

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.10.007

滇东北昭通地区发现峨眉山玄武岩沉积夹层:峨眉山玄武岩幕式喷发新证据

袁永盛¹, 张宏辉¹, 娄元林^{2,3,4}, 潘江涛^{1*}, 赵见波¹, 刘红豪¹

YUAN Yongsheng¹, ZHANG Honghui¹, LOU Yuanlin^{2,3,4}, PAN Jiangtao^{1*}, ZHAO Jianbo¹, LIU Honghao¹

1. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650100;

2. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南 长沙 410600;

3. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

4. 中国地质大学(北京), 北京 100083

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

2. Changsha General Survey of Natural Resources Center, CGS, Changsha 410600, Hunan, China;

3. Institute of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

4. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China

摘要:首次在滇东北昭通地区峨眉山玄武岩中识别出 3 套沉积夹层, 显示峨眉山玄武岩主喷发期内至少存在 3 次较长的喷发间歇期, 以沉积夹层为亚旋回划分标志, 将研究区峨眉山玄武岩划分为 4 个喷发亚旋回, 沉积夹层的存在为峨眉山玄武岩幕式喷发提供了新的关键性证据。研究区峨眉山玄武岩第三亚旋回和第四亚旋回之间的沉积夹层沉积厚度大、沉积特征明显, 本次工作选取其中的玄武质细砂岩进行了 LA-ICP-MS 测年, 获得锆石 U-Pb 年龄为 261.6 ± 0.6 Ma, 代表了昭通地区峨眉山玄武岩主喷发期的时间, 同时限定了沉积夹层的沉积时间下限。峨眉山玄武岩的喷发中心和火山机构展布可能受到区域上深大断裂的影响和控制, 喷发形式为多期次多点位喷发, 而沉积夹层发育于玄武岩多点喷发形成的小型山间凹陷汇水盆地。

关键词: U-Pb 测年; 沉积夹层; 峨眉山玄武岩; 昭通; 地质调查工程; 云南

中图分类号: P588.14⁺5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)10-1772-11

Yuan Y S, Zhang H H, Lou Y L, Pan J T, Zhao J B, Liu H H. The discovery of sedimentary intercalations in Emeishan basalt in the Zhaotong area, Northeastern Yunnan: the new evidence of episodic eruption. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(10): 1772-1782

Abstract: Three sets of sedimentary intercalations were systematically identified in Emeishan basalt in the Zhaotong area, Northeastern Yunnan for the first time, indicating that there were at least three long eruption intermissions during the main eruption period of Emeishan basalt. Taking the sedimentary intercalations as the subcycle division mark, the Emeishan basalt in the study area could be divided into four eruption subcycles. The existence of sedimentary intercalation provides a new key evidence for the episodic eruption of Emeishan basalt. The sedimentary intercalations between the third and fourth subcycles of Emeishan basalt in the study area have large sedimentary thickness and obvious sedimentary characteristics. In this work, the basaltic fine sandstone was selected for LA-ICP-MS dating, and the zircon U-Pb age was 261.6 ± 0.6 Ma. This age represents the time of the main eruption period of Emeishan basalt in the Zhaotong area, and defines the lower limit of the sedimentation time of the sedimentary intercalation. The eruption center and volcanic mechanism distribution of Emeishan basalt may be influenced and controlled by the deep faults in the region. The eruption form is multi-stage and multi-point eruption, while the sedimentary intercalations are developed in a small intermountain depression catchment basin formed by multi-point eruption of basalt.

Key words: U-Pb dating; sedimentary intercalation; Emeishan basalt; Zhaotong; geological survey engineering; Yunnan Province

收稿日期: 2020-05-20; 修订日期: 2022-09-20

资助项目: 中国地质调查局项目《乌蒙山岩溶石山区昭通—毕节地区区域地质调查》(编号: DD20191012)、《滇中楚雄地区云龙镇等 4 幅 1:5 万区域地质调查》(编号: ZD20220504)

作者简介: 袁永盛(1989-), 男, 工程师, 从事区域地质矿产研究。E-mail: 879933153@qq.com

* 通信作者: 潘江涛(1987-), 男, 工程师, 从事区域地质矿产研究。E-mail: pjt434214@126.com

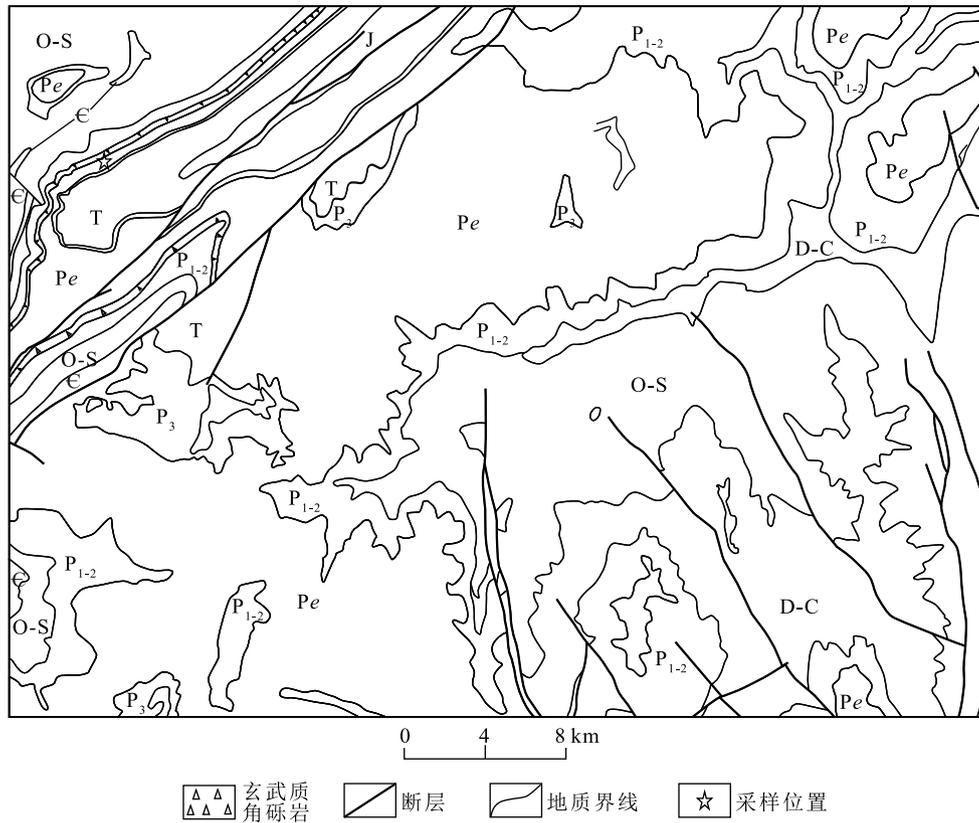


图2 研究区地质简图

Fig. 2 Geological sketch of the study area

C—寒武系; O-S—奥陶系-志留系; D-C—泥盆系-石炭系; P₁₋₂—中-下二叠统; Pe—峨眉山玄武岩;
P₃—上二叠统; T—三叠系; J—侏罗系

研究区峨眉山玄武岩划分为4个亚旋回。各亚旋回的岩性组合特征及旋回规律见图3。

峨眉山玄武岩第一亚旋回平行不整合于茅口组之上,厚155.1~244.4 m,底部为50~300 cm厚的爆发-空落相凝灰质的火山角砾岩(集块岩)或火山角砾凝灰岩,主体岩性为喷发-溢流相的斜斑玄武质的火山角砾岩(集块岩),根据角砾(集块)由大到小及斜长石斑晶由多到少的变化规律,可将峨眉山玄武岩第一亚旋回划分为4~7个喷发韵律。

峨眉山玄武岩第二亚旋回在莲峰断裂北西侧平行不整合于峨眉山玄武岩一段之上,在莲峰断裂南东侧平行不整合于茅口组之上,厚217.4~369.6 m。底部为一层厚0.2~3 m的紫红色沉积夹层或灰绿(白)色凝灰岩层,局部发育煤线,下部由2~7个致密状玄武岩-杏仁状玄武岩喷发韵律组成,每个喷发韵律由下到上杏仁逐渐增多。中上部为斜斑-致密状玄武岩的韵律,每个喷发韵律由下到上斜长

石斑晶逐渐增多,为峨眉山玄武岩第二亚旋回段的主要韵律;顶部由2~5个少杏仁-致密状玄武岩喷发韵律组成。

峨眉山玄武岩第三亚旋回平行不整合于峨眉山玄武岩第二亚旋回之上,底部主要为紫红色沉积夹层、局部为灰绿(白)色凝灰岩层或黑色(劣质)煤层,主体为溢流相的无斑玄武岩,主要岩性为致密状玄武岩及杏仁状玄武岩,根据杏仁由少到多可划分为2~3个喷发韵律。与峨眉山玄武岩第二亚旋回相比,具有喷发层数量少、单个喷发层厚的特点,其总厚度大于第二亚旋回,为区域上厚度最大、分布最广的一个亚旋回。

峨眉山玄武岩第四亚旋回平行不整合于峨眉山玄武岩第三亚旋回之上,厚60~90 m。底部为紫红色-灰绿色沉积夹层或古风化壳,局部可见煤线,主体为2~5个致密状玄武岩-少杏仁状玄武岩喷发韵律组成,单个韵律厚5~20 m,喷发韵律从下到上

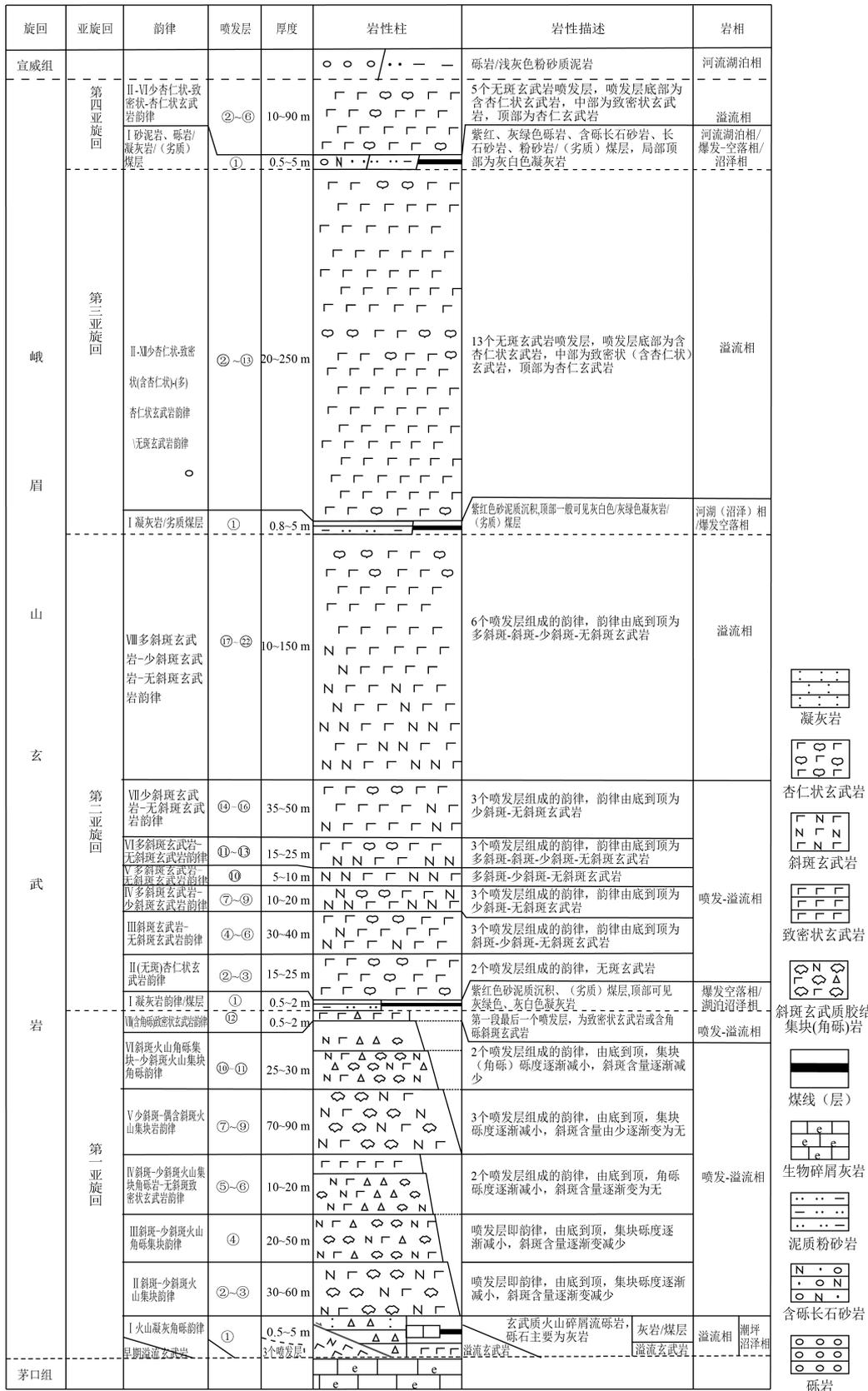


图 3 研究区峨眉山玄武岩的旋回及韵律划分

Fig. 3 The cycle and rhythm division of Emeishan basalt in the study area

杏仁逐渐增多。与上覆宣威组呈平行不整合接触。

其中,第四亚旋回与第三亚旋回之间发育沉积夹层(图4)。沉积夹层厚0.5~5 m,在水竹乡冯家厂北(PM027)500 m处的沉积夹层厚约5 m(图版 I-a,b),下伏第三亚旋回杏仁状玄武岩,上覆第四亚旋回致密状玄武岩。底部50 cm为抗风化能力较强的浅灰绿色砾岩(图版 I-c),之上为灰绿色含砾长石岩屑砂岩、长石岩屑砂岩(图版 I-d)、粉砂岩,由下到上砾石含量逐渐减少,分选性逐渐变好,砾石主要为玄武质,粒径最大可达50 mm,多呈次棱角状一次圆状,分选性较差。长石岩屑砂岩主要由斜长石和玄武质岩屑组成,胶结物为绿泥石或铁质(图版 I-e,f)。从矿物组成看,物源应为玄武岩。岩石中矿物一般呈棱角状一次棱角状,少量为次圆状,反映近源搬运的特征。长石岩屑砂岩中发育斜层理,粉砂岩中发育水平层理。

本次发现的沉积夹层从低到顶岩性依次由砾岩、含砾砂岩逐渐演变为长石岩屑砂岩、粉砂岩,沉积构造由交错层理向平行层理演化,沉积物分选性由差变好,反映了水体逐渐加深、水动力逐渐减弱的过程。沉积夹层总体厚度较大且沉积特征明显,对研究峨眉山玄武岩主喷发期的沉积作用具有重要意义。

2 样品分析方法

样品 PM027-2 锆石 U-Pb 定年在北京锆年领航科技有限公司,使用激光剥蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICPMS)完成。激光剥蚀平台为 Resolution SE 型 193 nm 深紫外激光剥蚀进样系统(Applied Spectra,美国),配备 S155 型双体积样品池。质谱仪采用 Agilent 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(Agilent,美国),详细调谐参数见 Thompson 等^[22]。

本次实验在束斑直径 30 μm 、剥蚀频率 5 Hz、能量密度 2 J/cm² 的激光条件下分析样品。数据处理采用 Iolite 程序,锆石 91500 为校正标样,GJ-1 为监测标样,每隔 10~12 个样品点分析 2 个 91500 标样及 1 个 GJ-1 标样。通常采集 20 s 的气体空白和 35~40 s 的信号区间进行数据处理,按指数方程进行深度分馏校正^[23]。以 NIST 610 为外标,⁹¹Zr 为内标计算微量元素含量。本次实验过程中测定的 91500 (1061.5 \pm 3.2 Ma,2 σ)、GJ-1(604 \pm 6 Ma,2 σ)年龄在不确定范围内与推荐值一致。Plesovice 标样作为未知样品的分析结果为 337.5 \pm 1.5 Ma($n=11$,2 σ),对应的年龄推荐值(337.13 \pm 0.37 Ma,2 σ)^[24]在不确定范围内与推荐值一致。采用软件 ICPMSDataCal 8.9 完成年龄谐和图的制作和年龄加权平均值计算。

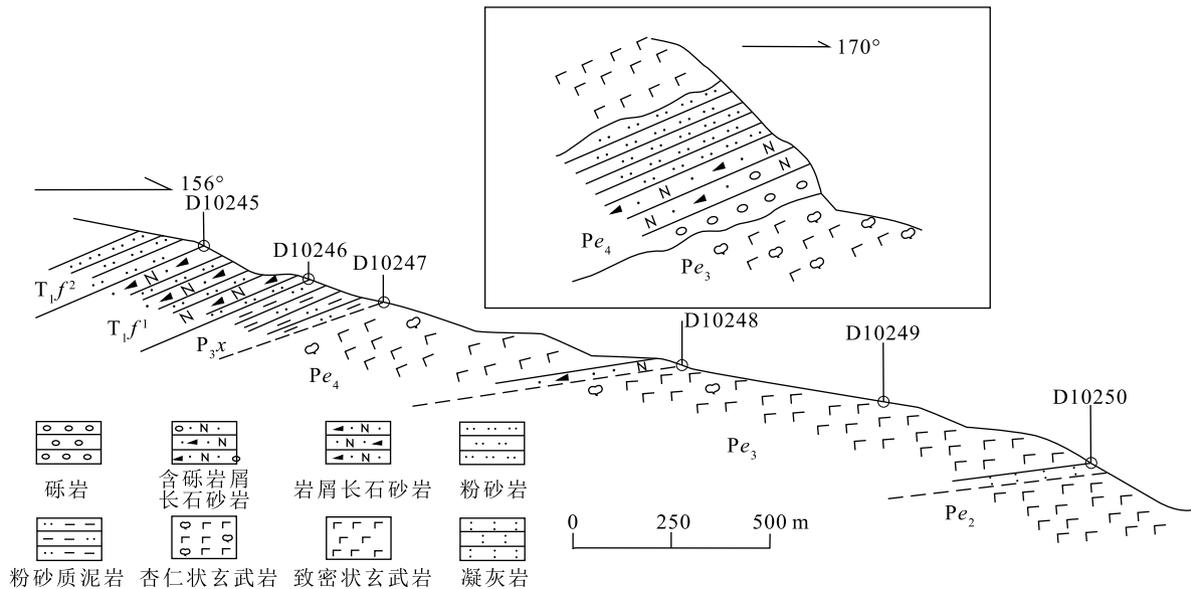


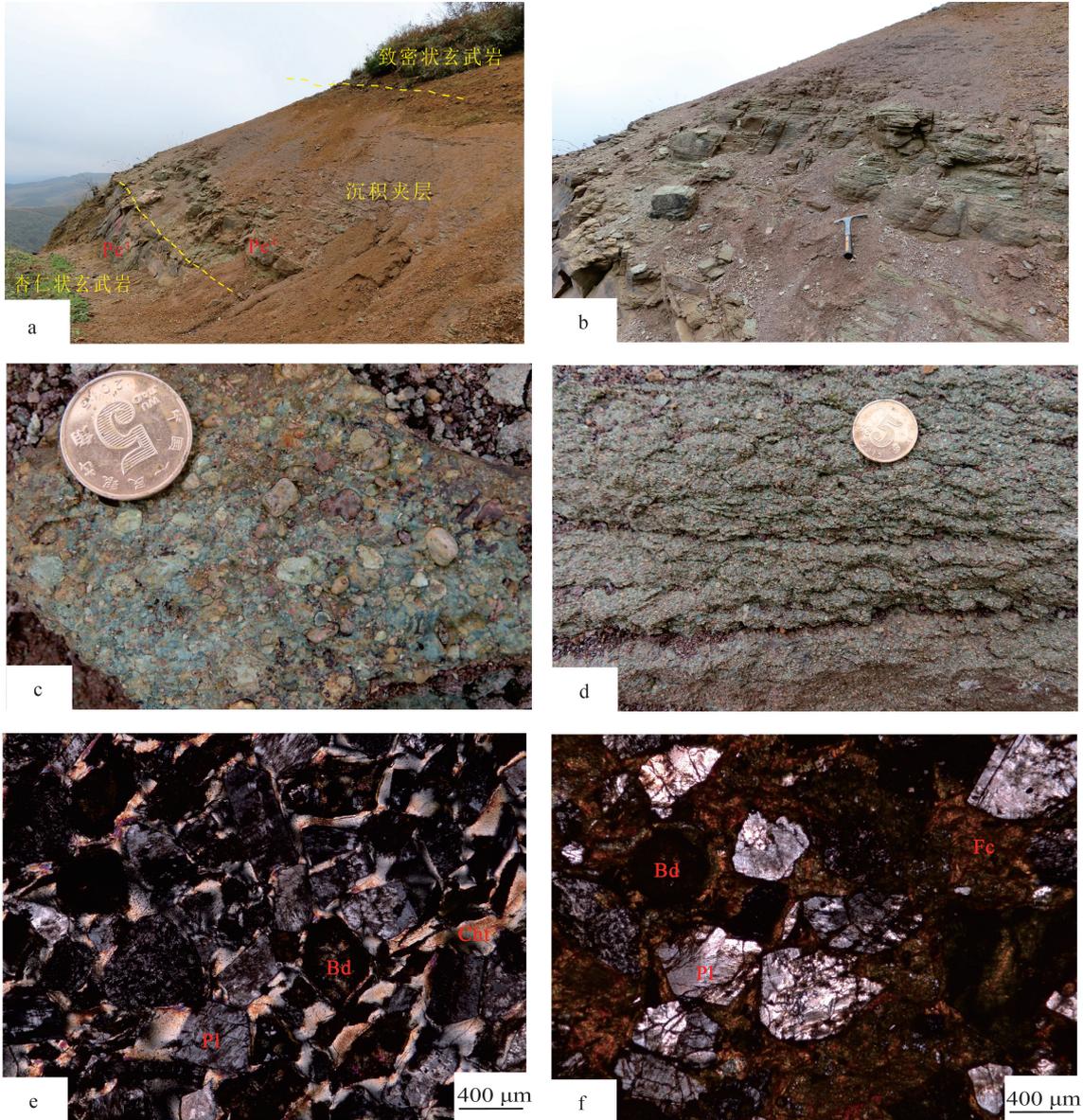
图4 峨眉山玄武岩第三亚旋回与第四亚旋回之间沉积夹层剖面图

Fig. 4 The section of sedimentary intercalation in the third and fourth subcycle of Emeishan basalt

Pe₂—峨眉山玄武岩第二亚旋回;Pe₃—峨眉山玄武岩第三亚旋回;Pe₄—峨眉山玄武岩第四亚旋回;P_{3x}—上二叠统宣威组;

T_{1f}¹—下三叠统飞仙关组一段;T_{1f}²—下三叠统飞仙关组二段

图版 I Plate I



a、b.沉积夹层宏观地质特征;c.沉积夹层底部发育的砾岩;d.沉积夹层中上部发育的长石岩屑砂岩;e.绿泥石胶结长石岩屑细砂岩镜下照片(+);f.铁质胶结岩屑长石中砂岩镜下照片(-)。Cht—绿泥石;Fc—铁质胶结物;Bd—玄武质岩屑;Pl—斜长石;Pe₃—峨眉山玄武岩第三亚旋回;Pe₄—峨眉山玄武岩第四亚旋回

3 形成时代

前人对峨眉山玄武岩进行过大量的测年研究,但在滇东北昭通地区尚未获得精确的年龄数据。该沉积夹层位发育于研究区玄武岩中部,为获得其年龄,本文开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年研究。

从锆石阴极发光图像(图 5)可以看出,锆石晶体多呈半自形—自形,边缘多破碎,反映了较强的水动力搬运特征。少部分锆石具有明显的振荡环

带,多数锆石环带不明显,内部结构相对均一、简单,Th/U 值远大于 0.4(0.49~1.57),具有基性岩浆锆石的特征。

本次共获得锆石年龄 35 组(表 1),除分析点 5、10 和 21 的谐和度较差外,共获得 32 组有效数据(谐和度介于 90%~110%之间)。其中 27、31、30 号分析点的年龄分别为 2044 Ma、827 Ma 和 436 Ma,推测为玄武岩岩浆上涌过程中捕获的锆石,其余 29 个数据集集中于 258~270 Ma 之间。为获得较准确的沉

表 1 PM027-2 样品 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 The LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic analysis results of PM027-2 sample

编号	元素含量/ 10^{-6}			同位素比值										年龄/Ma			谐和度/%		
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	1σ	
					1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ					
PM027-2-1	5.6	126.1	97.7	1.2907	0.0509	0.0044	0.294	0.028	0.04132	0.00077	236	180	262	22	261	5	256	14	100
PM027-2-2	10.5	196.0	221.0	0.8869	0.0549	0.0037	0.312	0.024	0.04098	0.00078	408	139	276	19	259	5	275	16	107
PM027-2-3	12.6	217.0	231.8	0.9362	0.0514	0.0026	0.300	0.018	0.04238	0.00067	259	109	266	14	268	4	262	12	99
PM027-2-4	5.9	59.4	120.7	0.4921	0.0515	0.0035	0.295	0.022	0.04161	0.00077	1008	122	825	42	760	14	756	43	100
PM027-2-6	4.7	96.5	85.1	1.1340	0.0485	0.0049	0.277	0.028	0.04140	0.00095	124	183	248	22	262	6	249	15	95
PM027-2-7	3.4	46.8	65.9	0.7097	0.0534	0.0050	0.298	0.029	0.04134	0.00089	346	180	265	23	261	6	272	19	102
PM027-2-8	4.1	57.2	81.1	0.7053	0.0539	0.0046	0.295	0.025	0.04088	0.00088	367	153	262	20	258	5	259	16	102
PM027-2-9	8.8	94.4	190.7	0.4950	0.0552	0.0034	0.312	0.020	0.04150	0.00072	530	336	289	47	259	11	273	46	105
PM027-2-11	47.0	956.0	799.0	1.1965	0.0551	0.0018	0.324	0.014	0.04279	0.00051	416	75	285	11	270	3	280	11	106
PM027-2-12	12.5	276.1	214.3	1.2884	0.0534	0.0029	0.304	0.019	0.04146	0.00061	346	115	270	15	262	4	255	11	103
PM027-2-13	3.2	61.5	58.3	1.0549	0.0481	0.0063	0.264	0.035	0.04130	0.00120	104	234	238	28	261	7	242	18	91
PM027-2-14	7.1	146.0	119.5	1.2218	0.0498	0.0036	0.293	0.023	0.04264	0.00078	186	143	261	18	269	5	267	14	97
PM027-2-15	2.5	33.3	46.9	0.7100	0.0504	0.0068	0.279	0.038	0.04250	0.00120	213	251	250	30	268	7	283	26	93
PM027-2-17	3.8	65.2	69.3	0.9408	0.0506	0.0051	0.288	0.030	0.04188	0.00098	223	191	257	24	264	6	273	18	97
PM027-2-18	10.3	226.1	176.0	1.2847	0.0499	0.0031	0.284	0.019	0.04149	0.00071	190	121	254	15	262	4	260	12	97
PM027-2-19	7.2	179.2	114.1	1.5706	0.0520	0.0040	0.292	0.023	0.04126	0.00088	285	140	260	18	261	5	259	12	100
PM027-2-20	33.2	815.0	540.4	1.5081	0.0515	0.0020	0.297	0.014	0.04166	0.00053	515	162	289	22	263	5	252	17	100
PM027-2-23	4.5	99.6	78.1	1.2753	0.0510	0.0049	0.295	0.029	0.04196	0.00082	241	186	262	23	265	5	251	14	99
PM027-2-24	3.3	44.9	64.2	0.6994	0.0564	0.0057	0.320	0.033	0.04140	0.00110	468	183	282	25	262	7	250	20	108
PM027-2-25	7.8	111.6	145.5	0.7670	0.0540	0.0036	0.312	0.022	0.04192	0.00072	371	129	276	17	265	4	271	14	104
PM027-2-26	2.5	28.4	51.0	0.5569	0.0533	0.0064	0.291	0.034	0.04090	0.00100	342	218	259	27	258	6	265	24	100
PM027-2-27	8193.0	1396.0	1763.0	0.7918	0.1261	0.0022	5.988	0.210	0.34380	0.00420	2044	45	1974	31	1905	20	1873	66	107
PM027-2-28	17.0	234.3	353.7	0.6624	0.0540	0.0024	0.312	0.017	0.04170	0.00055	371	99	276	13	263	3	264	11	105
PM027-2-29	13.1	304.9	217.4	1.4025	0.0535	0.0028	0.309	0.018	0.04162	0.00069	350	102	273	14	263	4	264	12	104
PM027-2-30	19.4	111.7	236.1	0.4731	0.0566	0.0021	0.551	0.026	0.07000	0.00110	476	76	446	17	436	7	442	22	102
PM027-2-31	21.0	91.5	122.1	0.7494	0.0682	0.0025	1.301	0.060	0.13690	0.00190	875	72	846	26	827	11	820	35	102
PM027-2-32	2.9	39.8	58.7	0.6787	0.0486	0.0058	0.273	0.034	0.04124	0.00100	129	231	245	27	261	6	242	20	94
PM027-2-33	3.7	75.1	68.1	1.1028	0.0530	0.0052	0.302	0.031	0.04115	0.00093	329	190	268	24	260	6	253	15	103
PM027-2-34	8.1	127.9	153.7	0.8321	0.0512	0.0034	0.300	0.022	0.04146	0.00070	250	136	266	17	262	4	262	13	102
PM027-2-35	14.0	193.7	275.7	0.7026	0.0540	0.0025	0.307	0.016	0.04116	0.0006100	371	91	272	12	260	4	258	12	105

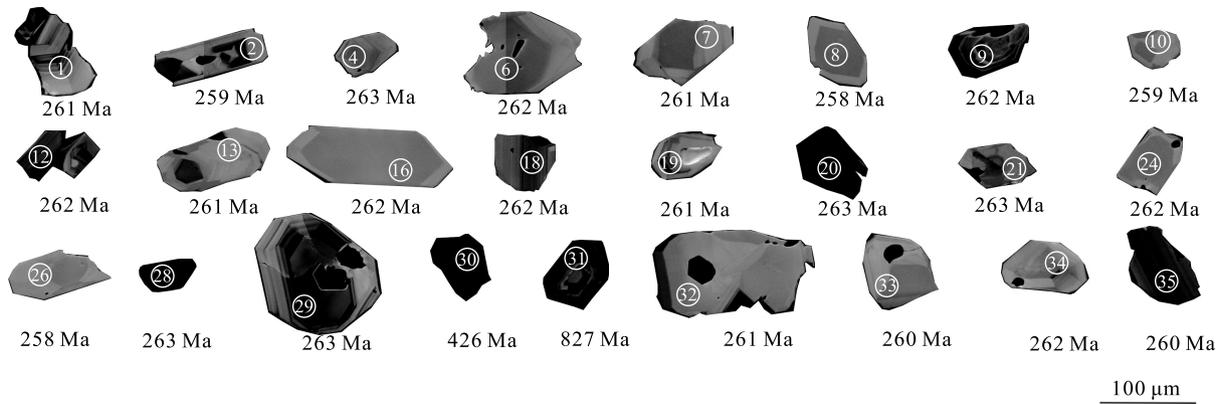


图 5 峨眉山玄武岩沉积夹层中 PM027-2 细砂岩样品锆石阴极发光图像

Fig. 5 Zircon cathodoluminescence of PM027-2 fine sandstone samples in Emeishan basalt sedimentary intercalation

积夹层形成年龄,本次采用最年轻的 23 个分析点数据进行研究。分析结果显示,样品 PM027-2 中 23 个分析点具有一致的谐和年龄(图 6),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $261.6 \pm 1.9 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD} = 0.103, n = 23$) (图 6)。

根据野外观察、镜下鉴定和锆石形态、年龄特征,推测沉积夹层的物源主要来自峨眉山玄武岩第三亚旋回,而该旋回为昭通地区厚度最大、分布最广的一个旋回,所以该年龄可以代表滇东北昭通地区峨眉山玄武岩主喷发期的年龄,同时也限制了沉积夹层形成的时间下限。

4 沉积夹层的成因及地质意义

4.1 峨眉山玄武岩的划分依据和喷发形式

大火成岩省的一个重要标志是短时间内的岩

浆巨量喷发,在 1~5 Ma 时间段内完成。但是近年在峨眉山玄武岩内取得的大量同位素年龄数据表明,其变化范围很宽。Shellnutt 等^[25]认为,峨眉山玄武岩的持续时间可能为 18 Ma 或更长。其中,260 Ma 左右代表了地幔柱活动时间,252 Ma 可能是镁铁质岩浆底侵作用时期,而晚期的 242 Ma 是华南和华北克拉通碰撞后松弛阶段的产物。张招崇等^[3,25-27]认为与其他大火成岩省一样,峨眉山大火成岩省也具有幕式喷发的特点,岩浆活动具有时间跨度较大、多期多阶段性的特点。

目前研究区玄武岩主要依据岩性组合进行划分,1:20 万昭通幅^①根据岩性组合将峨眉山玄武岩划分为 3 段(喷发旋回),第一段岩性为火山集块岩、火山角砾岩及角砾凝灰岩;第二段岩性为斑状玄武岩夹致密状、杏仁状玄武岩;第三段岩性为致

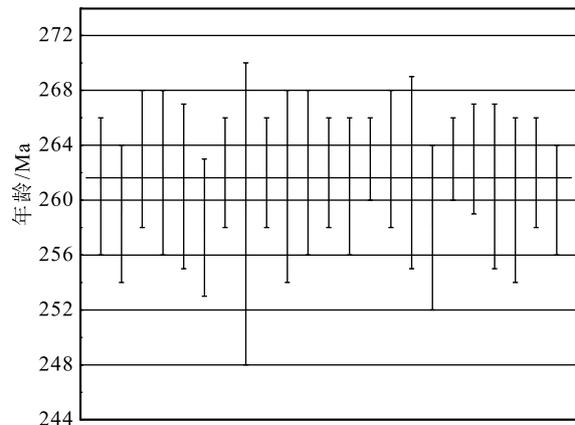
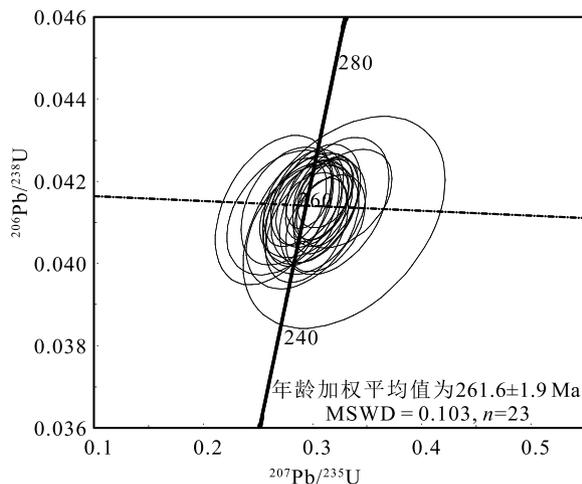


图 6 滇东北昭通地区峨眉山玄武岩沉积夹层锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb age concordance diagram of sedimentary intercalation of Emeishan basalt in the Zhaotong area, Northeastern Yunnan

密状、杏仁状玄武岩。笔者认为,这种划分方案未充分考虑峨眉山玄武岩喷发中心至边缘的岩性变化,导致划分出来的旋回(段)可能具有穿时性。

本次将滇东北地区峨眉山玄武岩划分为4个亚旋回,每个亚旋回之间都以沉积夹层的出现开始。沉积夹层岩性主要为紫红色砂泥质沉积,局部为灰绿色砂泥、砂砾质沉积或煤层(煤线)。作为划分依据的沉积夹层在区域上广泛分布,顶部普遍有凝灰岩层发育,具有较好的等时性,是各亚旋回划分的标志,也为横向对比提供了时间依据。部分沉积夹层厚度和沉积特征明显,反映主喷发期内存在一定时间的喷发间歇期,间接说明玄武岩的喷发为幕式喷发。

4.2 峨眉山玄武岩主喷发期

对峨眉山玄武岩的定年主要应用U-Pb同位素体系和 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 同位素体系,但由于 $\text{Ar}^{40}-\text{Ar}^{39}$ 同位素测年容易受到后期区域热事件的影响^[28-29],目前普遍采用锆石U-Pb同位素。一般情况下无法从玄武岩中得到足够的有效锆石,因此直接对玄武岩进行定年较困难。大多数有关峨眉山玄武岩喷发时代的年龄数据都来自于对同期侵入体和凝灰岩的间接定年^[30]。

对于峨眉山玄武岩主喷发期,学者们的观点也不尽相同。范蔚茗等^[31]认为,峨眉山玄武岩的大规模火山作用发生在253~256 Ma,其中251~253 Ma的中酸性岩浆岩代表了该火成岩事件的晚期产物。Lo等^[32]认为,峨眉山玄武岩的主喷发期为251~253 Ma,255 Ma存在一个次级喷发阶段。李宏博^[30]对峨眉山玄武岩的定年数据进行了统计,显示测年数据多集中在252~265 Ma,认为是峨眉山玄武岩的主喷发期。

为了精确地约束峨眉山玄武岩岩浆期活动的持续时间,祝明金等^[33]在贵州南部罗甸地区获得基性岩墙SHRIMP锆石U-Pb年龄为 261.2 ± 2.6 Ma,Shellnutt等^[34]利用CA-TIMS锆石高精度测年技术对攀西地区二叠纪侵入岩进行年代学研究,认为峨眉山主岩浆期为259~257 Ma。Zhong等^[35]和Yang等^[36]分别对峨眉山大火成岩省西部和东部地区的玄武岩顶部凝灰岩开展了CA-TIMS锆石高精度测年,结果显示峨眉山主喷发期的结束时间分别为 259.1 ± 0.5 Ma和 259.51 ± 0.21 Ma。

综合上述情况,笔者认为,峨眉山玄武岩顶部

的凝灰岩能较好地限定主喷发期结束的时间,大火成岩省西部和东部玄武岩主喷发期均结束于259 Ma左右,但峨眉山玄武岩开始喷发的时间还未获得高精度的年龄数据,从现有的测年数据看,不同位置的岩浆喷发起始时间、喷发规模可能不同。本次研究认为,滇东昭通地区玄武岩主喷发期为 261.6 ± 1.9 Ma,其中MSWD仅为0.103,具有较高的可信度。

4.3 构造对玄武岩喷发和展布的影响

从玄武岩的等厚度图(图1)可以看出,大理宾川地区的玄武岩厚度最大,达5584 m,结合前人研究资料,认为滇西地区可能为地幔柱柱头所在位置。但玄武岩的厚度变化不是简单的从中心到边缘逐渐递减的模式,玄武岩厚度的极值点和变化规律明显受深大断裂控制,说明深大断裂可能是岩浆上涌过程中的通道,这一点在不同地区的岩浆中捕获锆石比例不同、岩石地球化学元素富集程度不同也得到了体现。由于岩浆可能沿不同的深大断裂运移,经历了不同的演化过程,导致岩浆混染程度和喷出地表的时间也存在差异。

关于峨眉山玄武岩的成因,近年多数学者的研究成果支持地幔柱的观点。但对构造在岩浆形成与演化过程中作用的研究程度明显较弱。何斌等^[37]针对峨眉山下伏茅口组碳酸盐岩厚度变化的研究发现,峨眉山玄武岩喷发前茅口组存在地层缺失现象,认为是地幔柱快速隆升形成的地壳穹隆造成的。但这种模式未考虑构造在隆升过程中的作用。吴鹏等^[38]对滇东地区峨眉山玄武岩下伏茅口组灰岩进行的地层对比表明,地幔柱上涌导致的隆升开始于茅口期,而现今茅口组的减薄正是同沉积过程中断层差异升降造成的沉积地层厚度差异和沉积后地表隆升剥蚀的共同结果。研究区茅口组的厚度在莲峰断裂两侧发生急剧变化,茅口组与峨眉山玄武岩界线附近发育的火山碎屑岩主要分布于莲峰断裂西侧,且离莲峰断裂越近,火山碎屑岩厚度越大。断裂东侧未见发育。显然,玄武岩隆升期的活动断层对茅口组沉积厚度、峨眉山玄武岩隆升及沉积记录发挥着不可忽视的作用。

火山机构的展布是峨眉山玄武岩研究的难点。峨眉山玄武岩喷发至今年代久远,导致很多火山机构被风化剥蚀;同时峨眉山玄武岩虽是短时巨量喷发,但也经历过多期次喷发,导致很多可以指示火

山机构的证据被掩盖。传统的根据集块岩、火山角砾岩、火山弹等岩性结合火山岩相判定火山机构的方法效果不明显,但从玄武岩的等厚度图可以看出,一些区域断裂严格控制玄武岩的空间展布,等厚度图的极值点均显示沿断裂带展布的特征。邱寻欢^[39]在云南倘甸地区首创性地对峨眉山玄武岩区采用岩石磁组构测量方法确定火山熔岩初始流向,并结合火山岩相特征,最终反演古火山口及古岩浆流动方向。研究显示,存在 2 个火山口、8 个次级火山口,2 个火山口主要沿小江断裂带展布,推测峨眉山玄武岩的次一级喷发中心主要沿同期的深大断裂呈串珠状展布。多点喷发易形成隆凹相间的地理格局,在喷发间歇期,流水会汇聚到相对海拔较低的凹陷区内,形成小型的汇水盆地及沉积夹层。

5 结 论

(1) 在滇东北昭通地区峨眉山玄武岩系统中识别出 3 套沉积夹层,表明峨眉山玄武岩主喷发期内至少存在 3 次较长的喷发间歇期,为峨眉山玄武岩幕式喷发提供了新证据。

(2) 采用 LA-ICP-MS 测年方法对玄武质细砂岩进行了锆石 U-Pb 测年,获得年龄为 261.6 ± 0.6 Ma,代表了昭通地区峨眉山玄武岩主喷发期的时间,同时限定了该沉积夹层的沉积时间下限,反映主喷发期存在沉积作用。

(3) 峨眉山玄武岩的喷发时限、喷发中心和火山机构展布可能受到区域上深大断裂的影响和控制,而沉积夹层形成于玄武岩多点喷发形成的小型山间凹陷汇水盆地。

致谢: 成文过程得到成都理工大学朱利东教授和中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心吴亮高级工程师指导和帮助,审稿专家提出了宝贵的意见建议,在此一并表示感谢。

参考文献

[1] Chung S L, Jahn B M. Plume-lithosphere interaction in generation of the Emeishan flood basalts at the Permian-Triassic boundary [J]. *Geology*, 1995, 23(10): 889-892.

[2] Courtillot V, Jaupart C, Manighetti I, et al. On causal links between flood basalts and continental breakup [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1999, 166(3): 177-195.

[3] 张招崇. 关于峨眉山大火成岩省一些重要问题的讨论 [J]. *中国地*

质, 2009, 36(3): 634-646.

[4] 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 等. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(1): 25-39.

[5] 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜, 等. 攀西裂谷 [M]. 北京: 地质出版社, 1988.

[6] 陈文一, 刘家仁, 王中刚, 等. 贵州峨眉山玄武岩喷发期的岩相古地理研究 [J]. *古地理学报*, 2003, 5(1): 17-28.

[7] 何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 2006. 峨眉山地幔柱上升的沉积响应及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2006, 52(1): 30-37.

[8] 李宏博, 张招崇, 吕林素, 等. 栖霞组和茅口组等厚图: 对峨眉山地幔柱成因模式的指示意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(10): 2963-2974.

[9] 廖震文. 滇黔邻区与峨眉山玄武岩有关的铜矿、金矿地质特征对比 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2010, 40(4): 821-827.

[10] 曾令高, 张均, 孙腾, 等. 峨眉山大火成岩省烂纸厂铁矿床地质特征、成因及其找矿勘查启示 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2016, 46(2): 412-424.

[11] Gong D X, Hui B, Dai Z M, et al. A new type of REE deposit found in clay rock at the top of the Permian Emeishan basalt in the Yunnan-Guizhou area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(1): 204-205.

[12] 刘殿蕊. 云南宣威地区峨眉山玄武岩风化壳中发现铈、稀土矿 [J]. *中国地质*, 2020, 47(2): 540-541.

[13] 张兵强, 赵富远, 杨清毫, 等. 贵州省盘县架底金矿床成矿地质条件及找矿方向 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(1): 94-108.

[14] 陈军, 徐义刚. 二叠纪大火成岩省的环境与生物效应: 进展与前瞻 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36(3): 374-393.

[15] 王向东. 晚二叠世—早三叠世火山喷发强度、时限及其与生物绝灭和后期复苏的关系 [D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文, 2019.

[16] 朱江, 张招崇, 侯通, 等. 贵州盘县峨眉山玄武岩系顶部凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄: 对峨眉山大火成岩省与生物大规模灭绝关系的约束 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(9): 2743-2751.

[17] 李香君, 顾战宇, 雍自权, 等. 川西 Ys1 井峨眉山玄武岩岩相旋回及储层特征 [J]. *矿物岩石*, 2020, 40(1): 100-112.

[18] 徐涛, 张忠杰, 刘宝峰, 等. 峨眉山大火成岩省地壳速度结构与古地幔柱活动遗迹: 来自丽江-清镇宽角地震资料的约束 [J]. *中国科学(D 辑)*, 2015, 45(5): 561-576.

[19] 徐义刚, 何斌, 罗震宇, 等. 我国大火成岩省和地幔柱研究进展与展望 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2013, (1): 25-39.

[20] Zhong Y T, He B, Mundil R, et al. CA-TIMS zircon U-Pb dating of felsic ignimbrite from the Binchuan section: implications for the termination age of Emeishan large igneous province [J]. *Lithos*, 2014, 204: 14-19.

[21] 张宏辉, 袁永盛, 余杨忠, 等. 扬子板块西缘中生代—新生代碰撞造山事件的记录: 来自峨眉山玄武岩的锆石 U-Pb 同位素证据 [J]. *现代地质*, 2021, 35(5): 1155-1177.

[22] Thompson J, Meffre S, Danyushevsky L. Impact of air, laser pulse width and fluence on U-Pb dating of zircons by LA-ICPMS [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2018, 33: 221-230.

[23] Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, et al. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2010,

- 11: Q0AA06.
- [24] Sláma J, Kosler J, Condon D J, et al. Plesovice zircon—A new natural reference material for U–Pb and Hf isotopic microanalysis [J]. *Chemical Geology*, 2008, 249: 1–35.
- [25] Shellnutt J G, Zhou M F, Yan D P, et al. Longevity of the Permian Emeishan mantle plume (SW China): 1 Ma, 8 Ma or 18 Ma? [J]. *Geological Magazine*, 2008, 145(3): 373–388.
- [26] Xu Y G, Luo Z Y, Huang X L, et al. Zircon U–Pb and Hf isotope constraints on crustal melting associated with the Emeishan mantle plume [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 3084–3104.
- [27] 骆文娟, 张招崇, 侯通, 等. 攀西茨达复式岩体年代学和地球化学: 对峨眉山幔柱活动时间的约束 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(10): 2947–2962.
- [28] Ali J R, Lo C H, Thompson G M, et al. Emeishan Basalt Ar–Ar overprint ages define several tectonic events that affected the western Yangtze Platform in the Mesozoic and Cenozoic [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2004, 23: 163–178.
- [29] Boven A, Pasteels P, Punzalan L E, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronological constraints on the age and evolution of the Permo–Triassic Emeishan Volcanic Province, Southwest China [J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2002, 20: 157–175.
- [30] 李宏博. 峨眉山大火成岩省地幔柱动力学: 基性岩墙群、地球化学及沉积地层学证据 [D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2012.
- [31] 范蔚茗, 王岳军, 彭头平, 等. 桂西晚古生代玄武岩 Ar–Ar 和 U–Pb 年代学及其对峨眉山玄武岩省喷发时代的约束 [J]. *科学通报*, 2004, 49: 1892–1900.
- [32] Lo C H, Chung S L, Lee T Y, et al. Age of the Emeishan flood magmatism and relations to Permian–Triassic boundary events [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198: 449–458.
- [33] 祝明金, 田亚洲, 聂爱国, 等. 黔南基性岩墙岩石地球化学、SHRIMP 锆石 U–Pb 年代学及地质意义 [J]. *地球科学*, 2018, 43(4): 1333–1349.
- [34] Shellnutt J G, Denyszyn S W, Mundil R. Precise age determination of mafic and felsic intrusive rocks from the Permian Emeishan large igneous province (SW China) [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(1): 118–126.
- [35] Zhong Y T, He B, Mundil R, et al. CA–TIMS zircon U–Pb dating of felsic ignimbrite from the Binchuan section: implications for the termination age of Emeishan large igneous province [J]. *Lithos*, 2014, 204: 14–19.
- [36] Yang J, Cawood P A, Du Y, et al. Early Wuchiapingian cooling linked to Emeishan basaltic weathering? [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 492: 102–111.
- [37] 何斌, 徐义刚, 王雅玫, 等. 用沉积记录来估计峨眉山玄武岩喷发前的地壳抬升幅度 [J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(3): 316–320.
- [38] 吴鹏, 刘少峰, 窦国兴. 滇东地区峨眉山幔柱活动的沉积响应 [J]. *岩石学报*, 2014, 30(6): 1793–1803.
- [39] 邱寻欢. 云南寻甸地区峨眉山玄武岩磁组构研究及其地质意义 [D]. 东华理工大学硕士学位论文, 2019.
- ①王自廉, 马忠义, 符史标, 等. 昭通幅 G-48-2 1/20 万区域地质调查报告. 昆明: 云南省地质局区域地质调查队, 1978.