

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2019.02.003

引用格式:刘健,陈小友,汪一凡,等. 浙江天目山地区次火山岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. 华东地质, 2019, 40(2): 99-107.

浙江天目山地区次火山岩锆石 U-Pb 年龄及地质意义

刘 健, 陈小友, 汪一凡, 张建芳, 刘风龙, 陈津华

(浙江省地质调查院, 杭州 311203)

摘要: 通过对浙江天目山火山盆地进行详细的野外地质调查, 在圈定火山机构、划分火山岩性岩相的基础上, 对该火山机构的次火山岩和邻区的火山岩进行岩石学、地球化学和锆石 U-Pb 同位素年代学研究。所研究的岩石具准铝质特征, 轻、重稀土元素分异较显著, 是晚期岩浆作用的产物, 形成于火山弧构造环境。测得次火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为 126 ± 2 Ma 和 132 ± 4 Ma, 表明该区火山喷发具有阶段性和持续性, 天目山地区火山作用的时间上限约为 126 Ma, 可与华南地区燕山期火山活动进行对比。

关键词: 次火山岩; 锆石 U-Pb 年代学; 地质意义; 天目山; 浙江

中图分类号: P588.13; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2019)02-099-09

浙江天目山火山盆地位于江南造山带北东端, 是造山带内保存较完整的中生代火山盆地, 属于华南燕山期火山-岩浆大爆发的产物。天目山盆地主要出露中酸性火山岩, 并产出少量次火山岩系, 在火山喷发前后伴随较多的中酸性岩体侵入活动。前人主要侧重于天目山地区火山岩年代学研究^[1-6]。王德恩等^[7]对天目山火山盆地黄尖组下段流纹岩和英安岩进行锆石 U-Pb 同位素定年, 分别获得了 133.6 ± 1.5 Ma 和 135.0 ± 2.1 Ma 的年龄; 张万林等^[8]测得天目山火山盆地的流纹岩 Rb-Sr 等时线年龄约为 132.14 ± 0.25 Ma; 颜铁增等^[9]、徐步台等^[10]和俞云文等^[11]均认为天目山火山盆地黄尖组年龄为 120~135 Ma。目前, 对天目山火山活动末期的次火山岩及火山活动的持续性和阶段性研究相对较少。

本文对浙江天目山火山盆地次火山岩及邻区的火山岩进行研究, 在野外地质调查的基础上, 对次火山岩的岩石地球化学特征和锆石 U-Pb 同位素年代学特征进行研究, 为探讨天目山盆地火山活动时限及构造环境提供参考。

1 地质背景

研究区位于江山—绍兴拼合带北西侧, 属于江南造山带北东段。该区火山岩堆积在下古生界之上, 面积约 800 km², 构成数座海拔约 1 500 m 的山峰。火山活动可划分为 4 个火山喷发韵律: 第一韵律火山岩下部含凝灰质砂岩和粉砂岩等火山沉积碎屑岩, 上部为火山角砾岩, 含流纹质凝灰岩、熔结凝灰岩和流纹岩, 厚约 1 250 m; 第二韵律由一套深灰色、紫红色流纹岩和流纹质熔结凝灰岩组成, 厚约 706 m; 第三韵律主要由深灰色英安岩和英安质熔结凝灰岩组成, 底部含火山集块岩, 厚约 1 280 m; 第四韵律主要由一套灰黑色安山岩组成, 岩性较单一, 厚 > 540 m。第一韵律和第二韵律火山活动的产物归为黄尖组一段, 第三韵律和第四韵律火山活动的产物归为黄尖组二段。在天目山火山构造洼地中心发育次火山岩, 边缘有早白垩世中酸性侵入岩侵入(图 1)。

* 收稿日期: 2018-04-16 修订日期: 2018-08-30 责任编辑: 谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局“浙江 1:5 万杭垓(H50E009022)、仙霞(H50E010022)、船村(H50E010023)幅区域地质矿产调查(编号: 1212011220527)”项目资助。

第一作者简介: 刘健, 1983 年生, 男, 工程师, 主要从事矿产地质调查与研究工作。

在南京大学内生金属矿床成矿作用国家重点实验室完成。ICP-MS 型号为 Agilent7500a 型,激光剥蚀系统为 New Wave 公司生产的 UP213 固体激光剥蚀系统,采用 He 气作为载气,激光脉冲重复频率为 5 Hz,脉冲能量为 10~20 J/cm²,熔蚀孔径为 30~40 μm,背景测量时间为 40 s,剥蚀时间为 60 s,积分时间²⁰⁶Pb、²⁰⁷Pb、²⁰⁸Pb、²³²Th 和 ²³⁸U 分别为 15 ms、30 ms、0 ms、10 ms 和 15 ms,质量分馏校正采用标样 GEMOC/GJ-1^[13],分析数据通过分析软件 GLITTER^[14]计算获得同位素比值、年龄、误差、Th 含量和 U 含量。用²⁰⁴Pb 进行普通铅校正,单个测试数据误差为 1σ,²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄误差为 2σ。

3 地球化学特征

3.1 主量元素

样品的主量元素地球化学分析结果见表 1, SiO₂

含量为 60.48%~74.67%, TiO₂ 含量为 0.14%~0.83%, CaO 含量为 1.14%~4.30%。TFe 含量为 1.58%~6.04%, Al₂O₃ 含量为 12.60%~16.13%, MgO 含量为 0.33%~2.55%, K₂O 含量为 4.01%~5.60%, Na₂O 含量为 3.02%~3.92%, 全碱含量为 7.46%~9.39%, K₂O/Na₂O 值为 1.08~1.50。里特曼指数(σ)为 1.79~3.72,表明岩石为钙碱性-碱性岩。样品 A/CNK 值为 0.84~1.06,在 A/CNK-A/NK 图(图 2)上,大部分样品分布在准铝质区。在 Harker 图解上(图略), SiO₂ 与 K₂O 呈正相关,与 Al₂O₃、MgO、TFe、TiO₂、Na₂O、CaO 和 P₂O₅ 呈负相关,说明该区次火山岩可能为同源岩浆分异演化的产物^[15]。随着分异演化程度提高,岩石逐渐向酸性演化,碱含量逐渐降低,反映深部岩浆可能发生一定程度的斜长石、磷灰石及钛铁矿分离结晶作用。在 TAS 分类图(图 3)上,次火山岩落在粗面英安岩区。

表 1 天目山地区火山岩主量元素地球化学分析结果

Table 1 Analysis results of major element contents of the sub-volcanic rocks in the Tianmushan

样号	含量/%													特征参数				
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量	K ₂ O+Na ₂ O	K ₂ O/Na ₂ O	A/CNK	σ	
D0015	60.48	0.83	15.30	2.57	3.09	0.12	2.55	4.30	3.71	4.01	0.34	2.31	99.61	7.72	1.08	0.84	3.41	
D0024	65.69	0.58	15.20	1.60	2.53	0.099	1.44	2.95	3.67	4.41	0.16	1.35	99.69	8.09	1.20	0.94	2.88	
D0070*	66.68	0.45	15.37	1.91	1.58	0.09	0.89	1.86	3.92	5.47	0.13	1.45	99.80	9.39	1.40	0.97	3.72	
D0071*	68.31	0.42	14.32	1.22	2.14	0.09	1.14	2.41	3.41	4.67	0.13	1.49	99.75	8.09	1.37	0.95	2.59	
D0072*	74.67	0.14	12.60	0.38	1.20	0.08	0.33	1.14	3.02	4.50	0.03	1.76	99.83	7.52	1.49	1.06	1.79	
D0073*	70.72	0.21	14.98	0.82	1.33	0.08	0.39	1.18	3.74	5.60	0.04	0.78	99.87	9.34	1.50	1.04	3.15	
D0074*	60.75	0.81	16.13	4.12	1.92	0.11	2.15	4.16	3.40	4.06	0.27	1.87	99.75	7.46	1.19	0.92	3.14	

注: * 为火山岩数据; A/CNK = [ω(Al₂O₃)/102]/[ω(CaO)/56 + ω(Na₂O)/62 + ω(K₂O)/94]; σ = [ω(K₂O + Na₂O)]²/[ω(SiO₂ - 43)]。测试单位为自然资源部杭州矿产资源监督检测中心。

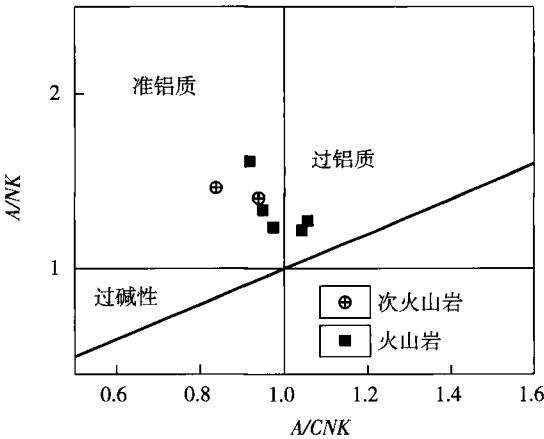


图 2 天目山次火山岩 A/CNK-A/NK 图解^[16]

Fig. 2 A/CNK vs. A/NK discrimination diagram of the sub-volcanic rocks in the Tianmushan^[16]

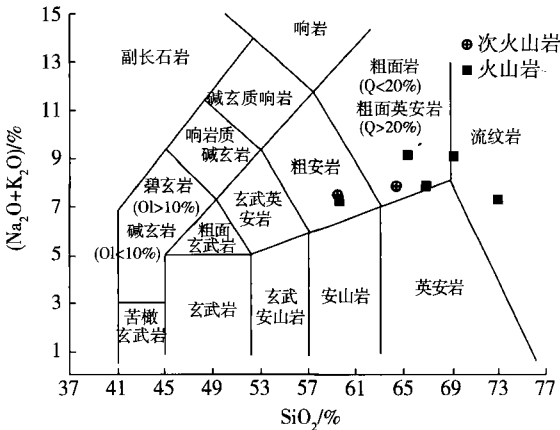


图 3 天目山次火山岩 TAS 判别图

Fig. 3 TAS discrimination diagram of the sub-volcanicrocks in the Tianmushan

3.2 微量元素和稀土元素

样品的微量元素和稀土元素含量见表 2。由原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 4)可知,样品大离子亲石元素(LILE)相对富集,Nb、Ta 相对亏损,Pb 呈正异常,Sr 和 Ti 呈负异常。球粒陨石标准化

稀土元素配分曲线(图 5)整体右倾,轻稀土元素相对富集,重稀土相对亏损,Eu 负异常。 $(La/Yb)_N$ 为 6.32~11.12,轻、重稀土元素分异较显著,表明岩浆经历了一定程度的分异演化^[17]。

表 2 天目山火山岩微量元素和稀土元素含量及特征参数

Table 2 Abundances of trace elements and REEs and characteristic parameters of the sub-volcanic rocks in the Tianmushan

样号	含量/ 10^{-6}												
	Rb	Ba	Th	U	Nb	Ta	La	Ce	Pb	Pr	Sr	Nd	Zr
D0015	135.4	846.3	11.9	3.17	14.31	1.36	39.66	80.58	19.42	10	451.3	42.22	230
D0024	150.7	730.5	13.15	3.3	14.8	0.99	45.66	91.21	21.83	10.73	224.6	43.89	224
D0070*	175.3	1166	14.24	3.64	16.09	0.71	43.27	86.2	23.66	10.01	229.7	40.72	295
D0071*	158.6	523.2	17.06	3.32	13.79	0.64	43.81	89.16	25.33	10.39	205.8	41.53	180
D0072*	183.6	203.2	20.72	5.42	19.79	0.98	36.38	75.73	22.08	9.14	35.05	37.2	146
D0073*	216.6	401.8	17.73	3.99	20.62	0.96	49.78	96.23	28.77	10.93	81.9	42.1	278
D0074*	125.3	943.9	9.25	1.95	13.88	1.15	40.57	79.92	19.1	9.86	551.4	41.9	254
样号	含量/ 10^{-6}												参数
	Sm	Eu	Ti	Gd	Tb	Dy	Y	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	$(La/Yb)_N$
D0015	8.19	1.58	4999.69	6.83	0.97	5.4	31.07	1.04	3.11	0.42	2.81	0.44	10.12
D0024	8.21	1.29	3475.02	6.97	1.05	6.03	34.16	1.19	3.56	0.5	3.35	0.5	9.78
D0070*	7.57	1.51	2672.35	6.31	0.95	5.39	31.32	1.08	3.28	0.48	3.24	0.51	9.59
D0071*	7.79	1.02	2511.17	6.5	0.98	5.6	31.67	1.08	3.28	0.47	3.1	0.48	10.15
D0072*	7.72	0.41	813.96	6.72	1.11	6.5	39.43	1.32	4.07	0.61	4.13	0.63	6.32
D0073*	7.43	0.86	1247.12	6.02	0.93	5.34	31.1	1.05	3.25	0.47	3.21	0.49	11.12
D0074*	8.02	1.66	4854.69	6.58	0.96	5.44	29.69	1.06	3.1	0.43	2.82	0.43	10.32

注: * 为火山岩数据; $(La/Yb)_N$ 为球粒陨石标准化后的 La 和 Yb 比值。测试单位为自然资源部杭州矿产资源监督检测中心。

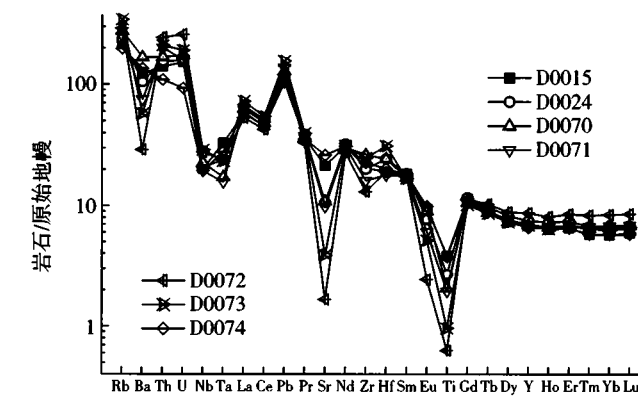


图 4 天目山火山岩原始地幔标准化微量元素蛛网图^[18]
Fig. 4 Primitive mantle-normalized trace element diagram of the sub-volcanic rocks in the Tianmushan

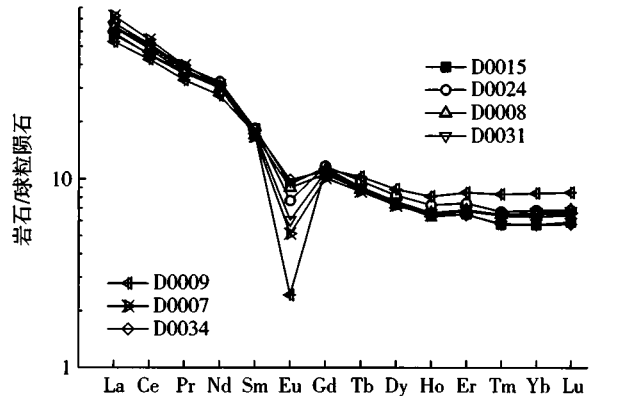


图 5 天目山火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图^[18]
Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution diagram of the sub-volcanic rocks in the Tianmushan

3.3 构造环境

在 Rb-(Y+Nb)构造环境判别图解(图 6(a))上,所研究的火山岩样品落在火山弧区;在 Nb-(Y+Nb)

构造环境判别图(图 6(b))上均落在火山弧与同碰撞区,表明所研究的次火山岩可能形成于火山弧构造环境。

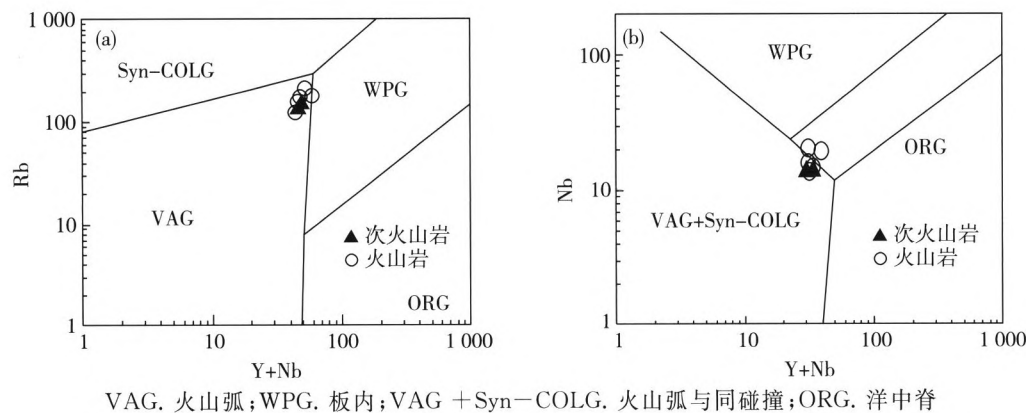


图 6 天目山次火山岩 Rb-(Y+Nb)判别图(a)和 Nb-(Y+Nb)构造环境判别图(b)^[19]

Fig. 6 Rb vs. (Y+Nb) discrimination diagram (a) and Nb vs. (Y+Nb) tectonic setting discrimination diagram (b) for the sub-volcanic rocks in the Tianmushan^[19]

4 锆石 U-Pb 年代学特征

从编号为 D0015 和 D0024 的样品中挑选用于定年的锆石,多呈长柱状。CL 阴极发光图(图 7)显示,锆石多数具有典型的环带结构。

对 D0015 和 D0024 样品分别测定 18 个点,测点主要分布在锆石环带上,测试数据如表 3 所示。样品测点 Th/U 值均>0.3,应为岩浆成因锆石^[20]。2 个样品分别获得锆石 U-Pb 谐和年龄为 126±2 Ma和 132±4 Ma(图 8),代表岩石的成岩年龄。

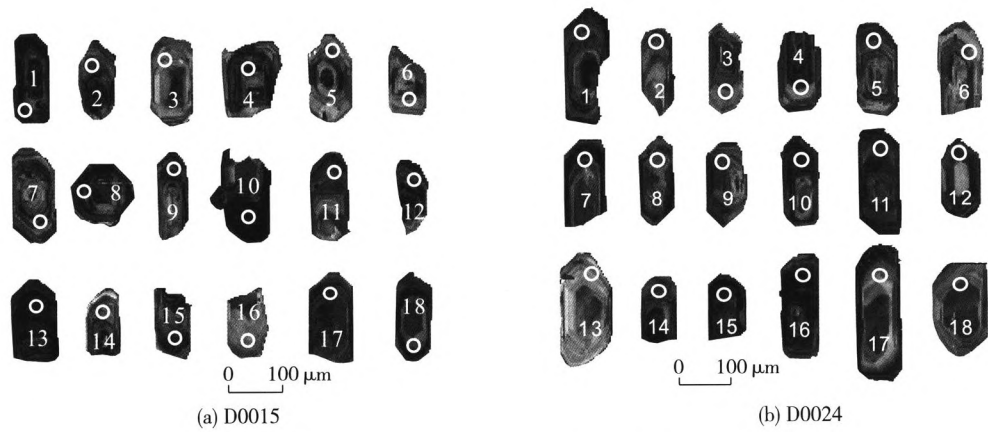


图 7 天目山次火山岩锆石阴极发光图像及测点位置

Fig. 7 Cathodoluminescence images and testing positions of zircon grains from the sub-volcanic rocks in the Tianmushan

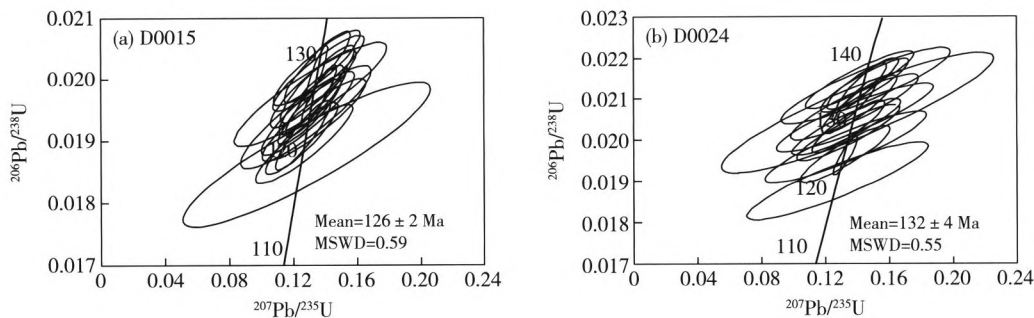


图 8 天目山次火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 8 U-Pb concordant plots for zircons from the sub-volcanic rocks in the Tianmushan

5 讨论

浙江地区晚中生代火山岩分为上、下两个火山岩系,其中下火山岩系称为建德群(浙西北)和磨石山群(浙东南)。下火山岩系喷发主体时代为早白垩世早期,其中浙西北地区火山岩层位为建德群第一旋回劳村组、黄尖组和第二旋回寿昌组、横山组,喷发时限为136~115 Ma^[5,21]。本文研究的天目山火山盆地位于下扬子陆块南东缘,介于东南沿海火山岩区与长江中下游火山岩区之间,火山岩层位为下火山岩系第一旋回黄尖组,前人研究获得其喷发时代为135~125 Ma^[5,21],与长江中下游成矿带火山岩喷发时限(135~123 Ma)^[22]一致。

本文获得天目山火山盆地次火山岩的年龄分别为126 Ma和132 Ma,为早白垩世火山岩浆活动的产物,与华南早白垩世火山活动的时间对应。研究表明,次火山岩是火山喷发旋回末期沿火山构造侵入而形成的岩石,明显受火山构造控制,并遭受后期剥蚀出露地表,可限定寄主火山岩形成时代的上限。本文2处次火山岩体可能代表2个不同火山机构,火山喷发结束时间分别为126 Ma和132 Ma,说明研究区火山喷发作用具有阶段性和持续性,最后一次喷发直至约126 Ma才结束,即天目山地区火山岩的形成时代上限约为126 Ma。天目山地区初

始喷发时间约为135 Ma^[7],一直持续到132 Ma,经短暂间歇后,再次活化,至126 Ma,火山作用减弱,火山盆地基本形成。

燕山期,华南地区主要受古太平洋构造体系控制,处在古太平洋板块俯冲带及其弧后扩张体系中,引发了大规模火山-侵入活动,形成大陆边缘广泛分布的钙碱性火山岩系列^[23-29]。舒良树等^[30]认为,印支期华南主要受特提斯构造域控制,但自晚中生代开始,古太平洋板块对欧亚大陆板块进行消减,使华南地壳整体处于伸展应力环境,经历了2个时期:燕山早期,主要发生在华南内陆,特别是南岭板内岩浆活动阶段;燕山晚期,主要发生在沿海陆缘弧岩浆活动阶段和内陆弧后阶段,是大洋板片对大陆消减中伸展增生造山的早、晚两个时期。地壳伸展-减压熔融和玄武岩底侵,是产生燕山期花岗质岩浆的主要原因。中晚侏罗世,华南地区主要为古太平洋构造域活动大陆边缘俯冲挤压的造山环境^[31-33],在区域整体挤压背景下,局部存在拉张^[31];早白垩世早期,华南地区为碰撞造山后的陆内伸展拉张环境^[31-32]。在构造环境判别图上,本文所研究的样品均落入火山弧区,应为早白垩世早期伸展拉张环境下大规模岩浆喷发的产物。因此,该区火山活动可能是华南地区燕山期火山活动在该区的响应。

表3 天目山次火山岩锆石 U-Pb 年龄测试数据

Table 3 U-Pb age data of zircons from the sub-volcanic rocks in the Tianmu Mountain

测点	同位素比值						年龄/Ma						Th/U
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±σ%	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±σ%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±σ%	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	±σ%	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	±σ%	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	±σ%	
D0015-1	0.049 6	0.004 8	0.134 49	0.012 8	0.019 67	0.000 4	176	177	128	11	126	2	0.54
D0015-2	0.049 01	0.006 9	0.135 85	0.019 0	0.020 11	0.000 4	148	258	129	17	128	3	0.57
D0015-3	0.049 52	0.019 9	0.128 31	0.051 5	0.018 79	0.000 8	173	624	123	46	120	5	0.46
D0015-4	0.048 46	0.004 9	0.130 18	0.013 1	0.019 48	0.000 4	122	191	124	12	124	2	0.46
D0015-5	0.048 38	0.006 5	0.134 74	0.018 0	0.020 2	0.000 4	118	245	128	16	129	3	0.53
D0015-6	0.049 76	0.008 1	0.132 76	0.021 6	0.019 35	0.000 4	184	291	127	19	124	3	0.72
D0015-7	0.047 69	0.005 8	0.125 26	0.015 0	0.019 05	0.000 4	84	225	120	14	122	2	0.43
D0015-8	0.048 45	0.007 7	0.126 67	0.020 1	0.018 96	0.000 4	121	278	121	18	121	3	0.77
D0015-9	0.049 15	0.005 7	0.135 05	0.015 5	0.019 93	0.000 4	155	218	129	14	127	3	0.55
D0015-10	0.049 9	0.002 7	0.135 91	0.007 3	0.019 75	0.000 3	190	94	129	7	126	2	0.36
D0015-11	0.048 06	0.007 2	0.128 96	0.019 3	0.019 46	0.000 5	102	260	123	17	124	3	0.48
D0015-12	0.047 81	0.004 4	0.125 91	0.011 5	0.019 1	0.000 4	90	166	120	10	122	2	0.44
D0015-13	0.048 2	0.001 7	0.134 49	0.004 7	0.020 1	0.000 3	125	53	128	4	128	2	0.38
D0015-14	0.047 80	0.010 2	0.127 87	0.027 2	0.019 4	0.000 6	89	334	122	24	124	3	0.53
D0015-15	0.048 47	0.005 0	0.135 07	0.013 8	0.020 21	0.000 4	122	192	129	12	129	2	0.48

续表3

测点	同位素比值						年龄/Ma						Th/U
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
		$\pm\sigma\%$		$\pm\sigma\%$		$\pm\sigma\%$		$\pm\sigma\%$		$\pm\sigma\%$		$\pm\sigma\%$	
D0015-16	0.048 0	0.011 7	0.130 89	0.031 7	0.019 77	0.000 6	99	377	125	28	126	4	0.53
D0015-17	0.048 35	0.004 9	0.131 22	0.013 3	0.019 68	0.000 4	116	192	125	12	126	2	0.62
D0015-18	0.048 34	0.006 5	0.132 4	0.017 9	0.019 86	0.000 4	116	245	126	16	127	3	0.54
D0024-1	0.048 28	0.007 7	0.134 23	0.021 3	0.020 17	0.000 5	113	278	128	19	129	3	0.50
D0024-2	0.049 37	0.012 0	0.145 09	0.035 0	0.021 32	0.000 6	165	387	138	31	136	4	0.50
D0024-3	0.048 87	0.006 9	0.132 37	0.018 6	0.019 65	0.000 5	142	254	126	17	125	3	0.48
D0024-4	0.049 12	0.019 9	0.139 95	0.056 2	0.020 67	0.001 0	154	612	133	50	132	6	0.45
D0024-5	0.047 47	0.008 1	0.132 9	0.022 5	0.020 31	0.000 5	73	279	127	20	130	3	0.52
D0024-6	0.048 86	0.011 5	0.138 37	0.032 4	0.020 54	0.000 6	141	375	132	29	131	3	0.47
D0024-7	0.049 11	0.005 4	0.141 23	0.015 5	0.020 86	0.000 5	153	203	134	14	133	3	0.38
D0024-8	0.048 21	0.009 3	0.138 25	0.026 5	0.020 8	0.000 5	110	310	131	24	133	3	0.50
D0024-9	0.047 76	0.007 6	0.141 27	0.022 4	0.021 46	0.000 5	87	276	134	20	137	3	0.58
D0024-10	0.048 1	0.003 1	0.138 71	0.009 0	0.020 92	0.000 4	104	112	132	8	133	2	0.41
D0024-11	0.048 62	0.005 1	0.143 21	0.014 9	0.021 37	0.000 4	130	196	136	13	136	3	0.46
D0024-12	0.047 93	0.005 4	0.134 23	0.015 1	0.020 32	0.000 4	96	210	128	14	130	3	0.90
D0024-13	0.048 55	0.014 4	0.127 16	0.037 5	0.019 0	0.000 6	126	451	122	34	121	4	0.45
D0024-14	0.049 15	0.006 2	0.144 52	0.018 3	0.021 33	0.000 4	155	243	137	16	136	3	0.46
D0024-15	0.048 63	0.003 5	0.142 7	0.010 3	0.021 29	0.000 4	130	128	135	9	136	2	0.40
D0024-16	0.048 94	0.001 8	0.132 37	0.005 0	0.019 62	0.000 3	145	59	126	4	125	2	0.29
D0024-17	0.048 55	0.012 3	0.132 63	0.033 4	0.019 82	0.000 6	126	395	126	30	127	4	0.58
D0024-18	0.048 65	0.013 1	0.121 17	0.032 5	0.018 07	0.000 6	131	419	116	29	115	3	0.44

6 结 论

(1)天目山火山盆地次火山岩锆石 U-Pb 年龄分别为 126±2 Ma 和 132±4 Ma,属于早白垩世。

(2)天目山火山盆地火山喷发作用具有阶段性和持续性,火山岩的形成时代上限约为 126 Ma。

(3)天目山火山盆地形成于早白垩世早期伸展拉张的构造环境,是华南地区燕山期火山活动在该区的响应。

致谢:成文过程中得到了浙江省地质调查院王加恩高级工程师的指导,在此表示感谢!

参考文献

[1] 俞云文,姜禹,卢成忠. 浙江白垩纪火山岩的地层划分及铀同位素特征 [J].地质学杂志,2008,32(1):69-78.

[2] 王对兴,李春麟,高万里,等. 浙东早白垩世岩浆混合作用:新昌小将岩体 U-Pb 年代学及地球化学证据[J].岩石学报,2013,29(11):3993-4003.

[3] 刘亮,邱检生,杨泽黎. 浙江临海猫狸岭岩体的成因:

年代学、地球化学与 Sr-Nd-Hf 同位素制约[J].岩石学报. 2013,29(12):4069-4086.

[4] 章邦桐,王凯兴,凌洪飞,等. 浙江莫干山花岗岩体锆石 U-Pb、全岩 Rb-Sr 年代学、Sr-Nd-O 同位素地球化学及成因研究[J].矿物岩石地球化学通报,2012,31(4):347-353,368.

[5] 李祥辉,陈斯盾,罗家洪,等. 浙江西部建德群锆石 LA-ICP-MS 之 U-Pb 同位素年龄及其地层学意义[J].地质论评, 2011,57(6):825-836.

[6] 陶奎元,邢光福,杨祝良,等. 浙江中生代火山岩时代厘定和问题讨论[J].地质论评,2000,46(1):14-21.

[7] 王德恩,张元朔,高冉,等. 下扬子天目山盆地火山岩锆石 LA-ICP-MS 定年及地质意义[J].资源调查与环境, 2014,35(3):178-184.

[8] 张万林,王剑锋,王有翔,等. 浙西北中生代火山岩 Rb-Sr 同位素地质年龄研究[J].成都地质学院学报, 1989,16(4):75-82.

[9] 颜铁增,俞云文,陈江峰,等. 浙江省西北部白垩纪火山岩 Nd-Sr 同位素特征[J].中国地质, 2005,32(3):417-423.

[10] 徐步台,俞云文. 浙江中生代火山岩同位素年龄及地层时代归属[J].地球学报, 1997,18(Z),117-119.

- [11] 俞云文,徐步台. 浙江中生代晚期火山—沉积岩系层序和时代[J]. 地层学杂志, 1999, 23(2): 136-145.
- [12] 浙江省地质调查院. 浙江 1:5万杭垓(H50E009022)、仙霞(H50E010022)、船村(H50E010023)幅区域地质矿产调查报告[R]. 2014: 3.
- [13] JACKSON S E, PEARSON N J, GRIFFIN W L, et al. The Application of Laser Ablation Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry to in Situ U-Pb Zircon Geochronology [J]. *Chemical Geology*, 2004, 211(1/2): 47-69.
- [14] GRIFFIN W L, POWELL W J, PEARSON N J, et al. GLITTER: data reduction software for laser ablation ICP-MS. *Laser ablation-ICP-MS in the Earth Sciences* [J]. *Mineralogical Association of Canada Short Course*, 2008, 40: 308-311.
- [15] 路凤香, 桑隆康, 邬金华, 等. 岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 47-49.
- [16] MANIAR P D, PICCOLI P M. Tectonic discrimination of granitoids [J]. *Geological society of America bulletin*, 1989, 101(5): 635-643.
- [17] 韩吟文, 马振东, 张宏飞, 等. 地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 198-200.
- [18] SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications* 1989, 42: 313-345.
- [19] PEARCE J A, HARRIS N B W, TINDLE A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks [J]. *Jour Petrol*, 1984, 25: 956-983.
- [20] HOSKIN P W O, BLACK L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. *Metamorphic Geology*, 2001, 18(4): 423-439.
- [21] LIU L, XU X S, ZOU H B. Episodic eruptions of the Late Mesozoic volcanic sequences in southeastern Zhejiang, SE China: Petrogenesis and implications for the geodynamics of paleo-Pacific subduction [J]. *Lithos*, 2012, 154: 166-180.
- [22] 周涛发, 范裕, 袁峰, 等. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用 [J]. *地质学报*, 2011, 85(5): 712-730.
- [23] 余心起, 吴淦国, 张达, 等. 中国东南部中生代构造体制转换作用研究进展 [J]. *自然科学进展*, 2005, 15(10): 1167-1174.
- [24] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 华南中生代大地构造研究新进展 [J]. *地球学报*, 2012, 33(3): 257-279.
- [25] 李武显, 周新民. 浙闽沿海晚中生代火成岩成因的地球化学制约 [J]. *自然科学进展*, 2000, 10(7): 630-641.
- [26] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展 [J]. *地学前缘*, 2004, 11(11): 45-55.
- [27] 崔建军, 张岳桥, 董树文, 等. 华南陆缘晚中生代造山及其地质意义 [J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 86-105.
- [28] 王加恩, 刘远栋, 汪建国, 等. 浙江丽水地区磨石山群火山岩时代归属 [J]. *华东地质*, 2016, 37(3): 157-165.
- [29] 张岩, 马宏杰, 樊永成, 等. 浙江遂昌柘岱口地区酸性碎斑熔岩地质特征及成因 [J]. *华东地质*, 2017, 38(1): 1-11.
- [30] 舒良树, 周新民, 邓平, 等. 南岭构造带的基本地质特征 [J]. *地质论评*, 2006, 52(2): 251-265.
- [31] 邢光福, 卢清地, 陈荣, 等. 华南晚中生代构造体制转折结束时限研究——兼与华北燕山地区对比 [J]. *地质学报*, 2008, 82(4): 451-463.
- [32] 厉子龙, 周静, 毛建仁, 等. 浙西北木瓜燕山期花岗斑岩的定年、地球化学特征及其地质意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(10): 3607-3622.
- [33] 张岳桥, 徐先兵, 贾东, 等. 华南早中生代从印支期碰撞构造体系向燕山期俯冲构造体系转换的形变记录 [J]. *地学前缘*, 2009, 16(1): 234-247.

Zircon U-Pb chronology of the sub-volcanic rocks in the Tianmushan, Zhejiang and its geological significances

LIU Jian, CHEN Xiao-you, WANG Yi-fan, ZHANG Jian-fang, LIU Feng-long, CHEN Jin-hua
(*Zhejiang Institute of Geological Survey, Hangzhou 311203, China*)

Abstract: Based on the detailed field geological survey in the Tianmushan volcanic basin and the petro-facies classification of volcanic rocks, this study conducted petrology, geochemistry and U-Pb isotopic geochronology analyses for the sub-volcanic rocks and adjacent volcanic rocks. The results show that the rocks studied are characterized by quasi-aluminum, distinct differentiation between LREE and HREE, indicating that they were the product of the late magmatism and formed in the volcanic arc environment. This study yielded two LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of 126 ± 2 Ma and 132 ± 4 Ma for the sub-volcanic rocks, indicating that the volcanic eruption in this area was periodical and continuous. The upper timing limit of the volcanism in the Tianmushan volcanic basin is about 126 Ma, which can be comparable with the Yanshanian volcanism in South China.

Key words: sub-volcanic rocks; zircon U-Pb chronology; geological significance; Tianmushan; Zhejiang