩和泥岩, 部分地区显示出风暴沉积的特征(Hu C L and Zhu M Y, 2020; Lan Z W et al., 2022; Qi L et al., 2023)。在劳亚板块内部, 这套砂泥岩中火山灰夹层中单颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为  $684 \pm 4.0 \text{ Ma} \sim 688.6^{+9/-6} \text{ Ma}$ (Ferri et al., 1999; Fanning and Link, 2008; Lund et al., 2009; Condon and Bowring, 2011; Keeley et al., 2013), 在华南地区相应层位内火山灰中取得单颗锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄  $691.9 \pm 8.0 \text{ Ma}$ (Lan Z W et al., 2015), 斯图特冰期内部短暂冰退的开启时限为 ca. 690 Ma。

本次开展工作的三口桥剖面长安组与青白口纪岩门寨组呈整合接触, 以含砾粉砂岩出现为特征, 在含砾粉砂岩最下部中取得最年轻一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄  $726 \pm 7 \text{ Ma}$ ; 含砾粉砂岩层之上出现条带状板岩层位, 板岩层底部取得最年轻一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值  $671 \pm 17 \text{ Ma}$ , 上述两个年龄值在误差范围内与国际上斯图特冰期的开启时间及其内部短暂冰退开启时限一致(兰中伍, 2023); 含砾粉砂岩层位是对气候转冷的沉积响应, 板岩层的出现则反映了冰期内气候转暖。值得注意的是, Yin C Y et al.(2008)在贵

州黎平富禄组底部取得 SHRIMP 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄  $669 \pm 13 \text{ Ma}$ , 从年代地层格架上表明三口桥剖面原划分的长安组可能包含扬子陆块富禄组的沉积, 但精确的地层对比仍需要更多的证据。

### 3.2 华南长安组的底界时限

长安组是华南地区成冰纪最早出现的冰成沉积, 其沉积下限代表了新元古代晚期冰期在华南的启动时限(孙海清等, 2014; 高林志等, 2015; 兰中伍, 2023)。

本文在三口桥剖面长安组底部砾岩层中采集了碎屑锆石样品, 该层位岩性为土黄色含砾粉砂岩(图 2c), 与下伏青白口系高涧群浅红色条带状板岩差异明显、接触关系清晰(湖南省地质调查院, 2017b), 其中最年轻一组年龄的碎屑锆石内部振荡环带结构发育(图 4), Th/U 比值介于 0.59 ~ 1.51 之间(表 1), 并未经历后期 U-Pb 体系的重置, 加权平均年龄  $726 \pm 7 \text{ Ma}$ (图 5a), 在误差范围内与 Lan Z W et al.(2015, 2020)、柏道远等(2015)、Song G et al.(2017)、蔡娟娟等(2018)、秦亚等(2021)等在长安组底部或板溪群及相当层位顶部获得的同位素年龄相一致, 可限定长安组沉积下限为 ca. 720 Ma, 与国际上的斯图特冰期一致(Shields-Zhou et al., 2016; Hoffman et al., 2017; Hu C L and Zhu M Y, 2020; Lan Z W et al., 2020)。

除了 ca. 720 Ma 的沉积时限, 长安组沉积下限还存在 ca. 760 Ma 或 ca. 780 Ma 的认识, 本文



芳等, 2019)。Wang X C et al.(2012)在湘中地区长安组中获得的碎屑锆石年龄谱则有 752 Ma 和 800 Ma 双峰值的特征, 孙海清等(2014)在新化碧溪地区凝灰岩夹层中获得的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 加权平均年龄分别为  $751 \pm 5$  Ma 和  $764 \pm 10$  Ma, 锆石显示出磨圆特征。本文认为其主要反映了区域物源特征; 在桂北三江地区, 长安组碎屑锆石年龄谱呈现多个年龄峰值, 其中最明显的峰值为 807 Ma (韩坤英等, 2016); 在桂北罗城地区, 长安组物源较明显的年龄峰值分布于 720 Ma ~ 850 Ma 之间, 呈现多个年龄峰值(蔡娟娟等, 2018)。本次在三口桥剖面采集的长安组含砾岩段样品中碎屑锆石给出的年龄峰值分别为 752 Ma、780 Ma 及 802 Ma, 板岩段样品的年龄峰值分别为 693 Ma、741 Ma 和 787 Ma, 都呈现出 <1000 Ma 多个年龄峰值分布特征, 与桂北罗城地区相似。

上述研究中, 长安组碎屑锆石较多地显示出典型岩浆锆石的振荡环带结构, Th/U 比值普遍 >0.2。碎屑锆石的形态在各地有所区别, 桂北罗城地区、桂北三江地区和湖南衡阳地区长安组中以棱角状、次棱角状碎屑锆石多于次圆状(韩坤英等, 2016; 蔡娟娟等, 2018)。湘中地区长安组样品中, 碎屑锆石则多呈次圆状(杜秋定等, 2013; 宋芳等, 2019), 新化碧溪地区的长安组底部凝灰岩中取得的锆石也显示出磨圆特征。同时, 湘中地区长安组物源峰值相对较为单一, 磨圆和物源峰值特征暗示, 湘中地区长安组物源应具有更长的搬运距离。

新元古代晚期, 伴随罗迪尼亚超大陆裂解, 扬子陆块周缘普遍发育幕式岩浆活动(Li Z X et al., 2007), 其中江南造山带 830 ~ 750 Ma 的岩浆活动尤为引人注目(邓奇等, 2016), 为南华裂谷系活动背景下的成冰纪沉积地层提供了丰富的物源, 扬子东南缘的长安组物源特征很好地反映了这一地质背景。在接近于裂谷控制断裂边缘的桂北罗城和衡阳, 多峰值的锆石年龄谱说明在裂谷边缘地区物源更为复杂, 湘中地区长安组相对单一峰值的物源, 则是对 800 ~ 780 Ma 岩浆活动集中时段(邓奇等, 2016)的印证。

### 3.4 扬子陆块成冰纪下冰期名称的使用

新元古代晚期, 地球上出现了数次大规模的

冰川事件(Hoffman et al., 2017), 其中成冰纪期间的“斯图特冰川事件”(720 ~ 660 Ma)和“马力诺冰川事件”(650 ~ 635 Ma)属于全球性冰川事件(Hoffman et al., 2017), 在华南、尤其是扬子陆块广泛发育沉积特征明显的冰川沉积物(冰碛砾岩)(牛志军等, 2023)。但是, 对于扬子陆块新元古代晚期冰川事件的期次、时限和国际对比等问题一直存在不同认识。

扬子陆块冰期沉积研究历史悠久, 早期将新元古代冰川活动统称为“南华冰期”(刘鸿允等, 1980)。随着研究的深入, 以“长安组”沉积时限命名了扬子陆块的下冰期, 即“长安冰期”, 对应国际上的“斯图特冰期”。其后为“富禄间冰期”及“南沱冰期”(对应国际上的“马力诺冰期”), 均以相应时段沉积的岩石地层单位命名(王曰伦等, 1980)。

二十世纪 80 ~ 90 年代, 扬子陆块新元古代冰期地层沉积序列划分日趋精细, 各地区识别和命名(或重新定义)了溁水河组、东山峰组(杨彦均等, 1984)、莲沱组和古城组(湖北省地质矿产局, 1997)、两界河组、铁丝坳组和澄江组(贵州省地质矿产局, 1997)等当时认为与冰川活动相关的岩石地层单位。但是对于长安组和古城组(刘鸿允等, 1991; 林树基等, 2010)、莲沱组和溁水河组之间及它们与青白口纪板溪群的对比关系(刘卫新和张宝成, 1989; 林树基, 1995; 黄建中等, 1996; 张启锐和兰中伍, 2016)存在争论。在此期间, 同位素年代学开始被应用于新元古代冰期地层的研究(马国干等, 1984), 由于技术手段限制, 取得的同位素年龄准确度和解读都存在讨论的空间(郑永飞, 2003)。1999 年, “南华系”从原“震旦系”中被单独划分, 底界年龄 800 Ma, 顶界年龄 680 Ma(全国地层委员会, 2001), 后被修改为 780 Ma 和 635 Ma(尹崇玉等, 2015)。

基于上述研究和认识, 部分学者以桂北地区研究为窗口, 提出扬子陆块成冰纪存在三次冰期的可能性(周传明等, 2001), 并通过区域上取得的同位素年代学、同位素地球化学及地层对比等多方面综合研究提出扬子陆块存在“长安”、“铁丝坳”和“南沱”三次冰期, 但是下部两个冰期共同对应国际上的斯图特冰期(Zhou C M et al., 2004)。

部分学者认为扬子陆块最早一次冰期(“长安冰期”)早于国际上的斯图特冰期,中间一次的“古城冰期”和最晚的“南沱冰期”分别与国际上的“斯图特冰期”以及“马力诺冰期”对应,并提出了相应的岩石地层划分方案(彭学军等,2004;尹崇玉和高林志,2013);部分学者则认为扬子陆块只存在“江口”和“南沱”两次冰期(张启锐和储雪蕾,2006),并与两次全球性冰期相对应。

综合而言,学界普遍认同成冰纪岩石地层的划分应以沉积学特征反映的“冰期”、“间冰期”作为划分依据,对于以南沱组为代表的南沱冰期对应国际上的马力诺冰期也并无太多的争论。争议集中于下冰期,总结主要原因包括:(1)扬子陆块新元古代冰期地层中缺乏古生物化石和凝灰岩层等可以直接开展地层对比的标志(赵彦彦和郑永飞,2011);(2)冰川的剥蚀作用引起部分地区地层缺失以及南华裂谷系发育导致各地冰期沉积序列差异较大(周传明,2016);(3)对冰期、间冰期沉积特征的认识有所变化(张启锐和储雪蕾,2006;闫斌等,2010;林树基等,2010;Hu C L and Zhu M Y, 2020)。相关争议也体现在对于冰期(冰川事件)名称的使用上。包括“长安冰期”、“长安-铁丝坳冰期”(Zhou C M et al., 2004)、“古城冰期”(彭学军等,2004)及“江口冰期”(张启锐和储雪蕾,2006)等均被提出,时间段上对应斯图特冰期,但是与岩石地层单位的对应关系并不明确。

针对上述争议,近年来开展了多方面的工作。首先在地层对比方面,对“间冰期”富禄组的研究逐步精细。通过岩性对比,发现在扬子陆块东南缘,富禄组多见砾石层位(牛志军等,2023),部分层位具有冰期沉积特征(张启锐和储雪蕾,2006;林树基等,2010);在长安组缺失的扬子陆块北部,富禄组底部一般粒度较粗,牛志军等(2023)认为是长安组的相变(图3);在古城组不发育的湘西、黔东南等地区,富禄组顶部则出现较多含砾层位(林树基等,2010)。结合国际上对斯图特冰期开展的深入研究,其内部存在一个或多个冰退时期(Hu C L and Zhu M Y, 2020; Lan Z W et al., 2022; Qi L et al., 2023),可划分出数个冰进→冰退的轮回,扬子陆块长安组、富禄组和古城组的岩性组

合,很可能对应冰期内部的这一变化。而在区域上广泛分布的大塘坡组,岩性岩相、沉积地球化学等方面的研究均表明其是温暖气候下的沉积物(齐靛等,2015;马志鑫等,2016;湖南省地质调查院,2017a;李明龙等,2021;李婷婷等,2021),是典型的间冰期沉积。

其次,定年技术手段的日臻完善和普及,使得厘定新元古代晚期冰期地层时间框架成为可能。全球各主要陆块开展的年代学研究成果将成冰纪早期的“斯图特冰期”界定为720~660 Ma (Shields-Zhou et al., 2016)。同时,华南新元古代冰期年代学研究的诸多成果将长安组底界限定约720 Ma,大塘坡组底界限定在659 Ma(兰中伍,2023及其参考文献)。从年代地层格架上,扬子陆块从长安组底部到大塘坡组底部之间的沉积地层,对应国际上划分的斯图特冰期沉积。在贵州黎平富禄组底部凝灰岩层中取得的SHRIMP锆石U-Pb年龄 $669 \pm 13$  Ma(Yin C Y et al., 2008)证明富禄组属于斯图特冰期内部沉积,且该年龄与ca. 690 Ma发生的斯图特冰期冰退年龄(Condon and Bowring, 2011; Keeley et al., 2013; Lan Z W et al., 2015)一致。

因此,从岩石地层和年代地层序列两方面,目前多认同将长安组、富禄组与古城组对应于斯图特冰期(周传明,2016;Hu C L and Zhu M Y, 2020;兰中伍,2023;牛志军等,2023),但是在冰期名称的使用上,仍然是“长安”、“两界河”、“铁丝坳”、“古城”、“江口”等名词混用,应进行规范。

“江口组”创建于下冰期沉积发育齐全的湘西洞口地区(湖南省地质测量大队,1965),原始定义实际包括了目前的长安组、富禄组和大塘坡组,之后大塘坡组(湘锰组)被单独划分,江口组被定义为整合或假整合在青白口系和大塘坡组之间的岩石地层单位(湖南省地质矿产局,1988),后经湖南省区调所1992年在区域地质调查工作中进一步进行划分(湖南省地质调查院,2017a)，“江口组”停用(湖南省地质矿产局,1997;湖南省地质调查院,2017a)。张启锐和储雪蕾(2006)曾建议,将“江口组”提升为“江口群”,代指板溪群之上、大塘坡组之下、成冰纪下冰期所有沉积地层,并使用“江口冰期”这一名称对应国际上的斯图特冰期。

本文认为,“长安组”代表扬子陆块新元古代晚期最早出现的冰川沉积(冰碛砾岩),作为岩石地层单位名称已深入人心,而目前扬子陆块下冰期显然不仅包含长安组一个岩石地层单位,使用“长安冰期”这一名称极易引起混淆。诸如“两界河”、“铁丝坳”、“古城”等岩石地层单位名称也存在同样的问题。而“江口组”一是其定义最接近于目前下冰期包含的岩石地层单位,二是该名称使用时间短且停用已久,使用“江口冰期”代表扬子陆块新元古代晚期的下冰期,可以极大程度避免冰川活动时间概念与岩石地层单位沉积时限概念的混淆,也可以体现下冰期相较上冰期过程较为复杂、持续时间较长(兰中伍, 2023)这一特点。

## 4 结论

通过对扬子东南缘“长安冰期”沉积的区域对比及三口桥剖面长安组的碎屑锆石 U-Pb 定年工作,取得如下结论:

(1)三口桥剖面长安组底部含砾粉砂岩最年轻的4颗碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $726\pm 7\text{ Ma}$ ,可限定该地区斯图特冰期开启时限为 ca. 720 Ma。

(2)该剖面长安组在含砾粉砂岩之上存在板岩段,符合斯图特冰期内部存在冰退的沉积学特征,板岩段底部碎屑锆石中最年轻的4颗碎屑锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 $671\pm 17\text{ Ma}$ ,在误差范围内与斯图特冰期短暂冰退发生的时限(ca. 690 Ma)一致,该地区长安组沉积序列是对下冰期内气候变化过程的响应。

(3)研究区长安组物源年龄峰值在 693~787 Ma 之间,含砾粉砂岩段和板岩段的主峰值分别为 802 Ma 和 741 Ma,与江南造山带岩浆活动高峰期一致,反映其物源应主要来自江南造山带。

(4)建议使用“江口冰期”作为扬子陆块成冰纪下冰期的名称,与国际上斯图特冰期对应,避免其与岩石地层单位的混淆,同时突出下冰期发展过程复杂、持续时间长的特点。

### 参考文献:

柏道远,马铁球,钟响,李彬,熊雄.2015.萍乡东桥岩门寨组

- 凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及南华冰期底界年代探讨 [J]. 岩石矿物学杂志,34(5):637-647.
- 蔡娟娟,崔晓庄,兰中伍,王剑,江卓斐,邓奇,卓皆文,陈凤霖,江新胜.2018.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,20(1):65-86.
- 邓奇,王剑,汪正江,崔晓庄,施美凤,杜秋定,马龙,廖世勇,任光明.2016.江南造山带新元古代中期(830~750 Ma)岩浆活动及对构造演化的制约 [J]. 大地构造与成矿学,40(4):768-786.
- 杜秋定,汪正江,王剑,卓皆文,谢尚克,邓奇,杨菲.2013.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,59(2):334-344.
- 高林志,尹崇玉,丁孝忠,王泽九,张恒.2015.华南地区新元古代年代地层标定及地层对比 [J]. 地球学报,36(5):533-545.
- 贵州省地质矿产局. 1997. 贵州省岩石地层 [M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 韩坤英,王梁,丁孝忠,任留东,高林志,刘燕学,庞健峰,薛玖红.2016.桂北地区南华系沉积物源分析:来自碎屑锆石 U-Pb 年龄的证据 [J]. 岩石学报,32(7):2066-2180.
- 湖北省地质矿产局. 1997. 湖北省岩石地层 [M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 湖南省地质测量大队. 1965. 中华人民共和国区域地质调查报告(1:20万洞口幅) [R].
- 湖南省地质调查院. 2017a. 中国区域地质志:湖南志 [M]. 北京:地质出版社.
- 湖南省地质调查院. 2017b. 中华人民共和国区域地质矿产调查报告(1:5万铁丝塘等四幅) [R].
- 湖南省地质矿产局. 1988. 湖南省区域地质志 [M]. 北京:地质出版社.
- 湖南省地质矿产局. 1997. 湖南省岩石地层 [M]. 武汉:中国地质大学出版社.
- 黄建中,唐晓珊,张晓阳,郭乐群.1996.对峡东莲沱组与湖南板溪群对比问题的一点浅见 [J]. 地层学杂志,(3):232-236.
- 兰中伍.2023.华南南华系年代地层学研究进展 [J]. 沉积与特提斯地质,43(1):180-187.
- 李明龙,杨波涌,郑德顺,陈林,田景春.2021.鄂西走马地区南华纪大塘坡间冰期古气候研究 [J]. 地质论评,67(1):39-55.
- 李婷婷,朱光有,赵坤,王鹏举.2021.华南地区南华系大塘坡组黑色岩系地质地球化学特征与有机质富集机制 [J]. 石油学报,(42):1142-1162.
- 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 [J]. 地质通报,29(2-3):195-204.

- 林树基.1995.板溪群和莲沱组对比问题与震旦/前震旦界限[J]. 贵州地质,(1):23-29.
- 刘鸿允,董榕生,李建林,杨彦均.1980.论震旦系划分与对比问题[J]. 地质科学,(4):307-321.
- 刘鸿允,董榕生,戚中林,张启锐,李建林,胡文虎,陈孟莪,劳秋元. 1991. 中国震旦系[M]. 北京:科学出版社.
- 刘卫新,张宝成.1989.对峡东莲沱组与湖南五强溪组对比问题的认识[J]. 湖南地质,8(1):66-70.
- 马国干,李华芹,张自超.1984.华南地区震旦纪时限范围的研究[J]. 宜昌地质矿产研究所所刊,8:1-29.
- 马志鑫,罗亮,刘喜停,刘伟,孙志明.2016.重庆秀山小茶园锰矿南华系大塘坡组古环境[J]. 古地理学报,(3):473-486.
- 牛志军,宋芳,何壹砚,安志辉,田洋,刘浩,杨文强.2023.中南地区南华纪地层序列及对重大地质事件的响应[J]. 华南地质,39(2):173-185.
- 彭学军,刘耀荣,吴能杰,陈建超,李建清.2004.扬子陆块东南缘南华纪地层对比[J]. 地层学杂志,28(4):354-359.
- 齐靓,余文超,杜远生,周琦,郭华,王佳武,王萍,徐源.2015.黔东南华纪铁丝坳期-大塘坡期古气候的演变:来自CIA的证据[J]. 地质科技情报,34(6):47-57.
- 秦亚,冯佐海,葛黎明,邢全力,吴杰,薛云峰.2021.桂北三江地区丹洲群的锆石U-Pb年龄及其地质意义[J]. 桂林理工大学学报,41(2):257-266.
- 全国地层委员会. 2001. 中国地层指南及中国地层指南说明书(修订版)[M]. 北京:地质出版社.
- 宋芳,牛志军,何壹砚,杨文强.2019.湘中地区南华系沉积序列、物源特征及区域对比[J]. 地球科学,44(9):3074-3087.
- 孙海清,黄建中,杜远生,罗来,伍皓.2014.扬子地块东南缘南华系长安组同位素年龄及其意义[J]. 地质科技情报,33(2):15-20+27.
- 汪正江,王剑,江新胜,孙海清,高天山,陈建书,邱艳生,杜秋定,邓奇,杨菲.2015.华南扬子地区新元古代地层划分对比研究新进展[J]. 地质论评,61(1):1-22.
- 王曰伦,陆松年,高振家,林蔚兴,马国干.1980.中国震旦纪冰川特征、分期及对比[J]. 中国地质科学院院报天津地质矿产研究所分刊,1(1):1-17.
- 闫斌,朱祥坤,唐索寒,朱茂炎.2010.广西新元古代BIF的铁同位素特征及其地质意义[J]. 地质学报,84(7):1080-1086.
- 杨明桂,祝平俊,熊清华,毛素斌.2012.新元古代-早古生代华南裂谷系的格局及其演化[J]. 地质学报,86(9):1367-1375.
- 杨明桂,王光辉.2020.华南新元古代晚期地层层序与南华间冰期—冰后期大规模沉积成矿作用[J]. 华东地质,41(3):197-208.
- 杨彦均,魏绪寿,陈文斌,张立志,侯东南,赵德星,朱鸿. 1984.湖南省石门县杨家坪上前寒武系剖面研究[J]. 湖南地质,(4):1-107.
- 尹崇玉,高林志,刘鹏举,唐烽,王自强,陈寿铭. 2015. 中国新元古代生物地层序列与年代地层划分[M]. 北京:科学出版社.
- 尹崇玉,高林志.2013.中国南华系的范畴、时限及地层划分[J]. 地层学杂志,37(4):534-541.
- 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[J]. 地层学杂志,30(4):306-314.
- 张启锐,兰中伍.2016.南华系、莲沱组年龄问题的讨论[J]. 地层学杂志,40(3):297-301.
- 赵彦彦,郑永飞.2011.全球新元古代冰期的记录和时限[J]. 岩石学报,27(2):545-565.
- 郑永飞.2003.新元古代岩浆活动与全球变化[J]. 科学通报,(16):1705-1720.
- 赵小明,安志辉,邱啸飞,胡正祥.2022.扬子克拉通北缘神农架-崆岭地区中-新元古代地层厘定——兼论“神农架群底界”[J]. 华南地质,38(1):46-55.
- 周传明,燕夔,胡杰,孟凡巍,陈哲,薛耀松,曹瑞骥,尹磊明,王金权,王金龙,肖书海,鲍惠铭,袁训来.2001.皖南新元古代两次冰期事件[J]. 地层学杂志,(4):247-252.
- 周传明.2016.扬子区新元古代前震旦纪地层对比[J]. 地层学杂志,40(2):120-135.
- Condon D J, Bowring S A. 2011. Chapter 9: A user's guide to Neoproterozoic geochronology[M]. Memoir of Geological Society of London.
- 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[J]. Geological Society of Australia Abstract, 91: 57-62.
- Ferri F, Rees C J, Nelson J L. 1999. Geology and mineral deposits of the northern Kechika Trough between Gataga River and the 60<sup>th</sup> parallel[M]. Bulletin of Bureau of Columbia Ministry. Energy Mines, 107: 1-122.
- Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y. 2017. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology[J]. Science Advances, 3: e1600983.
- Hoffman P F, Li Z X. 2009. A palaeogeographic context for Neoproterozoic glaciation[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 277: 158-172.
- Hu C L, Zhu M Y. 2020. Lithofacies and glacio-tectonic deformation structures of the Tiesi'ao/Dongshanfeng

- Formations on the Yangtze Block, South China: Implications for Sturtian Glaciation dynamics[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 538: 109481.
- Hu Z C, Li X H, Luo T, Zhang W, Crowley J, Li Q L, Ling X X, Yang C, Li Y, Feng L P, Xia X P, Zhang S B, Wang Z C, Guo J L, Xu L, Lin J, Liu X M, Bao Z A, Liu Y S, Zong K Q. 2021. Tanz zircon megacrysts: a new zircon reference material for the microbeam determination of U-Pb ages and Zr-O isotopes[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 36(12): 2715-2734.
- Keeley J A, Link P K, Fanning C M, Schmitz M D. 2013. Pre- to synglacial rift related volcanism in the Neoproterozoic (Cryogenian) Pocatello Formation, SE Idaho: new SHRIMP and CA-ID TIMS constraints[J]. *Lithosphere*, 5: 128-150.
- Lan Z W, Huyskens M H, Lu K, Li X H, Zhang G Y, Lu D B, Yin Q Z. 2020. Towards refining the onset age of Sturtian glaciation in South China[J]. *Precambrian Research*, 338: 105555.
- Lan Z W, Mitchell R N, Gernon T M, Nordsvan A R. 2022. Did an asteroid impact cause temporary warming during snowball Earth?[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 581: 117407.
- Lan Z W, Li X H, Zhang Q R, Li Q L. 2015. Global synchronous initiation of the 2<sup>nd</sup> episode of Sturtian glaciation: SIMS zircon U-Pb and O isotope evidence from the Jiangkou Group, South China[J]. *Precambrian Research*, 267: 28-38.
- Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, Chen Z Q, Zhang Q R, Li Q L, Lu D B, Liu Y, Tang G Q. 2014. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations[J]. *Precambrian Research*, 255: 401-411.
- Li X H, Liu Y, Li Q L, Guo C H, Chamberlain K R. 2009. Precise determination of Phanerozoic zircon Pb/Pb age by multicollector SIMS without external standardization[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 10: Q04010.
- Li Z X, Wartho J A, Occhipinti S, Zhang C L, Li X H, Wang J, Bao C M. 2007. Early history of the eastern Sibao Orogen (South China) during the assembly of Rodinia: New mica <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating and SHRIMP U-Pb detrital zircon provenance constraints[J]. *Precambrian Research*, 159: 79-94.
- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, Günther D, Xu J, Gao C G, Chen H H. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257: 34-43.
- Ludwig K R. 2003. ISOPLOT 3.0: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley Geochronology Center, Special Publication.
- Lund K, Aleinikoff J N, Evans K V, duBray E A, Dewitt E H, Unruh D M. 2009. SHRIMP U-Pb dating of recurrent Cryogenian and Late Cambrian-Early Ordovician alkalic magmatism in central Idaho: Implications for Rodinia rift tectonics[J]. *Geological Society of American Bulletin*, 122: 430-453.
- Qi L, Hou M C, Cawood P A, Lang X G, Zhu S X, Zhang M X. 2023. Neoproterozoic storm deposits in western Yangtze: Implications for the sea conditions during the middle Sturtian glaciation[J]. *Precambrian Research*, 384: 106945.
- Shields-Zhou G A, Porter S, Halverson G P. 2016. A new rock-based definition for the Cryogenian Period (circa 720-635 Ma)[J]. *Episode*, 39: 3-8.
- Song G Y, Wang X Q, Shi X Y, Jiang G Q. 2017. New U-Pb age constraints on the upper Banxi Group and synchrony of the Sturtian glaciation in South China[J]. *Geoscience Frontiers*, 8: 1161-1173.
- Wang X C, Li X H, Li Z X, Li Q L, Tang G Q, Gao Y Y, Zhang Q R, Liu Y. 2012. Episodic Precambrian crust growth: Evidence from U-Pb ages and Hf-O isotopes of zircon in the Nanhua Basin, central South China[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 386-403.
- Wang Z J, Wang J, Du Q D, Deng Q, Liu H, Yang F. 2016. Geochronological and geochemical evidence for the sedimentary transformation from the Banxi Period to Nanhua Glacial Period[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90: 1915-1916.
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F, Griffin W L, Meier M, Oberli F, Von Quadt A, Roddick J C, Spiegel W. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, traceelement and REE analyses[J]. *Geostandards Newsletter*, 19: 1-23.
- Williams G E. 1975. Late Precambrian glacial climate and the Earth's obliquity[J]. *Geological Magazine*, 112: 441-465.
- Xu Y J, Cawood P A, Du Y S. 2016. Intraplate Orogenesis in Response to Gondwana Assembly: Kwangsi Orogeny, South China[J]. *American Journal of Science*, 316(4): 329-362.
- Yin C Y, Liu P, Tang F. 2008. New U-Pb zircon age constrains on the age of interglacial Fulu Formation in

- Zhaoxing, Liping, Guizhou, South China[A]. Abstracts of the 33<sup>rd</sup> International Geological Congress, Oslo.
- Zhang S H, Jiang G Q, Dong J, Han Y G, Wu H C. 2008. New SHRIMP U-Pb age from the Wuqiangxi Formation of Banxi Group: Implications for rifting and stratigraphic erosion associated with the early Cryogenian (Sturtian) glaciation in South China [J]. *Science China: Earth Sciences*, 38: 1537-1544.
- Zhao G C, Wang Y J, Huang B C, Dong Y P, Li S Z, Zhang G W, Yu S. 2018. Geological reconstructions of the East Asian blocks: From the breakup of Rodinia to the assembly of Pangea[J]. *Earth-Science Reviews*, 186: 262-286.
- Zhou C M, Tucker R, Xiao S H, Peng Z X, Yuan X L, Chen Z. 2004. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciations in south China[J]. *Geology*, 32(5): 437-440.