

浙东南松阳县枫坪组沉积岩碎屑锆石年代学及地质意义

金海飞, 许朝卫, 戴春政, 马天寿, 邢晓娅

(浙江省第三地质大队, 浙江 金华 322100)

摘要: 利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱技术(LA-ICP-MS)对浙东南松阳县枫坪组地层底部的细砂岩进行了锆石 U-Pb 定年及稀土元素分析。样品中大部分碎屑锆石具有较好的振荡环带且 Th/U 值大于 0.1, 表明其为岩浆成因。碎屑锆石中稀土元素含量变化范围较大, $(La/Yb)_N$ 值为 $0 \sim 0.29$, LREE/HREE 值为 $0.003 \times 10^{-6} \sim 0.977 \times 10^{-6}$, 表明样品中锆石的轻、重稀土元素分异程度较小且重稀土元素相对富集, 具有轻稀土元素含量低、重稀土元素含量高的左倾模式且具有负 Eu 异常、正 Ce 异常的特征, 表明碎屑锆石主要以岩浆锆石为主, 同时存在少量的变质锆石。碎屑锆石 U-Pb 测年结果表明, 最年轻的锆石年龄为 193 Ma, 显示枫坪组沉积岩成岩年龄不晚于 193 Ma。碎屑锆石年龄可分为 4 组, 分别为 2 461 ~ 1 743 Ma、887 Ma、435 和 422 Ma、330 ~ 193 Ma。碎屑锆石的主要年龄区间分别与已知的构造-岩浆热事件时间相对应(吕梁期、晋宁期、加里东期和印支-海西期), 表明本区的构造岩浆活动与中国大地构造运动相一致, 并具有幕式发展的特征。通过对枫坪组沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年龄的系统分析并与可能物源区的年代学对比研究, 认为枫坪组沉积岩物质来源主要是周边出露的中条期侵入岩体和浙东南出露的印支期花岗岩体。

关键词: 枫坪组; LA-ICP-MS; 锆石定年; 稀土元素; 物质来源

中图分类号: P597⁺.3; P588.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)03-0354-11

Detrital zircon geochronology for the sedimentary rock of Fengping Formation in southeastern Zhejiang and its geological significance

JIN Hai-fei, XU Chao-wei, DAI Chun-zheng, MA Tian-shou and XING Xiao-ya

(No. 3 Geological Party of Zhejiang, Jinhua 322100, China)

Abstract: The rare earth elements characteristics of detrital zircons and the U-Pb age of detrital zircons of fine-grained sandstone from Fengping Formation were investigated by the LA-ICP-MS analytical technique. The detrital zircons have a good oscillatory zones and Th/U ratios of most zircons are higher than 0.1, indicating that they are of magmatic origin. The content of REE varies in a large range. The ratios of $(La/Yb)_N$ ($0 \sim 0.29$) and LREE/HREE ($0.003 \times 10^{-6} \sim 0.977 \times 10^{-6}$) show the relative enrichment of HREE. The distribution pattern of rare earth elements in detrital zircons exhibits mainly low content of LREE and high content of HREE as well as Eu negative anomaly and Ce positive anomaly. The result shows that the majority of zircons originated from magmatic source, whereas some other zircons originated from metamorphic activity. The youngest U-Pb age of detrital zircon is 193 Ma, indicating that its diagenetic age is not later than 193 Ma. The data suggest that zircons are mainly composed of 4 age stages, including 2 461 ~ 1 743 Ma, 887 Ma, 435 and 422 Ma, 330 ~ 193 Ma, respectively, corresponding

收稿日期: 2018-08-21; 接受日期: 2018-12-13; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 浙江省地质勘查专项基金(2015010)

作者简介: 金海飞(1992-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 从事基础地质调查, E-mail: 462537098@qq.com。

to the known tectonic-magmatic thermal events (Liliang Movement, Jinning Movement, Caledonian Movement, Indosinian-Hercynian Movement). The result reveals that the tectonic magmatism in this area is consistent with the tectonic activity in China, and it has the characteristics of continuous development. Through the systematic analysis of the U-Pb dating data of detrital zircons from the sedimentary rock of Fengping Formation and chronology of possible provenances, it is shown that the materials for sedimentation was from surrounding rock mass of Zhongtiao Movement and the Indosinian granite body in southeastern Zhejiang.

Key words: Fengping Formation; LA-ICP-MS; U-Pb age of detrital zircon; REE; material source

Fund support: Project of Zhejiang Geological Survey (2015010)

锆石作为岩石中最常见、应用最为广泛的副矿物,广泛存在于岩浆岩、变质岩和沉积岩中,其物理化学性质非常稳定,在风化、搬运、剥蚀等地质过程中不容易发生蚀变,因此可通过多种实验手段对其进行研究,了解锆石携带的地质信息(雷玮琰等, 2013)。沉积岩中碎屑锆石以其 U-Pb 同位素体系封闭温度高、受沉积作用和成岩作用影响小等特点,被广泛应用于物源分析(兰中伍等, 2006)。碎屑锆石的 U-Pb 年龄谱系可直接反映沉积岩物源区岩石的年龄组成(Viola and Anczkiewicz, 2008)。近年来随着原位微区分析技术的发展,结合阴极发光 CL 和背散射图像,可精确识别出锆石的继承年龄、变质年龄和结晶年龄,反映沉积岩形成过程中的多期不同地质事件的发生时间。浙东南枫坪组系于 1970 年西安煤炭科学研究所浙南课题组创名沿用至今,前人虽对该地层岩性、沉积环境等方面进行了研究,但未深入了解其成岩年龄及物质来源。本文依托于浙江省 1:5 万柳村、住龙区域地质调查项目,利用激光剥蚀电感耦合等离子质谱技术(LA-ICP-MS)对浙东南松阳县枫坪组地层底部的细砂岩进行了碎屑锆石 U-Pb 年代学研究,旨在确定岩石成岩年龄及物质来源。

1 地质背景及样品信息

研究区位于华南褶皱系浙东南褶皱带丽水-宁波隆起南西段龙泉-遂昌断垄的中部地区,大地构造位于欧亚大陆板块与滨西太平洋板块消减带内侧华夏板块西北部(王伟等, 2012)。出露的地层为八都岩群泗源岩组,磨石山群高坞组,大爽组三段,枫坪组一段、二段(图 1)。枫坪组与二长花岗斑岩岩体呈不整合接触,与泗源岩组变质岩呈断裂接触。区域内断裂以北东向为主。经野外勘查,枫坪组一段岩性总体为浅灰色块状中粗粒岩屑石英砂岩、岩屑

石英砂岩、岩屑砂岩等,厚度大于 322.37 m。枫坪组二段岩性下部为块状深灰色中粒或中细粒岩屑砂岩,局部夹灰黑色薄层粉砂泥岩;上部为深灰色中粗粒岩屑石英砂岩夹灰黑色薄层泥岩。枫坪组一段与二段呈整合接触。

本次实验样品采自松阳县枫坪乡洋庄源出露的枫坪组二段中细粒岩屑砂岩中,岩石呈中细粒砂状结构,块状构造(图 2a),矿物组成为石英(40%)、岩屑(50%)、泥质胶结物(10%)。石英砂屑磨蚀搬运特征明显,多呈次棱角状-次圆状,粒度 0.05 ~ 0.6 mm,以 0.06 ~ 0.25 mm 的细砂为主,发育波状消光。岩屑含量丰富,多呈磨圆的次圆状,粒度 0.05 ~ 0.5 mm,成分主要见有硅质岩、泥质硅质岩、千枚状泥岩、石英片岩、霏细岩和少量白云母碎片。以上砂屑之间由富含铁尘的泥质物充填和胶结(图 2b)。

2 测试方法

样品质量大约为 3 kg,送至廊坊市河北区域地质调查实验室进行锆石靶的制作。锆石制靶完成后,根据锆石光学图像和 CL 图像,避开裂纹和包裹体,确定合适的测点位置。锆石 U-Pb 同位素定年和微量元素含量在武汉上谱分析科技有限责任公司利用 LA-ICP-MS 同时完成。激光剥蚀系统为 GeoLas-Hd,等离子体质谱仪为 Agilent7900。激光能量 80 mJ,频率 5 Hz,激光束斑直径 32 μm 。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度。U-Pb 同位素定年和微量元素处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 20 ~ 30 s 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal 完成。锆石样

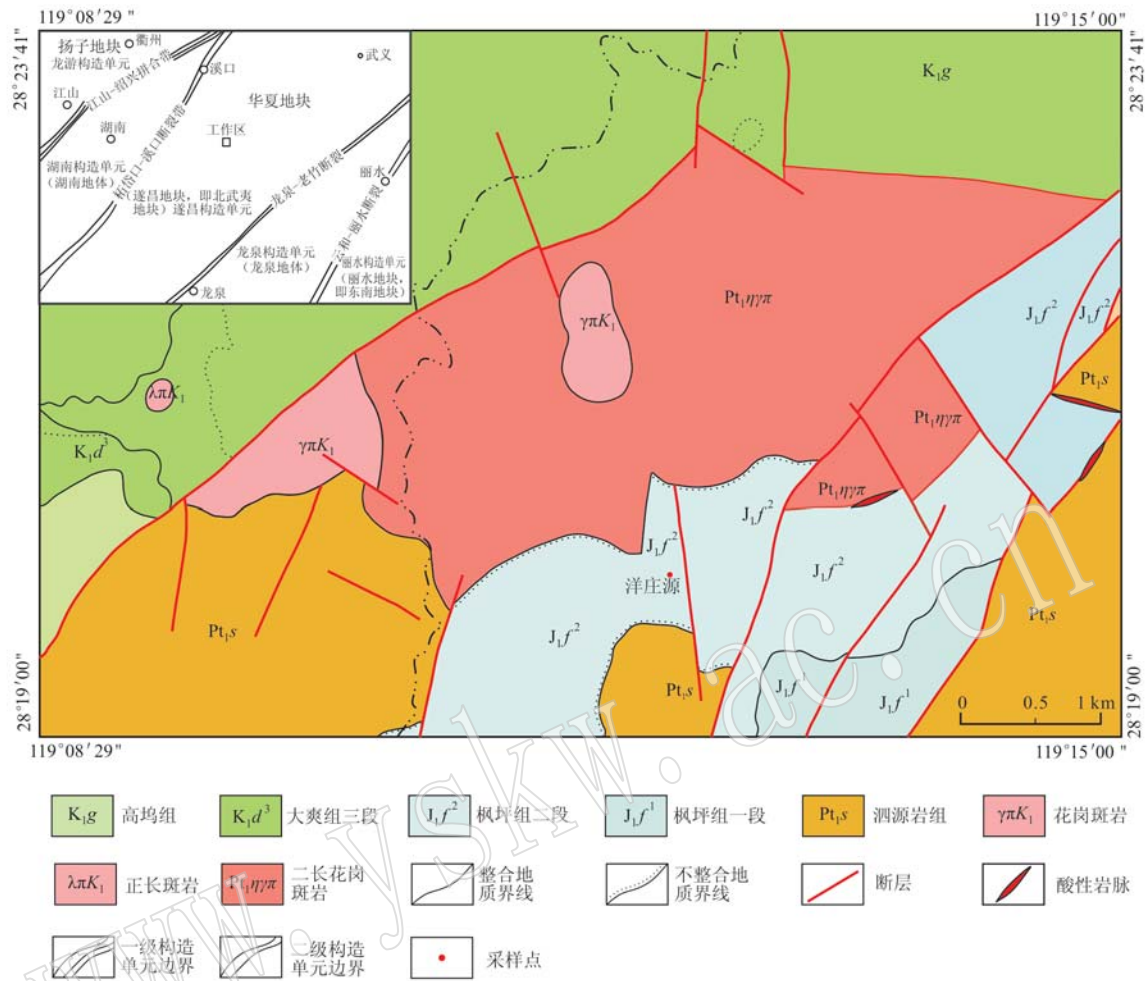


图 1 研究区区域地质图

Fig. 1 Tectonic geological map of the study area

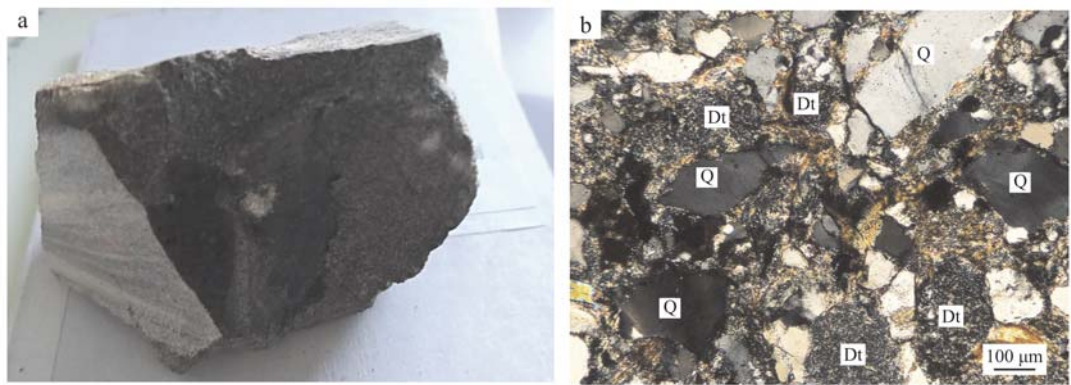


图 2 岩屑砂岩手标本(a)及显微镜下特征照片(b, +)

Fig. 2 The hand specimen (a) and microscopic (b, +) photos of lithic sandstone

Q—石英; Dt—岩屑

Q—quartz; Dt—detritus

品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3 完成 (Ludwing, 2003)。锆石 U-

Th-Pb 同位素比值、年龄数据及锆石微量元素的单次测量的标准偏差为 1σ, 加权平均年龄采用 1σ。

3 测试结果及讨论

3.1 锆石 U-Pb 同位素年代学结果

锆石阴极发光图像(图3)显示锆石形态以浑圆状为主,少数呈棱柱状或不规则多边状,且部分锆石碎裂,粒径为100~200 μm ,显示碎屑锆石特征。大部分锆石具有较好的振荡环带,表明其为岩浆成因。

样品中锆石 Th、U 和 Th/U 值变化区间较大(见表1),锆石中 Th 含量为 $2.95 \times 10^{-6} \sim 504.98 \times 10^{-6}$,U 含量为 $80.02 \times 10^{-6} \sim 1\,051.15 \times 10^{-6}$ 。大部分碎屑锆石 Th/U 值大于0.1,显示该部分锆石为岩浆锆石,另外存在小部分锆石具有较低的 Th 含量和较高的 U 含量以及极低的 Th/U 值(小于0.1),反映这些锆石为变质成因。

对枫坪组沉积岩样品中80个碎屑锆石进行LA-

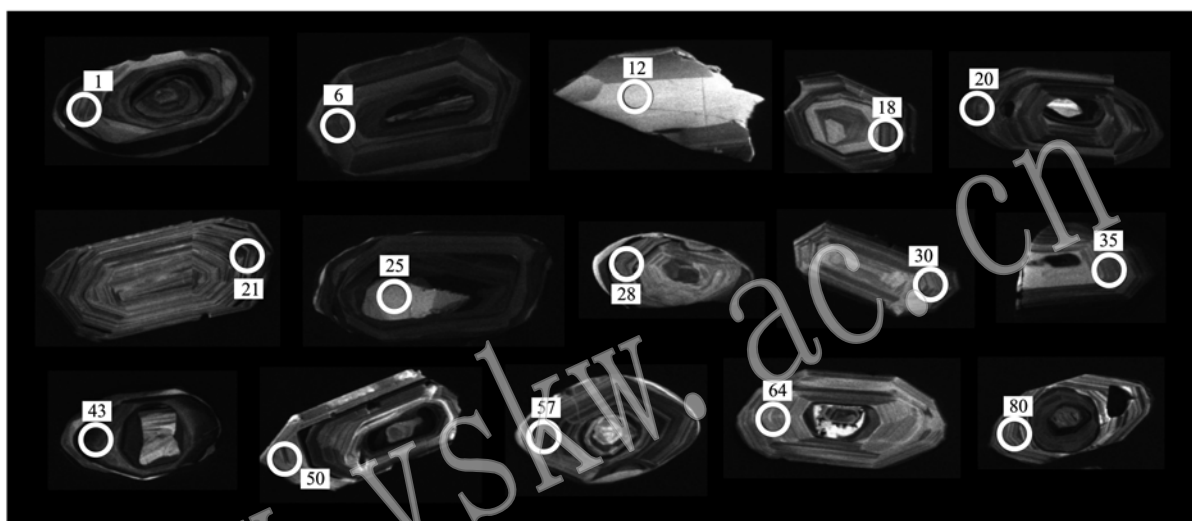


图3 枫坪组沉积岩碎屑锆石阴极发光图像(CL)

Fig. 3 CL images for detrital zircons from sedimentary rock of Fengping Formation

ICP-MS U-Pb 同位素测定,为了数据的准确性剔除了谐和度小于90%的点号(40、45、54、66、74和80号),同时对锆石年龄大于1 000 Ma的数据采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,年龄小于1 000 Ma的数据采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄使测试结果更具可靠性(Gehrels *et al.*, 1999)。通过对74个锆石谐和年龄数据分析可知,锆石年龄具有分组集中的特征,可将年龄分为两组,其中一组年龄明显较老, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄在2 461~1 743 Ma(表1),这些年龄大部分谐和度较好,在U-Pb年龄谐和图中分布在一致线上或附近(图4),这部分年龄的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为 $1\,860 \pm 17$ Ma,同时也有部分年龄谐和度较差,位于一致线下方,推测这是由于锆石发生了Pb丢失造成的。另一组年龄明显年轻, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表观年龄在330~193 Ma之间,这组年龄谐和度较高,基本落在U-Pb谐和图一致线上。所有的年龄在U-Pb年龄谐和图上可以构成一条很好的不一致线,并获得 243 ± 57 Ma的下交点年龄和 $1\,878 \pm 16$ Ma的上交点年龄(图4)。

3.2 稀土元素特征

枫坪组粉砂岩样品的碎屑锆石 LA-ICP-MS 原位微区稀土元素含量结果见表2。由表2可知,锆石 ΣREE 为 $29.15 \times 10^{-6} \sim 1\,924.66 \times 10^{-6}$,LREE、HREE分别为 $0.89 \times 10^{-6} \sim 383.82 \times 10^{-6}$, $27.13 \times 10^{-6} \sim 1\,875.53 \times 10^{-6}$,锆石稀土元素含量变化范围较大。采用Taylor等(1985)的球粒陨石平均值对原始测试结果进行标准化后可知, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为0~0.29,LREE/HREE值为0.003~0.977,表明样品中锆石的轻、重稀土元素分异程度较小且重稀土元素相对富集。

锆石的稀土元素配分模式图见图5。由图5可知,不同年龄段的锆石均具有轻稀土元素含量低、重稀土元素含量高的左倾模式且具有适度的“谷”状负Eu异常、“峰”状正Ce异常, δEu 值为0.006~0.749, δCe 值为1.18~533.76。稀土元素越来越多地被应用于反映沉积环境的变化等研究中,一般Ce异常可用于指示沉积环境(雷开宇,2015),本样

表1 枫坪组细砂岩样品碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学测试结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Pb data of zircons of fine sandstone from Maple ping group

点编号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%				
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$								
				1 σ		1 σ		1 σ		1 σ						
1	69.67	263.74	0.26	0.1116	0.002 2	4.740 1	0.094 3	0.307 1	0.002 3	1 826	36	1 774	17	1 726	12	97
2	117.74	212.95	0.55	0.111 6	0.002 1	4.781 3	0.086 6	0.310 1	0.002 3	1 826	35	1 782	15	1 741	11	97
3	109.17	328.02	0.33	0.111 8	0.001 9	4.835 4	0.083 6	0.312 7	0.002 3	1 829	30	1 791	15	1 754	12	97
4	88.70	635.63	0.14	0.109 9	0.001 8	4.521 7	0.072 4	0.297 4	0.001 7	1 798	29	1 735	13	1 678	8	96
5	7.82	655.41	0.01	0.111 1	0.001 8	4.631 4	0.077 6	0.301 6	0.002 0	1 817	30	1 755	14	1 699	10	96
6	28.03	475.04	0.06	0.112 1	0.002 2	4.526 4	0.096 4	0.291 9	0.003 0	1 835	68	1 736	18	1 651	15	94
7	20.98	595.16	0.04	0.111 7	0.002 1	4.643 1	0.087 3	0.300 5	0.002 1	1 828	33	1 757	16	1 694	11	96
8	30.53	594.15	0.05	0.111 3	0.001 8	5.073 1	0.087 3	0.329 6	0.002 4	1 820	30	1 832	15	1 837	12	99
9	4.92	349.10	0.01	0.049 6	0.001 8	0.270 7	0.009 6	0.039 6	0.000 4	176	85	243	8	251	2	97
10	13.01	857.98	0.02	0.111 0	0.001 7	5.104 1	0.082 2	0.332 3	0.002 5	1 817	28	1 837	14	1 850	12	99
11	127.79	370.60	0.34	0.110 5	0.002 0	4.645 8	0.084 0	0.303 6	0.002 1	1 809	32	1 758	15	1 709	11	97
12	57.04	87.10	0.65	0.055 9	0.002 9	0.533 0	0.026 8	0.069 8	0.000 9	456	119	434	18	435	5	99
13	138.26	260.47	0.53	0.157 0	0.003 1	9.530 9	0.185 5	0.438 3	0.003 4	2 433	34	2 391	18	2 343	15	97
14	182.40	400.57	0.46	0.131 5	0.002 5	7.098 4	0.134 6	0.389 2	0.003 0	2 118	33	2 124	17	2 119	14	99
15	85.18	322.27	0.26	0.110 7	0.002 2	4.814 3	0.092 7	0.313 5	0.002 3	1 811	35	1 787	16	1 758	11	98
16	38.87	95.10	0.41	0.066 7	0.002 5	1.355 4	0.047 2	0.147 6	0.001 7	828	78	870	20	887	9	98
17	242.08	257.07	0.94	0.160 3	0.003 7	10.452 1	0.223 0	0.469 5	0.003 7	2 461	39	2 476	20	2 481	16	99
18	106.52	199.43	0.53	0.049 5	0.002 6	0.269 6	0.012 8	0.039 9	0.000 6	172	129	242	10	252	4	95
19	49.18	773.02	0.06	0.111 7	0.003 3	4.804 0	0.130 4	0.309 3	0.002 9	1 828	53	1 786	23	1 737	14	97
20	61.11	354.17	0.17	0.106 6	0.002 7	4.354 0	0.105 4	0.294 2	0.002 8	1 743	47	1 704	20	1 662	14	97
21	255.28	305.53	0.84	0.051 5	0.001 8	0.353 1	0.011 8	0.049 6	0.000 5	261	77	307	9	312	3	98
22	104.16	370.69	0.28	0.108 8	0.002 3	4.624 7	0.095 8	0.306 0	0.002 2	1 780	38	1 754	17	1 721	11	98
23	142.94	591.45	0.24	0.111 9	0.002 3	4.975 5	0.100 6	0.320 3	0.002 4	1 831	69	1 815	17	1 791	12	98
24	114.98	172.66	0.67	0.112 4	0.002 7	4.913 9	0.115 3	0.315 6	0.002 5	1 839	44	1 805	20	1 768	12	97
25	67.82	104.00	0.65	0.158 3	0.003 7	8.389 2	0.195 3	0.382 8	0.003 1	2 439	40	2 274	21	2 089	14	91
26	77.39	348.18	0.22	0.115 9	0.002 3	5.089 8	0.099 5	0.316 8	0.002 1	1 894	35	1 834	17	1 774	10	96
27	235.01	399.42	0.59	0.112 7	0.001 9	4.989 5	0.086 2	0.319 4	0.002 0	1 844	31	1 818	15	1 787	10	98
28	86.50	259.51	0.33	0.112 1	0.002 0	4.860 1	0.087 7	0.312 9	0.002 0	1 833	33	1 795	15	1 755	10	97
29	85.61	319.06	0.27	0.108 6	0.001 9	4.805 0	0.081 3	0.319 5	0.002 1	1 776	32	1 786	14	1 787	11	99
30	90.88	154.34	0.59	0.051 5	0.002 8	0.323 5	0.017 1	0.045 5	0.000 5	261	94	285	13	287	3	99
31	105.57	264.28	0.40	0.112 0	0.002 2	5.133 3	0.096 3	0.331 3	0.002 7	1 832	69	1 842	16	1 845	13	99
32	92.91	393.16	0.24	0.111 0	0.001 8	4.829 0	0.080 2	0.313 8	0.002 0	1 817	34	1 790	14	1 759	10	98
33	182.45	825.03	0.22	0.160 1	0.002 6	9.663 2	0.212 2	0.432 8	0.005 3	2 457	27	2 403	20	2 318	24	96
34	77.91	260.51	0.30	0.112 2	0.002 0	4.823 6	0.083 7	0.310 3	0.002 2	1 836	64	1 789	15	1 742	11	97
35	66.43	281.81	0.24	0.112 0	0.002 0	4.982 8	0.088 8	0.321 2	0.002 4	1 833	33	1 816	15	1 795	12	98
36	68.76	80.02	0.86	0.054 8	0.003 4	0.504 8	0.028 5	0.067 6	0.000 9	406	169	415	19	422	5	98
37	57.67	187.62	0.31	0.145 9	0.003 0	8.305 9	0.163 2	0.411 4	0.003 2	2 298	34	2 265	18	2 221	15	98
38	58.79	771.62	0.08	0.130 0	0.002 2	5.730 5	0.093 6	0.318 0	0.001 8	2 098	29	1 936	14	1 780	9	91
39	41.34	344.25	0.12	0.117 0	0.001 9	4.877 2	0.078 7	0.301 0	0.001 8	1 911	30	1 798	14	1 696	9	94

续表 1
Continued Table 1

点编号	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同位素比值				年龄/Ma				谐和度/%	
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
40	59.35	523.44	0.11	0.163 6	0.002 5	8.188 6	0.136 6	0.361 1	0.002 6	2.494	27	1 987	12
41	159.17	424.53	0.37	0.113 6	0.001 9	4.647 0	0.075 3	0.295 5	0.001 9	1 858	30	1 669	9
42	53.72	439.84	0.12	0.112 4	0.002 0	4.241 8	0.078 7	0.272 5	0.002 1	1 839	33	1 553	11
43	47.24	387.05	0.12	0.116 1	0.002 2	4.991 6	0.093 5	0.310 6	0.002 5	1 896	33	1 744	13
44	76.48	504.57	0.15	0.114 9	0.002 9	4.925 9	0.079 1	0.309 4	0.001 9	1 880	30	1 738	9
45	78.40	579.08	0.14	0.111 6	0.001 8	3.388 4	0.053 1	0.219 1	0.001 4	1 828	28	1 277	7
46	147.75	322.79	0.46	0.052 9	0.001 8	0.294 1	0.010 3	0.040 2	0.000 4	324	78	254	2
47	90.50	152.71	0.59	0.052 7	0.002 6	0.222 0	0.011 0	0.030 4	0.000 4	317	118	193	2
48	133.52	361.06	0.37	0.111 2	0.002 3	4.180 1	0.087 5	0.271 2	0.002 4	1 820	38	1 547	12
49	153.02	192.58	0.79	0.158 5	0.003 2	9.668 7	0.192 9	0.440 0	0.003 8	2 439	34	2 351	17
50	346.03	458.73	0.75	0.047 5	0.001 8	0.212 9	0.008 0	0.032 4	0.000 3	76	89	206	2
51	164.39	286.55	0.57	0.113 1	0.001 9	4.727 5	0.080 3	0.301 6	0.001 9	1 850	31	1 699	9
52	216.98	431.28	0.50	0.115 2	0.001 9	5.158 1	0.086 2	0.323 1	0.002 1	1 883	34	1 805	10
53	63.12	164.05	0.38	0.118 0	0.002 3	5.423 1	0.105 7	0.331 7	0.002 7	1 928	34	1 846	13
54	40.71	624.68	0.07	0.109 4	0.002 3	3.139 0	0.071 0	0.206 8	0.002 2	1 791	37	1 212	12
55	73.96	318.70	0.23	0.114 9	0.002 4	4.868 5	0.103 2	0.305 9	0.002 4	1 880	38	1 721	12
56	77.62	297.89	0.26	0.115 8	0.002 3	5.045 3	0.099 6	0.314 5	0.002 5	1 894	35	1 763	12
57	100.25	409.56	0.24	0.117 1	0.002 1	5.105 5	0.093 5	0.314 7	0.002 2	1 922	32	1 764	11
58	72.93	440.51	0.17	0.117 5	0.001 9	5.421 9	0.092 3	0.332 9	0.002 4	1 920	25	1 852	12
59	116.04	718.03	0.16	0.111 6	0.001 8	4.094 4	0.068 7	0.264 7	0.002 0	1 825	29	1 514	10
60	497.89	1004.12	0.50	0.051 8	0.001 3	0.262 3	0.006 4	0.036 6	0.000 3	280	62	232	2
61	286.18	503.24	0.57	0.160 5	0.003 2	10.089 8	0.216 5	0.454 4	0.004 3	2 461	33	2 415	19
62	18.44	829.62	0.02	0.113 6	0.002 0	4.862 9	0.086 3	0.309 6	0.001 9	1 858	38	1 739	9
63	227.52	460.90	0.49	0.051 8	0.001 4	0.375 6	0.010 6	0.052 5	0.000 6	280	65	330	3
64	79.63	205.46	0.39	0.117 1	0.002 1	5.378 5	0.097 6	0.331 8	0.002 3	1 922	32	1 847	11
65	65.49	321.69	0.20	0.115 0	0.002 1	5.185 1	0.091 0	0.325 6	0.002 3	1 880	38	1 817	11
66	13.94	629.99	0.02	0.115 3	0.002 2	3.984 8	0.085 5	0.249 1	0.003 1	1 885	35	1 631	17
67	44.00	309.20	0.14	0.112 8	0.002 2	4.575 5	0.095 0	0.292 4	0.002 8	1 856	35	1 653	14
68	441.77	1 051.15	0.42	0.051 4	0.001 3	0.258 0	0.006 4	0.036 3	0.000 3	257	62	233	2
69	9.00	320.16	0.03	0.048 0	0.001 8	0.243 5	0.009 1	0.036 8	0.000 4	98	-108	221	7
70	504.98	455.27	1.11	0.115 4	0.001 8	5.121 8	0.078 2	0.320 7	0.002 0	1 887	27	1 793	10
71	111.79	171.52	0.65	0.133 6	0.002 3	7.308 1	0.125 3	0.395 7	0.002 9	2 147	30	2 150	15
72	92.28	221.52	0.42	0.112 5	0.002 1	4.910 0	0.094 0	0.315 9	0.002 7	1 840	34	1 804	16
73	135.54	266.59	0.51	0.051 3	0.002 1	0.281 0	0.011 6	0.039 8	0.000 5	254	96	252	3
74	78.37	317.41	0.25	0.161 4	0.003 3	8.056 9	0.214 6	0.358 0	0.003 9	2 470	35	2 237	24
75	97.75	195.77	0.50	0.113 6	0.001 9	4.949 1	0.086 3	0.315 4	0.002 6	1 858	30	1 811	15
76	210.85	556.93	0.38	0.113 4	0.001 7	4.777 3	0.071 4	0.304 6	0.001 9	1 855	28	1 714	9
77	36.66	937.39	0.04	0.114 0	0.001 8	4.508 4	0.072 3	0.285 9	0.002 1	1 865	28	1 621	11
78	2.95	432.86	0.01	0.120 3	0.002 2	5.543 0	0.108 7	0.332 7	0.003 0	1 961	32	1 907	17
79	106.09	209.97	0.51	0.113 0	0.002 3	4.365 0	0.092 8	0.279 3	0.002 9	1 847	36	1 588	15
80	66.32	270.35	0.25	0.076 4	0.002 3	0.631 5	0.030 8	0.058 1	0.001 7	1 106	61	364	10

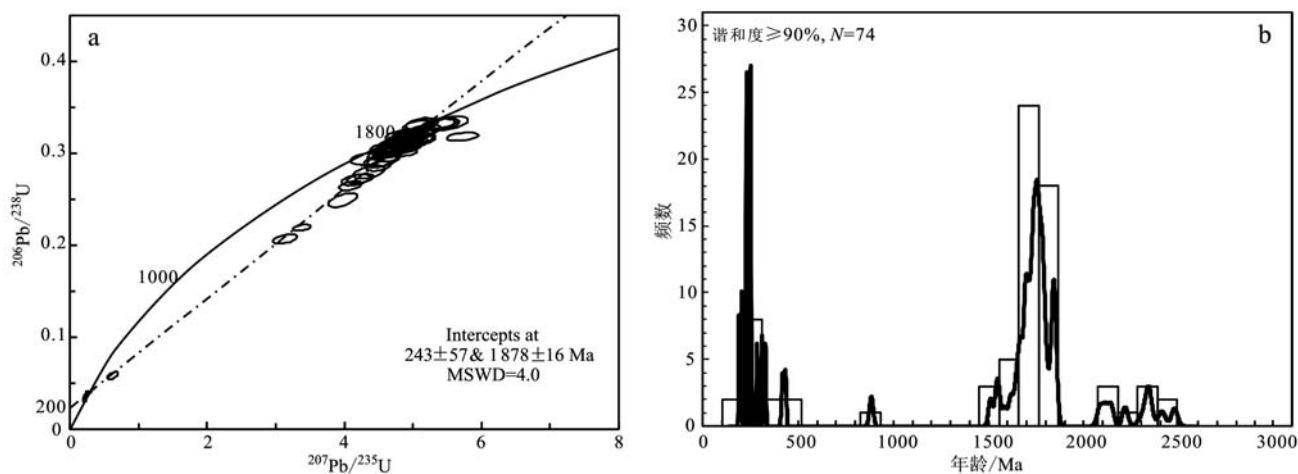


图4 枫坪组细砂岩样品碎屑锆石 U-Pb 谐和图(a)和年龄谱图(b)

Fig. 4 The U-Pb concordia plots(a) and age distribution patterns(b) of detrital zircons of fine sandstone from Fengping Formation

品中 δCe 均大于 1.05, 反映了枫坪组砂岩沉积环境为缺氧的还原环境。

不同成因类型的锆石, 其稀土元素配分模式存在较大差别 (Belousova *et al.*, 2002; 李小聪等, 2016)。典型的岩浆锆石稀土元素配分模式特征为正 Ce 异常、负 Eu 异常、HREE 富集, 典型的变质锆石稀土元素配分模式特征为正 Ce 异常、负 Eu 异常、HREE 相对平坦, 典型的热液锆石相应特征为负 Eu 异常、LREE 平坦, 同时 HREE 富集。图 5 显示本样品中绝大部分锆石具有岩浆锆石的典型特征, 即富集 HREE, 亏损 LREE, 从 LREE 到 HREE 元素的球粒陨石归一化值呈逐步上升的趋势, 并且具有 Ce 的正异常和 Eu 的负异常。同时也存在少量的变质锆石, 其稀土元素配分中 HREE 相对平坦, 具正 Ce 异常和负 Eu 异常。因此, 枫坪组细砂岩锆石以为岩浆锆石为主, 同时存在少量的变质锆石。

3.3 枫坪组沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年龄的地质意义

本次测试中最年轻的碎屑锆石年龄为 193 Ma, 显示该样品成岩年龄不晚于 193 Ma。通过对枫坪组细砂岩中所获得的谐和度较高 (大于 90%) 的年龄进行统计, 锆石年龄可分为 4 组, 分别为 2 461 ~ 1 743 Ma、887 Ma、435 和 422 Ma、330 ~ 193 Ma。通过锆石的形态、结构和稀土元素特征分析, 可确定样品中锆石多为岩浆成因的碎屑锆石, 因此每一个年龄区间的碎屑锆石均代表了一次岩浆构造事件。这些年龄区间的峰期年龄分别集中在 1 961 ~ 1 743 Ma、887 Ma、435 ~ 422 Ma 和 254 ~ 193 Ma, 在中国大地

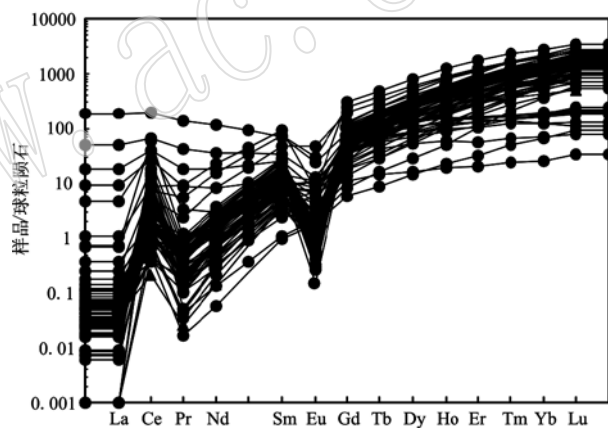


图5 枫坪组细砂岩碎屑锆石稀土元素球粒陨石标准化配分模式图 (标准值据 Taylor and McLennan, 1985)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns of detrital zircons of fine sandstone from Fengping Formation (normalization values after Taylor and McLennan, 1985)

构造期次上可分别对应吕梁期 (2 500 ~ 1 800 Ma)、晋宁期 (1 000 ~ 800 Ma)、加里东期 (600 ~ 400 Ma) 和印支-海西期 (355 ~ 200 Ma) 等构造运动期次, 表明本区的构造岩浆活动与中国大地构造运动相一致, 并具有幕式发展的特征。通过统计 4 组年龄区间的碎屑锆石颗数可知 2 461 ~ 1 743 Ma 年龄区间最多, 为 59 颗, 其他 3 组分别为 1 颗、2 颗和 12 颗, 可以推断研究区在吕梁期岩浆构造运动最为活跃, 晋宁期和加里东期岩浆构造运动微弱区域较稳定, 到印支期该区构造活动又开始活跃。研究区位于浙江省东南部且岩浆活动非常发育, 按照构造旋回和侵入时代, 浙江省岩浆活动可划分为中条期、晋宁

表 2 枫坪组细砂岩碎屑锆石稀土元素含量统计表
Table 2 The concentrations of rare earth elements in detrital zircons of fine sandstone from Fengping Formation

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δEu	$w_B/10^{-6}$
1	0.013	1.43	0.067	1.04	2.88	0.08	23.9	9.56	116.0	46.5	211	43.9	392	80.1	928.75	5.51	923.24	0.006	0.00	0.03	11.31
2	0.019	4.50	0.082	1.36	3.01	0.17	17.7	5.53	63.1	22.5	97	19.9	176	35.7	446.52	9.14	437.38	0.021	0.00	0.07	26.49
3	0.016	1.63	0.130	1.92	5.05	0.11	32.1	11.60	138.0	49.5	215	42.6	367	73.0	936.99	8.85	928.13	0.010	0.00	0.03	8.38
4	0.023	1.32	0.031	0.53	2.46	0.01	17.7	6.78	90.8	34.7	168	36.6	339	71.4	769.41	4.39	765.02	0.006	0.00	0.01	11.60
5	0.015	0.21	0.004	0.11	0.88	0.06	8.1	4.53	60.9	19.5	72	12.9	106	19.8	304.57	1.28	303.29	0.004	0.00	0.07	6.56
6	0.010	1.01	0.019	0.29	1.06	0.10	11.0	4.02	48.6	18.0	83	18.8	189	40.2	415.33	2.48	412.85	0.006	0.00	0.09	17.34
7	0.011	0.40	0.015	0.21	1.02	0.12	11.8	5.36	63.3	20.8	85	15.7	131	25.8	360.26	1.78	358.49	0.005	0.00	0.11	7.01
8	0.013	0.47	0.023	0.69	2.31	0.07	18.7	8.56	124.0	52.1	256	59.0	562	119.0	1201.98	3.57	1198.41	0.003	0.00	0.03	6.40
9	0.000	0.46	0.002	0.04	0.23	0.16	1.8	0.53	5.6	2.0	8	1.9	18	3.7	42.10	0.89	41.21	0.022	0.00	0.75	0.00
10	0.045	0.37	0.029	0.25	1.43	0.05	12.6	7.34	106.0	40.3	176	35.1	291	56.6	727.36	2.18	725.18	0.003	0.00	0.04	2.39
11	0.019	2.39	0.042	0.67	1.99	0.05	14.6	5.64	71.6	30.5	146	30.6	270	54.3	628.48	5.16	623.33	0.008	0.00	0.03	19.66
12	0.007	15.30	0.065	1.09	1.92	0.62	11.8	4.00	49.8	20.4	99	22.5	220	49.4	496.05	18.97	477.08	0.040	0.00	0.40	172.20
13	0.000	17.30	0.021	0.49	1.11	0.61	7.5	2.73	34.7	15.6	82	20.1	222	55.0	459.27	19.58	439.70	0.045	0.00	0.65	0.00
14	0.016	13.80	0.065	1.75	3.05	0.22	21.8	7.99	100.0	39.5	180	36.6	315	62.6	781.71	18.85	762.85	0.025	0.00	0.08	99.11
15	0.042	1.34	0.066	1.28	4.26	0.07	25.5	9.52	116.0	42.1	183	36.9	322	63.6	805.61	7.06	798.55	0.009	0.00	0.02	6.01
16	0.000	9.60	0.014	0.37	1.57	0.39	13.9	6.11	85.3	36.9	185	43.1	411	89.8	882.92	11.95	870.97	0.014	0.00	0.26	0.00
17	0.097	7.49	0.770	11.00	17.30	2.62	76.5	21.8	228.0	77.2	305	57.6	478	93.5	1377.71	39.33	1338.38	0.029	0.00	0.22	6.40
18	0.000	8.21	0.056	1.19	2.17	0.96	14.5	4.56	56.0	22.9	113	24.6	245	56.2	550.03	12.59	537.44	0.023	0.00	0.52	0.00
19	0.003	1.57	0.019	0.35	1.18	0.11	9.8	4.96	67.3	26.0	113	23.6	199	37.8	485.09	3.23	481.86	0.007	0.00	0.10	46.69
20	0.042	0.87	0.061	1.17	3.08	0.07	22.0	8.87	115.0	43.9	201	42.0	369	75.6	882.49	5.30	877.19	0.006	0.00	0.03	4.06
21	1.750	35.80	0.450	2.15	1.96	0.98	11.6	3.79	48.7	19.7	99	24.1	253	61.1	563.79	43.11	520.68	0.083	0.00	0.63	9.41
22	0.042	2.23	0.061	1.10	3.04	0.03	18.0	6.87	79.8	29.4	121	23.8	189	33.5	507.67	6.50	501.17	0.013	0.00	0.01	10.22
23	0.010	2.53	0.053	1.46	4.11	0.13	26.5	8.96	107.0	39.8	176	36.8	326	66.5	796.26	8.28	787.98	0.011	0.00	0.04	26.35
24	0.013	2.54	0.150	2.79	6.63	0.15	36.2	12.00	129.0	45.4	179	34.4	291	56.7	795.73	12.29	783.45	0.016	0.00	0.03	13.47
25	0.017	7.99	0.035	0.63	1.45	0.12	10.4	3.61	47.4	19.6	90	19.7	180	38.1	419.60	10.24	409.36	0.025	0.00	0.10	77.51
26	0.055	1.50	0.085	1.74	4.45	0.14	30.0	11.00	137.0	53.0	237	49.0	430	87.3	1041.77	7.96	1033.81	0.008	0.00	0.04	5.14
27	0.033	4.28	0.110	1.99	5.04	0.06	23.8	7.94	90.7	32.9	144	29.5	257	50.1	646.94	11.51	635.43	0.018	0.00	0.02	16.75
28	0.027	1.65	0.089	1.12	3.64	0.05	24.7	9.73	122.0	48.2	217	45.7	409	81.2	964.59	6.59	958.00	0.007	0.00	0.02	7.93
29	0.010	2.32	0.049	1.18	3.47	0.15	16.5	4.75	41.0	11.6	39	5.9	42	7.1	173.68	7.18	166.49	0.043	0.00	0.06	24.73
30	0.003	13.30	0.062	1.00	2.77	0.40	17.3	6.22	76.7	30.2	139	30.6	285	61.0	663.25	17.56	645.69	0.027	0.00	0.18	216.22
31	0.013	2.61	0.100	2.14	6.39	0.12	39.9	14.10	158.0	55.2	221	41.0	339	63.3	942.43	11.37	931.05	0.012	0.00	0.02	16.67
32	0.007	2.09	0.078	0.90	3.25	0.02	22.3	8.72	110.0	42.7	189	38.7	335	65.7	819.14	6.35	812.80	0.008	0.00	0.01	21.14
33	0.026	8.29	0.053	1.03	2.33	0.14	16.5	6.54	91.1	38.1	179	39.3	360	73.1	815.62	11.87	803.75	0.015	0.00	0.07	52.48
34	0.010	1.61	0.054	1.04	2.68	0.05	22.3	8.97	117.0	46.5	210	44.2	392	79.0	924.76	5.43	919.33	0.006	0.00	0.02	15.94
35	0.014	1.34	0.069	1.60	4.89	0.08	30.7	11.70	134.0	47.2	195	38.3	330	65.3	859.46	7.99	851.48	0.009	0.00	0.02	10.33
36	0.011	3.42	0.078	1.92	3.64	0.23	16.7	4.01	33.4	8.5	27	4.4	31	5.1	139.01	9.30	129.71	0.072	0.00	0.09	27.31
37	0.003	9.21	0.008	0.25	0.56	0.28	4.4	1.70	22.7	10.1	56	14.0	152	36.9	308.07	10.31	297.76	0.035	0.00	0.53	429.43
38	0.068	2.11	0.042	0.53	1.19	0.11	11.7	5.73	75.9	25.8	107	21.4	182	39.4	472.86	4.05	468.82	0.009	0.00	0.09	9.19

续表 2
Continued Table 2

点号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ REE	LREE	HREE	LREE/HREE	(La/Yb) _N	δ Eu	δ Ce
39	0.004	1.29	0.025	0.49	1.52	0.07	11.5	4.22	49.4	16.8	71	14.8	133	28.4	332.39	3.40	328.99	0.010	0.00	0.05	32.34
40	0.003	7.36	0.020	0.32	0.95	0.14	8.0	3.39	51.4	20.7	96	21.7	204	46.6	460.00	8.79	451.21	0.019	0.00	0.15	207.90
41	0.012	2.71	0.100	1.51	4.66	0.04	29.2	10.30	123.0	45.2	192	39.9	351	67.0	866.39	9.04	857.35	0.011	0.00	0.01	18.55
42	0.009	1.17	0.033	0.62	1.88	0.04	10.5	3.32	27.9	7.8	28	5.4	48	9.7	144.92	3.76	141.16	0.027	0.00	0.03	16.02
43	0.014	1.04	0.033	0.53	1.82	0.07	16.2	6.75	83.5	29.8	119	23.3	195	37.5	515.03	3.50	511.53	0.007	0.00	0.04	11.37
44	0.023	0.83	0.071	1.01	4.64	0.09	31.0	11.70	139.0	49.8	199	38.4	324	63.2	863.25	6.66	856.59	0.008	0.00	0.02	4.83
45	0.018	2.31	0.047	0.54	1.94	0.05	14.4	5.23	49.5	13.4	37	5.1	30	4.2	163.43	4.90	158.53	0.031	0.00	0.03	18.30
46	0.000	11.50	0.028	0.54	1.66	0.30	10.4	3.88	50.7	21.3	107	25.1	253	57.7	543.08	14.07	529.01	0.027	0.00	0.22	0.00
47	0.029	5.18	0.340	6.10	11.50	4.26	62.8	18.90	211.0	75.7	314	61.6	538	110.0	1419.47	27.38	1392.09	0.020	0.00	0.48	12.19
48	0.020	2.93	0.077	1.63	3.55	0.06	22.3	7.90	95.2	34.8	148	30.2	264	50.9	661.51	8.27	653.24	0.013	0.00	0.02	17.66
49	0.007	25.10	0.120	2.02	3.34	0.99	15.1	4.24	46.3	16.8	73	16.1	149	32.0	384.16	31.61	352.54	0.090	0.00	0.43	214.34
50	0.270	59.40	0.140	1.76	2.72	0.72	19.0	7.13	97.1	40.7	199	46.8	463	101.0	1038.12	65.03	973.09	0.067	0.00	0.31	71.48
51	0.018	5.26	0.079	1.40	3.22	0.07	22.1	7.75	97.8	37.2	161	33.2	284	55.7	709.67	10.05	699.62	0.014	0.00	0.03	32.33
52	0.012	3.66	0.091	2.03	5.72	0.09	38.4	14.0	175.0	67.2	285	57.5	487	94.1	1231.06	11.60	1219.47	0.010	0.00	0.02	25.39
53	0.006	1.50	0.081	1.22	3.20	0.08	20.1	7.37	94.7	37.9	165	34.9	314	63.5	743.43	6.10	737.33	0.008	0.00	0.03	16.14
54	0.010	0.89	0.005	0.16	0.93	0.08	6.9	2.52	21.4	5.1	15	2.5	18	3.1	76.66	2.08	74.59	0.028	0.00	0.10	29.52
55	0.037	1.78	0.064	0.86	2.62	0.06	20.1	8.06	107.0	43.6	198	42.7	369	73.8	866.95	5.41	861.54	0.006	0.00	0.03	8.58
56	0.010	1.58	0.067	1.13	3.39	0.07	25.6	10.00	112.0	33.8	126	24.5	205	41.0	585.07	6.26	578.82	0.011	0.00	0.02	14.75
57	0.002	2.34	0.065	1.35	3.56	0.48	24.2	7.41	88.8	33.7	143	28.6	244	48.8	627.32	7.80	619.52	0.013	0.00	0.16	45.07
58	0.006	1.62	0.067	1.13	3.59	0.13	26.6	9.53	117.0	45.2	196	40.9	360	71.9	873.85	6.54	867.32	0.008	0.00	0.04	19.09
59	0.015	2.91	0.022	0.49	2.90	0.03	19.4	6.44	55.8	13.9	42	6.7	49	8.2	207.76	6.38	201.38	0.032	0.00	0.01	36.99
60	19.400	66.20	6.070	26.90	8.23	1.18	23.0	6.94	79.9	30.3	140	31.4	292	62.5	793.95	127.94	666.00	0.192	0.04	0.26	1.43
61	71.200	189.00	19.700	84.90	16.80	2.12	25.5	5.45	49.6	17.1	76	16.9	165	37.3	776.79	383.82	392.97	0.977	0.29	0.31	1.18
62	0.140	1.79	0.170	1.14	1.72	0.21	12.2	5.39	70.7	26.1	119	26.3	240	50.6	555.85	5.17	550.69	0.009	0.00	0.14	2.67
63	3.640	26.80	1.270	6.22	2.81	0.20	14.2	5.49	72.9	31.3	156	35.3	350	75.6	781.79	40.97	740.82	0.055	0.01	0.09	2.93
64	0.022	1.89	0.093	1.92	5.60	0.12	32.2	11.10	128.0	48.1	210	42.3	374	76.1	932.05	9.64	922.42	0.010	0.00	0.03	9.89
65	0.020	0.99	0.072	1.28	4.23	0.08	28.9	11.40	140.0	54.1	230	45.8	398	79.9	994.52	6.67	987.85	0.007	0.00	0.02	6.12
66	0.096	0.81	0.100	0.79	2.11	0.68	18.0	6.68	57.3	13.8	43	6.6	51	8.7	209.43	4.59	204.83	0.022	0.00	0.34	1.90
67	0.016	0.82	0.037	0.52	2.79	0.08	19.3	5.38	43.2	10.8	35	5.5	44	7.7	174.41	4.26	170.14	0.025	0.00	0.03	7.92
68	7.100	39.00	2.620	13.20	6.08	0.71	22.6	7.69	90.7	35.2	167	36.1	352	74.3	854.16	68.71	785.45	0.087	0.01	0.18	2.12
69	0.000	0.81	0.007	0.21	0.77	0.22	3.6	0.87	6.7	1.8	5	0.9	7	1.4	29.15	2.02	27.13	0.075	0.00	0.41	0.00
70	0.410	8.54	1.280	16.40	21.80	0.70	97.1	28.50	308.0	107.0	437	82.6	681	134.0	1924.66	49.13	1875.53	0.026	0.00	0.05	2.75
71	0.260	17.70	0.090	0.78	0.99	0.33	6.1	2.02	26.6	10.9	55	13.0	144	33.3	310.96	20.13	290.83	0.069	0.00	0.42	27.17
72	0.020	2.35	0.057	1.38	3.71	0.10	26.2	8.86	112.0	43.0	189	37.4	336	65.6	826.13	7.61	818.52	0.009	0.00	0.03	16.10
73	0.003	17.70	0.021	0.38	0.90	0.52	5.8	1.73	20.8	9.1	50	12.5	144	38.7	301.88	19.55	282.32	0.069	0.00	0.70	533.76
74	0.009	1.45	0.052	1.11	3.96	0.12	18.6	4.31	35.4	10.9	45	9.9	99	21.4	251.60	6.71	244.90	0.027	0.00	0.04	16.24
75	0.009	2.10	0.130	2.52	5.88	0.16	35.2	11.00	116.0	35.4	128	21.2	163	28.5	548.52	10.79	537.73	0.020	0.00	0.03	14.65
76	0.003	2.01	0.026	0.51	1.81	0.04	11.9	4.48	51.7	20.9	96	21.3	205	45.3	461.08	4.40	456.68	0.010	0.00	0.03	55.00
77	0.025	1.15	0.030	0.56	2.36	0.09	13.8	4.64	46.7	15.2	70	15.8	158	32.2	360.79	4.22	356.58	0.012	0.00	0.05	9.91
78	0.019	0.63	0.006	0.094	0.26	0.19	2.5	0.93	10.9	4.4	26	7.4	90	22.8	165.46	1.20	164.26	0.007	0.00	0.72	13.72
79	0.014	3.40	0.058	1.08	2.60	0.12	12.7	3.54	32.8	9.6	33	5.5	43	7.7	154.98	7.28	147.70	0.049	0.00	0.06	27.86
80	0.003	1.52	0.014	0.51	2.09	0.25	16.2	5.16	63.3	24.5	115	24.7	233	50.3	537.29	4.39	532.90	0.008	0.00	0.13	56.62

期、加里东期、印支-海西期、燕山期及喜马拉雅期。由碎屑锆石 U-Pb 年龄分组集中特征显示,样品中年龄为 1 961 ~ 1 743 Ma 的一组碎屑锆石数量最多占总数的 54%,与已知的中条运动相对应。浙江省中条期岩浆岩仅分布在江绍拼接带以南的华夏地块中,主要侵位于八都岩群古老变质岩中的花岗质岩体。近年来有关中条期花岗质岩体发表了大量的同位素测年资料,岩体形成时代在 1 900 ~ 1 800 Ma 之间,形成于古元古代。松阳里庄二长花岗岩年龄为 $1\,870 \pm 36$ Ma(甘晓春等, 1995),黑云母花岗岩锆石 U-Pb 同位素年龄为 $1\,875 \pm 9$ Ma(Yu *et al.*, 2009),中粗粒钾长花岗岩年龄为 $1\,861 \pm 35$ Ma(Xia *et al.*, 2012)。汪建国等(2013)^①报道松阳金竹岩体锆石同位素定年结果为 $1\,830 + 99/-54$ Ma。该组碎屑锆石年龄与中条期岩浆岩地质年龄基本吻合且出露地理位置接近,推断该组年龄段锆石大部分来源于周边出露的中条期侵入岩体。样品中年龄为 254 ~ 193 Ma 的碎屑锆石数量为 9 颗,占总数的 12%,该组年龄段与已知的岩浆事件(印支运动)时间相对应。印支运动构造表现在华南各处较为常见(毛建仁等, 2014),近年来在浙江东南部也发现了较多的印支期花岗岩体,高万里等(2014)对松阳县靖居岩体石英正长岩进行锆石 U-Pb 同位素定年可知年龄为 245.7 ~ 241.2 Ma 之间。李万友等(2012)对靖居岩体正长花岗岩进行锆石 U-Pb 同位素定年得到成岩年龄为 215 ± 2 Ma。遂昌翁山二长花岗岩的锆石 SHRIMP 年龄为 225 ± 1 Ma(Yang *et al.*, 2011)。印支期花岗岩体在浙东南出露面积较小且分布不广泛,仅限于江绍拼接带以东、丽水-舟山断裂带以西的隆起带上,空间分布上与古元古代变质岩关系密切。因此推断该组年龄段碎屑锆石可能来自于浙东南出露的印支期花岗岩体。

4 结论

(1) 锆石 U-Pb 同位素定年分析结果可知,最年轻的锆石年龄为 193 Ma,显示枫坪组沉积岩成岩年龄不晚于 193 Ma。

(2) 样品中锆石稀土元素含量变化范围较大, $(La/Yb)_N$ 值、LREE/HREE 值等表明样品中锆石的轻、重稀土元素分异程度较小且重稀土元素相对富

集。不同年龄段的碎屑锆石均具有轻稀土元素含量低、重稀土元素含量高的左倾模式且具有适度的负 Eu 异常、正 Ce 异常。锆石稀土元素配分模式特征显示,本样品中锆石主要以岩浆锆石为主,同时存在少量的变质锆石。

(3) 锆石年龄可分为 4 组,分别为 2 461 ~ 1 743 Ma、887 Ma、435 和 422 Ma、330 ~ 193 Ma,在中国大地构造期次上可分别对应吕梁期、晋宁期、加里东期和印支-海西期,表明本区的构造岩浆活动与中国大地构造运动相一致,并具有幕式发展的特征。通过对枫坪组沉积岩碎屑锆石 U-Pb 年龄的系统分析与可能物源区的年代学的对比研究显示,枫坪组沉积岩物质来源主要是周边出露的中条期侵入岩体和浙东南出露的印支期花岗岩体。

References

- Belousova E A, Griffin W L, Oreilly S Y, *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602 ~ 622.
- Gan Xiaochun, Li Huimin, Sun Dazhong, *et al.* 1995. A geochronological study on Early Proterozoic granitic rocks, Southwestern Zhejiang[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(1): 1 ~ 8(in Chinese with English abstract).
- Gao Wanli, Wang Zongxiu, Li Chunlin, *et al.* 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and tectonic implication of Indosinian granite from Southeastern Zhejiang, South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 88(6): 1 055 ~ 1 067(in Chinese with English abstract).
- Gehrels G J, Jojansson M J and Howell D G. 1999. Detrital zircon geochronology of the Adams Argillite and Nation River Formation, east-central Alaska, USA[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 69(1): 135 ~ 144.
- Lan Zhongwu, Chen Yuelong, Su Benxun, *et al.* 2006. The origin of sandstones from the Songpan-Ganze Basin, Sichuan, China: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of elastic zircons[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(3): 321 ~ 332(in Chinese with English abstract).
- Lei Kaiyu. 2015. Rare earth elements of detrital zircon characteristics and geological significance of Zhiluo Formation in Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. *Journal of Yanan University(Natural Science Edition)*, 34(4): 58 ~ 62(in Chinese with English abstract).

① 汪建国, 余盛强, 吴 鸣, 等. 2013. 1:250 000 衢州市区域地质调查报告.

- Lei Weiyan, Shi Guanghai and Liu Yingxin. 2013. Research progress on trace element characteristics of zircons of different origins[J]. *Earth Science*, 20(4): 173 ~ 284 (in Chinese with English abstract).
- Li Wanyou, Ma Changqian, Liu Yuanyuan, *et al.* 2012. Discovery of the Indosinian aluminum A-type granite in Zhejiang Province and its geological significance[J]. *Sci. China Earth Sci.*, 55: 13 ~ 25 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaocong, Wang Andong, Wan Jianjun, *et al.* 2016. Tracing the stream sediment of the Ganjiang River(Nanchang Section): Constraint from the detrital zircon U-Pb isotope evidence[J]. *Geoscience*, 30(3): 514 ~ 527 (in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2003. Users Manual for Isoplot/Ex. Version3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, (3): 1 ~ 70.
- Mao Jianren, Li Zilong and Ye Haimin. 2014. Mesozoic tectono-magmatic activities in South China: Retrospect and prospect[J]. *Science China: Earth Sciences*, 57: 2 853 ~ 2 877 (in Chinese with English abstract).
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1 ~ 312.
- Wang Wei, Liu Chengdong, Liu Jianghao, *et al.* 2012. Geological characteristics and metallogenic condition analysis in songyang fluorite ore deposit[J]. *Journal of East China Institute of Technology(Natural Science Edition)*, 35(1): 66 ~ 74 (in Chinese with English abstract).
- Viola G and Anczkiewicz. 2008. Exhumation history of the Red River shear zone in northern Vietnam: New insights from zircon and apatite fission-track analysis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33(1/2): 78 ~ 90.
- Xia Y, Xu X S and Zhu K Y. 2012. Paleoproterozoic S-and A -type granites in southwestern Zhejiang: Magmatism, metamorphism and implications for the crustal evolution of the Cathaysia basement[J]. *Precambrian Research*, 216 ~ 219(9): 177 ~ 210.
- Yang S, Ma C Q, Liu Y Y, *et al.* 2011. Geochronological and geochemical constraints on The petrogenesis of late Triassic aluminous A-type granites in southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(6): 1 117 ~ 1 131.
- Yu J H, Wang L, O Reilly S, *et al.* 2009. A Paleoproterozoic orogeny recorded in a long-lived Cratonic remnant, eastern Cathaysia Block, China[J]. *Precambrian Research*, 174(3): 347 ~ 363.

附中文参考文献

- 甘晓春, 李惠民, 孙大中, 等. 1995. 浙西南早元古代花岗质岩石的年代[J]. *岩石矿物学杂志*, 14(1): 1 ~ 8.
- 高万里, 王宗秀, 李春麟, 等. 2014. 浙东南印支期花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及构造意义[J]. *地质学报*, 88(6): 1 055 ~ 1 067.
- 兰中伍, 陈岳龙, 苏本勋, 等. 2006. 四川松潘-甘孜盆地砂岩的物质来源: 来自锆石 U-Pb (SHRIMP) 年龄证据[J]. *沉积学报*, 24(3): 321 ~ 332.
- 雷开宇. 2015. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区直罗组碎屑锆石稀土元素特征及地质意义[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 34(4): 58 ~ 62.
- 雷玮琰, 施光海, 刘迎新. 2013. 不同成因锆石的微量元素特征研究进展[J]. *地学前缘*, 20(4): 273 ~ 284.
- 李万友, 马昌前, 刘园园, 等. 2012. 浙江印支期铝质 A 型花岗岩的发现及其地质意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 42(2): 164 ~ 177.
- 李小龙, 王安东, 万建军, 等. 2016. 赣江流域(南昌段)水系沉积物物源示踪研究: 来自锆石 U-Pb 同位素证据的约束[J]. *现代地质*, 30(3): 514 ~ 527.
- 毛建仁, 厉子龙, 叶海敏. 2014. 华南中生代构造-岩浆活动研究: 现状与前景[J]. *中国科学(D 辑)地球科学*, 44(12): 2 593 ~ 2 617.
- 王伟, 刘成东, 刘江浩, 等. 2012. 浙江松阳萤石矿床地质特征及成矿条件分析[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 35(1): 66 ~ 74.