

扬子陆块西缘云南东川地区澄江组碎屑锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其对物源和地壳演化的约束

高永娟, 林仕良, 秦雅东, 任光明, 庞维华, 楼雄英

GAO Yongjuan, LIN Shiliang, QIN Yadong, REN Guangming, PANG Weihua, LOU Xiongying

中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081

Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China

摘要:澄江组是晋宁不整合面之上最早沉积的地层之一, 了解其物源对于认识扬子西缘早期地壳演化具有重要意义。对扬子西缘东川地区澄江组底部碎屑锆石进行了 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析。结果显示, 澄江组碎屑锆石的年龄谱具有 780~900 Ma、约 1000 Ma、约 1800 Ma 的峰值, 最年轻一组碎屑锆石年龄加权平均值为 801 ± 5 Ma (MSWD = 2.4, $n=9$), 与区内澄江组底部火山岩的年龄十分接近, 限定研究区澄江组的沉积下限为约 800 Ma。综合碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成、锆石形态及古地理特征, 认为东川地区澄江组底部的物源主要来自于扬子地块西缘新元古代岩浆岩的剥蚀, 其次为东川群的沉积再循环。通过扬子地块南华纪早期地层的区域对比发现, 扬子西缘与北缘在新元古代之前可能具有不同的地壳演化历史。扬子西缘不同地区澄江组之间存在物源差异, 与区域构造活动密切相关。

关键词: 扬子西缘; 澄江组; 碎屑锆石; Hf 同位素; 地壳演化; 东川

中图分类号: P588.14; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2021)11-1943-14

Gao Y J, Lin S L, Qin Y D, Ren G M, Pang W H, Lou X Y. U-Pb age and Hf isotope composition of detrital zircons from the Chengjiang Formation in Dongchuan area, Yunnan Province of the western Yangtze Block and its constraints on provenance and crustal evolution. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1943–1956

Abstract: The Chengjiang Formation is one of the earliest stratigraphic units above the Jinning unconformity. Determining the sources is of great significance for the understanding of the early crustal evolution in the western Yangtze Block. U-Pb dating and Lu-Hf isotopic composition studies were carried out on the detrital zircons from the Lower Chengjiang Formation in the Dongchuan area of the western Yangtze Block. The U-Pb ages of the zircons are clustered at 780~900 Ma, ~1000 Ma and ~1800 Ma respectively, and the weighted mean age of the youngest group is 801 ± 5 Ma (MSWD = 2.4, $n=9$), which is consistent with the volcanic age of the Lower Chengjiang Formation. Thus, it is further confirmed that the lower age of the Chengjiang Formation should be limited at ~800 Ma. Combined with the U-Pb age and Hf isotopic composition, zircon morphology and paleogeography, it is believed that the detritus was largely sourced from the widely distributed Neoproterozoic magmatic rock in the western Yangtze Block, and a small part from the recycled materials of the Dongchuan Group. Regional comparison of the early Nanhua strata of the Yangtze Block indicates that the western and northern margins of the Yangtze Block show different crustal evolution history. The provenance differences of the Chengjiang Formation in different regions of the western margin of the Yangtze are closely related to regional tectonic activities.

Key words: western Yangtze Block; Chengjiang Formation; detrital zircon; Hf isotope; crustal evolution; Dongchuan

收稿日期: 2021-05-05; 修订日期: 2021-06-23

资助项目: 国家自然科学基金项目《扬子西南缘东川地区前寒武纪地层 Nd、Hf 同位素示踪研究》(批准号: 41503025)、《西藏那曲地区中晚侏罗世拉贡塘组沉积作用对班公湖-怒江构造带地质演化的制约》(批准号: 41972113)、中国地质调查局项目《中尼铁路(境内段)沿线区域地质调查》(编号: DD20211195)、《扬子陆块攀枝花—玉溪地区与罗平生物群区域地质调查》(编号: DD20190054)和科技部青藏科考项目《深时特提斯生物与环境演变》(编号: 2019QZKK0706)

作者简介: 高永娟(1982-), 女, 博士, 高级工程师, 从事区域地质矿产调查研究工作。E-mail: gaoyongjuan@126.com

澄江组作为扬子西缘新元古代地层中重要的地层单元之一,是晋宁造山运动之后,扬子西缘新元古代最早接受的一套碎屑沉积,属于华南新元古代裂谷盆地中的早期充填序列^[1]。澄江组是发育在晋宁运动不整合面之上、澄江运动不整合面之下的一套以紫红色陆相碎屑沉积为主,局部夹厚度不等火山岩的沉积地层,可与扬子西缘苏雄组/开建桥组、扬子北缘莲沱组、湘西板溪群、黔东南下江群、桂北丹洲群等地层对比^[2]。近年,前人通过精确的锆石 U-Pb 年代学研究,对澄江组的沉积时限进行了约束。多数学者将澄江组的底界年龄限定为 800 Ma 左右^[2-4],顶界年龄限定为 725 Ma 左右^[5],也有研究者认为澄江组的底界年龄可能为 812 Ma 左右^[6]。

将碎屑锆石 U-Pb 同位素年代学和 Hf 同位素分析结合,在示踪沉积物源、揭示大陆早期演化、基底组成等方面具有独特的优势。目前,关于澄江组的研究主要集中在通过凝灰岩锆石 U-Pb 年龄^[2-3,6-7]或地层中碎屑锆石 U-Pb 年龄^[4-5,8]对地层沉积时代进行约束,而有关地层碎屑锆石 Hf 同位素研究的报道十分有限^[9]。为深入探讨澄江组的物源,本文报道了云南东川地区澄江组底部碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成,对澄江组的沉积时代和物质来源进行了约束。此外,通过与同期地层进行对比,对扬子地块的早期演化历史和基底组成进行了探讨。

1 地质背景及样品特征

扬子西缘康滇裂谷呈南北向展布,是发育于晋宁运动不整合面之上的伸展断陷盆地^[3]。裂谷盆地的基底主要由古元古代东川群、河口群、大红山群和中元古代昆阳群、会理群、盐边群及其相当地层组成^[10-14]。在大地构造位置上,云南东川地区属于康滇裂谷盆地的南部,南北方向的小江断裂是研究区主要的活动断裂。区内由老到新出露古元古代东川群、中元古代昆阳群、南华系、震旦系、古生界及第四系(图 1)。研究区澄江组零星分布,厚度一般 20~30 m,但在小江东岸小江农场附近出露完好,厚度达 500 m,角度不整合于昆阳群黄草岭组变质变形的砂板岩之上,平行不整合于震旦系灯影组白云岩之下,岩性主要为紫红色页岩、砂状页岩、含砾粗砂岩、砂质砾岩等。

本次采集的样品位于东川地区小江农场澄江组底部,地理坐标为北纬 26°12'39"、东经 103°06'05",岩性为含砾长石杂砂岩,具有含砾中粗粒杂砂状结构,块状构造。岩石颗粒分选性、磨圆度差,以棱角状—次棱角状为主,主要成分为石英(22%)、长石(35%)、粘土矿物(20%)、绢云母(10%)、不透明矿物(8%)、白云母(5%)。碎屑主要由石英长石砂岩、石英、长石及少量白云母组成,呈次棱角状,粒径多为 0.05~0.84 mm(图 2)。

2 分析方法

锆石挑选在廊坊诚信地质服务有限公司完成,采用传统比重法淘选之后,在双目镜下进行人工挑纯。制靶及阴极发光(CL)照相在北京铀年领航科技有限公司完成。锆石使用环氧树脂进行固定后抛光并进行 CL 照相,观察锆石颗粒内部的核、边和包裹体结构以用于锆石原位 U-Pb 同位素分析时的选点依据。

锆石 U-Pb 和 Hf 同位素分析均在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成。锆石 U-Pb 同位素分析采用的激光剥蚀系统仪器为 GeoLas 2005,质谱仪器为 Agilent 7500a,实验中采用的激光束斑直径为 32 μm ,年龄数据处理采用 91500 标样为外标,而锆石 U、Th 和 Pb 含量采用 NIST610 为外标计算,仪器参数和数据处理方法见参考文献[16]。锆石年龄计算及谐和图的绘制均采用 Isoplot 3.0 软件完成^[17]。此外,对锆石年龄进行分析和讨论时,考虑到放射性铅同位素的影响,当年龄小于 1000 Ma 时采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,当年龄大于 1000 Ma 时采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 年龄。

Hf 同位素分析采用的实验仪器为 Neptune Plus 型 MC-ICP-MS(多接收电感耦合等离子体质谱仪),锆石 Lu-Hf 同位素分析点选择在 U-Pb 年龄测试点附近(图 3)。实验中激光束斑直径为 44 μm ,背景采集时间为 20 s,激光剥蚀时间为 50 s,测定时采用 91500 为外标,具体的实验参数和数据采集过程见参考文献[18]。锆石 Hf 同位素组成离线数据处理采用 ICPMSDataCal 软件完成^[16]。

3 分析结果

澄江组底部碎屑锆石多呈淡黄色或无色,锆石形态多为自形的短柱状、粒状和板状,代表了距离

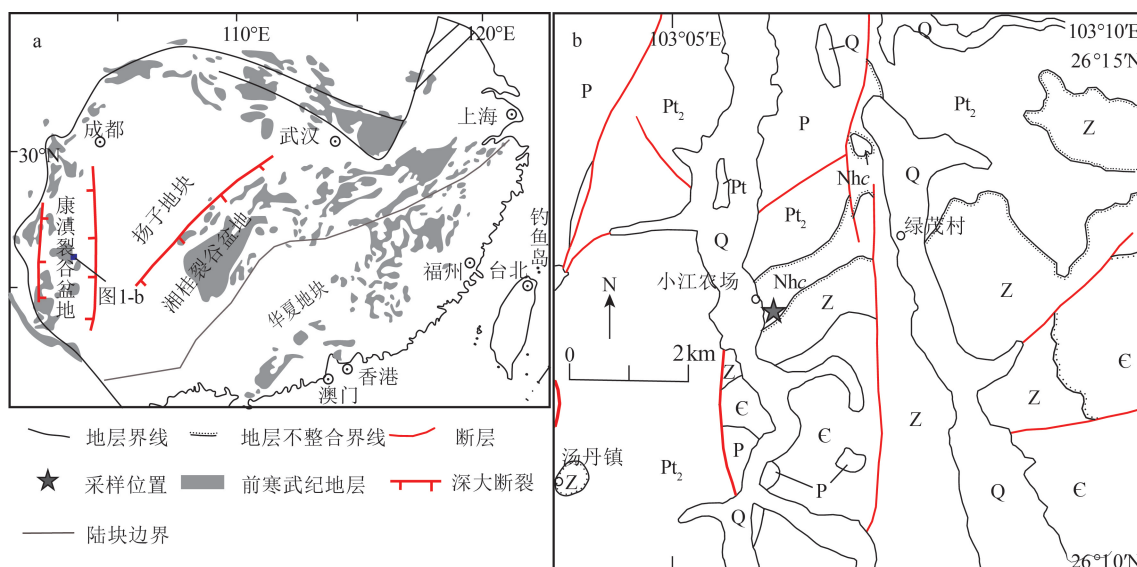


图 1 研究区地质简图及采样位置(a 据参考文献[15]修改)

Fig. 1 Simplified geological map of studied area and sampling location

Q—第四系; P—二叠系; C—寒武系; Nhc—南华系澄江组; Z—震旦系; Pt₂—昆阳群

源区较短的搬运过程。个别锆石呈半自形-浑圆状,暗示其经历了较远距离搬运或沉积再循环过程。锆石晶体长 $80\sim 130\ \mu\text{m}$,宽 $40\sim 80\ \mu\text{m}$,长宽比为 $1:1\sim 2:1$;多数晶形较完好,表面光滑无裂隙,少数呈破碎状。CL 图像显示,绝大多数锆石具有典型的岩浆振荡环带,表明其为岩浆成因(图 3)。

本次对澄江组底部砂岩中 100 颗碎屑锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 年龄测定,其中 97 颗锆石获得了谐和年龄,谐和度大于 95%(表 1)。锆石的 Th

和 U 含量分别为 $74\times 10^{-6}\sim 1098\times 10^{-6}$ 和 $162\times 10^{-6}\sim 2083\times 10^{-6}$;大多数锆石的 Th/U 值为 $0.4\sim 1.8$,为典型的岩浆锆石;仅 1 颗锆石(分析点 PM31-1-61)的 Th/U <0.1 (为 0.09),指示其为变质锆石。U-Pb 测年结果显示,东川地区澄江组底部碎屑锆石的年龄分布范围为 $786\sim 2712\ \text{Ma}$,多数年龄集中在 $780\sim 900\ \text{Ma}$ 之间,存在 1 个主要峰值 $832\ \text{Ma}$ 和 2 个次级峰值 $980\ \text{Ma}$ 和 $1800\ \text{Ma}$ (图 4)。澄江组底部砂岩中最年轻的单颗粒锆石年龄为 $786\pm 7\ \text{Ma}$,最老的 2 颗太古宙锆石年龄为 $2709\ \text{Ma}$ 和

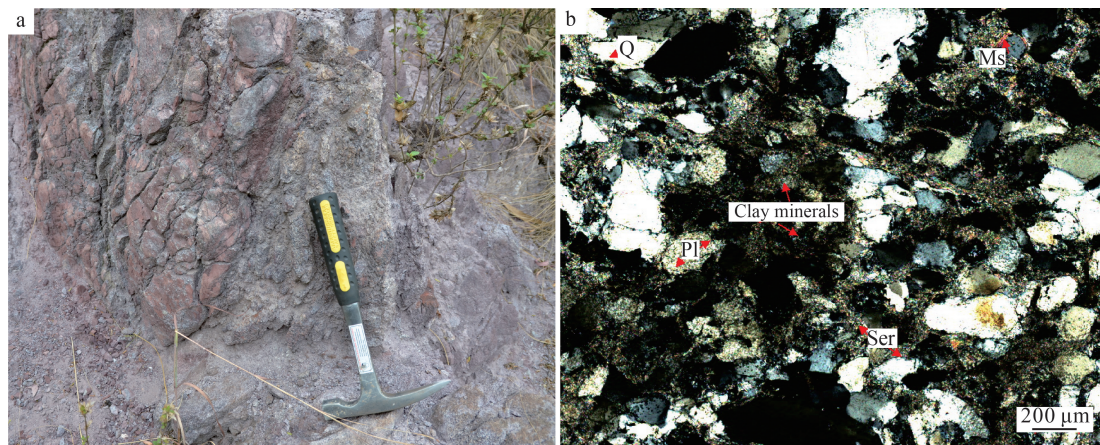


图 2 东川地区澄江组底部含砾砂岩野外(a)及显微照片(b)

Fig. 2 Field outcrop(a) and photomicrograph(b) for the gravel sandstone of the Chengjiang Formation in the Dongchuan area

Q—石英; Pl—斜长石; Ser—绢云母; Ms—白云母; Clay minerals—粘土矿物

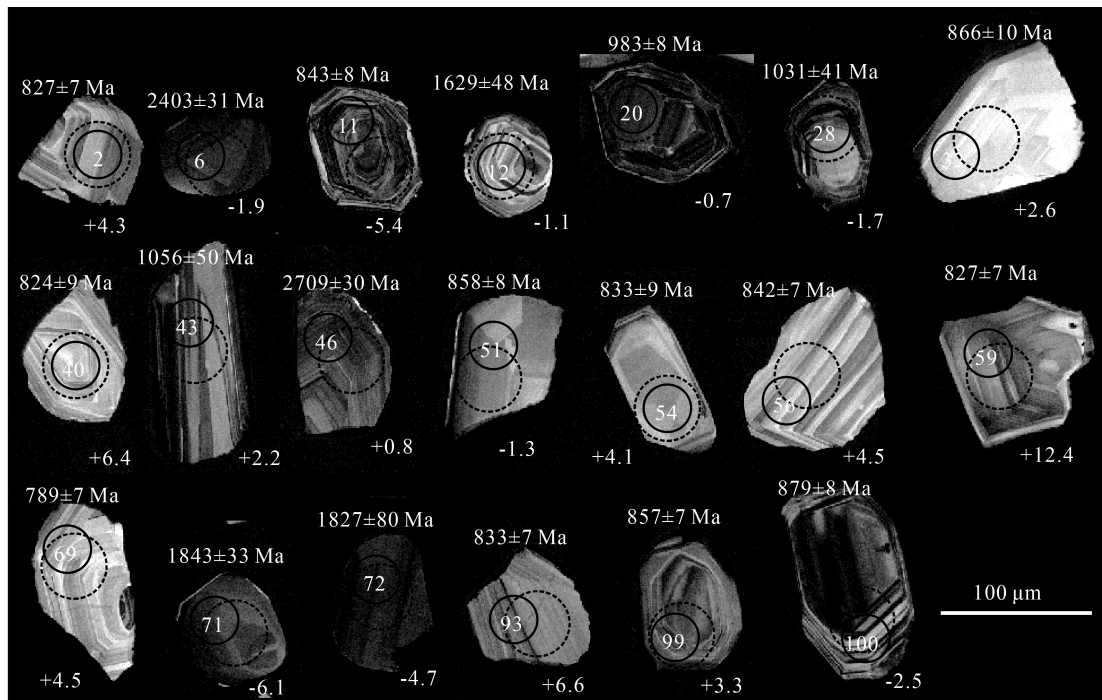


图3 东川地区澄江组底部代表性碎屑锆石阴极发光(CL)图像
(实线圈为 U-Pb 年龄分析点,圈内数字为年龄分析点号;虚线圈为 Lu-Hf 同位素分析点)

Fig. 3 CL images of representative detrital zircons from the bottom of the Chengjiang Formation in the Dongchuan area

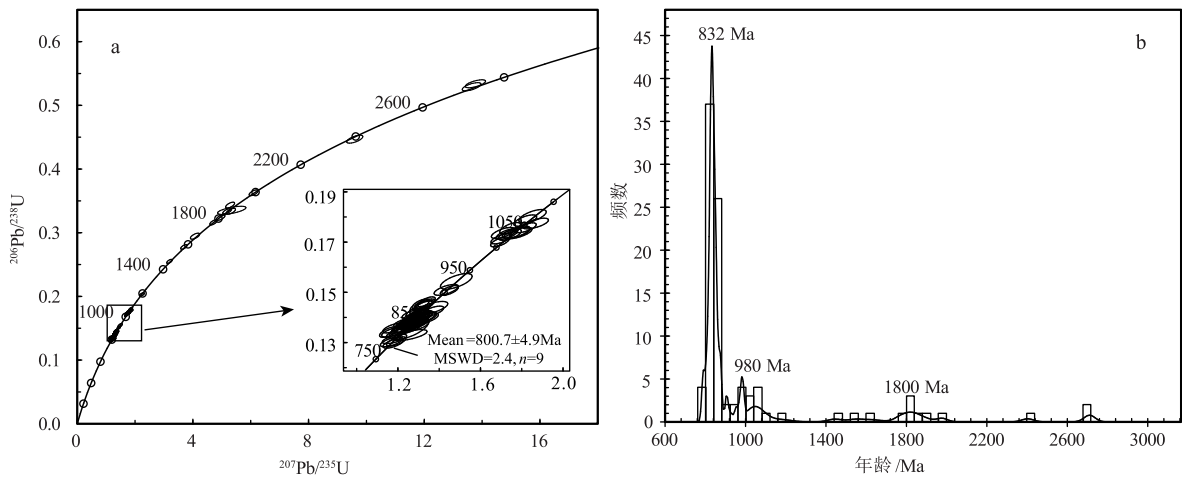


图4 东川地区澄江组底部碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)及年龄分布图(b)

Fig. 4 Concordia diagram(a)and frequency plot(b) of the detrital zircons U-Pb ages from the bottom of the Chengjiang Formation in the Dongchuan area

2712 Ma(表 1)。

本次随机选取数颗不同时代的锆石进行 Lu-Hf 同位素分析,共 19 个分析点(表 2),Hf 同位素分析点与 U-Pb 年龄分析点相同或接近,计算 Hf 同位素

组成采用的是同一锆石的 U-Pb 年龄。Hf 同位素分析结果表明,东川地区澄江组底部碎屑锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值介于 0.281108~0.282621 之间, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值变化于 -6.1~+12.4 之间。其中,新元古代锆石

表 1 东川地区澄江组底部碎屑锆石 U-Th-Pb 同位素数据

Table 1 U-Th-Pb isotopic data of detrital zircons from the bottom of the Chengjiang Formation in the Dongchuan area

分析点	元素/ 10^{-6}		Th	同位素比值						年龄/Ma						谐和度
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
PM31-1-1	99.1	201	0.49	0.0703	0.0026	1.4829	0.0507	0.1544	0.0021	1000	76	923	21	925	11	99%
PM31-1-2	477	493	0.97	0.0673	0.0016	1.2740	0.0311	0.1368	0.0012	856	51	834	14	827	7	99%
PM31-1-3	591	995	0.59	0.0683	0.0015	1.3051	0.0295	0.1379	0.0012	876	44	848	13	833	7	98%
PM31-1-4	776	1282	0.61	0.0696	0.0014	1.4491	0.0290	0.1508	0.0013	917	43	910	12	905	7	99%
PM31-1-5	637	809	0.79	0.0761	0.0017	1.8668	0.0413	0.1774	0.0014	1098	45	1069	15	1053	8	98%
PM31-1-6	245	487	0.50	0.1551	0.0028	9.5969	0.1841	0.4469	0.0041	2403	31	2397	18	2381	19	99%
PM31-1-7	456	768	0.59	0.0684	0.0017	1.4338	0.0387	0.1510	0.0014	880	52	903	16	906	8	99%
PM31-1-8	449	632	0.71	0.0673	0.0017	1.2675	0.0332	0.1362	0.0015	856	52	831	15	823	8	99%
PM31-1-9	393	406	0.97	0.0677	0.0019	1.2833	0.0366	0.1376	0.0016	861	59	838	16	831	9	99%
PM31-1-10	234	991	0.24	0.0688	0.0018	1.3317	0.0365	0.1399	0.0015	894	54	860	16	844	8	98%
PM31-1-11	766	1509	0.51	0.0696	0.0017	1.3441	0.0342	0.1397	0.0014	917	52	865	15	843	8	97%
PM31-1-12	568	318	1.79	0.1003	0.0026	4.0739	0.1060	0.2946	0.0031	1629	48	1649	21	1664	16	99%
PM31-1-13	232	558	0.42	0.0672	0.0018	1.3032	0.0350	0.1406	0.0015	843	56	847	15	848	9	99%
PM31-1-14	233	538	0.43	0.0744	0.0017	1.8522	0.0439	0.1803	0.0017	1052	46	1064	16	1069	10	99%
PM31-1-15	624	865	0.72	0.0666	0.0014	1.3041	0.0300	0.1413	0.0013	828	46	848	13	852	8	99%
PM31-1-16	631	502	1.26	0.0671	0.0017	1.2650	0.0322	0.1368	0.0012	839	53	830	14	826	7	99%
PM31-1-17	197	206	0.95	0.0639	0.0040	1.2539	0.0626	0.1354	0.0028	739	127	825	28	819	16	99%
PM31-1-18	124	185	0.67	0.0650	0.0030	1.2580	0.0549	0.1330	0.0014	776	99	827	25	805	8	97%
PM31-1-19	507	626	0.81	0.0658	0.0015	1.2464	0.0283	0.1369	0.0012	1200	47	822	13	827	7	99%
PM31-1-20	139	1048	0.13	0.0718	0.0014	1.7437	0.0333	0.1755	0.0015	983	39	1025	12	1042	8	98%
PM31-1-21	625	896	0.70	0.0656	0.0017	1.1766	0.0325	0.1296	0.0012	794	59	790	15	786	7	99%
PM31-1-22	142	231	0.62	0.0676	0.0022	1.3051	0.0425	0.1403	0.0016	857	69	848	19	846	9	99%
PM31-1-23	342	866	0.39	0.0661	0.0017	1.2607	0.0330	0.1376	0.0010	809	48	828	15	831	6	99%
PM31-1-24	270	544	0.50	0.0677	0.0017	1.3017	0.0321	0.1393	0.0011	861	58	846	14	841	6	99%
PM31-1-25	283	481	0.59	0.0626	0.0017	1.1733	0.0304	0.1357	0.0012	694	57	788	14	820	7	96%
PM31-1-26	198	307	0.65	0.0655	0.0020	1.2787	0.0382	0.1414	0.0012	791	63	836	17	853	7	98%
PM31-1-27	384	689	0.56	0.0664	0.0014	1.3243	0.0288	0.1445	0.0013	817	44	856	13	870	8	98%
PM31-1-28	177	674	0.26	0.0736	0.0015	1.8171	0.0365	0.1786	0.0015	1031	41	1052	13	1059	8	99%
PM31-1-29	283	372	0.76	0.1108	0.0022	4.9596	0.0984	0.3238	0.0028	1813	35	1812	17	1808	14	99%
PM31-1-30	533	578	0.92	0.0656	0.0017	1.2897	0.0335	0.1422	0.0015	794	58	841	15	857	8	98%
PM31-1-31	337	440	0.77	0.0661	0.0018	1.2633	0.0329	0.1388	0.0014	809	56	829	15	838	8	99%
PM31-1-32	74.0	162	0.46	0.0694	0.0027	1.3650	0.0507	0.1438	0.0017	909	80	874	22	866	10	99%
PM31-1-33	268	361	0.74	0.0678	0.0022	1.2830	0.0404	0.1375	0.0014	861	67	838	18	831	8	99%
PM31-1-34	533	763	0.70	0.0664	0.0014	1.2789	0.0289	0.1391	0.0012	820	46	836	13	839	7	99%
PM31-1-35	253	464	0.55	0.0661	0.0016	1.2631	0.0304	0.1383	0.0013	809	45	829	14	835	7	99%
PM31-1-36	126	262	0.48	0.0676	0.0020	1.3050	0.0386	0.1399	0.0012	855	61	848	17	844	7	99%
PM31-1-37	195	273	0.71	0.0655	0.0020	1.2236	0.0368	0.1356	0.0014	791	64	811	17	820	8	99%
PM31-1-38	400	532	0.75	0.0669	0.0015	1.2776	0.0301	0.1378	0.0012	835	46	836	13	832	7	99%
PM31-1-39	816	785	1.04	0.0958	0.0018	3.6873	0.0715	0.2776	0.0024	1544	40	1569	16	1579	12	99%
PM31-1-40	167	238	0.70	0.0658	0.0024	1.2403	0.0455	0.1364	0.0016	800	78	819	21	824	9	99%
PM31-1-41	399	573	0.70	0.0657	0.0017	1.2538	0.0330	0.1379	0.0013	796	54	825	15	833	8	99%
PM31-1-42	417	866	0.48	0.0673	0.0015	1.2811	0.0283	0.1378	0.0012	856	47	837	13	832	7	99%
PM31-1-43	254	523	0.49	0.0741	0.0018	1.7818	0.0447	0.1736	0.0015	1056	50	1039	16	1032	8	99%
PM31-1-44	246	652	0.38	0.1214	0.0019	6.0992	0.1022	0.3627	0.0030	1977	28	1990	15	1995	14	99%
PM31-1-45	463	901	0.51	0.1075	0.0017	4.7085	0.0807	0.3161	0.0026	1767	29	1769	14	1771	13	99%
PM31-1-46	380	524	0.72	0.1862	0.0028	13.6378	0.2137	0.5292	0.0043	2709	30	2725	15	2738	18	99%

续表 1

分析点	元素/ 10^{-6}		Th	同位素比值								年龄/Ma						谐和度
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ			
PM31-1-47	1098	2083	0.53	0.0678	0.0011	1.3203	0.0225	0.1407	0.0011	863	35	855	10	849	6	99%		
PM31-1-48	213	449	0.47	0.0657	0.0017	1.2727	0.0330	0.1401	0.0012	798	54	834	15	845	7	98%		
PM31-1-49	255	502	0.51	0.0737	0.0018	1.7723	0.0439	0.1739	0.0017	1035	50	1035	16	1034	9	99%		
PM31-1-50	409	827	0.49	0.0661	0.0016	1.3304	0.0330	0.1454	0.0013	809	47	859	14	875	7	98%		
PM31-1-51	241	458	0.53	0.0695	0.0018	1.3678	0.0357	0.1424	0.0014	915	53	875	15	858	8	98%		
PM31-1-52	225	692	0.32	0.0729	0.0015	1.7428	0.0367	0.1730	0.0015	1011	43	1024	14	1028	8	99%		
PM31-1-53	328	441	0.74	0.0654	0.0018	1.2433	0.0353	0.1377	0.0014	789	62	820	16	832	8	98%		
PM31-1-54	168	282	0.60	0.0670	0.0021	1.2755	0.0400	0.1380	0.0015	839	65	835	18	833	9	99%		
PM31-1-55	562	1417	0.40	0.0744	0.0013	1.7909	0.0324	0.1739	0.0013	1052	35	1042	12	1034	7	99%		
PM31-1-56	309	339	0.91	0.0676	0.0018	1.3025	0.0353	0.1396	0.0013	857	62	847	16	842	7	99%		
PM31-1-57	333	486	0.68	0.0660	0.0016	1.2599	0.0305	0.1384	0.0012	806	52	828	14	836	7	99%		
PM31-1-58	248	361	0.69	0.0676	0.0018	1.2802	0.0332	0.1374	0.0013	855	(145)	837	15	830	7	99%		
PM31-1-59	371	453	0.82	0.0672	0.0018	1.2718	0.0336	0.1370	0.0012	844	56	833	15	827	7	99%		
PM31-1-60	262	424	0.62	0.0678	0.0018	1.3039	0.0331	0.1395	0.0013	861	55	847	15	842	8	99%		
PM31-1-61	122	1360	0.09	0.0747	0.0014	1.8172	0.0351	0.1757	0.0013	1061	39	1052	13	1043	7	99%		
PM31-1-62	571	828	0.69	0.0681	0.0018	1.2917	0.0389	0.1368	0.0014	872	57	842	17	826	8	98%		
PM31-1-63	147	192	0.77	0.0685	0.0024	1.3129	0.0446	0.1398	0.0017	883	72	851	20	843	9	99%		
PM31-1-64	320	361	0.89	0.1154	0.0022	5.3151	0.1047	0.3337	0.0030	1887	35	1871	17	1856	14	99%		
PM31-1-65	234	515	0.45	0.0666	0.0016	1.2961	0.0321	0.1408	0.0014	828	50	844	14	849	8	99%		
PM31-1-66	242	655	0.37	0.0658	0.0014	1.2701	0.0273	0.1398	0.0011	798	44	832	12	843	6	98%		
PM31-1-67	227	488	0.47	0.1866	0.0029	13.7682	0.2322	0.5339	0.0041	2712	26	2734	16	2758	17	99%		
PM31-1-68	450	1510	0.30	0.0659	0.0012	1.2597	0.0240	0.1385	0.0012	806	39	828	11	836	7	99%		
PM31-1-69	178	264	0.67	0.0654	0.0020	1.1688	0.0356	0.1303	0.0013	787	65	786	17	789	7	99%		
PM31-1-70	157	406	0.39	0.1127	0.0020	5.1799	0.0976	0.3335	0.0027	1843	33	1849	16	1855	13	99%		
PM31-1-71	628	764	0.82	0.0908	0.0017	3.1905	0.0617	0.2549	0.0021	1443	35	1455	15	1464	11	99%		
PM31-1-72	125	741	0.17	0.1117	0.0049	5.3436	0.3243	0.3352	0.0042	1827	80	1876	52	1863	20	99%		
PM31-1-73	497	594	0.84	0.0656	0.0016	1.2314	0.0323	0.1361	0.0013	794	56	815	15	823	7	99%		
PM31-1-74	392	615	0.64	0.0627	0.0015	1.1561	0.0296	0.1342	0.0014	698	54	780	14	812	8	96%		
PM31-1-75	675	824	0.82	0.0661	0.0015	1.2382	0.0310	0.1361	0.0015	809	48	818	14	823	8	99%		
PM31-1-76	310	506	0.61	0.0796	0.0019	2.2359	0.0563	0.2031	0.0018	1187	48	1192	18	1192	10	99%		
PM31-1-77	228	372	0.61	0.0663	0.0018	1.1912	0.0310	0.1304	0.0012	817	56	797	14	790	7	99%		
PM31-1-78	351	411	0.85	0.0648	0.0018	1.1941	0.0327	0.1336	0.0012	769	58	798	15	808	7	98%		
PM31-1-79	217	271	0.80	0.0656	0.0020	1.2277	0.0408	0.1351	0.0015	794	65	813	19	817	9	99%		
PM31-1-81	262	582	0.45	0.0663	0.0015	1.2991	0.0307	0.1415	0.0012	817	49	845	14	853	7	99%		
PM31-1-82	249	699	0.36	0.0653	0.0014	1.3102	0.0276	0.1453	0.0014	783	46	850	12	874	8	97%		
PM31-1-83	214	1704	0.13	0.0719	0.0013	1.6941	0.0297	0.1700	0.0013	983	37	1006	11	1012	7	99%		
PM31-1-84	550	1244	0.44	0.0649	0.0013	1.2396	0.0254	0.1377	0.0013	772	44	819	12	831	7	98%		
PM31-1-85	130	880	0.15	0.0709	0.0015	1.7090	0.0372	0.1736	0.0015	954	44	1012	14	1032	8	98%		
PM31-1-86	405	481	0.84	0.1108	0.0021	5.2868	0.1023	0.3434	0.0030	1813	34	1867	17	1903	15	98%		
PM31-1-87	107	1012	0.11	0.0715	0.0014	1.7002	0.0327	0.1713	0.0013	972	39	1009	12	1019	7	98%		
PM31-1-88	443	603	0.73	0.0660	0.0016	1.2516	0.0295	0.1371	0.0013	806	52	824	13	828	8	99%		
PM31-1-91	696	926	0.75	0.0647	0.0013	1.2332	0.0237	0.1375	0.0011	765	43	816	11	830	6	98%		
PM31-1-92	208	756	0.27	0.0720	0.0015	1.7295	0.0341	0.1732	0.0014	987	41	1020	13	1030	8	99%		
PM31-1-93	270	418	0.65	0.0645	0.0019	1.2370	0.0376	0.1380	0.0013	767	62	818	17	833	7	98%		
PM31-1-94	230	353	0.65	0.0661	0.0022	1.2713	0.0421	0.1386	0.0015	809	69	833	19	837	8	99%		
PM31-1-95	353	323	1.09	0.0635	0.0021	1.1767	0.0367	0.1341	0.0013	724	69	790	17	811	7	97%		
PM31-1-96	398	637	0.62	0.0651	0.0023	1.1835	0.0391	0.1314	0.0012	776	74	793	18	796	7	99%		
PM31-1-97	401	609	0.66	0.0663	0.0017	1.2989	0.0318	0.1414	0.0013	817	56	845	14	852	7	99%		
PM31-1-98	277	732	0.38	0.0661	0.0016	1.3252	0.0319	0.1448	0.0013	809	47	857	14	872	8	98%		
PM31-1-99	603	1054	0.57	0.0665	0.0014	1.3077	0.0265	0.1421	0.0013	822	44	849	12	857	7	99%		
PM31-1-100	674	1686	0.40	0.0662	0.0014	1.3390	0.0277	0.1461	0.0014	813	43	863	12	879	8	98%		

表 2 东川地区澄江组底部碎屑锆石 Hf 同位素组成

Table 2 Hf isotope compositions of detrital zircons from the bottom of the Chengjiang Formation in the Dongchuan area

分析点 (同年龄点)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	1 σ	U-Pb 年龄 /Ma	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	1 σ	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	1 σ	$T_{\text{DM1}}/$ Ma	$T_{\text{DM2}}/$ Ma	f_{Lu}/Hf
PM31-1-2	0.282402	0.000023	0.001675	0.000022	0.051359	0.000779	827	-13.1	1.0	4.3	1.0	1223	1369	-0.95
PM31-1-6	0.281230	0.000028	0.000725	0.000011	0.023480	0.000349	2403	-54.5	1.1	-1.9	1.2	2798	2958	-0.98
PM31-1-11	0.282112	0.000027	0.001188	0.000012	0.041144	0.000418	843	-23.3	1.1	-5.4	1.1	1613	1911	-0.96
PM31-1-12	0.281748	0.000019	0.001050	0.000013	0.032330	0.001041	1629	-36.2	0.9	-1.1	0.9	2112	2302	-0.97
PM31-1-20	0.282143	0.000028	0.000273	0.000005	0.011212	0.000361	983	-22.3	1.1	-0.7	1.1	1533	1765	-0.99
PM31-1-28	0.282082	0.000028	0.000127	0.000006	0.005261	0.000191	1031	-24.4	1.1	-1.7	1.1	1610	1858	-1.00
PM31-1-32	0.282309	0.000045	0.000376	0.000002	0.013363	0.000218	866	-16.4	1.7	2.6	1.7	1309	1494	-0.99
PM31-1-40	0.282455	0.000026	0.001098	0.000016	0.036903	0.000785	824	-11.2	1.1	6.4	1.1	1130	1250	-0.97
PM31-1-43	0.282209	0.000029	0.001739	0.000041	0.066613	0.001092	1056	-19.9	1.1	2.2	1.2	1500	1664	-0.95
PM31-1-46	0.281108	0.000021	0.000705	0.000004	0.025493	0.000593	2709	-58.9	0.9	0.8	1.0	2961	3063	-0.98
PM31-1-51	0.282210	0.000029	0.000769	0.000003	0.027199	0.000325	858	-19.9	1.2	-1.3	1.2	1460	1702	-0.98
PM31-1-54	0.282383	0.000025	0.001019	0.000016	0.037199	0.000568	833	-13.8	1.0	4.1	1.0	1228	1384	-0.97
PM31-1-56	0.282389	0.000025	0.000992	0.000008	0.036075	0.000404	842	-13.5	1.0	4.5	1.1	1219	1367	-0.97
PM31-1-59	0.282621	0.000018	0.001103	0.000008	0.036063	0.000624	827	-5.3	0.8	12.4	0.9	895	922	-0.97
PM31-1-69	0.282428	0.000030	0.001411	0.000006	0.073072	0.001315	789	-12.2	1.2	4.5	1.2	1177	1324	-0.96
PM31-1-70	0.281450	0.000015	0.000317	0.000004	0.009838	0.000184	1843	-46.7	0.7	-6.1	0.8	2473	2738	-0.99
PM31-1-72	0.281535	0.000012	0.001402	0.000011	0.036323	0.000255	1827	-43.7	0.7	-4.7	0.8	2427	2655	-0.96
PM31-1-93	0.282454	0.000022	0.001136	0.000011	0.041723	0.000357	833	-11.2	0.9	6.6	1.0	1132	1248	-0.97
PM31-1-99	0.282342	0.000038	0.000805	0.000019	0.027064	0.000484	857	-15.2	1.4	3.3	1.5	1278	1448	-0.98
PM31-1-100	0.282171	0.000017	0.001139	0.000022	0.040795	0.001369	879	-21.3	0.8	-2.5	0.8	1530	1783	-0.97

注: 锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值采用相应的 U-Pb 年龄计算, $\lambda = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a}$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.282772$, $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{CHUR}} = 0.0332$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.0384$, $(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_{\text{DM}} = 0.28325$; $(^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf})_{\text{平均地壳}} = 0.015$

(789~879 Ma) 的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值有正有负, 变化于 -5.4~+6.6 之间, 表明区域地壳存在同时期幔源物质加入的岩浆活动。值得一提的是, 1 颗 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 +12.4 的岩浆锆石, 其 T_{DM1} (895 Ma) 和 T_{DM2} (922 Ma) 与锆石结晶年龄 827 Ma 十分接近, 反映了新生地壳迅速剥蚀沉积的过程。3 颗 1000 Ma 左右的早新元古代锆石颗粒 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值接近于 0, 在 -1.7~+2.2 之间。2 颗 1800 Ma 左右的晚古元古代锆石具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 (-4.7 和 -6.1) 和古老的太古宙模式年龄 (T_{DM2} 为 2738 Ma 和 2655 Ma), 2 颗大于 2000 Ma 的岩浆锆石 (2403 Ma 和 2709 Ma) 也获得了太古宙模式年龄 (T_{DM2} 为 2958 Ma 和 3063 Ma), 说明澄江组的物源区可能存在古老地壳物质 (表 2)。

4 讨 论

4.1 澄江组的沉积时限

前人对扬子西缘不同地区的澄江组开展了详细的调查研究, 获得了丰富的年龄数据。滇东北金阳地区澄江组中下部凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $797.8 \pm 8.2 \text{ Ma}^{[2]}$, 东川中河剖面澄江组底部凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $803.7 \pm 8.7 \text{ Ma}^{[2]}$, 巧家地区澄江组中部凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $785 \pm 12 \text{ Ma}^{[7]}$; 滇中武定罗茨地区澄江组底部玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $804 \pm 6 \text{ Ma}^{[3]}$, 易门地区澄江组底部凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $812 \pm 6 \text{ Ma}^{[6]}$, 晋宁县王家湾剖面澄

江组底部砂岩中最年轻一组锆石 U-Pb 年龄为 804.5 ± 5.4 Ma ($n=9$)^[4], 昆明西山地区澄江组底部砂岩 SHRIMP U-Pb 锆石年龄为 799.5 ± 8.4 Ma ($n=10$)^[8]。上述定年结果将澄江组底界年龄约束在 798~812 Ma 之间。滇中澄江县城北澄江组顶部凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 725 ± 11 Ma, 代表了澄江组的顶界年龄^[5]。

本次研究在滇东北东川地区小江农场澄江组底部砂岩中, 获得最年轻一组锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 801 ± 5 Ma (MSWD=2.4, $n=9$), 代表了研究区澄江组的底界年龄, 这与滇东北其他区域取得的澄江组底部年龄 798~804 Ma 十分接近, 而略晚于滇中地区的澄江组底部年龄 (804~812 Ma)。结合前人的研究成果, 认为扬子西缘澄江组的沉积时限为 800~725 Ma。

近年, 前人在地层定年结果的基础上, 开展了区域地层的对比研究。江新胜^[2]等通过地层沉积构造在区域上的变化特征, 认为澄江组具有以火山喷发堆积开始, 河湖相沉积超覆结束的构造-沉积旋回, 与扬子西缘同期异相的开建桥组和苏雄组沉积特征相似, 结合开建桥组/苏雄组顶底界年龄 725~803 Ma, 认为扬子西缘澄江组与开建桥组/苏雄组可直接对比^[2, 19-21]。

扬子北缘三峡地区及通山地区莲沱组的年代学研究表明, 其沉积年龄为 790~720 Ma^[22-23]。莲沱组是一套由南向北超覆的移地滨岸相沉积, 其层型剖面超覆在基岩之上, 可能缺失下部地层, 而层型剖面以南莲沱组的底界年龄可能达到 800 Ma 左右^[2]。为此, 莲沱组的底界年龄可与澄江组对比。黔湘桂地区与澄江组相当地层包括湘中板溪群、黔东下江群及桂北丹洲群, 其中板溪群的沉积年龄为 814~712 Ma^[24-25], 下江群沉积年龄为 814~720 Ma^[26-27], 丹洲群的沉积年龄为 801~716 Ma^[28-29]。可见, 黔湘桂地区同期地层的沉积时限略长, 沉积下限略早于澄江组。

4.2 物 源

4.2.1 新元古代年龄 (780~900 Ma)

东川地区小江农场澄江组底部碎屑锆石年龄大致可分为 780~900 Ma、950~1050 Ma、1750~2000 Ma 和约 2700 Ma 四组, 指示了物源区在新元古代、中元古代晚期—早新元古代、古元古代及新太古代的岩浆活动。

澄江组碎屑锆石的 U-Pb 年龄多在 800~860 Ma 之间, 与扬子地块新元古代中期广泛发育的岩浆活动相符, 与 Rodinia 超大陆的聚合和裂解密切相关^[30]。目前在扬子西缘出露较多的新元古代地质体, 包括 860 Ma 关刀山岩体和格宗岩体^[31-34], 康定杂岩中 800~850 Ma 的花岗岩、片麻岩、基性岩体等^[31, 35-36], 800~850 Ma 的宝兴杂岩^[37], 约 810 Ma 的高家村岩体^[38], 贵州西南部约 850 Ma 的花岗斑岩^[39]及扬子西缘前南华系变质地层中 800~825 Ma 的火山岩^[3, 40-41]。这些岩浆活动与澄江组底部碎屑锆石记录的新元古代构造热事件是一致的, 而且样品中新元古代锆石的形态呈柱状、棱角状 (图 3), 岩石学特征显示结构成熟度和分选性较差 (图 2), 指示较近距离的碎屑来源。同时, 研究区澄江组大多数新元古代锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值大于 0 (表 2), 与扬子西缘 800~900 Ma 的新元古代岩体具有正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的特征类似^[42]。因此推测, 澄江组新元古代碎屑应主要来自于扬子西缘。此外, 锆石的微量元素岩性判别图解也表明, 这些碎屑锆石主要来自于花岗岩类 (图略), 这与扬子西缘广泛存在新元古代花岗岩的特征相符。

4.2.2 约 1000 Ma 的年龄

研究区澄江组底部约 1000 Ma 的碎屑锆石年龄, 对应全球典型的格林威尔造山事件, 该期岩浆事件在扬子西缘不同地区均有记录。康定群中发现 1007~1014 Ma 的花岗岩体^[43-44]; 会理群中发现 1040~1063 Ma 的花岗岩体^[45-46]及 1023 Ma 的基性岩墙^[47], 荊林群中发现 1041~1050 Ma 的酸性侵入岩^[45, 48]。此外, 年龄为 990~1100 Ma 的火山岩和火山碎屑岩在会理群、昆阳群及荊林群中也普遍发育^[38, 47, 49-52]。另有统计表明, 约 1000 Ma 的锆石年龄在扬子西缘前寒武纪沉积岩中有显著的记录^[30], 进一步证实扬子西缘广泛存在格林威尔期造山。

华夏陆块各个时代的沉积岩中含有大量的格林威尔期岩浆成因的碎屑锆石, 表明华夏块体曾有大量的格林威尔期岩浆岩出露^[30], 也成为澄江组碎屑物质的可能来源。在碎屑锆石年龄谱对比图中, 澄江组约 1000 Ma 的峰值与扬子西缘及华夏地块相似, 暗示两者均为可能的物源 (图 5)。但是, 从南华系早期的古地理格局看, 研究区位于滇中古陆, 与华夏古陆之间为南华裂谷盆地, 而南华盆地与澄江

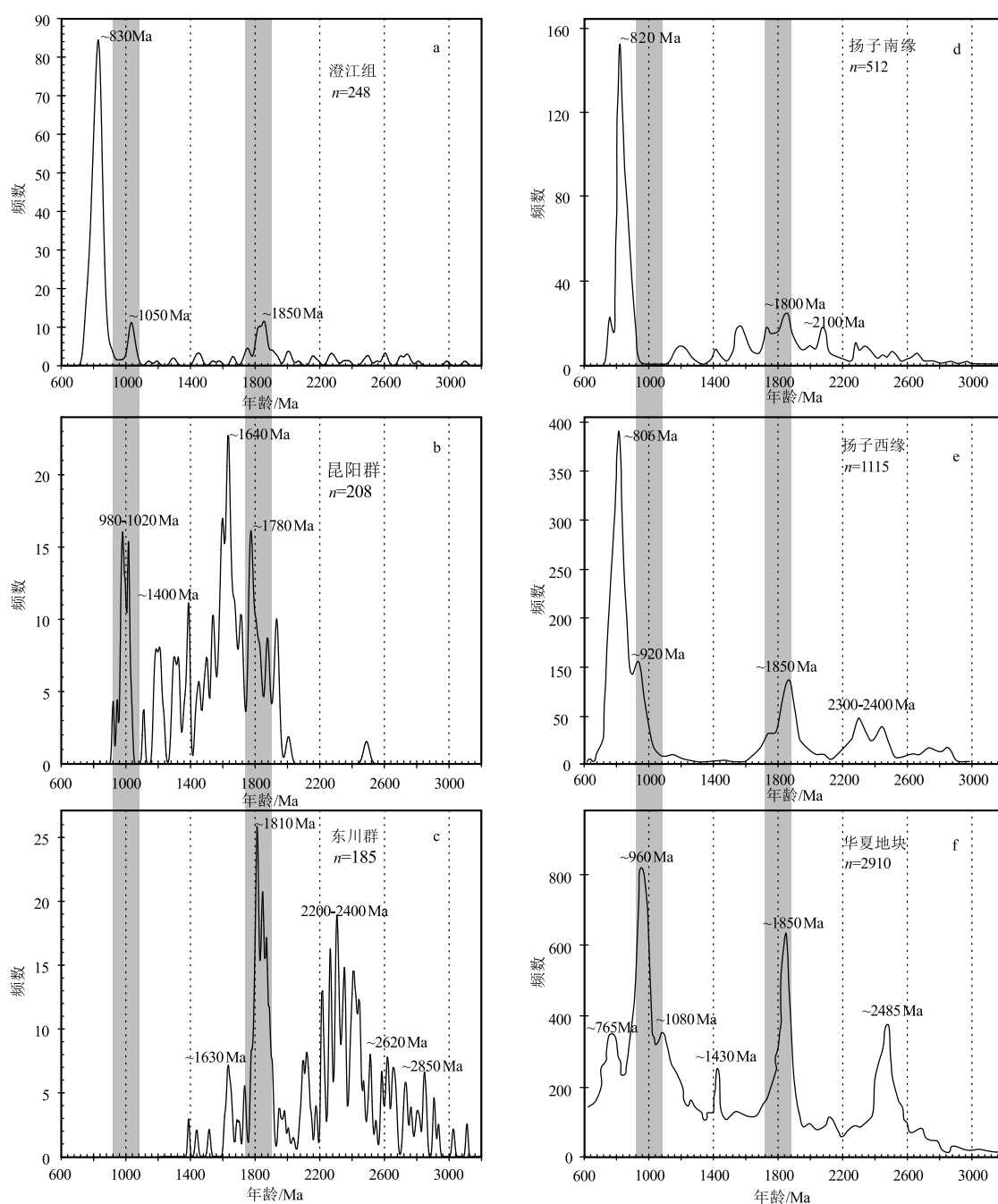


图 5 东川地区澄江组与下伏地层、扬子地块及华夏地块年龄谱对比图

Fig. 5 Comparing U-Pb age spectra of detrital zircons from the Chengjiang Formation in the Dongchuan area with its underlying strata, Yangtze Block and Cathaysia Block

a—澄江组碎屑锆石年龄谱, 数据据参考文献[9]及本研究; b—昆阳群碎屑锆石年龄谱, 数据据参考文献[9]及本研究; c—东川群碎屑锆石年龄谱, 数据据参考文献[9]; d—扬子南缘锆石年龄谱^[58]; e—扬子西缘锆石年龄谱^[58]; f—华夏地块锆石年龄谱^[30]

组同期的沉积地层下江群、丹洲群和板溪群的碎屑锆石未见明显的约 1000 Ma 的峰值^[23, 42, 53-57], 指示其主要物源并非来自华夏地块。而研究区位于南华盆地的西部, 也不可能直接接受来自华夏古陆的碎屑补

给。扬子西缘澄江组沉积相特征显示自西向东的古流向^[4], 也说明澄江组不会接受来自东部的物源。在与下伏地层的碎屑锆石年龄谱对比图(图 5)中, 昆阳群出现显著的 980~1020 Ma 的峰值, 但其主要峰

值约 1640 Ma 在澄江组中并未出现。因此,也排除昆阳群为澄江组碎屑物质提供物源的可能。

尽管在罗迪尼亚超大陆重建模型中,与扬子西缘相邻的陆块都可能成为格林威尔期碎屑锆石的物源。然而,本文澄江组中约 1000 Ma 的碎屑锆石晶体完整、自形程度高(图 3),指示了较短的搬运距离及较低程度的磨蚀作用,所以这些碎屑物质应来自于附近扬子地块西缘同时期的火成岩。

4.2.3 约 1850 Ma 的年龄

澄江组底部碎屑锆石约 1800 Ma 的峰值记录了 Columbia 超大陆裂解事件。扬子地块约 1800 Ma 的岩浆记录主要集中在扬子核部,崆岭杂岩中发育约 1.85 Ga 的花岗岩和基性岩脉,它们形成于由碰撞挤压向伸展作用的构造转换背景,是 Columbia 超大陆裂解前期的响应^[59-60]。尽管约 1.8 Ga 的岩浆岩在扬子西缘出露较少,但是与 Columbia 超大陆裂解有关的岩浆记录在扬子西缘广泛存在,康定群中发现原岩年龄为 1.87 Ga 的麻粒岩^[61],大红山群、东川群及河口群中普遍发育 1.68~1.74 Ga 的变火山岩^[11, 14, 62-65],河口群及通安组中均可见约 1.7 Ga 的基性岩脉(墙)^[65-66],这些岩浆记录是 Columbia 超大陆裂解在扬子西缘的响应^[10-11]。值得注意的是,扬子西缘前寒武纪地层碎屑锆石年龄谱的特征普遍具有约 1.8 Ga 的峰值^[10, 12, 67],这些碎屑锆石被认为来源于扬子地块之外或是扬子西缘未出露的基底^[11, 58]。

本次研究中,澄江组约 1.85 Ga 的碎屑锆石呈半自形次圆状(图 3),说明经历了一定距离的搬运或沉积再循环过程。与下伏地层碎屑锆石年龄谱对比结果显示,东川群具有显著的约 1.8 Ga 的峰值,与澄江组 1.85 Ga 的峰值对应,而东川群其他次级峰值或年龄组在澄江组中也有相应体现(图 5-c)。同时,东川地区澄江组 1.8 Ga 左右的碎屑锆石多具有负的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值,且分布范围与东川群极相似(图 6)。由此判断,澄江组中约 1.85 Ga 的碎屑锆石应来自东川群,即研究区的基底地层东川群为澄江组提供了部分物源。

4.2.4 2.4~2.7 Ga 的年龄

东川地区澄江组底部碎屑锆石发现 3 个早古元古代—新太古代岩浆锆石年龄,证明了古老地壳物质的存在。扬子地块已出露的太古宙基底主要分布在扬子北缘,但越来越多的研究表明,扬子地块广泛存在太古宙基底^[68-70]。碎屑锆石统计进一步发现,2.7~2.6 Ga 的岩浆事件在整个扬子地块普遍存在^[69],在扬子西缘东川群、大红山群和昆阳群碎屑锆石中均有显著的约 2.7 Ga 的岩浆记录^[10, 64]。最近的研究在扬子西南缘元江地区发现了约 2.36 Ga 的花岗岩,证实扬子西缘存在早古元古代地质体^[71]。因此,扬子西缘及北缘已有的古老地质体及早期地层是澄江组可能的物源。

莲沱组具有扬子地块约 2000 Ma、2500 Ma 的

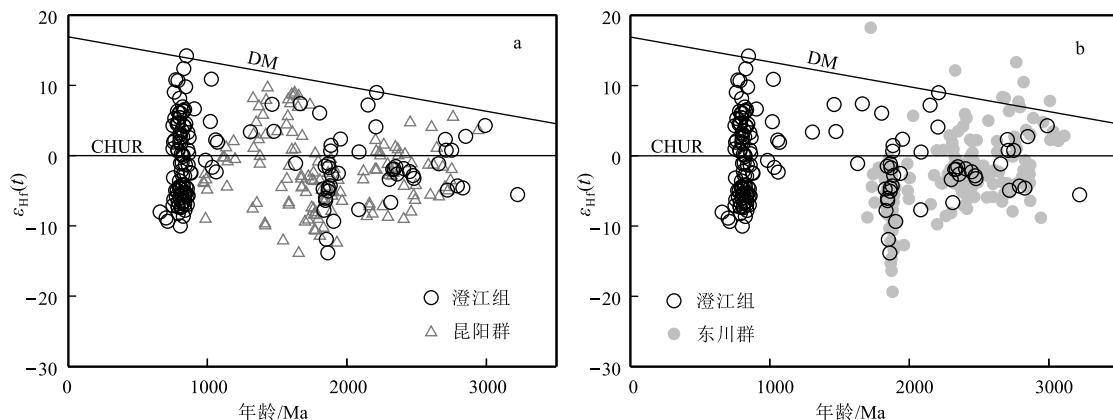


图 6 扬子西南缘澄江组、昆阳群和东川群碎屑锆石 U-Pb 年龄与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系对比图

(澄江组、昆阳群数据据参考文献[9]及本研究;东川群数据据参考文献[9])

Fig. 6 Comparison of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ vs. U-Pb age for the detrital zircons of the Chengjiang Formation, Kunyang

Group and Dongchuan Group in the southwestern Yangtze

a—澄江组与昆阳群 U-Pb 年龄与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系对比图; b—澄江组与东川群 U-Pb 年龄与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系对比图;

DM—亏损地幔; CHUR—球粒陨石

典型年龄峰值(图 7),其物源为扬子北缘的鄂中古陆^[57]。这一特征在东川地区澄江组中并未出现,说明两者来自于不同的物源区。因此,扬子北缘为澄江组提供物源的可能性极小。研究区澄江组 2.4~2.7 Ga 的锆石颗粒呈次圆状,形态特征与 1.85 Ga 左右的锆石相似(图 3),暗示它们可能经历了同一沉积过程。如前所述,东川地区澄江组的部分物源来自东川群,东川群最主要的峰值对应澄江组约 1.85 Ga 的次级峰值,大于 2.0 Ga 的次级年龄峰值对应澄江组少量出现的古元古代—太古宙年龄分布特征(图 5),这种对应关系也与东川群提供少量物源的结论呼应。由此推测,2.4~2.7 Ga 的锆石主要来源仍为东川群。

综合以上分析,东川地区澄江组底部砂岩的沉积物源主要为扬子地块西缘新元古代的岩浆岩,其次为东川群。

4.3 区域对比及构造意义

扬子西缘东川地区澄江组碎屑锆石的 U-Pb 年龄,揭示了扬子西缘在 1.1~1.8 Ga、1.9~2.3 Ga、2.5~2.8 Ga 和 2.9~3.2 Ga 的地壳生长事件,以及 780~900 Ma(新元古代)、约 1.0 Ga(晚中元古代)、1.8~2.0 Ga(晚古元古代)几期重要的岩浆事件(图 4、图 8)。

研究表明,在新元古代拼合事件之前,扬子西缘与北缘具有不同的地壳演化历史,两者属于各自独立的陆块,而扬子东南缘兼有两者的特点^[15]。近年,在扬子北缘和西缘均发现了代表残余洋壳的蛇绿岩带^[46, 73],并在蛇绿岩伴生的地质体中获得了 1.0 Ga 左右的成岩年龄^[46, 74],暗示扬子地块在早新元古代存在内部微陆块之间的拼合事件。在扬子地块南华纪早期地层对比中,扬子西缘澄江组约 1.0 Ga 和约 1.8 Ga 的年龄峰值,在扬子北缘的莲沱组及扬子东南缘的下江群(及相当地层)中并未出现,扬子北缘莲沱组中明显的约 2.0 Ga 和约 2.5 Ga 的峰值也仅在扬子东南缘的下江群有所显示(图 7)。澄江组 Hf 模式年龄(T_{DM2})反映扬子西缘存在显著的 1.9~2.3 Ga 的地壳增长(图 8),而莲沱组中相应的记录十分微弱^[23]。这些证据说明,扬子西缘与北缘在新元古代之前具有不同的基底组成和地壳演化历史,支持了扬子地块可能存在多个独立次级块体的观点。

值得关注的是,扬子西缘不同地区澄江组的年龄谱对比显示,大于 1000 Ma 的锆石年龄分布特征

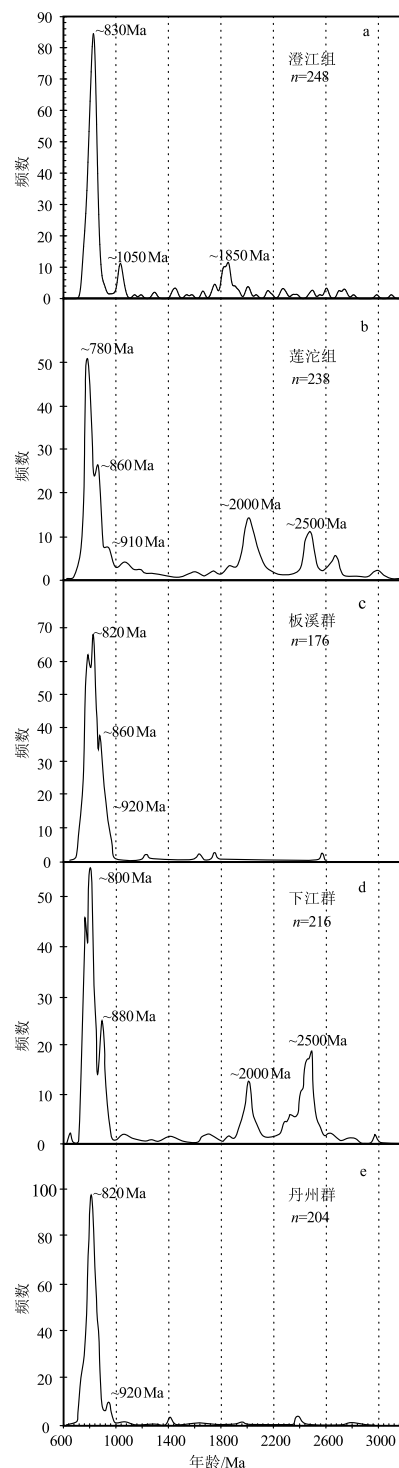


图 7 扬子西南缘澄江组及相当地层碎屑锆石年龄分布图
Fig. 7 U-Pb age spectra of detrital zircons from the Chengjiang Formation and its equivalent strata in the southwestern Yangtze Block
a—澄江组,数据据参考文献[9]及本研究;b—莲沱组,年龄谱据参考文献[72];c—板溪群,年龄谱据参考文献[72];d—下江群,年龄谱据参考文献[54];e—丹州群碎屑锆石年龄分布图,年龄谱据参考文献[72]

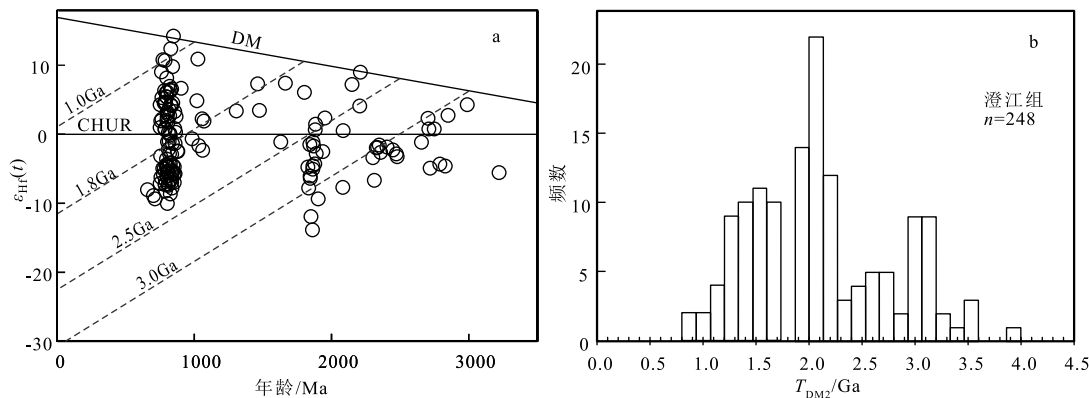


图8 扬子西南缘澄江组碎屑锆石 Hf 同位素模式年龄分布直方图

Fig. 8 Histogram of zircon Hf model ages for the detrital zircons of the Chengjiang Formation in the southwestern Yangtze
a—澄江组碎屑锆石 U-Pb 年龄与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系图; b—澄江组 Hf 同位素模式年龄 (T_{DM2}) 分布直方图;

DM—亏损地幔; CHUR—球粒陨石

差别较大,东川地区小江农场澄江组底部碎屑锆石有明显的约 1000 Ma 和约 1800 Ma 的峰值,而这 2 个峰值在滇中晋宁和建水地区的澄江组中并未出现^[75-76],说明不同地区的澄江组物源组成仍存在一定的差异。澄江组分布区典型的断裂为近东西向的菜子园-踩马水-麻塘断裂和南北向的小江断裂,这些主断裂及次级断裂将区域地壳分隔成多个相对独立的小盆地,各盆地之间基底的出露和剥蚀情况不同,造成澄江组碎屑组成之间的差异。为此,扬子西缘古地理格局在一定程度上影响了澄江组的物源组成。

5 结 论

(1) 东川地区小江农场澄江组底部砂岩中碎屑锆石的年龄谱具有 780~900 Ma、约 1000 Ma、约 1800 Ma 的峰值,反映了区域新元古代、晚中元古代、晚古元古代的岩浆事件。最年轻的碎屑锆石年龄加权平均值为 801 ± 5 Ma ($n=9$),结合前人的研究成果,认为扬子西缘澄江组的沉积时限为 800~725 Ma。

(2) 根据澄江组的碎屑锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成对比结果,结合锆石形态及古地理特征,认为东川地区澄江组底部砂岩的碎屑物质主要来自扬子地块西缘新元古代火成岩的剥蚀,其次为基底地层东川群的沉积再循环。

(3) 通过扬子地块南华纪早期地层的区域对比发现,扬子西缘与北缘在新元古代之前可能具有不

同的地壳演化历史。扬子西缘不同地区澄江组之间存在物源差异,与区域构造活动密切相关。

致谢: LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年工作得到中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室胡兆初教授的指导,审稿专家的修改意见明显提高了论文质量,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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(10): 1496-1507.
- [3] 崔晓庄, 江新胜, 王剑, 等. 扬子西缘澄江组底部玄武岩形成时代新证据及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2015, 34(1): 1-13.
- [4] 刘石磊, 崔晓庄, 汪长林, 等. 扬子西缘新元古代中期裂谷作用: 来自年代学与沉积学的新证据[J]. 地球科学, 2020, 45(8): 3082-3093.
- [5] 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.
- [6] 刘军平, 夏彩香, 孙柏东, 等. 滇中易门地区新元古代澄江组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 沉积与特提斯地质, 2019, 39(1): 14-21.
- [7] 陆俊泽, 江新胜, 王剑, 等. 滇东北巧家地区新元古界澄江组 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2013, 33(2): 65-71.
- [8] Jing X, Yang Z, Evans D A D, et al. A pan-latitude Rodinia in the Tonian true polar wander frame [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 530. doi.org/10.1016/j.epsl.2019.115880.
- [9] 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.
- [10] Zhao X F, Zhou M F, Li J W, et al. Late Paleoproterozoic to early Mesoproterozoic Dongchuan Group in Yunnan, SW China: Implications for tectonic evolution of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Research*, 2010, 182(1/2): 57–69.
- [11] Chen W T, Zhou M, Zhao X. Late Paleoproterozoic sedimentary and mafic rocks in the Hekou area, SW China: Implication for the reconstruction of the Yangtze Block in Columbia [J]. *Precambrian Research*, 2013, 231: 61–77.
- [12] 李怀坤, 张传林, 姚春彦, 等. 扬子西缘中元古代沉积地层锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(8): 1287–1298.
- [13] 杜利林, 郭敬辉, 耿元生, 等. 扬子西南缘盐边群时代及构造环境: 来自碎屑沉积岩的约束 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 641–672.
- [14] 杨红, 刘福来, 杜利林, 等. 扬子地块西南缘大红山群老厂河组变质火山岩的锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2012, 28(9): 2994–3014.
- [15] Wang L J, Griffin W L, Yu J H, et al. U-Pb and Lu-Hf isotopes in detrital zircon from Neoproterozoic sedimentary rocks in the northern Yangtze Block: Implications for Precambrian crustal evolution [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1261–1272.
- [16] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and Refinement of Zircon U-Pb Isotope and Trace Element Analyses by LA-ICP-MS [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(15): 1535–1546.
- [17] Ludwig K R. Ageochronological toolkit for Microsoft excel [J]. *Isoplot*, 2003, 3: 1–70.
- [18] Hu Z C, Liu Y S, Gao S, et al. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP-MS [J]. *J. Anal. Atom. Spectrom.*, 2012, 27(9): 1391–1399.
- [19] 卓皆文, 江新胜, 王剑, 等. 川西南新元古界开建桥组底部沉凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *矿物岩石*, 2015, 35(1): 91–99.
- [20] Li X H, Li Z X, W Z H, 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.
- [21] 胡世玲, 刘鸿允, 劳秋元. 震旦纪地质年代学新研究 [J]. *地质科学*, 1991, (4): 325–336.
- [22] 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.
- [23] 徐琼, 江拓, 侯林春, 等. 扬子陆块三峡地区莲沱组砂岩中碎屑 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成及其地质意义 [J]. *地球科学*, 2021, 46(4): 1217–1230.
- [24] 王剑, 李献华, Duan Z T, 等. 沧水铺火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及“南华系”底界新证据 [J]. *科学通报*, 2003, 48(16): 1726–1731.
- [25] Liu Y, Yang K, Polat A, et al. Reconstruction of the Cryogenian palaeogeography in the Yangtze Domain: constraints from detrital age patterns [J]. *Geological Magazine*, 2019, 156(7): 1247–1264.
- [26] 高林志, 陈建书, 戴传固, 等. 黔东南地区梵净山群与下江群凝灰岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄 [J]. *地质通报*, 2014, 33(7): 949–959.
- [27] 汪正江, 王剑, 杜秋定, 等. 扬子克拉通内存在太古代成熟陆壳: 来自岩石学、同位素年代学和地球化学证据 [J]. *科学通报*, 2013, 58(17): 1651–1660.
- [28] Lan Z, Li X, Zhu M, et al. A rapid and synchronous initiation of the wide spread Cryogenian glaciations [J]. *Precambrian Research*, 2014, 255: 401–411.
- [29] 高林志, 陆济璞, 丁孝忠, 等. 桂北地区新元古代地层凝灰岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义 [J]. *中国地质*, 2013, 40(5): 1443–1452.
- [30] 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, (6): 543–559.
- [31] Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 196: 51–67.
- [32] 李献华, 李正祥, 周汉文, 等. 川西南关刀山岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd 同位素地球化学——岩石成因与构造意义 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2003, (S2): 60–68.
- [33] Sun W, Zhou M, Yan D, et al. Provenance and tectonic setting of the Neoproterozoic Yanbian Group, western Yangtze Block (SW China) [J]. *Precambrian Research*, 2008, 167: 213–236.
- [34] Du L L, Guo J H, Nutman A P, et al. Implications for Rodinia reconstructions for the initiation of Neoproterozoic subduction at ~ 860 Ma on the western margin of the Yangtze Block: Evidence from the Guandaoshan Pluton [J]. *Lithos*, 2014, 196/197: 67–82.
- [35] 郭春丽, 王登红, 陈毓川, 等. 川西南新元古代花岗质杂岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄、元素和 Nd-Sr 同位素地球化学研究: 岩石成因与构造意义 [J]. *岩石学报*, 2007, 10(10): 2457–2470.
- [36] 耿元生, 杨崇辉, 王新社, 等. 扬子地台西缘结晶基底的时代 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(3): 429–441.
- [37] Meng E, Liu F, Du L, et al. Petrogenesis and tectonic significance of the Baoping granitic and mafic intrusions, southwestern China: Evidence from zircon U-Pb dating and Lu-Hf isotopes, and whole-rock geochemistry [J]. *Gondwana Research*, 2015, 28(2): 800–815.
- [38] Zhou M F, Ma Y X, Yan D P, et al. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Research*, 2006, 144(1/2): 19–38.
- [39] Wu T, Zhou J, Wang X, et al. Identification of ca. 850 Ma high-temperature strongly peraluminous granitoids in southeastern Guizhou Province, South China: A result of early extension along the southern margin of the Yangtze Block [J]. *Precambrian Research*, 2018, 308: 18–34.
- [40] 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(12): 1952–1963.
- [41] 任光明, 庞维华, 孙志明, 等. 四川喜德地区九盘营组变英安岩锆石 U-Pb 年龄: 兼论登相群新认识 [J]. *矿物岩石*, 2016, 36(3): 79–86.
- [42] Wang W, Zhou M. Sedimentary records of the Yangtze Block (South China) and their correlation with equivalent Neoproterozoic sequences on adjacent continents [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 265/266: 126–142.
- [43] 杨崇辉, 耿元生, 杜利林, 等. 扬子地块西缘 Grenville 期花岗岩的

- 厘定及其地质意义[J].中国地质,2009,36(3): 647-657.
- [44] Li Z X, Li X H, Zhou H W, et al. Grenvillian continental collision in South China: new SHRIMP U-Pb zircon results and implications for the configuration of Rodinia[J]. *Geology*, 2002, 30(2): 163-166.
- [45] Wang Y, Zhu W, Huang H, et al. Ca. 1.04 Ga hot Grenville granites in the western Yangtze Block, southwest China [J]. *Precambrian Research*, 2019, 328: 217-234.
- [46] 王生伟, 廖震文, 孙晓明, 等. 会东菜园子花岗岩的年龄、地球化学——扬子地台西缘格林威尔造山运动的机制探讨[J]. *地质学报*, 2013, 87(1): 55-70.
- [47] Zhu W, Zhong H, Li Z, et al. SIMS zircon U-Pb ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of ca. 1.0 Ga mafic dykes and volcanic rocks in the Huili area, SW China: Origin and tectonic significance [J]. *Precambrian Research*, 2016, 273: 67-89.
- [48] Chen W T, Sun W H, Wang W, et al. "Grenvillian" intra-plate mafic magmatism in the southwestern Yangtze Block, SW China [J]. *Precambrian Research*, 2014, 242: 138-153.
- [49] 李怀坤, 张传林, 相振群, 等. 扬子克拉通神农架群锆石和斜锆石 U-Pb 年代学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 673-697.
- [50] 张传恒, 高林志, 武振杰, 等. 滇中昆阳群凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄: 华南格林威尔期造山的证据[J]. *科学通报*, 2007, 52(7): 818-824.
- [51] 尹福光, 孙志明, 白建科. 东川、滇中地区中元古代地层格架[J]. *地质学报*, 2011, 35(1): 49-54.
- [52] Greentree M R, Li Z X, Li X H, et al. Late Mesoproterozoic to earliest Neoproterozoic basin record of the Sibao orogenesis in western South China[J]. *Precambrian Research*, 2006, 151: 79-100.
- [53] Song G, Wang X, Shi X, et al. New U-Pb age constraints on the upper Banxi Group and synchrony of the Sturtian glaciation in South China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(5): 1161-1173.
- [54] Wang L, Griffin W L, Yu J, et al. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks[J]. *Precambrian Research*, 2010, 177: 131-144.
- [55] 魏亚楠, 江新胜, 崔晓庄, 等. 黔东南新元古代清水江组碎屑锆石 U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2015, 35(3): 61-71.
- [56] Wang X, Li X, Li Z, et al. 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*, 2012, 222/223: 386-403.
- [57] 宋芳, 牛志军, 何壹视, 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.
- [58] Zhu G, Yu J, Zhou X, et al. The western boundary between the Yangtze and Cathaysia blocks, new constraints from the Pingbian Group sediments, southwest South China Block [J]. *Precambrian Research*, 2019, 331: 105350.
- [59] 彭敏, 吴元保, 汪晶, 等. 扬子崆岭高级变质地体古元古代基性岩脉的发现及其意义[J]. *科学通报*, 2009, (5): 641-647.
- [60] 熊庆, 郑建平, 余淳梅, 等. 宜昌圈椅墙 A 型花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素与扬子大陆古元古代克拉通化作用[J]. *科学通报*, 2009, 53(22): 2782-2792.
- [61] 刘文中, 徐士进, 王汝成, 等. 攀西麻粒岩锆石 U-Pb 年代学: 新元古代扬子陆块西缘地质演化新证据[J]. *地质论评*, 2005, 51(4): 470-476.
- [62] 王冬兵, 孙志明, 尹福光, 等. 扬子地块西缘河口群的时代: 来自火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据[J]. *地层学杂志*, 2012, 36(3): 630-635.
- [63] 任光明, 庞维华, 孙志明, 等. 扬子西缘会理地区通安组角闪岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2014, 34(2): 33-39.
- [64] Greentree M R, Li Z X. The oldest known rocks in south-western China: SHRIMP U-Pb magmatic crystallisation age and detrital provenance analysis of the Paleoproterozoic Dahongshan Group [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 33(5/6): 289-302.
- [65] 关俊雷, 郑来林, 刘建辉, 等. 四川省会理县河口地区辉绿岩体的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质学报*, 2011, 85(4): 482-490.
- [66] 王冬兵, 尹福光, 孙志明, 等. 扬子陆块西缘古元古代基性侵入岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素及其地质意义[J]. *地质通报*, 2013, 32(4): 617-630.
- [67] Sun W H, Zhou M F, Gao J F, et al. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China[J]. *Precambrian Research*, 2009, 172(1/2): 99-126.
- [68] Zheng J P, Griffin W L, O'Reilly S Y. Widespread Archean basement beneath the Yangtze Craton[J]. *Geology*, 2006, 34(6): 417-420.
- [69] Han P, Guo J, Chen K, et al. Widespread Neoproterozoic (~2.7-2.6 Ga) magmatism of the Yangtze craton, South China, as revealed by modern river detrital zircons[J]. *Gondwana Research*, 2017, 42: 1-12.
- [70] Wang Z J, Wang J, Du Q D, et al. The evolution of the Central Yangtze Block during early Neoproterozoic time: Evidence from geochronology and geochemistry[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 77(21): 31-44.
- [71] Cui X, Wang J, Sun Z, et al. Early Paleoproterozoic (ca. 2.36 Ga) post-collisional granitoids in Yunnan, SW China: Implications for linkage between Yangtze and Laurentia in the Columbia supercontinent[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 169: 308-322.
- [72] 宋高源. 扬子地台东南缘新元古代地层碎屑锆石年龄及其意义[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2017.
- [73] Peng S, Kusky T M, Jiang X F, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Miaowan ophiolite, Yangtze craton: Implications for South China's amalgamation history with the Rodinian supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21: 577-594.
- [74] Shi Y R, Liu D Y, Zhang Z Q, et al. SHRIMP zircon U-Pb dating of Gabbro and Granite from the Huashan Ophiolite, Qinling Orogenic Belt, China: Neoproterozoic Suture on the Northern Margin of the Yangtze Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81: 239-243.
- [75] 魏亚楠. 扬子陆块南部新元古代碎屑锆石 U-Pb 年龄谱及其地质意义[D]. 中国地质大学(武汉)硕士学位论文, 2016.
- [76] 张昆昆. 滇东南建水地区新元古代澄江组碎屑锆石年代学及其地质意义[D]. 中国地质大学(武汉)硕士学位论文, 2016.