

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.10.005

滇东北待补地区碎屑锆石 U-Pb 年龄及其对新元古代康滇裂谷盆地沉积古地理演化的启示

潘江涛¹, 吴亮^{1*}, 余莉², 李仕忠¹, 胡关云¹PAN Jiangtao¹, WU Liang^{1*}, YU Li², LI Shizhong¹, HU Guanyun¹

1. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650100;

2. 云南省有色地质局三〇八队, 云南 昆明 650217

1. Kunming General Survey of Natural Resources Center, CGS, Kunming 650100, Yunnan, China;

2. Team 308, Yunnan Nonferrous Geology Bureau, Kunming 650217, Yunnan, China

摘要: 扬子西缘新元古代康滇裂谷盆地是华南新元古代裂谷盆地系统的重要组成部分, 其充填序列和演化模式研究对华南扬子古大陆的形成演化具有重要意义。报道了位于扬子西缘待补地区新元古代康滇裂谷盆地中“板溪-南华楔状地层”成熟期相当的澄江组顶部碎屑锆石 (PM109-51) LA-ICP-MS U-Pb 年龄, 获得 10 组峰值年龄, 认为最年轻的一组年龄加权平均值 (723 ± 9 Ma) 代表了区域内华南长安冰期 (Sturtian) 的启动时间; 通过与区内早寒武世沧浪铺组底部碎屑锆石 (PM005-14) LA-ICP-MS U-Pb 年龄值比较, 发现两者在 801 Ma 峰值与 816 Ma 峰值区间的物源贡献率上存在较大的差别, 结合前人资料数据的分析, 认为在新元古代康滇裂谷盆地的发展期甚至物源无明显变化的震旦纪—早寒武世地层中, 这些表现为裂谷盆地幼年期的物源贡献率突变现象, 代表了康滇裂谷半地堑盆地系统对物源的约束控制作用; 早期由裂谷肩老地层或岩浆岩提供物源, 由于小型半地堑盆地群的存在, 物源对远离主边界断裂的区域贡献率较低, 随着小型半地堑盆地的连通性加强, 后期物源辐射则更广泛。

关键词: 新元古代; 康滇裂谷盆地; 碎屑锆石 U-Pb 年龄; 半地堑盆地; 物源区; 地质调查工程

中图分类号: P534.3; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)10-1745-12

Pan J T, Wu L, Yu L, Li S Z, Hu G Y. U-Pb ages of detrital zircons from Daibu area, northeastern Yunnan Province: the implication Neoproterozoic paleogeographic evolution of the Kangdian rift basin. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(10): 1745-1756

Abstract: The Neoproterozoic Kangdian rift basin of the western margin of the Yangtze is an important component of the Neoproterozoic rift basin system in South China. The study of its filling sequence and evolution model is of great significance to the formation and evolution of the ancient Yangtze Continent in South China. This paper reports the LA-ICP-MS U-Pb age of detrital zircon at the top of the Chengjiang Formation (PM109-51) in the mature period of the "Banxi-Nanhua Wedge Formation" in the Neoproterozoic Kangdian Rift Basin in the western margin of Yangtze, acquired 10 groups peak age, and the earliest weighted average age (723 ± 9 Ma) is limited to represent the start time of the Chang'an ice age (Sturtian) in southern China. Comparing with the LA-ICP-MS U-Pb age value of detrital zircon at the bottom of the Early Cambrian Canglangpu Formation in the region, It is found that there is a big difference in the source contribution rate between the 801 Ma peak and the 816 Ma peak, Combined with the analysis of previous data, it is believed that during the development period of the Neoproterozoic Kangdian rift basin and even the Sinian-Early

收稿日期: 2020-05-29; 修订日期: 2022-09-28

资助项目: 中国地质调查局项目《云南待补 (G48E011006)、务德 (G48E011007)、李子沟 (G48E012006)、得德卡 (G48E012007) 幅 1:5 万区域地质矿产调查》(编号: 12120115041601)、《滇中楚雄地区云龙镇等 4 幅 1:5 万区域地质调查》(编号: ZD20220504)

作者简介: 潘江涛 (1987-), 男, 工程师, 从事区域地质矿产研究。E-mail: pj434214@126.com

* 通信作者: 吴亮 (1985-), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查、矿产勘查研究。E-mail: 229471514@163.com

Cambrian strata without obvious changes in provenance, these performances are the source contribution of the rift basin in the early stage. The rate mutation phenomenon represents the constraining control effect of the Kangdian rift half-graben basin system on the provenance. In the early stage, the old rift shoulder stratigraphy or magmatic rock provided the source. Due to the existence of the half graben basin group, the provenance contribution rate to the area away from the main boundary fault is low. As the connectivity of the half graben basin increases, the later sources are more widely radiated.

Key words: Neoproterozoic; Kangdian rift basin; U-Pb age of detrital zircon; half graben basin; provenance area; geological survey engineering

康滇裂谷盆地是华南新元古代裂谷盆地系统的重要组成部分^[1],盆地的充填历史反映了华南裂谷盆地系统的基本充填及演化模式,间接为 Rodinia 超大陆裂解过程提供了基本信息。王剑等^[1]认为,华南新元古代裂谷盆地的形成与 Rodinia 超大陆的裂解密切相关,裂谷盆地中充填的“板溪-南华楔状地层”可划分为裂谷幼年期、裂谷成熟期、早冰期、间冰期、晚冰期 5 个充填序列。位于滇东北扬子西缘裂谷系的康滇裂谷盆地缺失裂谷幼年期、成熟期、早冰期的产物,仅发育代表间冰期的澄江组及晚冰期的南沱组,随后被被动大陆边缘阶段的台地相碳酸盐岩沉积覆盖。朱光磊等^[2]指出,滇东地区震旦纪-寒武纪地层虽然在构造环境上发生了转换,但物源区不变,依然接受晚新元古代的物源。

本文对研究区澄江组顶部及早寒武世沧浪铺组底部的碎屑岩开展了碎屑锆石 U-Pb 年龄及物源分析研究,为新元古代康滇裂谷盆地的构造发展及盆地充填演化提供新线索。

1 地质背景

发生于 850~820 Ma 的地幔柱上涌导致了 Rodinia 超大陆裂解,随之在全球范围内形成了大量新元古代裂谷盆地^[3-6]。作为 Rodinia 超大陆的重要组成部分,华南古大陆在此背景下形成了华南新元古代裂谷盆地系统^[7-8],包括扬子西缘的康滇裂谷盆地、西北缘的碧口-汉南裂谷盆地、东北缘的花山裂谷盆地、东南缘的南华裂谷盆地^[9-12]。研究区位于华南新元古代裂谷盆地系统的康滇裂谷盆地(图 1),盆

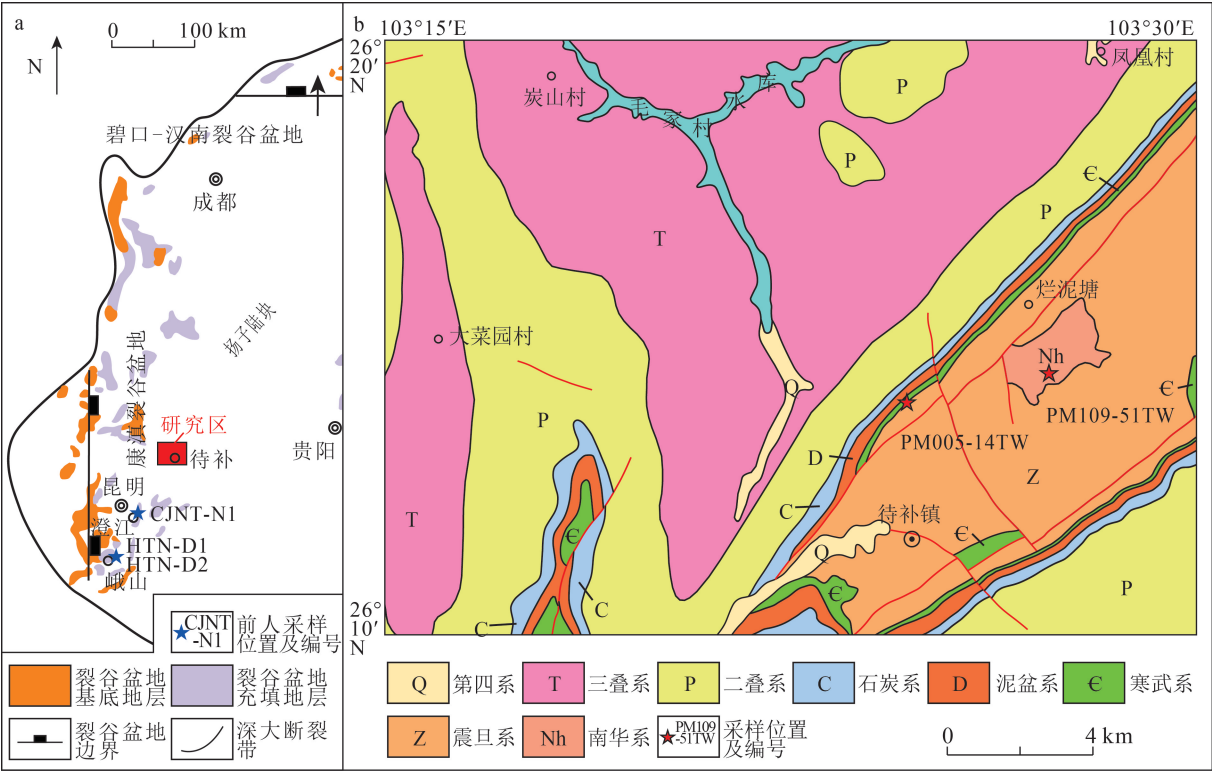


图 1 新元古代康滇裂谷盆地展布图(a,据参考文献[5]修改)和研究区地质简图(b)
Fig. 1 Distribution of Neoproterozoic Kangdian rift basin(a) and simplified geological map of studied area(b)

地西缘为安宁河-易门基底断裂,东缘为甘洛-小江断裂^[13]。卓皆文等^[14]从物源分析的角度认为,甘洛-小江断裂对新元古代康滇裂谷盆地无控制作用,从而得出新元古代康滇裂谷盆地为典型的半地堑盆地的结论。王剑等^[1]将华南新元古代裂谷盆地系统中夹于震旦系与四堡造山不整合之间的一套延伸不连续、底面不等时、层厚差异极大的充填体称为板溪-南华楔状地层,自下而上分为 5 个填充序列。近些年来,汪正江等^[15],江卓斐^[16]、陈建书等^[17]、杜秋定等^[18]对各次级裂谷盆地中的旋回及地层对比进行了详细研究。研究区出露的最老地层为昆阳群鹅头场组基底浅变质岩,晋宁运动不整合面之上为澄江组陆相碎屑沉积,其后被南沱组冰碛岩平行不整合覆盖(图 2),随后为广泛的震旦纪—寒武纪陆表海碳酸盐岩—碎屑岩沉积。

2 样品及测试

本次测年样品 PM109-51TW 采用会泽县待补镇安洋村实测剖面中澄江组顶部细粒岩屑长石砂岩,样品重量约 2 kg,为剥除风化面后的新鲜基岩;PM005-14TW 采用会泽县待补镇嘎里村实测剖面中沧浪铺组红井哨段细粒岩屑砂岩,样品重量约 2 kg,也为剥除风化面后的新鲜基岩。

锆石挑选工作在河北地质矿产开发局廊坊诚信地质服务公司实验室完成,锆石分析在武汉上谱

分析科技有限责任公司实验室完成。将锆石颗粒采用无色透明的环氧树脂进行固定后,制成圆形样品靶,锆石靶上的锆石颗粒采用扫描电镜加载阴极发光仪器进行透射光、反射光,阴极发光(CL)照相。选择锆石内部无包裹体、无裂纹,表面干净的锆石进行微区分析,分析测试在武汉上谱公司的 LA-ICP-MS 分析实验室按照标准程序完成。成分标定样为 Nist610,同位素比值标样为 91500。对离线数据的处理使用 ICPMSDataCal,各样品的年龄加权平均值计算及谐和图绘制采用 Isoplot 3.0 程序。

3 测试结果

2 个样品的测试锆石多呈透明—半透明,晶体呈柱状、近等轴状,且具有清晰的振荡环带,少数具有暗色增生边,部分锆石有一定的磨蚀现象;Th/U 值均大于 0.4,指示明显的岩浆锆石特征。

本文讨论的重点在于澄江组碎屑锆石 U-Pb 年龄对华南长安冰期(Sturtian)启动时间的约束、碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征对盆地演化的启示 2 个方面。前人研究也表明^[2,19],扬子西南缘震旦纪—寒武纪沉积岩具有相似的碎屑物质组成及碎屑锆石年龄谱,主要由新元古代碎屑物组成。因此,本文仅列举澄江组样品(PM109-51TW)U-Pb 锆石年龄数据(表 1)及部分锆石阴极发光图像(图 3)。



图 2 南沱组与澄江组平行不整合界面(a)和南沱组冰碛砾岩沉积特征(b)

Fig. 2 Parallel unconformity surface between the Nantuo Formation and the Chengjiang Formation(a) and sedimentary characteristics of moraine conglomerate in Nantuo Formation(b)

Nh_{1c}—澄江组;Nh_{2n}—南沱组

表 1 PM109-51TW 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 The LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic analysis results of PM109-51TW sample

编号	元素含量/ 10^{-6}			同位素比值						同位素年龄/Ma						谐和度/%				
	Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{208}\text{Pb}/$ ^{232}Th					
	PM109-51TW1-1	163	347	469	0.74	0.0649	0.0019	1.2042	0.0352	0.1342	0.0014	770	43	803	16	812	8	760	30	99
	PM109-51TW1-2	698	1649	1954	0.84	0.0659	0.0012	1.2282	0.0230	0.1343	0.0012	802	24	814	10	812	7	718	25	100
	PM109-51TW1-3	239	627	744	0.84	0.0626	0.0014	1.1676	0.0280	0.1342	0.0012	694	35	786	13	812	7	579	19	97
	PM109-51TW1-5	414	1204	679	1.77	0.0643	0.0016	1.1624	0.0293	0.1302	0.0012	753	37	783	14	789	7	847	22	99
	PM109-51TW1-6	268	769	611	1.26	0.0650	0.0015	1.1427	0.0263	0.1268	0.0009	773	36	774	12	770	5	711	14	101
	PM109-51TW1-7	92	182	245	0.74	0.0622	0.0024	1.1476	0.0422	0.1342	0.0015	681	59	776	20	812	8	902	22	96
	PM109-51TW1-8	348	793	866	0.92	0.0638	0.0012	1.2093	0.0224	0.1365	0.0009	736	27	805	10	825	5	826	13	98
	PM109-51TW1-9	423	1258	915	1.37	0.0658	0.0013	1.2086	0.0232	0.1323	0.0007	799	31	805	11	801	4	694	13	100
	PM109-51TW1-10	208	365	654	0.56	0.0617	0.0016	1.1449	0.0275	0.1343	0.0010	662	38	775	13	812	6	855	17	95
	PM109-51TW1-11	792	2312	1756	1.32	0.0652	0.0012	1.1738	0.0221	0.1294	0.0007	781	30	788	10	784	4	700	10	101
	PM109-51TW1-13	191	378	493	0.77	0.0654	0.0020	1.2358	0.0350	0.1370	0.0012	788	45	817	16	828	7	872	22	99
	PM109-51TW1-14	444	795	1352	0.59	0.0650	0.0014	1.2097	0.0262	0.1339	0.0010	775	34	805	12	810	5	835	17	99
	PM109-51TW1-15	516	1072	1360	0.79	0.0645	0.0015	1.2080	0.0280	0.1349	0.0010	757	36	804	13	816	6	815	17	99
	PM109-51TW1-16	468	1126	1197	0.94	0.0675	0.0021	1.2572	0.0388	0.1344	0.0013	852	48	827	17	813	7	697	19	102
	PM109-51TW1-17	282	637	726	0.88	0.0657	0.0020	1.2203	0.0360	0.1343	0.0012	797	46	810	16	813	7	775	19	100
	PM109-51TW1-18	566	1452	1543	0.94	0.0664	0.0016	1.1855	0.0279	0.1287	0.0010	818	37	794	13	780	5	674	15	102
	PM109-51TW1-19	520	887	1709	0.52	0.0647	0.0013	1.2380	0.0238	0.1380	0.0010	764	28	818	11	833	6	812	17	98
	PM109-51TW1-20	350	828	526	1.57	0.0673	0.0023	1.3570	0.0434	0.1471	0.0015	848	49	871	19	885	9	964	20	98
	PM109-51TW1-21	674	1617	1510	1.07	0.0652	0.0015	1.2375	0.0274	0.1372	0.0010	780	35	818	12	829	5	823	15	99
	PM109-51TW1-22	509	735	437	1.68	0.0974	0.0021	3.6748	0.0790	0.2727	0.0022	1574	28	1566	17	1555	11	1527	29	101
	PM109-51TW1-23	406	955	922	1.04	0.0683	0.0015	1.3482	0.0305	0.1425	0.0012	879	33	867	13	859	7	841	18	101
	PM109-51TW1-25	314	684	917	0.75	0.0671	0.0019	1.2461	0.0349	0.1348	0.0014	842	41	822	16	815	8	819	22	101
	PM109-51TW1-26	214	382	705	0.54	0.0647	0.0017	1.2372	0.0330	0.1385	0.0013	764	41	818	15	836	7	841	21	98
	PM109-51TW1-27	247	687	460	1.50	0.0664	0.0021	1.2459	0.0362	0.1369	0.0014	818	44	822	16	827	8	816	19	99
	PM109-51TW1-28	317	561	917	0.61	0.0666	0.0018	1.3194	0.0366	0.1433	0.0011	827	45	854	16	863	6	914	21	99
	PM109-51TW1-29	251	438	557	0.79	0.0715	0.0018	1.6757	0.0393	0.1702	0.0014	973	35	999	15	1013	8	1002	23	96
	PM109-51TW1-30	416	835	1125	0.74	0.0695	0.0016	1.3656	0.0311	0.1430	0.0015	913	29	874	13	862	9	904	22	101
	PM109-51TW1-31	448	715	702	1.02	0.0805	0.0020	2.2673	0.0544	0.2039	0.0015	1209	35	1202	17	1196	8	1209	25	101
	PM109-51TW1-32	102	200	295	0.68	0.0639	0.0028	1.1967	0.0521	0.1364	0.0016	737	72	799	24	824	9	838	28	97
	PM109-51TW1-33	368	848	1090	0.78	0.0661	0.0017	1.2302	0.0323	0.1347	0.0013	811	38	814	15	815	7	758	21	100

续表 1-1

编号	元素含量/ 10^{-6}			同位素比值						同位素年龄/Ma						$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$ 谐和度/%			
	Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{207}\text{Pb}/$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{207}\text{Pb}/$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{207}\text{Pb}/$	$^{206}\text{Pb}/$	$^{208}\text{Pb}/$	^{232}Th					
					^{206}Pb	^{238}U	^{235}U	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
MM109-51TW1-34	268	762	514	1.48	0.0688	0.0021	1.2740	0.0348	0.1347	0.0013	894	41	834	16	815	7	787	18	102
MM109-51TW1-35	252	537	801	0.67	0.0685	0.0019	1.2725	0.0341	0.1347	0.0011	884	42	833	15	815	6	729	17	102
MM109-51TW1-36	99	231	268	0.86	0.0660	0.0026	1.2113	0.0461	0.1343	0.0016	806	60	806	21	812	9	797	24	99
MM109-51TW1-37	300	432	1058	0.41	0.0651	0.0016	1.2886	0.0321	0.1430	0.0011	777	39	841	14	861	6	894	21	98
MM109-51TW1-38	545	1197	1517	0.79	0.0677	0.0017	1.3247	0.0317	0.1414	0.0012	861	36	857	14	853	7	806	18	100
MM109-51TW1-39	589	1208	1626	0.74	0.0672	0.0015	1.3161	0.0294	0.1413	0.0011	845	34	853	13	852	6	850	17	100
MM109-51TW1-40	422	640	1562	0.41	0.0670	0.0017	1.2524	0.0312	0.1349	0.0011	838	38	824	14	816	6	873	20	101
MM109-51TW1-41	268	256	324	0.79	0.1058	0.0028	4.6071	0.1229	0.3137	0.0029	1729	35	1751	22	1759	14	1770	42	98
MM109-51TW1-42	170	352	505	0.70	0.0683	0.0022	1.2734	0.0403	0.1348	0.0013	876	50	834	18	815	7	830	20	102
MM109-51TW1-43	151	339	409	0.83	0.0683	0.0021	1.2728	0.0397	0.1345	0.0013	878	49	834	18	814	7	834	22	102
MM109-51TW1-44	257	1198	478	2.51	0.0633	0.0025	1.1323	0.0421	0.1301	0.0014	718	61	769	20	788	8	495	13	98
MM109-51TW1-45	625	1293	1778	0.73	0.0656	0.0014	1.2884	0.0274	0.1416	0.0011	793	32	841	12	853	6	843	17	99
MM109-51TW1-46	84	172	230	0.75	0.0684	0.0028	1.3297	0.0519	0.1413	0.0016	880	62	859	23	852	9	872	28	101
MM109-51TW1-48	361	693	1216	0.57	0.0651	0.0015	1.2136	0.0266	0.1343	0.0010	779	33	807	12	813	6	782	16	99
MM109-51TW1-50	375	1280	1320	0.97	0.0686	0.0016	1.2351	0.0311	0.1299	0.0016	886	32	817	14	787	9	482	14	104
MM109-51TW1-51	94	218	234	0.93	0.0664	0.0025	1.2263	0.0440	0.1343	0.0017	820	54	813	20	813	10	808	24	100
MM109-51TW1-52	545	1176	1440	0.82	0.0690	0.0014	1.2934	0.0256	0.1355	0.0009	899	29	843	11	819	5	827	16	103
MM109-51TW1-53	277	639	728	0.88	0.0647	0.0017	1.2018	0.0311	0.1347	0.0013	764	38	801	14	814	7	795	18	98
MM109-51TW1-54	725	1893	2496	0.76	0.0681	0.0014	1.1850	0.0247	0.1257	0.0011	873	29	794	11	763	6	602	14	104
MM109-51TW1-55	674	1466	1917	0.76	0.0717	0.0015	1.3370	0.0274	0.1347	0.0010	977	30	862	12	815	5	775	15	106
MM109-51TW1-56	175	428	413	1.04	0.0701	0.0021	1.3157	0.0395	0.1356	0.0013	932	45	853	17	820	7	795	19	104
MM109-51TW1-60	366	1116	944	1.18	0.0691	0.0018	1.2880	0.0329	0.1344	0.0011	903	40	840	15	813	6	589	13	103
MM109-51TW1-61	246	570	649	0.88	0.0677	0.0019	1.2574	0.0343	0.1346	0.0013	858	41	827	15	814	7	772	20	102
MM109-51TW1-62	154	337	400	0.84	0.0707	0.0022	1.3169	0.0396	0.1352	0.0015	948	44	853	17	817	8	822	27	104
MM109-51TW1-63	120	272	292	0.93	0.0686	0.0026	1.2731	0.0469	0.1347	0.0015	888	57	834	21	815	9	834	29	102
MM109-51TW1-64	188	382	569	0.67	0.0681	0.0020	1.2672	0.0371	0.1342	0.0012	870	46	831	17	812	7	778	27	102
MM109-51TW1-65	630	1842	1146	1.61	0.0673	0.0017	1.2502	0.0312	0.1341	0.0010	846	40	823	14	811	5	754	25	101
MM109-51TW1-66	299	598	918	0.65	0.0672	0.0018	1.2587	0.0318	0.1350	0.0011	844	39	827	14	816	6	776	30	101
MM109-51TW1-67	617	1896	2084	0.91	0.0653	0.0017	1.1276	0.0288	0.1246	0.0011	783	39	767	14	757	6	495	19	101

续表 1-2

编号	元素含量/ 10^{-6}			同位素比值						同位素年龄/Ma						谐和度/%			
	Pb	^{232}Th	^{238}U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}U	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{208}\text{Pb}/$ ^{232}Th				
PM109-51TW1-68	306	745	737	1.01	0.0746	0.0090	1.3152	0.0911	0.1344	0.0015	1058	123	852	40	813	8	813	38	105
PM109-51TW1-69	296	693	879	0.79	0.0674	0.0017	1.2677	0.0322	0.1356	0.0010	849	40	831	14	820	6	662	22	101
PM109-51TW1-70	197	463	474	0.98	0.0666	0.0022	1.2383	0.0405	0.1346	0.0013	825	53	818	18	814	7	803	25	100
PM109-51TW1-71	91	186	262	0.71	0.0671	0.0030	1.2383	0.0543	0.1344	0.0017	839	71	818	25	813	9	801	29	101
PM109-51TW1-72	178	359	530	0.68	0.0696	0.0022	1.2900	0.0386	0.1344	0.0011	915	48	841	17	813	6	759	20	103
PM109-51TW1-73	181	325	591	0.55	0.0669	0.0022	1.2617	0.0431	0.1349	0.0016	834	51	829	19	816	9	782	21	102
PM109-51TW1-75	848	2733	2536	1.08	0.0680	0.0015	1.1164	0.0261	0.1184	0.0012	870	31	761	13	721	7	534	12	106
PM109-51TW1-76	267	618	658	0.94	0.0658	0.0019	1.2274	0.0359	0.1349	0.0012	799	46	813	16	816	7	803	18	100
PM109-51TW1-77	361	767	650	1.18	0.0736	0.0020	1.6736	0.0439	0.1655	0.0019	1029	35	999	17	987	10	1004	40	104
PM109-51TW1-78	259	584	670	0.87	0.0677	0.0021	1.2579	0.0394	0.1344	0.0012	859	50	827	18	813	7	823	18	102
PM109-51TW1-79	185	364	546	0.67	0.0665	0.0020	1.2320	0.0359	0.1346	0.0013	821	45	815	16	814	7	857	20	100
PM109-51TW1-80	251	548	666	0.82	0.0671	0.0021	1.2487	0.0381	0.1346	0.0012	842	49	823	17	814	7	855	20	101
PM109-51TW1-81	886	2118	2724	0.78	0.0660	0.0023	1.0814	0.0366	0.1188	0.0010	806	75	744	18	724	6	721	5	103
PM109-51TW1-82	629	1152	1753	0.66	0.0677	0.0016	1.3729	0.0332	0.1464	0.0011	859	38	877	14	881	6	939	22	100
PM109-51TW1-83	113	257	297	0.87	0.0704	0.0027	1.3042	0.0497	0.1343	0.0014	938	61	848	22	813	8	859	29	104
PM109-51TW1-84	236	546	576	0.95	0.0676	0.0020	1.3078	0.0384	0.1400	0.0012	857	47	849	17	845	7	879	21	100
PM109-51TW1-85	89	195	243	0.81	0.0644	0.0035	1.1862	0.0627	0.1352	0.0019	754	89	794	29	817	11	886	30	97
PM109-51TW1-86	203	426	507	0.84	0.0653	0.0019	1.2623	0.0366	0.1402	0.0014	782	45	829	16	846	8	952	23	98
PM109-51TW1-87	501	1254	980	1.28	0.0655	0.0017	1.2689	0.0332	0.1403	0.0013	789	39	832	15	846	7	933	20	98
PM109-51TW1-88	94	218	247	0.88	0.0690	0.0032	1.2715	0.0555	0.1349	0.0016	900	70	833	25	816	9	842	26	102
PM109-51TW1-91	181	821	459	1.79	0.0655	0.0023	1.1222	0.0381	0.1243	0.0014	790	52	764	18	755	8	493	17	101
PM109-51TW1-92	865	2567	1730	1.48	0.0736	0.0019	1.3875	0.0344	0.1362	0.0012	1031	36	884	15	823	7	797	22	107
PM109-51TW1-93	160	396	380	1.04	0.0669	0.0027	1.2435	0.0481	0.1347	0.0014	834	63	820	22	815	8	845	22	101
PM109-51TW1-94	646	1748	1939	0.90	0.0665	0.0015	1.1368	0.0247	0.1233	0.0008	822	34	771	12	750	5	688	14	103
PM109-51TW1-95	69	135	192	0.70	0.0751	0.0037	1.4022	0.0691	0.1346	0.0018	1072	78	890	29	814	10	956	34	109
PM109-51TW1-96	253	725	498	1.46	0.0692	0.0024	1.2671	0.0424	0.1327	0.0014	905	51	831	19	803	8	802	19	103
PM109-51TW1-97	335	1091	988	1.10	0.0670	0.0018	1.2544	0.0340	0.1349	0.0012	838	42	825	15	816	7	558	13	101
PM109-51TW1-98	593	1301	1622	0.80	0.0676	0.0014	1.2619	0.0244	0.1346	0.0008	855	30	829	11	814	5	842	15	102
PM109-51TW1-99	654	2115	1785	1.18	0.0690	0.0014	1.1944	0.0242	0.1246	0.0008	900	31	798	11	757	5	610	14	105
PM109-51TW1-100	575	1564	1702	0.92	0.0674	0.0014	1.1378	0.0272	0.1214	0.0015	851	30	771	13	739	8	721	17	104

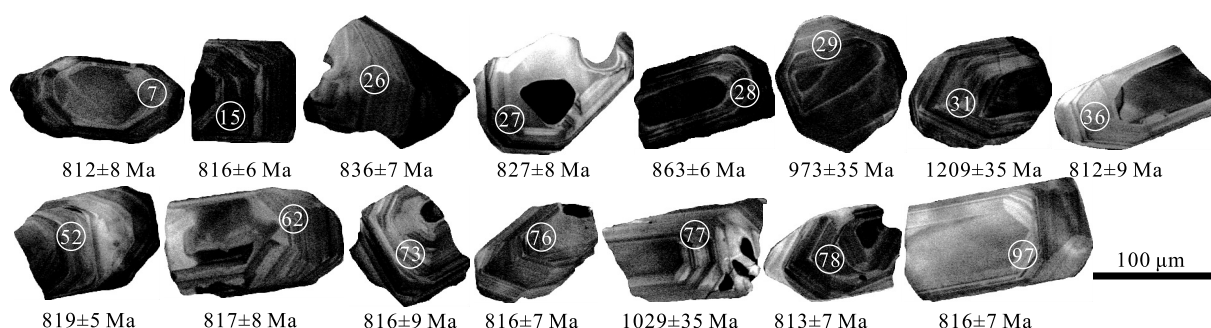


图 3 PM109-51TW 样品部分锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 3 Representative CL images of the detrital zircons from sample PM109-51TW

样品 PM109-51TW 共测试 100 个点, 以谐和度在 90%~110% 区间为遴选条件, 选出 89 组有效数据, 最年轻的 2 颗锆石年龄为 721 ± 4 Ma (PM109-51TW-75)、 724 ± 6 Ma (PM109-51TW-81), 两者年龄加权平均值为 723 ± 9 Ma (MSWD = 0.1, $n=2$) (图 4-a、b); 锆石 U-Pb 年龄频谱 (图 5-a、b) 显示

10 组年龄值 (区间): 主峰区间共有 57 个测点年龄 (801~836 Ma), 占总有效数据的 65%, 年龄加权平均值为 816 ± 2 Ma (MSWD = 1.03, $n=57$); 845~863 Ma 年龄区间共有 11 个测点年龄, 占总有效数据的 12%, 年龄加权平均值为 854 ± 4 Ma (MSWD = 0.91, $n=11$); 780~789 Ma 年龄区间共有 5 个测点年龄,

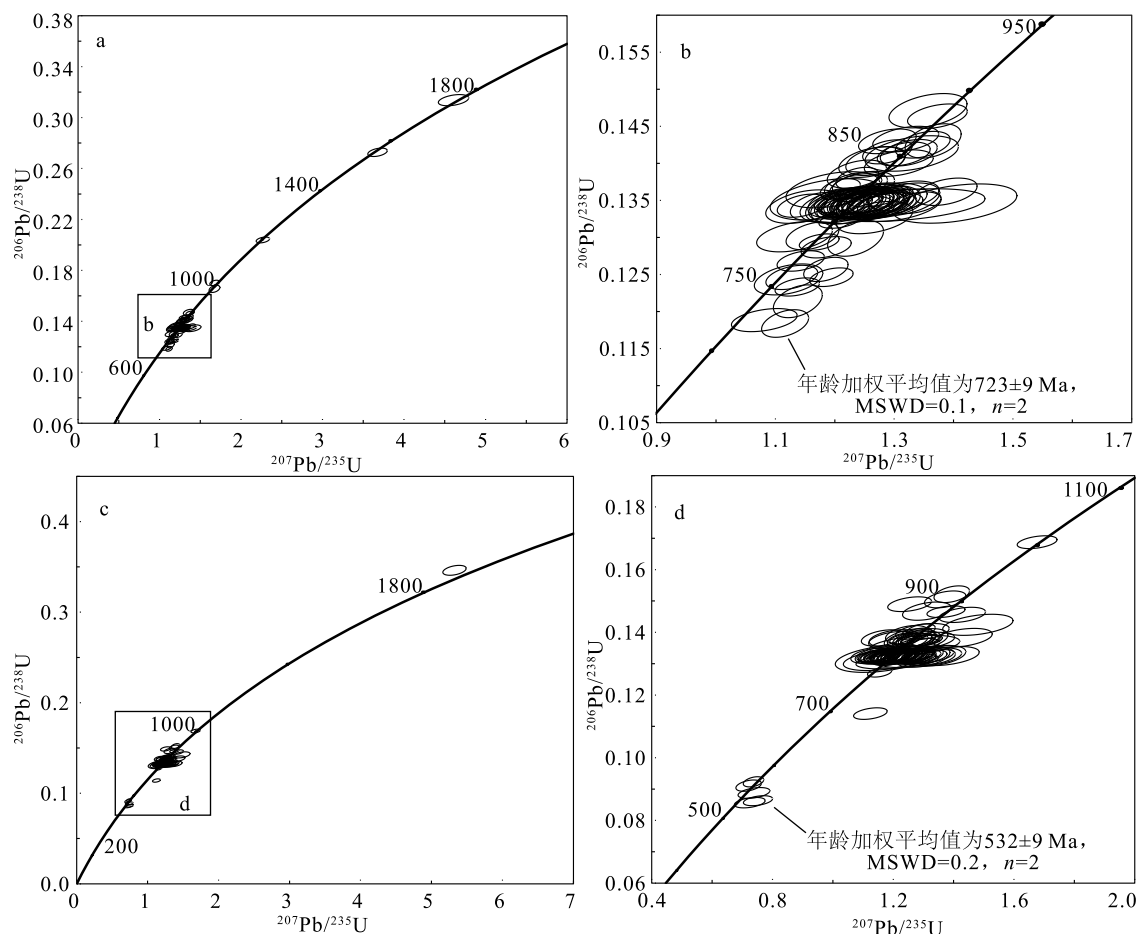


图 4 样品 PM109-51TW(a、b) 和 PM005-14TW(c、d) 锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 Concordia diagrams of U-Pb values for detrital zircons from sample PM109-51TW(a,b) and PM005-14TW(c,d)

占总有效数据的 6%, 年龄加权平均值为 784 ± 5 Ma (MSWD=0.37, $n=5$); 其他年龄(区间)值还有 723 Ma、758 Ma、882 Ma、1001 Ma、1209 Ma、1574 Ma、1729 Ma。

样品 PM005-14TW 共测试 100 个点, 以谐和度在 90%~110% 区间为遴选条件, 选出 95 组有效数据, 最年轻的 2 颗锆石年龄为 530 ± 7 Ma (PM005-14TW-40)、 534 ± 6 Ma (PM005-14TW-71), 两者年龄加权平均值为 532 ± 9 Ma (MSWD=0.2, $n=2$) (图 4-c,d); 锆石 U-Pb 年龄频谱(图 5-c~e)显示 9 组年龄值(区间): 主峰区间共有 56 个测点年龄(793~803 Ma), 占总有效数据的 59%, 年龄加权平均值为 801 ± 2 Ma (MSWD=0.038, $n=56$); 821~858 Ma 年龄区间共有 24 个测点年龄, 占总有效数据的 25%, 年龄加权平均值为 834 ± 3 Ma (MSWD=0.72, $n=24$); 876~913 Ma 年龄区间共有 6 个测点年龄, 占总有效数据的 6%, 年龄加权平均值为 891 ± 14 Ma (MSWD=2.3, $n=6$); 其他年龄(区间)值还有 532 Ma、561 Ma、696 Ma、772 Ma、969 Ma、1815 Ma。

4 讨论

4.1 华南长安冰期(Sturtian)的启动时间

新元古代晚期有 2 次全球性冰川事件, 早冰期被称为 Sturtian 冰期, 晚冰期被称为 Marinoan 冰期^[20]。华南扬子古大陆与之对应的分别为长安冰期和南沱冰期^[21]。由于滇东北地区澄江组为晋宁运动不整合面之上最早沉积的一套陆相碎屑沉积, 之上被代表典型冰川作用的南沱组冰碛砾岩所覆盖, 因此, 其顶底的年代学地质意义尤为重要。

江新胜等^[22]对滇中地区澄江组底部及中部凝灰岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄研究, 认为新元古代康滇裂谷盆地的开启时间为 800 Ma 左右, 缺失华南新元古代裂谷盆地充填系列中的第 I 旋回沉积。卓皆文等^[14]对陆良组底部与中部凝灰岩层进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄研究, 提出康滇裂谷盆地的开启时间与华南新元古代裂谷盆地的开启时间(约 820 Ma)一致, 并用半地堑盆地的充填模式解释了部分地区的第 I 旋回沉积缺失问题。

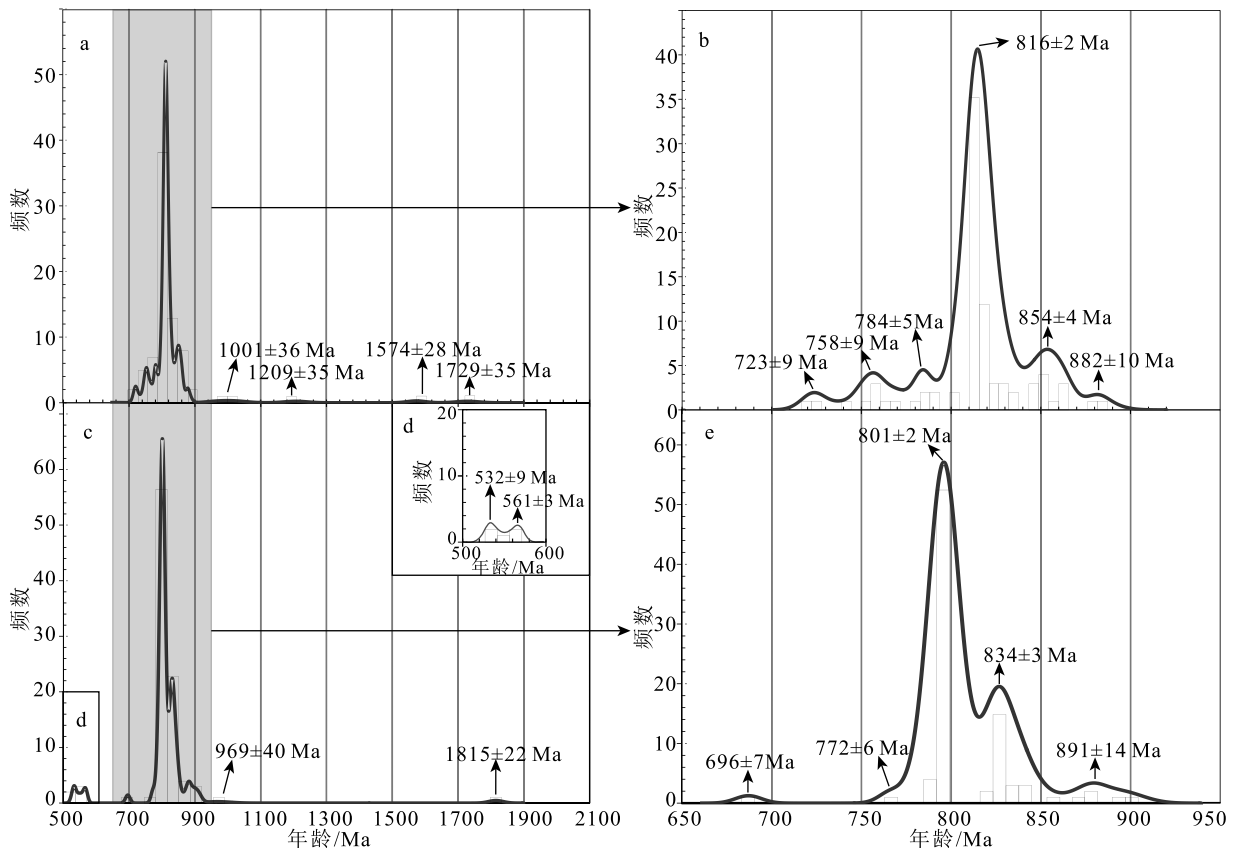


图 5 样品 PM109-51TW(a,b)和 PM005-14TW(c,d,e) 锆石 U-Pb 年龄分布曲线及对比图

Fig. 5 U-Pb age and frequency distribution of detrital zircons from sample PM109-51TW(a,b) and PM005-14TW(c,d,e)

关于华南长安冰期 (Sturtian) 启动时间的论述, 前人已取得了大量的成果^[23-26]。最新的报道有 Jiang 等^[27] 于开建桥组顶部凝灰岩中获得的锆石 U-Pb 年龄约 717 Ma; 蔡娟娟等^[28] 于桂北长安组底部获得的最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄 719.6 ± 6.1 Ma; 杜秋定等^[18] 于扬子地块东南缘通山地区莲沱组顶部获得的碎屑锆石 U-Pb 最小年龄约为 720 Ma, 限定扬子地块 Sturtian 冰期的启动年龄约为 720 Ma。值得指出的是, 江卓斐等^[29] 于滇东南沱组下段底部获得的最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄为 725 ± 4 Ma, 上段底部获得的最年轻碎屑锆石 U-Pb 年龄为 665 ± 4 Ma, 并由此认为扬子西缘南沱组下段可与扬子东南缘的长安组对比, 为长安冰期的产物, 上段可与富禄组、大塘坡组对比, 为富禄间冰期的产物, 缺失传统意义上的南沱冰期产物。

研究区南沱组与下伏澄江组为平行不整合接触 (图 2-a), 岩性存在典型的两分性: 下部为暗紫色—灰黄色中层状复成分砾岩、含砾砂岩 (图 2-b), 砾岩中砾石无分选性, 磨圆度较差, 可见磨光面。冰碛岩段在整个区域内分布较普遍, 但出露无规律、不连续; 上部为紫红色薄—中层状含粉砂质泥岩与灰黄色薄—中层状细粒岩屑杂砂岩互层, 泥岩、粉砂质泥岩呈纹层状, 发育平行及小型交错层理, 有紫红色、灰黄色、灰白色交替层韵律特征。这种岩性的两分性与江卓斐等^[29] 于滇东南发现的南沱组上、下段可对比。

本次报道的澄江组顶部碎屑锆石 (PM109-51)

LA-ICP-MS U-Pb 年龄变化较大, 其中最年轻的一组年龄加权平均值为 723 ± 9 Ma (MSWD = 0.1, $n = 2$), 与崔晓庄等^[30] 于滇中澄江组顶部凝灰岩获得的 725 ± 11 Ma 在误差范围内一致。江卓斐等^[29] 还对崔晓庄等^[30] 获得的澄江组顶部凝灰岩年龄数据与上覆南沱组底部碎屑锆石年龄数据进行了对比, 认为澄江组与南沱组的沉积间隔极短。由此, 笔者认为本次报道的 723 ± 9 Ma 限定了研究区南沱组的最大沉积年龄, 指示了研究区华南长安冰期 (Sturtian) 的启动时间。这表明, 滇东南甚至整个滇东地区的南沱组与传统意义上的南沱组不同, 而与江卓斐等^[29] 得出的结论一致 (图 6)。

4.2 碎屑锆石年龄谱对新元古代康滇裂谷盆地沉积古地理演化的启示

江新胜等^[22] 将新元古代康滇裂谷盆地划分为 4 个沉积旋回, 认为第 I 旋回的起始时间为 820 Ma 左右, 以基性玄武岩的喷发、盆地基底快速沉降为特征; 第 II 旋回的起始时间为 800 Ma 左右, 以双峰式火山强烈喷发、沉积范围快速扩张为特征; 第 III 旋回的起始时间为 725 Ma 左右, 以冰川作用开始为标志; 第 IV 旋回的起始时间为 635 Ma 左右, 以冰川作用结束、全面海侵作用为标志。朱光磊等^[2] 研究发现, 甚至到早寒武世, 扬子陆块西南缘的沉积物源区依然未发生明显的改变。

对比本次研究的 2 个样品锆石 U-Pb 年龄分布曲线可以发现, 二者有着近乎一致的锆石 U-Pb 年龄谱分布特征 (图 5-a、c), 在裂谷盆地充填的大致

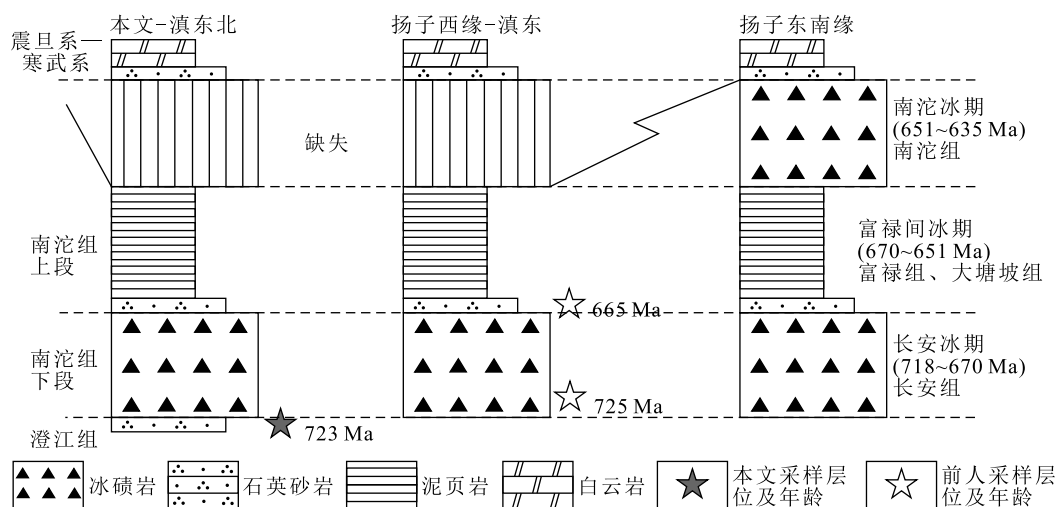


图 6 南沱组区域对比关系简图 (据参考文献^[29] 修改)

Fig. 6 Sketch of regional comparison of the Nantuo Formation

时限范围内(650~850 Ma),澄江组 and 沧浪铺组沉积岩接受的碎屑物质几乎一样,其中新元古代碎屑物质各占碎屑总量的 87% 和 85%。此外, Wang 等^[19] 也指出,扬子西缘震旦纪和寒武纪沉积岩以新元古代锆石为主,年龄峰值为约 760 Ma 和约 825 Ma。说明研究区早寒武世的沉积物源与晋宁运动以来裂谷盆地阶段的物源一致,来自相同的源区或为下伏地层物质再循环的产物,这与朱光磊等^[2] 在滇东南屏边地区得出的结论一致。

将本文待补镇澄江组顶部 PM109-51TW 样品(723 Ma)与江卓斐等^[29] 于峨山县城、澄江县时代相近的南沱组下段碎屑锆石 HTN-D1 样品(725 Ma)、CJNT-N1 样品(728 Ma)进行东西向的横向对比发现(图 7):自西向东,三者物源贡献上没有大的变化,虽然古老碎屑物所占比例有所增大,但均指示新元古代碎屑物来自于西侧,甚至在临近小江断裂的待补区域也是如此。这些相似性也佐证了卓皆文等^[14] 得出的甘洛—小江断裂对新元古代康滇裂谷盆地无控制作用,康滇裂谷盆地为半地堑盆地的结论。

然而,在 2 个样品 650~950 Ma 区间锆石 U-Pb 年龄曲线对比图(图 5-b、e)中,PM109-51TW 在主峰区间(主峰值为 816 Ma)的测点年龄有 57 个,占总有效数据的 65%,而在 PM005-14TW 中,该区间测点年龄占比突降至不足 10%,甚至不显峰值;相反,PM005-14TW 在主峰区间(主峰值为 801 Ma)的测点年龄有 56 个,占总有效数据的 59%,而在 PM109-51TW 中,该区间测点年龄占比也突降至不足 10%。对比江卓斐等^[29] 于峨山县城南沱组下段(HTN-D1)和南沱组上段(HTN-D2)获得的碎屑锆石年龄分布图(图 8),也具有类似特征,下段(HTN-D1)820~850 Ma 年龄值区间的测点年龄占比为绝对优势,至上段(HTN-D2)则突变得较低;而 800 Ma 峰值区间的测点年龄占比也由下段(HTN-D1)的第三位突增为上段(HTN-D2)的主峰值区。在相同的构造环境背景且物源区一致的前提下,这种主次峰值区间物源贡献占比变化如此之大,且在地史垂向序列上主峰值年龄具有区间差异的情况无疑是值得关注的。

根据卓皆文等^[14] 提出的新元古代康滇裂谷盆地构造模型,笔者认为,这种碎屑物组成变化可能只发生于裂谷盆地的幼年期(800~850 Ma),代表

了新元古代康滇裂谷半地堑盆地系统对物源的约束控制作用:盆地幼年期由裂谷肩老地层或岩浆岩提供物源,由于小型半地堑盆地群的存在,造成大量前期物源先于局部小盆地中充填,在小盆地辐射提供物源的沉积区内,前期物源贡献率占优势;随着裂谷盆地系统的发展,小型半地堑盆地连通性加强,前期物源供给不足,而后期物源则能辐射的更广,在这些区域,后期物源占优势;至盆地成熟期,

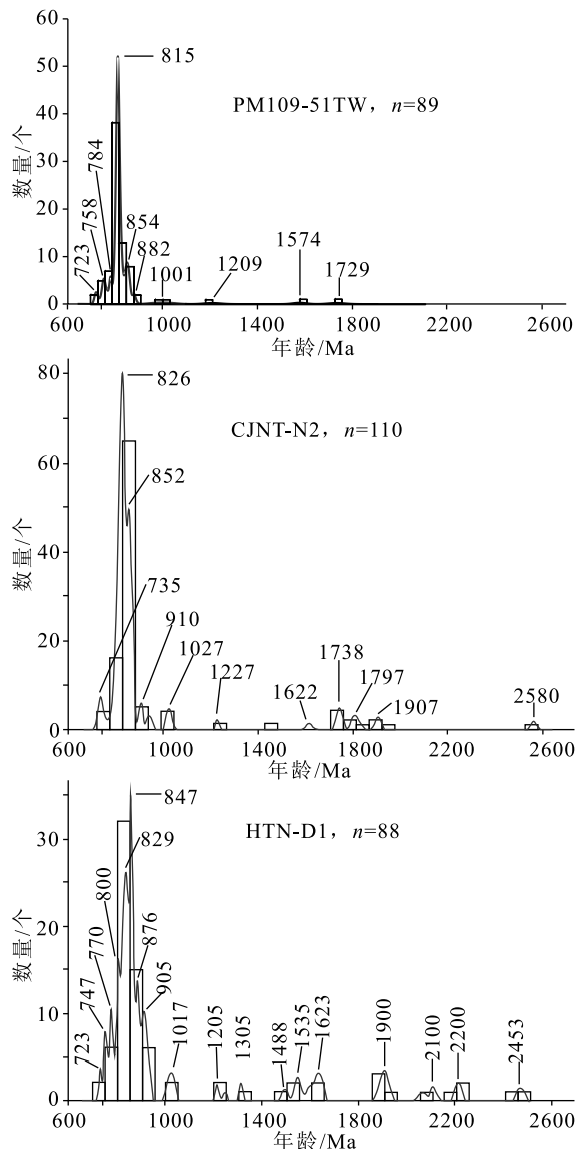


图 7 滇东南沱组底部等时样品碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征对比图

(HTN-D1、CJNT-N2 数据据文献[29])

Fig. 7 U-Pb age and frequency distribution of detrital zircons from isochronous samples from the bottom of Nantuo Formation, southeastern Yunnan

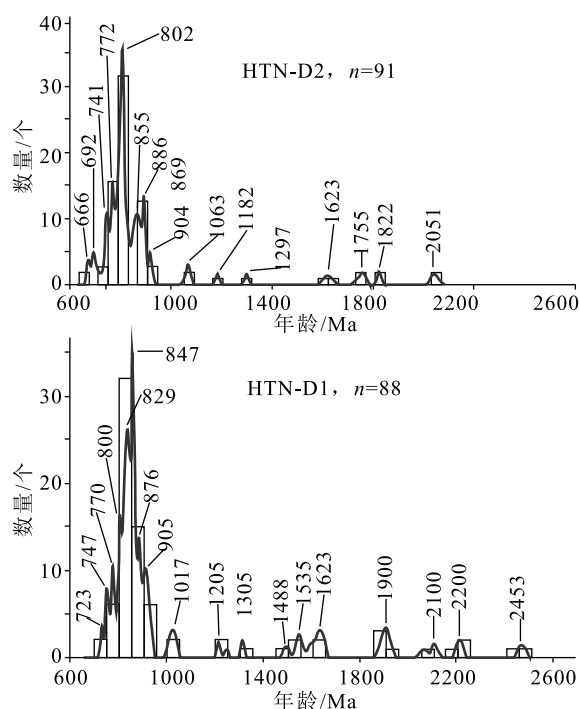


图 8 滇东南沱组下段(HTN-D1)与上段(HTN-D2)碎屑锆石 U-Pb 年龄分布特征对比图
(HTN-D1、HTN-D2 数据据参考文献[29])

Fig. 8 U-Pb age and frequency distribution of detrital zircons from the lower (HTN-D1) and upper (HTN-D2) member of Nantuo Formation, southeastern Yunnan

小型半地堑盆地群简化为一个统一的半地堑盆地,在整个盆地的辐射范围内,不再有新老物源的局部差异充填,其对沉积区的物源贡献率也在区域内均一化。

5 结 论

(1)滇东北新元古代澄江组顶部碎屑锆石 U-Pb 年龄最年轻的一组年龄加权平均值为 723 ± 9 Ma,限定了研究区南沱组的沉积年龄小于 723 Ma,指示了滇东地区早冰期的启动时间下限,与华南长安冰期(Sturtian)的启动时间相符;佐证了滇东地区南沱组并非华南南沱冰期的产物,而应与扬子东南缘长安组对比。

(2)通过与前人资料的对比,认为滇东北地区自晋宁运动后裂谷盆地开始发展,至早寒武世,其物源均未发生变化,来自于康滇裂谷盆地的西缘;佐证了甘洛-小江断裂对新元古代康滇裂谷盆地无控制作用,康滇裂谷盆地为半地堑盆地。

(3)在新元古代康滇裂谷半地堑盆地发展的幼年期,其盆地系统对物源的约束控制作用导致了该时期内锆石 U-Pb 年龄峰值区间物源贡献率突变的现象。

致谢:成文过程得到了成都理工大学朱利东教授和中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心邹光富研究员的指导和帮助,审稿专家提出了宝贵的意见建议,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 王剑,潘桂棠.中国南方古大陆研究进展与问题评述[J].沉积学报,2009,27(5): 818-825.
- [2] 朱光磊,于津海.滇东南震旦—寒武纪沉积岩的碎屑锆石组成和对扬子—华夏界线的限制[J].高校地质学报,2018,24(5): 658-670.
- [3] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1/4): 85-109.
- [4] Li Z X, Bogdanova S V, Collins A S, et al. Assembly, configuration, and break-up history of Rodinia: A synthesis[J]. Precambrian Research, 2008, 160: 179-210.
- [5] Li Z X, Zhang L H, Powell C M, et al. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia—East Antarctica and Laurentia? [J]. Geology, 1995, 23: 407-410.
- [6] Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. The break up of Rodinia: did it start with a mantle plume beneath South China? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 173: 171-181.
- [7] 郑永飞.新元古代岩浆活动与全球变化[J].科学通报, 2003, 48: 1705-1720.
- [8] Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up [J]. Precambrian Research, 2003, 122: 141-158.
- [9] Li X H, Li Z X, Zhou H W, et al. U-Pb zircon geochronology, geochemistry and Nd isotopic study of Neoproterozoic bimodal volcanic rocks in the Kangdian Rift of South China: implications for the initial rifting of Rodinia [J]. Precambrian Research, 2002, 113: 135-154.
- [10] Deng Q, Wang J, Wang Z J, et al. Continental flood basalts of the Huashan Group, northern margin of the Yangtze block - implications for the breakup of Rodinia [J]. International Geology Review, 2013, 55(15): 1865-1884.
- [11] Wang X Ce, Li X H, Li W X, et al. The Bikou basalts in the northwestern Yangtze block, South China: Remnants of 820-810 Ma continental flood basalts? [J]. Geological Society of America Bulletin, 2008, 120(11/12): 1478-1492.
- [12] 崔晓江, 江新胜, 王剑, 等. 滇中新元古代裂谷盆地充填序列及演化模式: 对 Rodinia 超大陆裂解的响应[J]. 沉积学报, 2014, 32(3): 399-409.

- [13] Wang J, Li Z X. History of Neoproterozoic rift basins in South China: implications for Rodinia break-up[J]. Precambrian Research, 2003, 122(1/4): 141-158.
- [14] 卓皆文, 江新胜, 王剑, 等. 华南扬子古大陆西缘新元古代康滇裂谷盆地的开启时间与充填样式[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43: 1952-1963.
- [15] 汪正江, 王剑, 江新胜, 等. 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, 2015, 61(1): 1-22.
- [16] 江卓斐. 扬子西缘新元古代冰川启动时间、期次及构造-岩相古地理演化[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2016.
- [17] 陈建书, 戴传固, 彭成龙, 等. 湘黔桂相邻区新元古代 820~635 Ma 时期裂谷盆地充填序列与地层格架[J]. 中国地质, 2016, 43(3): 899-920.
- [18] 杜秋定, 王剑, 汪正江, 等. 扬子地块新元古代裂谷盆地莲沱组沉积分异及其物源分析[J]. 地球科学, 2021, 46(7): 2529-2543.
- [19] Wang L J, Yu J H, Griffin W L, et al. Early crustal evolution in the western Yangtze Block: Evidence from U-Pb and Lu-Hf isotopes on detrital zircons from sedimentary rocks [J]. Precambrian Research, 2012, 222/223: 368-385.
- [20] Kennedy M J, Runnegar B, Prave A R, et al. Two or four Neoproterozoic glaciations? [J]. Geology, 1997, 26: 1059-1063.
- [21] 王曰伦, 陆松年, 高振家, 等. 中国震旦纪冰川特征、分期及对比[J]. 中国地质科学院天津地质矿产研究所分刊, 1980, 1(1): 1-17.
- [22] 江新胜, 王剑, 崔晓庄, 等. 滇中新元古代澄江组锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42: 1496-1507.
- [23] Zhang Q R, Li X H, Feng L J, et al. A New Age Constraint on the Onset of the Neoproterozoic Glaciations in the Yangtze Platform, South China[J]. Journal of Geology, 2008, 116: 423-429.
- [24] 高维, 张传恒. 长江三峡黄陵花岗岩与莲沱组凝灰岩的锆石 SHRIMP-Pb 年龄及其构造地层意义[J]. 地质通报, 2009, 28(1): 45-50.
- [25] Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, et al. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations[J]. Precambrian Research, 2014, 255: 401-411.
- [26] Lan Z W, Li X H, Zhu M Y, et al. Revisiting the Liantuo Formation in Yangtze Block, South China SIMS U-Pb zircon[J]. Precambrian Research, 2015, 263: 123-141.
- [27] Jiang Z F, Cui X Z, Jiang X S, et al. New zircon U-Pb ages of the pre-Sturtian rift successions from the western Yangtze Block, South China and their geological significance [J]. International Geology Review, 2016, 58(9): 1064-1075.
- [28] 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]. 古地理论, 2018, 20(1): 65-86.
- [29] 江卓斐, 崔晓庄, 伍皓, 等. 滇东成冰纪南沱组碎屑锆石 U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2018, 38(1): 42-54.
- [30] 崔晓庄, 江新胜, 王剑, 等. 滇中新元古代澄江组层型剖面锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 现代地质, 2013, 27(3): 547-556.