

# 闽西南下古生界东坑口组与魏坊组地层层序与物源区特征

## ——来自碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年的约束

肖爱芳, 黎敦朋

XIAO Aifang, LI DUNPENG

福州大学紫金矿业学院, 福建 福州 350108

College of Zijin Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China

**摘要:** 闽西南地区下古生界魏坊组与东坑口组地层层序长期以来一直存在争议。应用 LA-ICP-MS U-Pb 测年, 对闽西南地区下古生界魏坊组与东坑口组进行了 120 颗碎屑锆石的 U-Pb 测年, 获得锆石年龄范围为 506~3431Ma, 主要分布于 511~2796Ma 之间, 主要峰值年龄为 964Ma, 次要峰值年龄为 514Ma, 并存在 813Ma、1231Ma、2483Ma 的次级峰。年龄谱特征显示, 魏坊组沉积早于东坑口组, 东坑口组时代不属于中上寒武世。下古生界物源以 964Ma 峰值为代表, 反映 Grenville 构造热事件的物源最显著。还获得了较丰富的峰值年龄为 514Ma 的泛非期构造热事件年龄, 以及古太古代锆石年龄记录, 为闽西南地区下古生界地层层序的确立和物源研究提供了重要新资料。

**关键词:** 地层层序; 魏坊组, 东坑口组; 碎屑锆石; LA-ICP-MS U-Pb 测年

**中图分类号:** P539.2; P597+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2017)10-1750-10

**Xiao A F, Li D P. Stratigraphic sequence and characteristics of the source area of Lower Paleozoic Weifang Formation and Dongkengkou Formation in southwestern Fujian: Constraints from detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb dating. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(10):1750-1759**

**Abstract:** The stratigraphic sequence of Lower Paleozoic Weifang Formation and Dongkengkou Formation in southwestern Fujian has long been a problem of controversy. In this paper, the authors studied geochronology of 120 detrital zircon samples from the Lower Paleozoic Weifang Formation and Dongkengkou Formation sedimentary rocks in southwestern Fujian by LA-ICP-MS U-Pb dating, and obtained zircon ages ranging from 506Ma to 3431Ma, with most of the data from 511Ma to 2796Ma, the main peak value 964Ma, a secondary peak value 514Ma, and secondary peak values 813Ma, 1231Ma, 2483Ma. Characteristics of the age spectrum suggest that Weifang Formation was deposited earlier than Dongkengkou Formation. Age of Dongkengkou Formation does not belong to Middle-Upper Cambrian. Lower Paleozoic source with peak value at 964Ma most significantly reflects the Grenville tectonic event. The authors also received peak value age of 514Ma of Pan-African tectonic event. In addition, the authors found Paleoproterozoic zircon ages record. Important new information is thus provided for the establishment of Lower Paleozoic stratigraphic sequence; source studies.

**Key words:** stratigraphic sequence; Weifang Formation; Dongkengkou Formation; detrital zircon; LA-ICP-MS U-Pb dating

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年是确定地质体形成时代的重要方法之一。目前对缺少生物化石和火山岩的地层, 尚无其他更好的方法来定年, 但碎

屑锆石 U-Pb 测年的年龄谱特征, 为确定地层形成的顺序和地层时代提供了新的途径。

福建省下古生界分布于政和-大埔断裂以西地

收稿日期: 2016-07-16; 修订日期: 2017-06-12

资助项目: 福建省自然科学基金项目《福建西部早古生代地层层序的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年的约束》(编号: 2014J01157)

作者简介: 肖爱芳(1969-), 女, 硕士, 副教授, 从事地理信息系统教学与年代学等研究。E-mail: xaf@fzu.edu.cn



### 1 下古生界地层划分沿革

福建省位于华夏陆块东南部,以政和-大埔断裂为界,划分为闽东构造带和闽西构造带,闽西构造带以宁化-南平断裂为界划分为闽西北构造带和闽西南构造带(图1-a)<sup>[1]</sup>。闽西南下古生界主要分布于龙岩-永安-三明地区。下古生界这一断代地层最早由王绍文<sup>[7]</sup>创立罗峰溪千枚岩,时代归属中晚奥陶世;1:20万永安幅区域地质调查<sup>①</sup>将该地层命名为罗峰溪群,时代为寒武纪-志留纪;1982年福建区调队在福建省早古生代地层调查研究中,由下至上建立了下中寒武统林田群、上寒武统东坑口群、下奥陶统魏坊群和中上奥陶统罗峰溪群,认为福建省下古生界缺失志留系(图1-b)<sup>②[11-14]</sup>;1988年闽西地质大队在1:5万安砂幅、贡川幅区域地质调查中,由下至上建立了寒武系林田群、下奥陶统魏坊群、中奥陶统东坑口群和上奥陶统罗峰溪群(图1-c)<sup>③[5]</sup>;1995年福建省岩石地层清理将闽西地区的楼子坝群之上和天瓦崇组之下的地层由下至上划分为下中寒武统林田组、上寒武统东坑口组、下奥陶统魏坊组和中上奥陶统罗峰溪组<sup>[3-4]</sup>;《福建省区域地质志》<sup>[4]</sup>对福建省西部下古生界的划分仍维持1997年福建省岩石地层单位清理的划分方案(表1)。

### 2 样品特征与分析方法

#### 2.1 样品特征

用于测年的2个锆石样品采自大湖-李坊的简易公路边,采样位置见图1-b。样品S401采自魏坊村以南约1km的公路边,距离魏坊组层型剖面北约1km,地理坐标为北纬26°05.21'、东经117°18.03',岩

性为灰黄色中厚层变质石英细砂岩,地层层位属于魏坊组中下部,样品位于背斜的西翼,地层向西南倾斜,倾角中等;样品S402采自增布村西南约500m的公路边,距离东坑口组层型剖面西南约1.5km,地理坐标为北纬26°06.48'、东经117°16.14',岩性为灰黑色中层变质石英细砂岩,地层层位属于东坑口组中部,样品位于倒转背斜核部,发育西倾的轴面劈理。

#### 2.2 分析方法

锆石的精选在河北省区域地质调查队实验室完成,锆石显微结构、阴极发光(CL)和LA-ICP-MS U-Pb分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

野外采集约2kg样品,粉碎至80~120目,洗去粉尘,淘洗后使重矿物富集,经过电磁选,去除磁性部分,保留非磁性部分,再经淘洗获得锆石精矿,在双目镜下挑选出无裂隙、透明的锆石单矿物制成胶饼,抛光后进行锆石光学研究和阴极发光照相,最后进行LA-ICP-MS U-Pb分析。其中,阴极发光仪为加载于扫描电镜上的英国Gatan公司的Mono CL3+型阴极荧光探头,LA-ICP-MS分析在Hewlett Packard公司生产的Agilent 7500a ICP-MS和德国Lambda Physik公司的ComPex102 Excimer激光器工作物ArF(波长193nm)、MicroLas公司的GeoLas 200 M光学系统的联机上进行。激光束斑直径约为30 μm,激光剥蚀样品的深度为20~40 μm。实验中采用氦气作为剥蚀物质的载气,用人工合成的硅酸盐玻璃标准参考物质NIST SRM610进行仪器最佳化。锆石年龄测定采用标准锆石91500作为外标标准物质,元素含量测定采用

表1 福建下古生界地层划分沿革  
Table 1 Lower Paleozoic strata division history of Fujian

地质年代		1:20万永安幅区调(1965) <sup>①</sup>	福建区调队(1982) <sup>②</sup> 李兼海等(1983) <sup>[4]</sup>		1:5万贡川幅、安砂幅区调(1988) <sup>③</sup> 朱玉磷等(1989) <sup>[5]</sup>		福建省地矿局 (1997) <sup>[5]</sup>		本文
志留系	上统	罗峰溪群	第八段						
	中统		第七段						
	下统		第六段		罗峰	上段	罗峰溪组		罗峰
奥陶系	上统	罗峰溪群	第五段		溪群	下段	东坑口组		溪组
	中统		第四段		魏坊群		魏坊组		魏坊组
寒武系	下统	罗峰溪群	第三段		东坑口群		东坑口组		
	上统		第二段		林田组	上段	林田组		林田组
	中统		第一段			下段			

NIST SRM610 作为外标,  $^{29}\text{Si}$  作为内标, 详细分析步骤和数据处理方法见参考文献[8]。同位素比值数据处理采用 GLITTER (4.0 版) 软件, 年龄计算及成图采用 Isoplot (3.0 版) 软件进行。

### 3 分析结果

用于测年的锆石一般呈黄褐色, 晶形以半自形短柱状和椭圆状为主, 少数呈圆状, 部分锆石形态破碎; 锆石长度一般为  $80\sim 300\ \mu\text{m}$ , 绝大部分颗粒长度为  $100\sim 150\ \mu\text{m}$ , 长宽比在  $1:1\sim 2.5:1$  之间。锆石 CL 图像表明, 大部分锆石内部呈现振荡环带结构, 暗示为岩浆成因锆石<sup>[9]</sup>; 少数锆石内部结构比较均一, 无明显环带构造, 可能为变质锆石; 未见具有核幔构造的锆石(图2)。

#### 3.1 魏坊组碎屑锆石测年结果

对魏坊组样品 S401 中的 60 颗锆石进行 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析, 结果如表 2、图 3-a 及图 4-a 所示。锆石  $^{232}\text{Th}$  含量为  $43.1\times 10^{-6}\sim 811.2\times 10^{-6}$ ,  $^{238}\text{U}$  含量为  $49.8\times 10^{-6}\sim 1401.3\times 10^{-6}$ , Th/U 值为  $0.11\sim 1.85$ , 大部分 Th/U 值为  $0.32\sim 0.98$ 。60 颗锆石均获得谐和年龄(对年龄值小于 1Ga 的锆石取其  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄, 对年龄值大于 1Ga 的锆石取其  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 谐和度 =  $100\times$  年龄( $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ )/年龄( $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ), 谐和度在  $90\sim 110$  之间的年龄为谐和年龄, 下同)。由年龄直方图(图 4-a)可以看出, 形成  $500\sim 550\text{Ma}$  和  $950\sim 1000\text{Ma}$  的主要年龄峰, 以及  $600\sim 650\text{Ma}$ 、

$750\sim 800\text{Ma}$ 、 $950\sim 1000\text{Ma}$  和  $2450\sim 2500\text{Ma}$  的次级年龄峰; 由碎屑锆石年龄谱(图 4-a)可以看出, 形成  $514\text{Ma}$  的主要年龄峰, 以及  $620\text{Ma}$ 、 $784\text{Ma}$ 、 $983\text{Ma}$  和  $2502\text{Ma}$  的次级年龄峰。年龄最小的 1 颗锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $511.5\pm 6.5\text{Ma}$ ; 5 颗锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $511.5\pm 6.5\sim 516.2\pm 10.9\text{Ma}$ , 年龄加权平均值为  $513.9\pm 5.7\text{Ma}$ ; 年龄大于 3Ga 的锆石有 2 颗, 最老的锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为  $3431.9\pm 39.3\text{Ma}$ 。碎屑锆石的最小年龄  $511.5\pm 6.5\text{Ma}$  属于中寒武世, 早于魏坊组的沉积时代早奥陶世, 并显示碎屑锆石的主要年龄峰集中在  $514\text{Ma}$  和  $983\text{Ma}$ , 暗示物源主要为泛非构造层和罗迪尼亚构造层。

#### 3.2 东坑口组碎屑锆石测年结果

对东坑口组样品 S402 中的 60 颗锆石进行了 LA-ICP-MS U-Pb 测年分析, 结果如表 3、图 3-b 及图 4-b 所示。锆石  $^{232}\text{Th}$  含量为  $21.5\times 10^{-6}\sim 609.9\times 10^{-6}$ ,  $^{238}\text{U}$  含量为  $49.7\times 10^{-6}\sim 1659.6\times 10^{-6}$ , Th/U 值为  $0.02\sim 1.54$ , 一般 Th/U 值为  $0.31\sim 0.99$ 。60 颗锆石均获得谐和年龄。由年龄直方图(图 4-b)可以看出, 形成了  $900\sim 1050\text{Ma}$  的主要年龄峰, 以及  $1150\sim 1300\text{Ma}$  的次级年龄峰; 由碎屑锆石年龄谱(图 4-b)可以看出, 形成了  $964\text{Ma}$  的主要年龄峰, 以及  $912\text{Ma}$ 、 $1231\text{Ma}$ 、 $1862\text{Ma}$  和  $2449\text{Ma}$  的次级年龄峰。年龄最小的 1 颗锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $506.7\pm 4.3\text{Ma}$ , 3 颗锆石  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  年龄为  $506.7\pm 4.3\text{Ma}$ 、 $541.1\pm 5.0\text{Ma}$ 、 $561.0\pm 5.0\text{Ma}$ , 最老的锆石  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄为

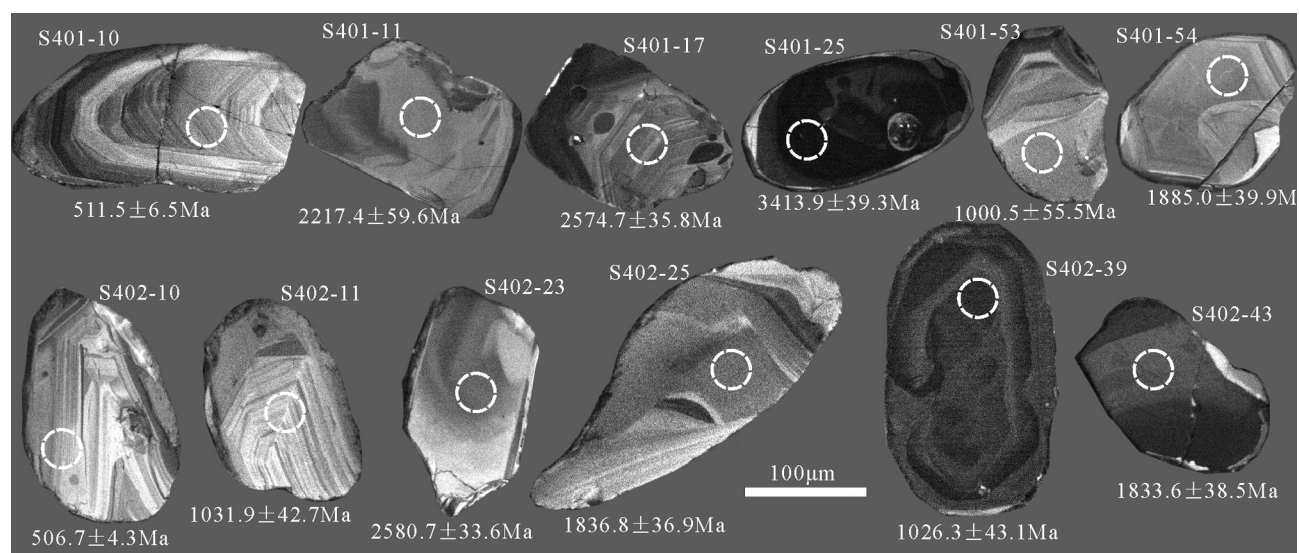


图2 碎屑锆石阴极发光图像及年龄

Fig. 2 Detrital zircons cathodoluminescence photos and ages

表2 魏坊组碎屑锆石(S401)U-Th-Pb测年结果  
Table 2 U-Th-Pb dating results of detrital zircons from Weifang Formation (S401)

样品号 与测点	<sup>232</sup> Th /10 <sup>-6</sup>	<sup>238</sup> U /10 <sup>-6</sup>	Th/U	Pb* /10 <sup>-6</sup>	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		谐和 度
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/ Ma	1σ	年龄/ Ma	1σ	年龄/ Ma	1σ	
401-01	811.2	1358.6	0.60	25.0	0.0854	0.0018	0.2070	0.0019	2.4401	0.0296	1324.9	41.3	1212.8	10.2	1254.5	8.7	103
401-02	544.4	1401.3	0.39	24.8	0.0923	0.0019	0.2573	0.0023	3.2772	0.0315	1473.7	38.1	1475.8	11.6	1475.7	7.5	100
401-03	393.7	973.3	0.40	37.5	0.0739	0.0063	0.1749	0.0048	1.7837	0.1475	1039.1	162.6	1038.9	26.3	1039.5	53.8	100
401-04	361.1	748.5	0.48	28.6	0.2798	0.0056	0.6627	0.0059	25.5875	0.2310	3361.9	30.8	3277.6	22.8	3330.9	8.8	102
401-05	117.5	137.9	0.85	25.1	0.0661	0.0022	0.1296	0.0015	1.1820	0.0324	809.6	67.5	785.5	8.8	792.2	15.1	101
401-06	104.7	236.3	0.44	29.0	0.1819	0.0038	0.4996	0.0048	12.5372	0.1373	2669.8	34.0	2612.3	20.8	2645.5	10.3	101
401-07	573.7	424.3	1.35	24.6	0.0965	0.0022	0.2729	0.0027	3.6354	0.0487	1558.2	41.3	1555.6	13.4	1557.3	10.7	100
401-08	57.6	58.5	0.98	27.1	0.0638	0.0040	0.1204	0.0024	1.0599	0.0629	735.0	127.5	732.9	13.8	733.8	31.0	100
401-09	125.5	394.7	0.32	28.6	0.1282	0.0029	0.3475	0.0035	6.1474	0.0824	2073.8	38.6	1922.4	16.9	1997.0	11.7	104
401-10	187.8	101.4	1.85	24.3	0.0593	0.0025	0.0826	0.0011	0.6761	0.0254	579.4	89.0	511.5	6.5	524.4	15.4	103
401-11	213.1	1082.3	0.20	47.3	0.1392	0.0049	0.3986	0.0076	7.6565	0.2420	2217.4	59.6	2162.7	35.2	2191.5	28.4	101
401-12	127.9	1153.8	0.11	24.6	0.0655	0.0014	0.1332	0.0012	1.2044	0.0142	791.4	44.5	806.2	6.8	802.6	6.5	100
401-13	106.5	145.0	0.73	35.2	0.0858	0.0071	0.0999	0.0028	1.1814	0.0930	1332.7	151.5	613.5	16.5	791.9	43.3	129
401-14	286.2	462.1	0.62	24.4	0.0704	0.0016	0.1565	0.0015	1.5200	0.0219	940.7	46.8	937.0	8.2	938.5	8.8	100
401-15	97.1	169.1	0.57	29.9	0.1686	0.0037	0.4668	0.0050	10.8578	0.1447	2544.0	36.6	2469.3	21.9	2511.0	12.4	102
401-16	159.8	424.0	0.38	24.8	0.0614	0.0017	0.0986	0.0010	0.8345	0.0174	652.2	58.5	606.0	5.9	616.1	9.6	102
401-17	40.3	125.4	0.32	31.0	0.1718	0.0037	0.4746	0.0049	11.2443	0.1404	2574.7	35.8	2503.7	21.4	2543.6	11.7	102
401-18	265.4	508.4	0.52	26.1	0.0962	0.0022	0.2540	0.0025	3.3721	0.0463	1552.5	42.0	1459.1	12.7	1497.9	10.7	103
401-19	100.9	634.0	0.16	25.4	0.0703	0.0016	0.1556	0.0014	1.5079	0.0199	935.7	45.4	932.3	8.0	933.6	8.1	100
401-20	559.3	954.1	0.59	24.7	0.0735	0.0017	0.1676	0.0016	1.6999	0.0229	1028.3	45.1	999.0	8.6	1008.5	8.6	101
401-21	168.1	99.1	1.70	25.4	0.0700	0.0029	0.1533	0.0022	1.4797	0.0539	928.2	81.9	919.2	12.4	922.1	22.1	100
401-22	87.8	75.1	1.19	27.0	0.0965	0.0027	0.2654	0.0032	3.5329	0.0768	1557.5	52.0	1517.5	16.4	1534.6	17.2	101
401-23	499.0	399.9	1.25	26.9	0.1603	0.0033	0.4482	0.0041	9.9093	0.1008	2458.7	34.6	2387.2	18.3	2426.4	9.4	102
401-24	85.1	139.2	0.61	30.9	0.1964	0.0044	0.5363	0.0060	14.5301	0.1987	2796.7	36.0	2767.9	25.1	2785.0	13.0	101
401-25	130.1	181.3	0.72	34.6	0.2927	0.0075	0.6352	0.0109	25.6408	0.5335	3431.9	39.3	3170.0	42.9	3332.9	20.3	105
401-26	236.8	269.4	0.88	23.7	0.0576	0.0018	0.0831	0.0009	0.6597	0.0165	512.8	67.6	514.6	5.3	514.4	10.1	100
401-27	155.0	84.9	1.83	25.2	0.0578	0.0047	0.0834	0.0018	0.6651	0.0522	523.6	170.2	516.2	10.9	517.7	31.9	100
401-28	89.7	166.0	0.54	26.2	0.0752	0.0021	0.1773	0.0020	1.8377	0.0398	1072.7	56.1	1052.1	10.8	1059.0	14.3	101
401-29	344.6	793.5	0.43	24.5	0.0673	0.0015	0.1290	0.0012	1.1964	0.0157	845.8	46.2	782.1	6.7	798.9	7.3	102
401-30	262.8	438.5	0.60	24.4	0.0713	0.0017	0.1621	0.0015	1.5934	0.0233	965.1	47.2	968.5	8.5	967.6	9.1	100
401-31	185.9	315.4	0.59	25.2	0.0686	0.0019	0.1473	0.0016	1.3927	0.0291	886.1	56.7	885.5	8.8	885.8	12.4	100
401-32	52.7	91.9	0.57	30.6	0.1754	0.0040	0.5007	0.0056	12.1115	0.1722	2609.9	37.4	2616.7	24.0	2613.1	13.3	100
401-33	316.4	102.9	3.07	29.7	0.1482	0.0049	0.4175	0.0075	8.5348	0.2433	2325.6	55.0	2249.2	33.9	2289.6	25.9	102
401-34	508.0	1120.5	0.45	32.4	0.1616	0.0040	0.4379	0.0052	9.7563	0.1598	2472.2	40.2	2341.0	23.5	2412.0	15.1	103
401-35	525.6	1112.5	0.47	26.2	0.1657	0.0035	0.4539	0.0043	10.3714	0.1115	2514.7	35.2	2412.3	18.9	2468.5	10.0	102
401-36	161.7	109.5	1.48	28.5	0.1655	0.0040	0.4759	0.0055	10.8622	0.1683	2512.8	39.1	2509.3	24.2	2511.4	14.4	100
401-37	346.8	592.0	0.59	24.6	0.0727	0.0017	0.1650	0.0015	1.6544	0.0225	1005.8	45.9	984.6	8.5	991.2	8.6	101
401-38	362.6	507.7	0.71	24.3	0.0721	0.0017	0.1684	0.0016	1.6730	0.0235	987.6	46.5	1003.1	8.7	998.3	8.9	100
401-39	34.1	77.0	0.44	27.0	0.0661	0.0026	0.1344	0.0018	1.2250	0.0425	809.7	80.8	812.8	10.2	812.0	19.4	100
401-40	215.1	193.6	1.11	27.0	0.0881	0.0026	0.2221	0.0027	2.6973	0.0608	1383.7	54.9	1293.1	14.0	1327.7	16.7	103
401-41	80.8	89.2	0.91	31.7	0.1748	0.0045	0.4879	0.0066	11.7608	0.2215	2604.3	42.0	2561.5	28.7	2585.5	17.6	101
401-42	43.1	138.1	0.31	31.9	0.1591	0.0036	0.4571	0.0049	10.0269	0.1401	2446.0	38.2	2426.6	21.8	2437.3	12.9	100

续表 2

样品号 与测点	<sup>232</sup> Th /10 <sup>-6</sup>	<sup>238</sup> U /10 <sup>-6</sup>	Th/U	Pb* /10 <sup>-6</sup>	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		谐和 度
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	
401-43	142.4	257.3	0.55	29.4	0.0878	0.0030	0.2223	0.0031	2.6923	0.0776	1379.1	64.3	1293.9	16.3	1326.3	21.4	103
401-44	170.3	641.9	0.27	25.6	0.07400	0.0017	0.1652	0.0016	1.6843	0.0236	1040.4	46.3	985.4	8.6	1002.6	8.9	102
401-45	87.2	201.4	0.43	29.8	0.1891	0.0041	0.5261	0.0052	13.7192	0.1574	2734.5	35.1	2725.0	21.8	2730.5	10.9	100
401-46	671.8	681.7	0.99	23.5	0.0573	0.0017	0.0830	0.0009	0.6558	0.0153	503.8	65.3	513.8	5.2	512.0	9.4	100
401-47	159.2	157.4	1.01	26.2	0.0645	0.0032	0.1261	0.0020	1.1221	0.0513	759.3	101.7	765.5	11.7	764.0	24.5	100
401-48	60.1	49.8	1.21	30.6	0.1600	0.0042	0.4543	0.0061	10.023	0.1935	2455.8	43.5	2414.3	27.0	2436.9	17.8	101
401-49	96.2	172.8	0.56	29.2	0.1026	0.0029	0.2954	0.0036	4.1773	0.0876	1671.2	50.6	1668.3	17.9	1669.6	17.2	100
401-50	106.6	132.8	0.80	26.6	0.0894	0.0024	0.2436	0.0027	3.0032	0.0571	1413.2	50.0	1405.3	13.8	1408.4	14.5	100
401-51	233.1	235.0	0.99	29.2	0.0885	0.0036	0.2268	0.0038	2.7667	0.1018	1392.7	76.9	1317.8	19.9	1346.6	27.4	102
401-52	326.7	190.7	1.71	25.6	0.0598	0.0040	0.0832	0.0016	0.6863	0.0432	597.1	138.1	515.2	9.5	530.6	26.0	103
401-53	138.1	234.4	0.59	25.8	0.0725	0.0020	0.1628	0.0017	1.6277	0.0337	1000.5	55.5	972.3	9.6	981.0	13.0	101
401-54	158.4	317.4	0.50	27.2	0.1153	0.0026	0.3366	0.0032	5.3517	0.0671	1885.0	39.9	1870.1	15.6	1877.2	10.7	100
401-55	352.0	1165.1	0.30	24.1	0.0622	0.0014	0.1010	0.0009	0.8658	0.0117	679.6	48.8	620.4	5.4	633.3	6.4	102
401-56	185.8	262.2	0.71	26.8	0.1075	0.0025	0.3045	0.0030	4.5132	0.0598	1757.5	41.2	1713.5	14.6	1733.4	11.0	101
401-57	194.4	406.6	0.48	25.8	0.0741	0.0019	0.1705	0.0017	1.7413	0.0312	1043.2	51.6	1015.0	9.5	1024.0	11.6	101
401-58	123.0	345.8	0.36	26.3	0.0719	0.0020	0.1526	0.0016	1.5120	0.0230	982.1	54.8	915.5	8.9	935.3	12.1	102
401-59	368.9	579.1	0.64	24.2	0.0622	0.0020	0.1120	0.0012	0.9594	0.0242	679.5	66.1	684.1	6.8	683.0	12.5	100
401-60	539.5	586.7	0.92	25.6	0.0758	0.0022	0.1696	0.0019	1.7720	0.0393	1089.0	57.4	1010.0	10.4	1035.2	14.4	102

注: Pb\*为放射性成因铅(Pb\*=0.241\*<sup>206</sup>Pb+0.221\*<sup>207</sup>Pb+0.524\*<sup>208</sup>Pb), 谐和度=100×年龄(<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U)/年龄(<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U)

2671.7±33.4Ma。碎屑锆石的最小年龄为 506.7±4.3Ma, 属于中寒武世<sup>[10]</sup>, 大于东坑口组的沉积年龄, 并显示碎屑锆石的主要年龄峰集中在 964Ma, 暗示物源主要为罗迪尼亚构造层。

## 4 讨论

### 4.1 魏坊组与东坑口组形成时限与地层层序

沉积盆地中碎屑锆石的沉积序列与物源区的

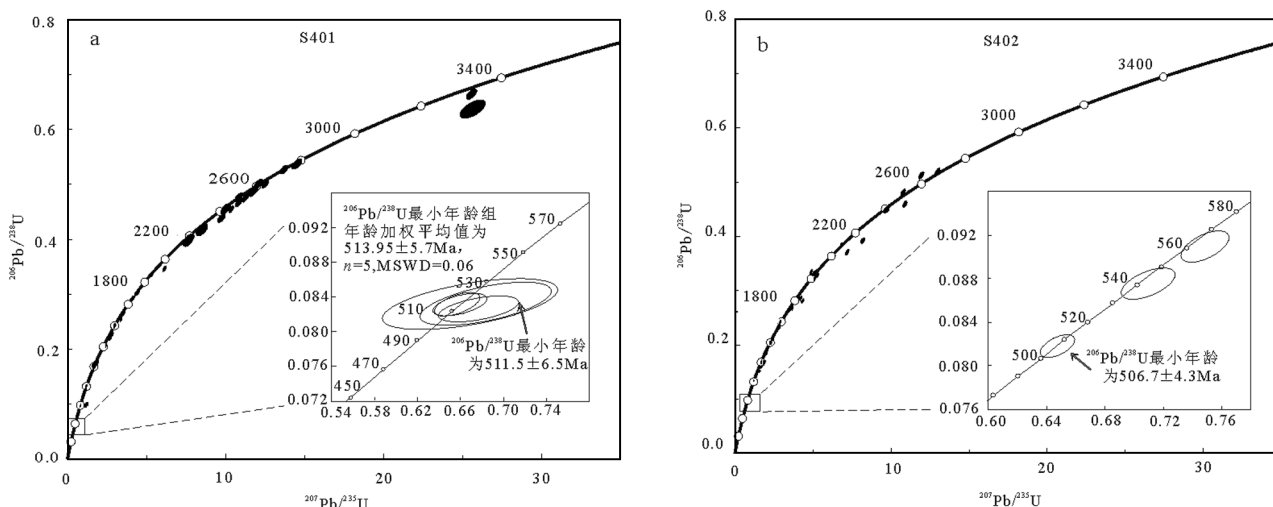


图 3 测年结果谐和图

Fig. 3 Concordia diagrams of dating results

表3 东坑口组碎屑锆石(S402)U-Th-Pb测年结果  
Table 3 U-Th-Pb dating results of detrital zircons from Dongkengkou Formation (S402)

样品号 与测点	<sup>232</sup> Th /10 <sup>-6</sup>	<sup>238</sup> U /10 <sup>-6</sup>	Th/U	Pb* /10 <sup>-6</sup>	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		谐和度
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	
402-01	219.4	399.7	0.55	27.0	0.1577	0.0032	0.4495	0.0039	9.7728	0.0864	2430.8	33.8	2392.8	17.3	2413.6	8.1	101
402-02	143.2	835.6	0.17	25.8	0.0789	0.0016	0.1705	0.0015	1.8559	0.0173	1170.7	39.9	1014.7	8.1	1065.5	6.2	105
402-03	133.2	660.1	0.20	24.7	0.0706	0.0015	0.1535	0.0014	1.4937	0.0157	944.9	42.5	920.5	7.5	927.8	6.4	101
402-04	109.5	135.2	0.81	25.7	0.1034	0.0022	0.2890	0.0026	4.1200	0.0424	1685.4	38.0	1636.7	12.9	1658.3	8.4	101
402-05	609.9	480.6	1.27	25.1	0.0988	0.0020	0.2723	0.0024	3.7106	0.0346	1602.1	37.6	1552.4	12.0	1573.7	7.5	101
402-06	196.4	527.6	0.37	26.7	0.1517	0.0031	0.3921	0.0034	8.2014	0.0756	2365.1	34.3	2132.4	15.9	2253.5	8.3	106
402-07	97.9	235.4	0.42	26.6	0.1074	0.0022	0.2870	0.0026	4.2490	0.0440	1755.5	37.7	1626.2	12.9	1683.5	8.5	104
402-08	53.7	111.0	0.48	27.3	0.0757	0.0021	0.1521	0.0017	1.5880	0.0336	1087.0	55.1	912.9	9.2	965.5	13.2	106
402-09	61.4	170.0	0.36	24.8	0.0714	0.0016	0.1574	0.0014	1.5487	0.0196	967.4	44.6	942.3	8.0	950.0	7.8	101
402-10	462.5	556.0	0.83	23.1	0.0574	0.0013	0.0818	0.0007	0.6474	0.0077	506.7	47.6	506.7	4.3	506.9	4.8	100
402-11	373.1	771.4	0.48	24.5	0.0737	0.0016	0.1682	0.0015	1.7081	0.0194	1031.9	42.7	1002.1	8.3	1011.6	7.3	101
402-12	529.6	608.9	0.87	24.1	0.0764	0.0016	0.1871	0.0016	1.9719	0.0200	1106.7	41.1	1105.5	8.9	1106.0	6.8	100
402-13	457.5	600.0	0.76	24.3	0.0664	0.0017	0.1234	0.0012	1.1304	0.0210	819.2	53.6	750.4	7.1	767.9	10.0	102
402-14	271.8	358.5	0.76	26.1	0.1171	0.0024	0.3280	0.0029	5.2971	0.0508	1912.6	36.4	1828.8	14.1	1868.4	8.2	102
402-15	112.5	1659.6	0.07	27.3	0.0762	0.0017	0.1605	0.0015	1.6852	0.0198	1099.4	42.8	959.3	8.1	1003.0	7.5	105
402-16	141.8	219.5	0.65	24.3	0.0713	0.0016	0.1609	0.0015	1.5829	0.0193	967.1	44.1	961.8	8.1	963.5	7.6	100
402-17	121.9	272.4	0.45	24.6	0.0773	0.0016	0.1932	0.0017	2.0587	0.0226	1128.3	41.8	1138.7	9.3	1135.2	7.5	100
402-18	94.4	452.7	0.21	27.5	0.0773	0.0019	0.1614	0.0016	1.7207	0.0280	1129.8	48.0	964.3	8.9	1016.3	10.4	105
402-19	218.8	534.3	0.41	31.1	0.0817	0.0030	0.1690	0.0024	1.9043	0.0605	1239.4	70.4	1006.3	13.2	1082.6	21.1	108
402-20	88.4	477.0	0.19	24.7	0.0706	0.0015	0.1517	0.0014	1.4762	0.0159	944.6	42.9	910.7	7.5	920.7	6.5	101
402-21	97.6	694.7	0.14	25.4	0.0821	0.0017	0.2124	0.0019	2.4024	0.0229	1246.6	39.6	1241.3	9.9	1243.3	6.8	100
402-22	165.7	254.8	0.65	27.0	0.1821	0.0037	0.5181	0.0046	13.0061	0.1206	2671.7	33.4	2691.1	19.5	2680.1	8.7	100
402-23	350.1	520.9	0.67	27.2	0.1724	0.0035	0.4597	0.0040	10.9253	0.0991	2580.7	33.6	2438.2	17.8	2516.8	8.4	103
402-24	409.0	614.2	0.67	25.6	0.1005	0.0021	0.2677	0.0023	3.7087	0.0344	1632.9	37.5	1529.0	11.9	1573.2	7.4	103
402-25	71.5	307.8	0.23	26.2	0.1123	0.0023	0.3327	0.0030	5.1518	0.0500	1836.8	36.9	1851.5	14.3	1844.7	8.3	100
402-26	120.8	231.5	0.52	24.8	0.0865	0.0018	0.2365	0.0021	2.8198	0.0305	1348.9	40.4	1368.3	11.1	1360.8	8.1	99
402-27	362.6	627.2	0.58	24.2	0.0712	0.0015	0.1506	0.0014	1.4777	0.0165	962.2	43.1	904.2	7.6	921.3	6.8	102
402-28	194.8	571.8	0.34	24.0	0.0705	0.0015	0.1611	0.0014	1.5662	0.0161	943.7	42.3	962.7	7.9	956.9	6.4	99
402-29	551.2	963.2	0.57	24.4	0.1061	0.0022	0.3355	0.0030	4.9078	0.0443	1733.0	36.8	1865.2	14.1	1803.6	7.6	97
402-30	29.9	49.7	0.60	26.5	0.0965	0.0022	0.2655	0.0026	3.5333	0.0510	1557.5	42.9	1518.1	13.5	1534.7	11.4	101
402-31	51.6	209.6	0.25	26.2	0.1108	0.0023	0.3324	0.0030	5.0803	0.0519	1813.2	37.5	1850.0	14.5	1832.8	8.7	99
402-32	81.6	209.0	0.39	26.6	0.0643	0.002	0.1122	0.0014	0.9950	0.0303	751.9	73.9	685.5	8.1	701.3	15.4	102
402-33	273.2	888.4	0.31	24.0	0.0712	0.0015	0.1612	0.0014	1.5824	0.0155	963.4	41.8	963.2	7.9	963.3	6.1	100
402-34	62.2	313.2	0.20	26.8	0.1294	0.0027	0.3835	0.0034	6.8425	0.0656	2089.9	35.8	2092.5	15.9	2091.2	8.5	100
402-35	78.5	118.4	0.66	24.6	0.0737	0.0017	0.1786	0.0017	1.8144	0.0261	1033.0	46.4	1059.1	9.3	1050.7	9.4	99
402-36	306.5	579.3	0.53	24.5	0.0809	0.0017	0.2051	0.0018	2.2874	0.0227	1218.2	40.3	1202.8	9.7	1208.4	7.0	100
402-37	22.9	1347.0	0.02	29.0	0.1151	0.0024	0.3241	0.0028	5.1425	0.0467	1881.0	36.3	1809.7	13.8	1843.1	7.7	102
402-38	268.9	175.1	1.54	24.0	0.0698	0.0016	0.1514	0.0014	1.4572	0.0189	922.1	45.5	908.9	7.9	912.8	7.8	100
402-39	324.3	295.2	1.10	24.2	0.0735	0.0016	0.1703	0.0016	1.7247	0.0198	1026.3	43.1	1013.7	8.5	1017.8	7.4	100
402-40	117.4	154.0	0.76	25.1	0.0803	0.0018	0.1865	0.0017	2.0635	0.0250	1203.2	42.7	1102.2	9.4	1136.8	8.3	103
402-41	227.9	600.0	0.38	27.1	0.1570	0.0032	0.4483	0.0040	9.7023	0.0933	2423.1	34.6	2387.6	18.0	2406.9	8.9	101
402-42	149.2	708.9	0.21	23.9	0.0736	0.0015	0.1831	0.0016	1.8579	0.0181	1030.2	41.4	1083.8	8.8	1066.2	6.4	98
402-43	58.5	323.7	0.18	30.6	0.1121	0.0024	0.2820	0.0026	4.3594	0.0499	1833.6	38.5	1601.5	13.3	1704.7	9.5	106

续表 3

样品号 与测点	<sup>232</sup> Th /10 <sup>-6</sup>	<sup>238</sup> U /10 <sup>-6</sup>	Th/U	Pb* /10 <sup>-6</sup>	<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb		<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U		<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U		谐和度
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	年龄/Ma	1σ	
402-44	110.7	149.4	0.74	24.9	0.0816	0.0018	0.2088	0.0019	2.3501	0.0275	1236.0	41.8	1222.7	10.3	1227.6	8.3	100
402-45	146.3	147.5	0.99	23.5	0.0588	0.0015	0.0876	0.0008	0.7099	0.0123	559.5	54.3	541.1	5.0	544.7	7.3	101
402-46	215.9	474.8	0.45	24.3	0.0730	0.0016	0.1713	0.0015	1.7248	0.0184	1014.5	42.1	1019.2	8.5	1017.8	6.9	100
402-47	65.8	108.3	0.61	25.6	0.0841	0.0019	0.2129	0.0021	2.4673	0.0341	1293.7	44.1	1244.0	10.9	1262.5	10.0	101
402-48	123.0	168.4	0.73	24.7	0.0874	0.0019	0.2423	0.0022	2.920	0.0323	1369.4	40.6	1398.6	11.5	1387.2	8.4	99
402-49	98.5	158.9	0.62	24.5	0.0718	0.0017	0.1625	0.0015	1.6092	0.0223	980.0	46.1	970.9	8.5	973.8	8.7	100
402-50	136.5	328.4	0.42	24.4	0.0665	0.0015	0.1349	0.0012	1.2366	0.0151	822.1	45.4	815.4	7.0	817.4	6.9	100
402-51	161.7	173.7	0.93	25.0	0.0826	0.0018	0.2042	0.0019	2.3265	0.0271	1260.5	41.8	1197.6	10.1	1220.4	8.3	102
402-52	21.5	797.3	0.03	40.3	0.0755	0.0018	0.1607	0.0016	1.6726	0.0250	1081.5	46.8	960.5	8.7	998.2	9.5	104
402-53	111.0	386.0	0.29	24.5	0.0720	0.0016	0.1614	0.0015	1.6018	0.0179	985.5	43.1	964.3	8.1	970.9	7.0	101
402-54	156.2	294.8	0.53	23.8	0.0597	0.0014	0.0909	0.0009	0.7486	0.0108	593.0	49.4	561.0	5.0	567.4	6.3	101
402-55	121.2	307.9	0.39	25.4	0.0891	0.0019	0.2331	0.0021	2.8659	0.0302	1407.1	39.9	1350.8	11.1	1373.0	7.9	102
402-56	140.8	273.5	0.51	25.1	0.0795	0.0017	0.1966	0.0018	2.1545	0.0256	1183.7	42.6	1156.9	9.8	1166.5	8.2	101
402-57	110.4	142.9	0.77	25.3	0.0796	0.0018	0.1898	0.0018	2.0829	0.0292	1186.1	45.0	1120.5	9.9	1143.2	9.6	102
402-58	132.2	328.1	0.40	27.3	0.1691	0.0035	0.5123	0.0047	11.9482	0.1185	2548.9	34.4	2666.3	20.1	2600.4	9.3	98
402-59	153.1	1178.0	0.13	28.3	0.1412	0.0030	0.3710	0.0035	7.2235	0.0763	2241.6	36.1	2034.1	16.3	2139.4	9.4	105
402-60	159.8	188.4	0.85	26.7	0.1626	0.0034	0.4806	0.0044	10.7806	0.1048	2483.2	34.5	2530.0	19.0	2504.4	9.0	99

注: Pb\*为放射性成因铅( $Pb^*=0.241 \cdot ^{206}Pb+0.221 \cdot ^{207}Pb+0.524 \cdot ^{208}Pb$ ), 谐和度= $100 \times \text{年龄} (^{207}Pb/^{235}U) / \text{年龄} (^{206}Pb/^{238}U)$

剥蚀序列呈镜像关系, 依据锆石年龄谱的峰值年龄, 可以确定地层形成的先后顺序。根据上述碎屑锆石沉积序列与物源区地层的剥蚀关系, 比较魏坊组和东坑口组碎屑锆石的年龄谱(图 4-a、b) 可以看出, 魏坊组中有 5 颗锆石年龄在 500~550Ma 之间, 形成 514Ma 的主要年龄峰, 并形成 620Ma、784Ma、983Ma 和 2502Ma 的次级年龄峰, 显示魏坊组的主要物源为泛非构造层, 次要物源为罗迪尼亚构造层。东坑口组中只有 2 颗锆石的年龄介于 500~550Ma 之间, 并形成 964Ma 的主要年龄峰, 以及 912Ma、1231Ma、1862Ma 和 2449Ma 的次级年龄峰, 显示东坑口组的主要物源来自格林威尔构造层, 次要物源为泛非构造层。由上述碎屑锆石年龄及年龄谱特征, 可以约束魏坊组和东坑口组形成时限在 506.7±4.3Ma 的中寒武世以后, 魏坊组的物源以泛非构造层为主, 东坑口组的物源主要来自罗迪尼亚构造层, 表明魏坊组沉积早于东坑口组的沉积, 即魏坊组层序位于东坑口组之下, 而不是东坑口组位于魏坊组之下, 支持朱玉磷等<sup>[5]</sup>对下古生界魏坊组与东坑口组的划分方案。因骆金锭等<sup>[6]</sup>在魏坊组发现了早奥陶世的笔石化石, 所以东

坑口组时代应在早奥陶世以后, 笔者认为, 朱玉磷等<sup>[5]</sup>将东坑口组对比为中奥陶世是合适的。

#### 4.2 下古生界物源区特征

S401 样品与 S402 样品共 120 颗碎屑锆石年龄合并形成的年龄谱如图 4-c 所示。由图 4-c 可以发现, 存在 964Ma 的主要年龄峰, 并形成 514Ma、686Ma、813Ma、1231Ma、2483Ma 的次要年龄峰, 最年轻的锆石 <sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 年龄是 506.7±4.3Ma, 最老的锆石 <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb 年龄是 3431.9±39.3Ma, 暗示物源区存在太古宙构造热事件, 并以罗迪尼亚构造热事件为最主要的构造热事件, 此外泛非构造热事件、哥伦比亚构造热事件和格林威尔构造热事件年龄在样品中均有反映。

前人<sup>[11-16]</sup>对华夏陆块中部的中上奥陶统碎屑锆石进行测年, 获得的年龄谱最主要的年龄峰是 964Ma, 以 538Ma、612Ma 为 2 个次要年龄峰, 同时存在 764Ma、1036Ma、2456Ma 的次要年龄峰值。前人对中上奥陶统碎屑锆石测年获得的主要年龄峰与本次测试结果完全吻合, 538Ma、2456Ma 次要年龄峰与本次获得的 514Ma、2483Ma 的次要年龄峰有一定的偏离, 可能是样品数量差异或是构造热事件的时差引起的。



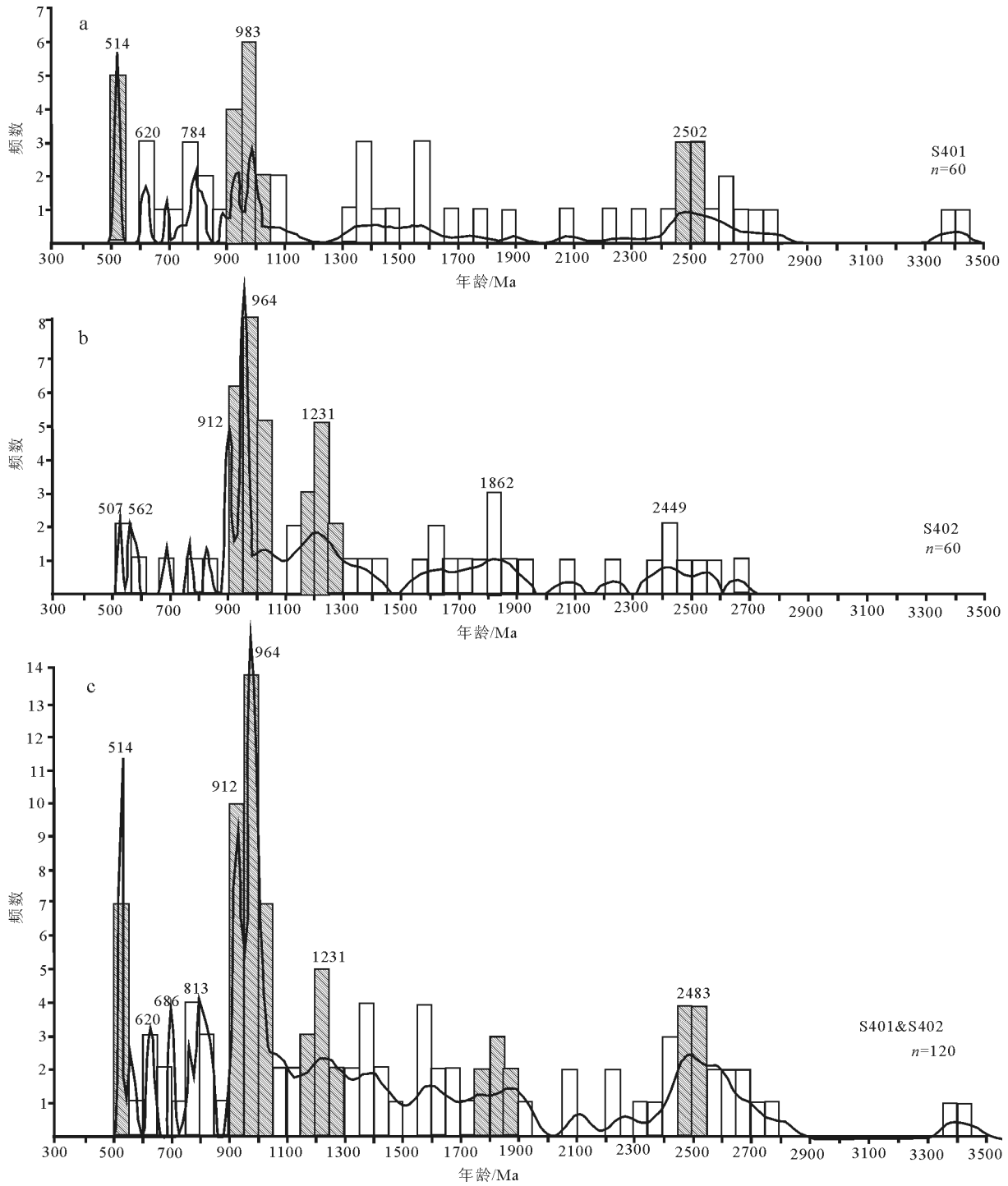


图4 测年结果频率直方图与年龄谱图

Fig. 4 Frequency histograms and age spectrum of U-Pb dating results

因此,闽西南地区下古生界物源主体为泛非构造层和罗迪尼亚构造层,并存在约 $3431.9 \pm 39.3$ Ma的太古宙构造热事件的年龄记录,该区下古生界碎屑锆石的年龄记录整体与华南构造演化一致<sup>[17]</sup>。

### 5 结论

(1)根据碎屑锆石年龄谱特征,确定闽西南下古生界魏坊组沉积早于东坑口组。

(2) 闽西南地区下古生界的物源主体来自泛非构造层和罗迪尼亚构造层。

(3) 闽西南地区下古生界的物源区存在约  $3431.9 \pm 39.3 \text{ Ma}$  的太古宙构造热事件的年龄纪录。

**致谢:** 感谢审稿专家对本文提出的宝贵修改建议, 感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室在锆石电镜、CL 照相及测年过程中给予的大力帮助与支持。

## 参考文献

- [1] 福建省地质矿产局. 福建省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1984.
- [2] 福建省地质矿产局. 福建省地质图说明书[M]. 福州: 福建省地图出版社, 1998.
- [3] 福建省地质矿产局. 福建省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [4] 李兼海, 朱义华, 李仁杰. 论福建西部早古生代地层的划分及对比[J]. 福建地质, 1983, 2(1): 1-20.
- [5] 朱玉磷, 张金塔. 对福建西部早古生代地层划分及对比问题的商榷[J]. 福建地质, 1988, 7(2): 142-165.
- [6] 骆金锭, 洪祖寅, 张文彬. 福建永安魏坊发现奥陶纪的笔石[J]. 古生物学报, 1980, 19(6): 511-512.
- [7] 王绍文. 闽西赣南地质矿产报告[J]. 矿冶, 1930, 4(13): 1-49.
- [8] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. Geostandards and Geo-analytical Research, 2004, 11: 357-370.
- [9] 吴元宝, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报. 2004, 16(49): 1589-1604.
- [10] 樊隽轩, 彭善池, 侯旭东, 等. 国际地层委员会官网与《国际地层表》(2015/01 版)[J]. 地层学杂志, 2015, 39(2): 125-134.
- [11] Li Z X, Li X H, Wartho J. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, southeastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. Geological Society of American Bulletin, 2010, 122(5-6): 772-793.
- [12] Chen C H, Liu Y H, Lee C Y, et al. Geochronology of granulite, charnockite and gneiss in the poly-metamorphosed Gaozhou Complex(Yunkai massif), South China: Emphasis on the in-site EMP monazite dating[J]. Lithos, 2012, 144/145: 109-129.
- [13] Xu Y J, Du Y S, Cawood P A. Detrital zircon provenance of Upper Ordovician and Silurian strata in the northeastern Yangtze Block: Response to orogenesis in South China[J]. Sedimentary Geology, 2012, 267/268: 63-72.
- [14] Li H B, Jia D, Wu L. Detrital zircon provenance of the Lower Yangtze foreland basin deposits: constraints on the evolution of the early Palaeozoic Wuyi-Yunkai orogenic belt in South China[J]. Geological Magazine, 2013, 150(6): 959-974.
- [15] 龚根辉. 华南古生代前陆盆地沉积与构造演化[D]. 浙江大学博士学位论文, 2015.
- [16] 张雄, 曾佐勋, 刘伟, 等. 湘南—桂东北地区寒武—奥陶纪沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年代学特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 153-174.
- [17] 舒良树. 华南构造演化的基本特征[J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035-1053.
- ① 福建区调队. 1:20 万永安幅地质图及说明书. 1965.
- ② 福建区调队. 福建省早古生代地层调查研究报告. 1982.
- ③ 闽西地质大队. 1:5 万安砂幅、贡川幅地质图及说明书. 1988.