

doi: 10.12029/gc20210213

鄢圣武, 白宪洲, 秦宇龙, 李小平, 赵克强, 熊富浩, 巴金. 2021. 四川昭觉—美姑地区峨眉山玄武岩古火山机构的发现及其喷发旋回的确定[J]. 中国地质, 48(2): 536–548.

Yan Shengwu, Bai Xianzhou, Qin Yulong, Li Xiaoping, Zhao Keqiang, Xiong Fuhao, Ba Jin. 2021. Discovery of Paleo-volcanic edifice and determination of its eruptive circles of Emeishan basalt in Zhaojue–Meigu Area, Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 48(2):536–548(in Chinese with English abstract).

四川昭觉—美姑地区峨眉山玄武岩古火山机构的发现 及其喷发旋回的确定

鄢圣武¹, 白宪洲¹, 秦宇龙¹, 李小平¹, 赵克强², 熊富浩³, 巴金¹

(1. 四川省地质调查院, 四川成都 610081; 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000; 3. 成都理工大学地球科学学院, 四川成都 610059)

摘要:野外地质调查发现, 扬子西缘昭觉—美姑一带存在多处峨眉山玄武岩组古火山机构, 为研究其火山喷发旋回与方式提供了良好窗口。古火山机构的岩石类型主要由巨厚玄武岩以及少量的火山碎屑岩和火山碎屑熔岩组成, 且均具火山颈爆发相、溢流相和火山洼地相堆积构造特征。系统的地质剖面研究表明, 峨眉山玄武岩组存在 3 次快速喷发亚旋回及 25 个火山韵律, 亚旋回之间不存在火山间歇期。其中, 第一亚旋回和第三亚旋回的喷发方式均以爆发相与溢流相为主, 而第二亚旋回则以溢流相为主。峨眉山玄武岩组古火山机构的系统厘定和研究, 揭示了峨眉山大火成岩省的火山喷发方式和旋回韵律特征, 为研究与峨眉山玄武岩组相关的成矿成藏作用提供了重要地层资料。

关键词:古火山机构; 韵律旋回; 喷发方式; 峨眉山玄武岩组; 扬子西缘; 地质工程调查; 昭觉—美姑; 四川
中图分类号: P588.14 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)02-0536-13

Discovery of Paleo-volcanic edifice and determination of its eruptive circles of Emeishan basalt in Zhaojue–Meigu Area, Sichuan Province

YAN Shengwu¹, BAI Xianzhou¹, QIN Yulong¹, LI Xiaoping¹, ZHAO Keqiang²,
XIONG Fuhao³, BA Jin¹

(1. *Sichuan Institute of Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China*; 2. *Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, Hebei, China*; 3. *College of Earth Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China*)

Abstract: The geological survey revealed that several paleo-volcanic edifices related to Emeishan basalt were identified in the Zhaojue–Meigu area on the western margin of Yangtze Block, which provides an excellent window for studying their eruption cycles and modes. The rock types of paleo-volcanic edifices are mainly composed of thick basalts, small amounts of pyroclastic

收稿日期: 2018-10-30; 改回日期: 2019-11-26

基金项目: 中国地质科学院矿产资源研究所四川省地矿局博士后研究站(科创平台)、中国地质调查局地质调查项目(DD20160313)和四川省教育厅科研项目(16ZB0109)资助。

作者简介: 鄢圣武, 1985年生, 男, 硕士, 工程师, 主要从事地质调查与矿产勘查工作; E-mail: ysw191052@163.com。

通讯作者: 赵克强, 1986年生, 男, 博士, 工程师, 主要从事地质调查与矿产勘查工作; E-mail: zkqiang@163.com。

rocks and volcanic clastic lavas. They have the characteristics of explosive facies, lava overflow facies and volcanic depression facies. Systematic geological profile suggest that there are three rapid eruption cycles (without any interval) and 25 volcanic rhythms during the formation of the Emeishan basalt Formation. Among them, the eruption patterns of the first and third cycles are dominated by the explosive facies and lava overflow facies, while the second cycle is dominated by the overflow phase. The systematic confirmation and study of the paleo-volcanic edifices reveal the volcanic eruption pattern and cycle rhythm characteristics of Emeishan large igneous province, which provides important data for the further study of the Wupo copper deposits in the western margin of Yangtze Block.

Key words: ancient volcanic edifice; eruptive circles; Emeishan basalt; western Yangtze; geological survey engineering; Zhaojue-Meigu; Sichuan Province

About the first author: YAN Shengwu, male, born in 1985, engineer, engaged in the research of geological survey and mineral exploration.

About the corresponding author: ZHAO Keqiang, male, born in 1986, engineer, engaged in the research of geological survey and mineral exploration.

Fund support: Supported by the Postdoctoral work station of Institute of Mineral Resources, CAGS in Sichuan Bureau of Geology & Mineral Resources(Scientific Innovation Center) project of China Geological Survey(No.DD20160313) and Scientific Research Projects of Sichuan Provincial Department of Education(No.16ZB0109).

1 引言

峨眉山大火成岩省位于中国西南部及越北地区(图1),出露面积约250000 km²,主要由高钛和低钛玄武岩、镁铁质-超镁铁质和长英质侵入岩、苦橄岩和酸性火山岩组成(Xu et al., 2001; Xiao et al., 2004; Xu et al., 2010),且与具有经济价值的钒钛磁铁矿、铜镍硫化物矿和铌钽矿密切相关(Yu et al., 2014; 王焰等, 2017)。高精度年代学分析揭示了峨眉山大火成岩省峰期年龄为259.1~259.2 Ma(Zhou et al., 2002; Zhong et al., 2014; Huang et al., 2016),时间上与中二叠世末生物大灭绝事件较好耦合(Zhou et al., 2002; Wignall et al., 2009; Day et al., 2015; Yang et al., 2018)。由于其丰富多样的成矿作用和巨量岩浆作用与生物大灭绝的潜在关联性,峨眉山大火成岩省受到了国内外学者的长期关注和研究(Zhou et al., 2002; Wignall et al., 2009; Zhong et al., 2014; Day et al., 2015; Huang et al., 2016; 徐义刚等, 2017; Bagherpour et al., 2018; Yang et al., 2018; Huang et al., 2019)。目前,前人已在地球化学、古生物学、古地磁和年代学等领域取得了重要研究成果(Xu et al., 2001; Sun et al., 2010; Zheng et al., 2010; Shellnutt, 2014; Zhong et al., 2014)。然而,有关峨眉山大火成岩省火山机构的研究还很薄弱,特别是缺少对火山碎屑岩等物质组成的综合研究,这制约了对峨眉山玄武岩组物质构成的系统厘定,也制约了

对其喷发旋回及喷发方式的深入认识(Thompson et al., 2001)。同时,近年来的研究表明,峨眉山玄武岩组不仅为相关金属矿床提供了成矿物质和热源,而且还可能是四川盆地特殊的油气储层类型(王伟锋等, 2012; 陆建林等, 2019; Lu et al., 2019; 马新华等, 2019; Wen et al., 2019)。然而,其火山机构特征和成因机理仍未得到系统厘定,这不仅制约了对相关金属成矿模式和含矿层位的准确认识,还严重制约了对油气储集空间和成藏系统的预测和研究。显然,系统开展峨眉山玄武岩组火山机构的研究,特别是刻画火山机构空间特征和厘定火山岩相类型与喷发方式这对认识峨眉山玄武岩组火山活动机制及相关成矿成藏效应均具有重要意义。

2 区域地质背景

研究区地处扬子地台西缘,构造形迹主要由寒武纪以来形成的盖层地质体、褶皱及断裂带组成,以近南北向线性展布为特征。在晚二叠世,区域构造应力场以东西向拉张应力作用为主,形成南北向张性断裂,同时引发了大规模的火山活动。南北向断裂不仅为基性岩浆上涌喷溢地表和浅层侵位提供了通道,而且为研究区中生代以来的构造格架和区域演化奠定了基础。

在峨眉山大火成岩省中心部位(川滇古陆),峨眉山玄武岩与上覆的上二叠统或上三叠统沉积岩和下伏中二叠统茅口组灰岩呈不整合接触关系

(Xiao et al., 2004; Xu et al., 2010)。区域上,峨眉山玄武岩由中心部位向边部厚度逐渐变薄(如宾川地区厚度达5000多米,贵州地区厚度仅几十至几百米)。在峨眉山大火成岩省中心地区,火山岩序列主要由下部的低钛玄武岩、上部的高钛玄武岩及顶部的酸性火山岩组成(Xu et al., 2001),而在东部地区则主要由高钛玄武岩组成,仅在云南富宁和广西那坡地区出露低钛玄武岩(Zhou et al., 2006; Huang et al., 2014)。古地理上,早泥盆世扬子陆块已基本趋于稳定,广泛接受陆表海浅海碳酸盐岩、碎屑岩沉积,仅山间盆地中堆积了少许山前磨拉石、碎屑岩建造。早中二叠世时期,扬子地区西部主要为碳酸盐岩台地相沉积(刘宝珺等, 1994)。受晚二叠世峨眉山地幔柱上隆的影响,扬子西部形成陆内裂谷,喷发堆积了巨厚的峨眉山玄武岩(图1)。而晚二叠世陆相碎屑沉积岩(宣威组)以及海相碎屑岩(龙潭组)由内向外呈环状分布在川滇古陆周围,碳酸盐岩台地相沉积仍广泛分布在扬子地区(Lu et al., 2019)。

研究区晚二叠世峨眉山玄武岩大面积分布(图2),厚度178.21~1374.00 m。峨眉山玄武岩组中岩石类型可以分为熔岩和火山碎屑熔岩、火山碎屑岩3类。结构上,熔岩具有斑状结构、隐晶质结构;斑晶多为斜长石,普通辉石少见,偶见橄榄石(橄榄石多伊丁石化);基质具间隐结构或隐晶质结构,多由斜长石微晶、玻璃质及隐晶质、磁铁矿等组成。而火山碎屑熔岩类主要具集块熔岩、角砾熔岩结构,块状构造,基质为流动特征较明显的隐晶质组成。火山碎屑岩具有集块结构、角砾结构、凝灰质结构等。前人对峨眉山溢流玄武岩开展了大量Ar-Ar和U-Pb年代学分析,限定了其峰期喷发时代为259 Ma左右(Zhou et al., 2002; Zhou et al., 2006; Wignall et al., 2009; Ali et al., 2010; Huang et al., 2014; Shellnutt, 2014; Zhong et al., 2014; Day et al., 2015; Yang et al., 2018)。岩石学和地球化学研究表明,峨眉山溢流玄武岩可划分为高钛和低钛系列,前者起源于深部OIB型富集地幔源区的低程度部

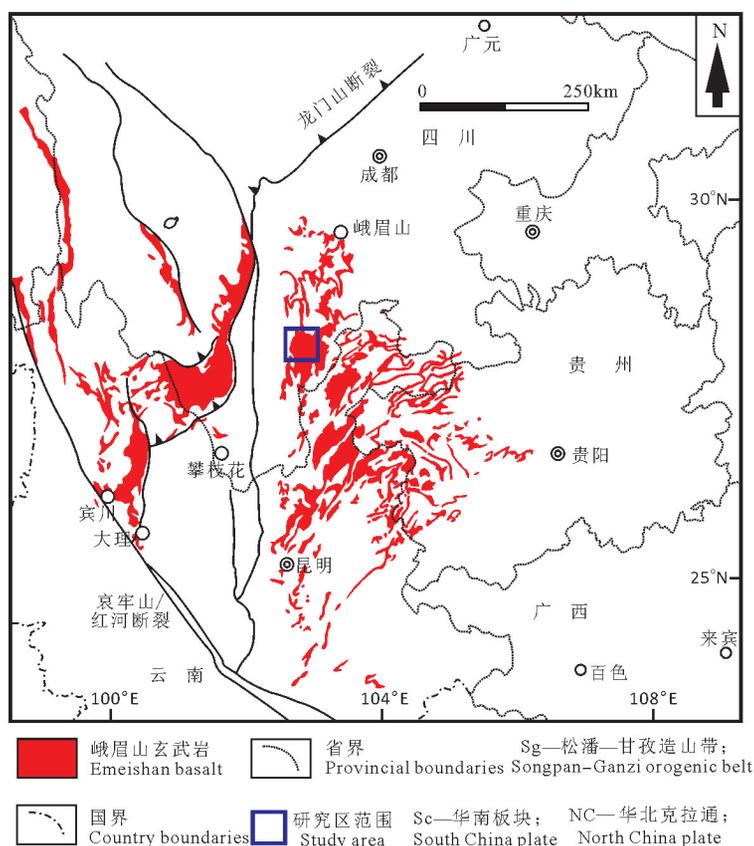


图1 峨眉山玄武岩分布示意图及研究区位置 (据Ali et al., 2010; Sun et al., 2010修改)
Fig 1 Schematic map showing the distribution of the Emeishan basalts and the studied area
(modified from Ali et al., 2010; Sun et al., 2010)

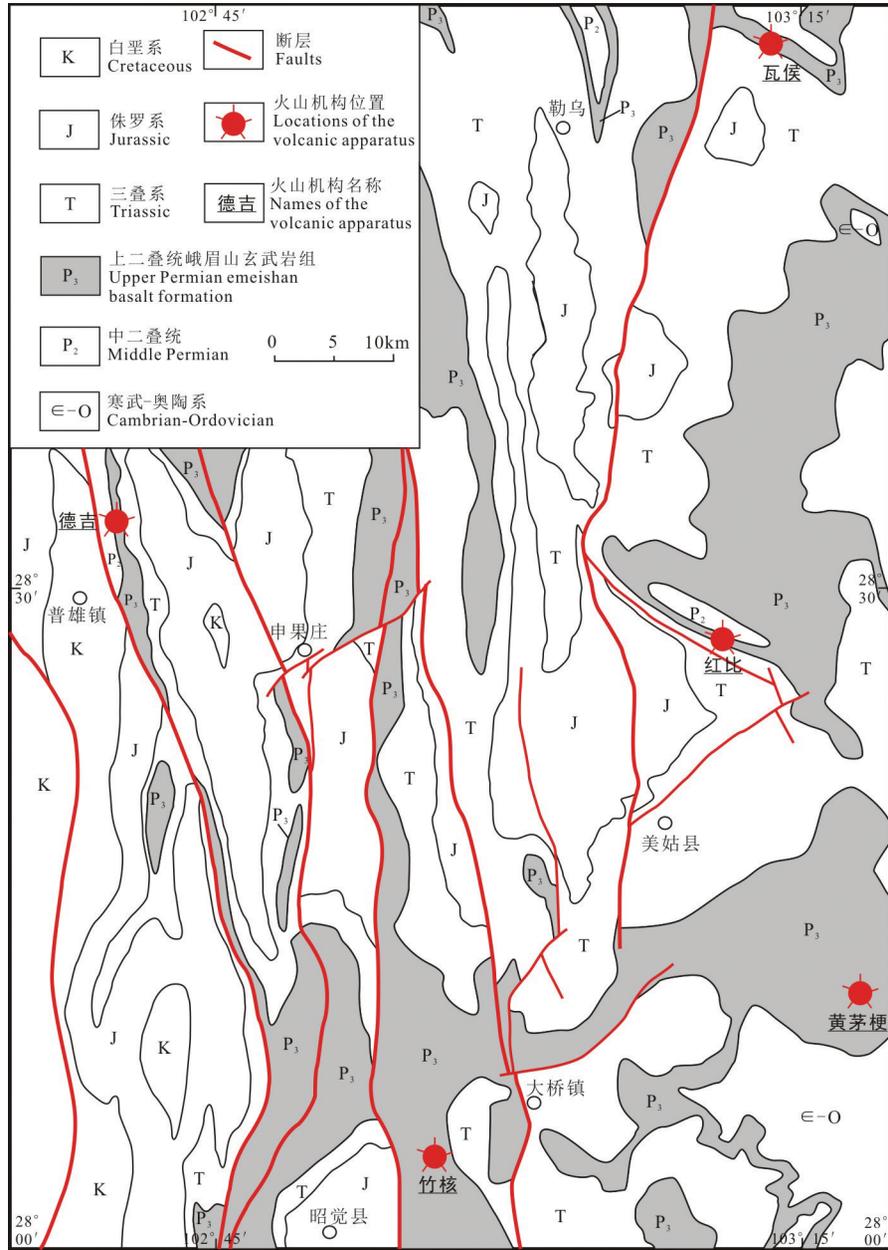


图2 研究区区域地质简图
Fig.2 Simplified geological map of the studied area

分熔融,而后者起源于浅部亏损地幔源区的高程度部分熔融(Xu et al., 2001; Xiao et al., 2004; Zhou et al., 2006; Ali et al., 2010)。

3 主要古火山机构及特征

峨眉山玄武岩组为一套致密状玄武岩、杏仁状玄武岩、斑状玄武岩、玄武质火山角砾岩及玄武质淬碎角砾岩,夹有少量玄武质火山角砾集块岩、凝灰岩,底部存在玄武质火山角砾集块岩。然而,有

关其古火山机构的研究却极为罕见。由于黏度较小,火山喷发多为溢流式,喷发物主要为杏仁状玄武岩、斑状玄武岩,在昭觉—美姑一带火山通道相、近火山口相岩石较为少见,相对于主体溢流玄武岩来说,其火山集块岩、熔结火山角砾岩只占极少量部分。

弹射空落相的火山集块岩和火山角砾岩是近火山口和火山锥堆积的标志,这些岩石的出现表明了古火山口的存在。峨眉山玄武岩组底部玄武质

火山角砾集块岩是寻找古火山机构的有力证据。比尔幅1:5万区调根据玄武质火山角砾岩和玄武质火山集块岩的分布规律和特点,进一步划分为5个裂隙式线状火山喷溢通道和8个中心式火山喷发中心。因其分布方向与普雄河断裂带基本一致,故推测火山喷发中心和喷溢带受断裂控制。本次经过详细的野外地质调查工作,在研究区由北至南相继发现了瓦侯、德吉、红比、黄茅梗、竹核等5处古火山机构,这5处古火山机构岩石类型相似,均由一系列玄武质火山角砾集块岩及少量凝灰岩、熔岩组成,三者交互分布,形成韵律,局部玄武质火山角砾集块岩与熔岩无明显界限,岩相上存在过渡。总体上,靠近底部岩石以火山通道相的玄武质集块岩为主,向上过渡为玄武质火山角砾岩和熔岩类岩石,岩相上为火山通道相、爆发相和溢流相。这种基性火山岩的爆破式喷发是昭觉—美姑地区少有的,也是极其重要的一种喷发类型,德吉正是其中最重要的代表性火山。瓦侯、竹核等火山机构的爆破式喷发应属于昭觉—美姑地区最早的喷发,火山碎屑物为阳新组灰岩。相对而言,竹核火山机构东西两侧,火山喷发物中为大量的溢流相玄武岩。这种爆破火山作用说明昭觉—美姑地区峨眉山玄武岩由短时间的爆发与长时间的溢流相互作用形成。

迄今为止发现的5处古火山机构中,瓦侯、竹核、黄茅梗、德吉属峨眉山玄武岩火山喷发早期产物;红比属峨眉山玄武岩火山喷发晚期产物;中期为安静溢流期,暂无火山通道相岩石类型出露(表1)。

3.1 瓦侯

瓦侯火山机构海拔2624 m,地貌上呈陡坎,玄武岩面理产状 $336^{\circ}\angle 47^{\circ}$ 。该火山机构岩石由块状

的火山角砾岩、斑状玄武岩组成,岩相上存在过渡,靠近中心部位以火山角砾岩为主,并出现有少量玄武质火山集块岩,这些喷发产物都是近火山口的标志。斑状玄武岩节理面大致垂直于流动方向,斑晶以灰白色柱状斜长石为主,基质为间粒间隐结构,局部可见斑晶定向,与流动方向一致。火山角砾岩中的角砾呈棱角状—次棱角状,大小在 $1\text{ cm}\times 2\text{ cm}\sim 4\text{ cm}\times 6\text{ cm}$,角砾岩性以灰岩为主,轻微大理岩化,有熔蚀晕圈,为火山爆发时携带的下伏岩层碎块,推断其来源于下伏的阳新组地层,根据集块和角砾的岩性判断该处火山机构为峨眉山玄武岩第一喷发亚旋回早期阶段的产物(图3a、b)。

3.2 竹核

竹核火山机构位于昭觉县竹核乡S307省道边,地貌上为深切河谷,最低点海拔1842 m。层位上处于峨眉山玄武岩组底部,由块状的火山角砾岩、斑状玄武岩组成,岩相界线明显,面理产状 $110^{\circ}\angle 46^{\circ}$ 。靠近中心部位以火山集块岩为主,包含了火山颈相、溢流相、爆发相岩石类型。玄武岩喷发时将下伏的阳新组灰岩捕获,在峨眉山玄武岩组底部宽约300 m范围内发育6个火山集块岩—角砾岩喷发韵律,火山集块岩段的出露宽度在2~25 m。集块(角砾)成分主要为阳新组灰岩,多呈次圆状、浑圆状、熔蚀港湾状,大小在 $1\text{ cm}\times 1.5\text{ cm}\sim 12\text{ cm}\times 18\text{ cm}$,单个集块岩韵律由下至上,集块有由大变小的趋势。露头上可以观察到阳新组灰岩被玄武岩熔蚀的晕圈构造。

玄武质火山集块岩:为火山集块结构,块状构造。集块主要为灰岩,可占50%,基质为玄武质熔岩或隐晶质,见有斜长石斑晶。集块呈棱角状、熔蚀港湾状、不规则状,少量为半塑性状,边部多有暗化的熔

表1 本文厘定的火山机构的地理位置和岩石学信息

Table 1 Information on the position and petrology of the identified volcanic apparatus in this study

名称	位置	高程/m	面理产状	描述
瓦侯	103°07'23"E 28°46'57"N	2624	$336^{\circ}\angle 47^{\circ}$	峨眉山玄武岩组底部,集块和角砾以灰岩为主,还有少量的石英砂岩,受后期南北向断裂构造(洪溪—美姑)影响岩层产状较陡
德吉	102°40'00"E 28°33'00"N	2033	$88^{\circ}\angle 39^{\circ}$	峨眉山玄武岩组底部,火山机构共发育3套火山集块(角砾)岩,集块岩产状与面理产状一致
红比	103°09'06"E 28°28'20"N	2624	$231^{\circ}\angle 53^{\circ}$	峨眉山玄武岩组上部,集块和角砾以斑状玄武岩、块状玄武岩为主,受构造影响产状较陡
黄茅梗	103°14'54"E 28°09'55"N	3217	$56^{\circ}\angle 12^{\circ}$	峨眉山玄武岩组底部,集块和角砾以灰岩和玄武岩为主,灰岩熔蚀明显,岩层产状平缓
竹核	102°56'33"E 28°04'55"N	1842	$110^{\circ}\angle 46^{\circ}$	峨眉山玄武岩组底部,共发育6套火山集块(角砾)岩,集块和角砾以灰岩为主,熔蚀明显,具港湾状熔蚀



图3 第一喷发亚旋回古火山机构岩石的野外特征

a—瓦侯火山集块岩露头;b—瓦侯火山集块岩中的灰岩集块和石英砂岩集块;c—竹核火山集块岩棱角状灰岩集块;d—竹核火山集块岩熔蚀港湾状的灰岩集块;e—德吉火山集块岩中玄武岩集块;f—黄茅埂火山集块岩中浑圆状的灰岩集块和次棱状的玄武岩集块

Fig. 3 Field photographs of ancient volcanic apparatus rocks in the first eruptive cycle

a- Wahou volcanic agglomerate outcrop; b- Limestone and Quartz sandstone aggregates in the Wahou volcanic aggregates; c- Zhouhe nuclear volcanic aggregates and angular limestone aggregates; d- Zhouher volcanic aggregates and melting embayment limestone aggregates; e- Deji basalt aggregates in volcanic aggregates; f- Round limestone aggregates and subangular basalt aggregates in the Huangmaogeng volcanic aggregates

蚀现象,粒径3~40 cm不等;集块之间胶结物为玄武质熔岩,具少斑状结构,含少量杏仁体(图3c、d)。

3.3 黄茅埂

该火山机构位于美姑县西南黄茅埂山脉的山

脊,海拔3217 m。岩相界线清楚,岩性由弹射空落相的火山集块岩和火山角砾岩、溢流相的斑状玄武岩组成,这些岩石是近火山口和火山锥堆积的标志,表明了古火山口的存在。靠近古火山口中心部

位以火山集块岩为主,包含了火山颈相、溢流相、爆发相岩石类型。火山集块岩厚度超过20 m,总体上位于峨眉山玄武岩组下部,火山碎屑岩与火山熔岩区别明显。推断这些产状近水平的玄武质火山集块岩为火山通道中岩浆上升爆破冷凝后留存的火山碎屑物。

玄武质火山集块岩为火山集块结构,块状构造。集块主要为次圆—浑圆状灰岩和斑状玄武岩,粒径5~40 cm不等,含量占60%以上,基质为玄武质熔岩或隐晶质(图3e),偶见斜长石斑晶。集块呈半定向排列,与岩浆流动方向一致,熔岩流线指向的交汇处和据气孔判断的熔岩流动反方向的交汇处正是火山口所处位置。集块大小不一,分选较差,同时,集块均靠近火山口部位,并未发生远距离搬运作用。因此,碎屑流的磨蚀作用不可能是其形态浑圆化的主要因素(Pearce., 1971; Green, 2008)。结合其玄武质胶结物和流动定向等特征,集块的形态和部分大理岩化变质现象可能反映了玄武质熔岩流对集块的高温熔蚀改造和短距离搬运作用(Valentine et al., 2013)。

3.4 德吉

德吉位于中普雄幅北侧,该处古火山机构是本次发现的规模较大,出露最完整的火山机构。与其他地方相比,该处玄武岩厚度为639 m,大于周边区域玄武岩厚度。而火山岩厚度分布的最大处往往存在火山口。德吉古火山机构由块状的玄武质火山集块岩、火山角砾岩、斑状玄武岩、杏仁玄武岩、块状玄武岩组成,火山集块岩—火山角砾岩呈带状出露,出露宽度约10 m,长度>150 m,产出范围约1500 m²。地形上沿沟谷,地貌上为绝壁,火山口处海拔2033 m。该处火山机构岩相上界线明显,靠近中心部位以火山集块岩为主,向上过渡为火山角砾岩,上部厚度巨大的斑状玄武岩为爆发后溢流的产物。根据熔岩流停滞部位可以推断岩浆呈多个方向流动,并非单一方向流动。集块岩向杏仁斑状玄武岩过渡部位界面弯曲,接触面产状 $106^{\circ}\angle 40^{\circ}$,接触部位顶部出现宽约2 cm的烘烤边现象。向上斑状玄武岩中出现有少量杏仁,杏仁体呈水滴状或不规则状,朝顶部逃逸现象明显。

玄武质火山集块岩:岩石呈深灰—灰黑色,出露范围局限,多呈岛状或席状分布。岩石呈集块结

构,块状构造(图3f)。集块大小8~40 cm不等,以8~15 cm居多,集块均为杏仁玄武岩和块状玄武岩,含量30%~35%,集块周围多分布有粒度不一的玄武岩角砾,角砾2~6 cm不等,多集中在2~4 cm,含量10%~15%。基质为杏仁玄武岩、隐晶质组成,具较明显的熔岩流动特征。靠近顶部集块岩常向角砾岩过渡。玄武质火山角砾岩:岩石呈深灰—灰黑色,常与火山集块岩共同产出或呈过渡关系。岩石具火山角砾结构,块状构造。角砾多呈棱角状,岩性以块状玄武岩为主,含量35%~40%不等,角砾周围常见集块,集块一般6~30 cm,含量2%~15%不等。角砾岩中基质部分为杏仁状构造的隐晶质玄武岩。块状或含杏仁玄武岩中常裹挟早期的深绿色杏仁玄武岩,寄主岩石块状玄武岩中可见浆屑长轴半定向形成的流面构造。裹挟的早期深绿色杏仁玄武岩中杏仁体呈雨滴状或蝌蚪状、椭圆状,流面呈紊乱状,反映岩浆在流动过程中的快速和不规律性。

3.5 红比

第三喷发亚旋回火山机构以红比为代表。红比火山机构位于觉洛幅,由块状的玄武质火山集块岩、火山角砾岩、斑状玄武岩、杏仁玄武岩、块状玄武岩组成,底部的火山集块岩产出范围约数十平方米,出露厚度>4 m(图4a),火山角砾岩与火山集块岩伴生,并无明显界限(图4b)。地形上呈不规则锥柱状,火山口处海拔2625 m,岩相上截然变化,靠近中心部位以火山集块岩为主,向上过渡为火山角砾岩,地貌上为绝壁;远离火山机构区域分布有大量熔岩,以块状玄武岩为主,斑状玄武岩及杏仁玄武岩少见,熔岩上部零星分布2~3层火山角砾岩,为火山爆发中间产物。该处火山机构共形成4个火山喷发韵律,均以火山集块岩—熔岩或火山角砾岩—熔岩为韵律特征,底部岩钟状产出的集块岩可能为火山颈相产物。形成时间晚于瓦侯火山机构。

灰色玄武质含集块火山角砾岩,角砾含量约为70%,多为近椭圆状,单个长轴长度多在10~40 cm,岩性为深灰色玄武岩,包括杏仁玄武岩和块状玄武岩,杏仁粒径多在0.5~2 mm,略具定向性。集块为深灰色含杏仁玄武岩,玄武岩集块长轴可达25 cm,含量为10%~15%。基质为紫红色隐晶质和火山灰物质,含量为10%~15%。

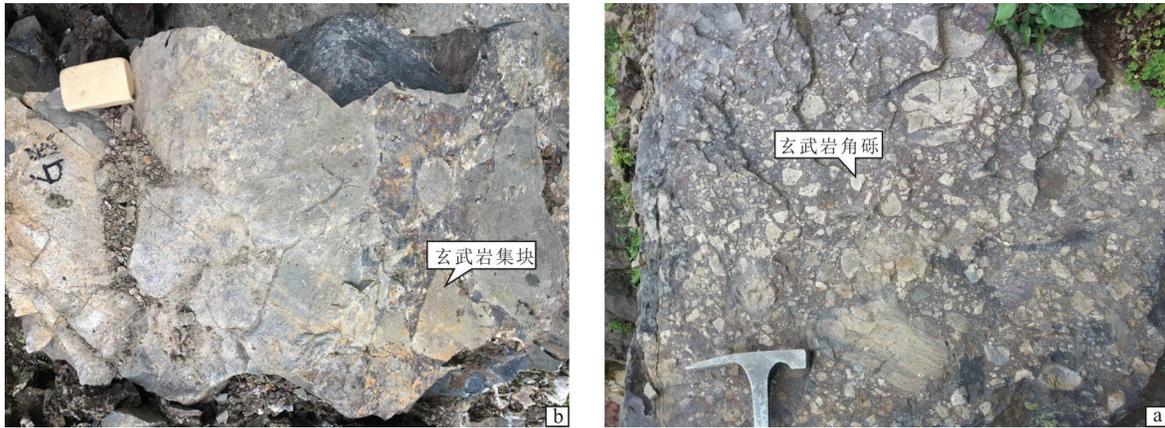


图4 第三喷发旋回古火山机构的野外岩石学特征

Fig.4 Field petrological features of the ancient volcanic apparatus formed in the third eruptive cycle

紫红色玄武质凝灰岩,呈夹层出露,凝灰质结构,块状构造,与玄武岩之间差异风化明显。一般来说,涌流相凝灰岩堆积距火山口的距离比灰流相者要小得多,而该处凝灰岩与火山集块岩、火山角砾岩的交替出现,正是古火山口的识别标志之一。

4 火山喷发韵律旋回及特征

区域上峨眉山玄武岩组岩性分段观点众多。本研究根据火山机构建造对地貌正贡献的行为、岩性向上所表现出的旋回性将峨眉山组火山岩分为3个火山喷发亚旋回。

4.1 第一亚旋回

第一亚旋回火山活动强弱变化明显,火山机构的坡度和地势起伏逐渐显现,重力势能增强,岩浆流速加快,韵律性不明显。岩性以深灰—灰黑色杏仁状无斑隐晶质玄武岩为主体,局部与杏仁状聚斑状玄武岩组成韵律,其间可见玄武质火山集块岩、火山角砾熔岩、紫红色凝灰岩、紫红色凝灰质粉砂岩等,下部岩性较为单一,多构成含斑含杏仁状玄武岩→致密块状玄武岩的喷发韵律,喷发相多为安静溢流相,中部火山角砾熔岩逐渐增加,火山活动逐渐增强,其喷发韵律多为火山角砾熔岩→深灰色杏仁状玄武岩→深灰色斑状杏仁状玄武岩,上部火山活动达到最强,以火山集块岩的出现为标志,构成玄武质火山集块岩→灰黑色斑状玄武岩组合,其喷发方式多为爆发相—溢流相。第一亚旋回玄武质火山角砾岩与火山集块岩发育,与第二亚旋回之间以一层凝灰岩结束为界。爆发相与溢流相共形成12个韵律,单个韵律层厚度为3.4~31.4 m。

4.2 第二亚旋回

第二亚旋回的韵律性最为明显。由于火山机构的坡度和地势起伏变缓,在纵向上岩浆表现出安静溢流特征。随着岩浆内部挥发分的逸出,在岩性上表现出十分发育的韵律层,常以深灰色杏仁状聚斑状玄武岩与灰黑色致密块状含斑玄武岩、灰黑色杏仁无斑隐晶质玄武岩组成韵律层。斑晶斜长石粒度可达20 mm,含量可高达35%~45%。杏仁玄武岩中杏仁体椭圆状,多硅质、绿泥石充填,整体成层性较好,显示较好的流动面理。两者界面处截然,或平直或弯曲的界面反映岩浆流动过程中的连续性和稳定性。喷发方式多为溢流相,共形成9个韵律,单个韵律层厚度为15.2~71.9 m。

4.3 第三亚旋回

第三亚旋回以无斑隐晶质玄武岩为主,夹少量杏仁聚斑状玄武岩。岩性组合为致密块状玄武岩、杏仁状玄武岩、暗紫红色凝灰岩,斑晶不发育。多构成深灰色杏仁状玄武岩→深灰色致密块状玄武岩组合的喷发韵律,部分构成暗紫红色凝灰岩→深灰色致密块状玄武岩组合的喷发韵律。底部见玄武质火山集块岩,顶部见紫红色火山碎屑岩,该亚旋回火山活动相对较强,多为溢流相,少有爆发相。韵律层不如一、二亚旋回明显,共形成4个韵律,单个韵律层厚度为8.0~50.2 m(图5)。

总体看来,第一喷发亚旋回韵律层发育,单个韵律层厚度偏小,与火山机构相关的岩石类型丰富;第二喷发亚旋回火山机构不发育,单个韵律层厚度较大,以熔岩为主,在美姑大风顶至越西县上普雄一带,中部常以灰黑色斑状玄武岩与灰黑色杏仁玄武岩组

界	系	组	层号	岩性	层厚/m	熔岩	集块岩	角砾岩	凝灰岩	喷发形式		韵律	亚旋回	旋回		
										溢流	爆发					
中生界	三叠系	须家河组	57	○ ○ ○ ○	11.3								25	三		
			56	□ □ □ □	19.9											24
			55	□ □ □ □	24.1											23
			54	○ ○ ○ ○	6.2											22
			53	□ □ □ □	8.8											21
			52	○ ○ ○ ○	8.1											20
			51	○ ○ ○ ○	3.6											19
			50	○ ○ ○ ○	3.4											18
			49	○ ○ ○ ○	10.5											17
			48	□ □ □ □	17.7											16
			47	□ □ □ □	13.1											15
			46	□ □ □ □	9.2											14
			45	□ □ □ □	9.4											13
			44	□ □ □ □	14.6											12
			43	□ □ □ □	32.6											11
			42	□ □ □ □	5.7											10
			41	□ □ □ □	14.3											9
			40	□ □ □ □	11.2											8
			39	□ □ □ □	16.8											7
			38	□ □ □ □	10.7											6
			37	□ □ □ □	33.2											5
			36	□ □ □ □	28.7											4
			35	□ □ □ □	36.6											3
			34	□ □ □ □	6.9											2
			33	□ □ □ □	22.7											1
			32	□ □ □ □	4.2											
			31	□ □ □ □	14.6											
			30	□ □ □ □	8.6											
			29	□ □ □ □	6.6											
			28	□ □ □ □	4.4											
			27	□ □ □ □	4.7											
			26	□ □ □ □	10.7											
			25	□ □ □ □	25.8											
			24	△ △ △ △	4.9											
			23	△ △ △ △	4.6											
			22	□ □ □ □	6.6											
			21	□ □ □ □	9.0											
			20	□ □ □ □	7.4											
			19	□ □ □ □	0.2											
			18	□ □ □ □	16.0											
			17	□ □ □ □	2.2											
			16	△ △ △ △	5.2											
			15	□ □ □ □	14.0											
			14	□ □ □ □	7.0											
			13	□ □ □ □	4.9											
			12	□ □ □ □	21.1											
			11	□ □ □ □	0.9											
			10	△ △ △ △	3.4											
			9	△ △ △ △	9.5											
			8	□ □ □ □	31.4											
			7	□ □ □ □	21.3											
			6	□ □ □ □	0.6											
			5	□ □ □ □	4.1											
			4	□ □ □ □												
			3	□ □ □ □												
			2	□ □ □ □												
			1	□ □ □ □												

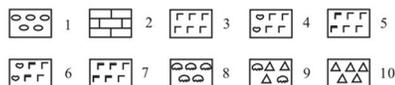


图5 峨眉山玄武岩喷发韵律旋回划分
 1—砾岩;2—灰岩;3—块状玄武岩;4—杏仁状玄武岩;5—斑状玄武岩;6—杏仁斑状玄武岩;7—多斑状玄武岩;8—玄武质集块岩;9—玄武质含集块角砾岩;10—玄武质火山角砾岩

Fig.5 Division of the eruption rhythm and cycle for the Emeishan basalt

1—Conglomerate;2—Limestone;3—Aphyric Basalt;4—Amygdaloidal basalt;5—Porphyritic basalt;6—Amygdaloidal-phyric basalt;7—Polyporphyritic basalt;8—Basaltic agglomerate;9—Basaltic agglomerated breccia;10—Basaltic volcanic breccia

成韵律,两者在局部形成多个细小的韵律层。斑晶斜长石粒度可达 20 mm,含量可高达 35%~45%。杏仁玄武岩中杏仁体椭圆状,多硅质,绿泥石充填,整体成层性较好,显示较好的流动面理。两者界面处截然,或平直或弯曲的界面反映岩浆流动过程中的连续性和稳定性;第三喷发亚旋回兼具有一、二亚旋回特征,与火山机构相关的岩石类型量少,熔岩以块状玄武岩为主,显示火山喷发晚期溢流为主的特征。

5 讨论

5.1 喷发时代

作为地球上所知最大的火山作用,大火成岩省具有极大的喷发速率和极高的岩浆体积,喷发持续时间一般小于 1 Ma(徐义刚等, 2017),而峨眉山玄武岩组不整合于阳新组灰岩之上,其上为宣威组沉积,地层学关系揭示峨眉山玄武岩的喷发时限无疑早于 P/T 界线,因此峨眉山玄武岩喷发年龄被推断为约 260 Ma(Xu et al., 2004)。有学者认为峨眉山玄武岩启动于 260 Ma,大规模快速喷发 256~253 Ma,而 253~251 Ma 的中酸性岩石代表其末期产物(范蔚茗等, 2004)。近年来,关于约 260 Ma 的火山启动时间推断也已被越来越多的年代学资料所证实,例如, Zhong 采用单颗粒锆石 CA-ID-TIMS 方法对宾川地区峨眉山玄武岩顶部酸性凝灰岩和朝天剖面 GLB 黏土岩中的锆石进行高精度定年,测得的酸性凝灰岩和黏土岩年龄分别为 (259.1±0.5) Ma 和 (259.2±0.3) Ma(Zhong et al., 2014),两者在误差范围内完全一致,(259.1±0.5) Ma 的火山喷发时间也被国际地层委员会所采纳。

5.2 喷发旋回与火山机构的关系

玄武岩的厚度、低钛玄武岩的分布表明,峨眉山地幔柱作用的中心部位在上扬子最西缘云南大理、

四川米易一带(何斌等, 2003)。据地幔柱模型(Campbell et al., 1990)推算,峨眉山地幔柱头部直径为800 km,地幔柱尾直径约400 km。研究区离峨眉山地幔柱中心部位550 km,处于地幔柱头部影响范围,而在地幔柱尾影响范围之外,这与本文火山机构反映较吻合:峨眉山玄武岩中第一亚旋回火山机构数量众多,类型丰富且规模宏大,裂隙式与中心式喷发并存,而第三亚旋回火山机构类型单一且规模较小。

本次厘定的峨眉山玄武岩组古火山机构在管道充填物和集块岩性等方面存在显著时空差异,其火山集块的不均一性为分析各古火山机构的形成时序提供了重要信息(Green., 2008; Valentine et al., 2013)。区域上,峨眉山玄武岩组存在3次喷发亚旋回,且上覆于泥盆纪碎屑岩和中二叠世灰岩等岩层之上,这些岩层均可作为后期火山岩提供碎屑来源。系统的地质剖面研究表明,第一喷发亚旋回的瓦侯和竹核火山机构中存在大量泥盆纪石英砂岩、中二叠世灰岩等火山集块,且多呈次圆状;而黄茅埂火山机构不仅存在大量灰岩角砾,还存在大量的玄武岩角砾,且灰岩角砾的熔蚀程度和大理岩化变质现象更明显,形态多为浑圆状,局部出现熔蚀边;第一亚旋回中的德吉火山机构则显著不同于其他古火山机构,其火山集块多为玄武岩,灰岩集块极少。这种集块的物质组成和含量的空间变化与火山喷发的早晚密切相关。基于野外地质调查和区域地

质资料,本文认为瓦侯和竹核古火山机构形成于第一喷发亚旋回早期,深部玄武质岩浆顺构造薄弱部位上涌并喷出地表,并携带了火山通道内的泥盆纪碎屑岩和中二叠世灰岩等角砾。角砾在高温玄武质岩浆的熔蚀和搬运下,形成了定向分布的次圆状形态特征;而玄武质火山角砾的出现则暗示,黄茅埂火山机构可能形成于第一亚旋回中期。早期喷发形成的玄武岩为晚期火山岩提供了新的火山角砾来源。且中期火山岩的温度更高,导致火山角砾的形态更加浑圆,并出现大理岩化变质现象;玄武岩的多期次上涌喷发,导致火山通道多被玄武岩充填,造成后期喷发的火山角砾多为玄武岩,而灰岩角砾的含量逐渐减少直至消失。因此,德吉火山机构应属第一亚旋回晚期岩浆喷发的产物。综上所述,在时间上,瓦侯火山机构与竹核火山机构形成于第一亚旋回早期,黄茅埂火山机构形成于第一亚旋回中期,而德吉火山机构则属第一亚旋回晚期(图6),而在空间上,火山喷发具北早南晚和东早西晚的特征。

第二喷发亚旋回暂未见火山机构出露,但第三喷发亚旋回的火山集块岩和火山角砾岩在物质组成上与第一亚旋回存在较大差异。红比火山机构处的火山集块岩及火山角砾均为杏仁玄武岩或斑状玄武岩,表明此阶段已有大量玄武岩熔岩覆盖,火山爆发时携带的围岩物质为峨眉山玄武岩组玄武岩,属峨眉山玄武岩晚期产物。研究区内玄武岩

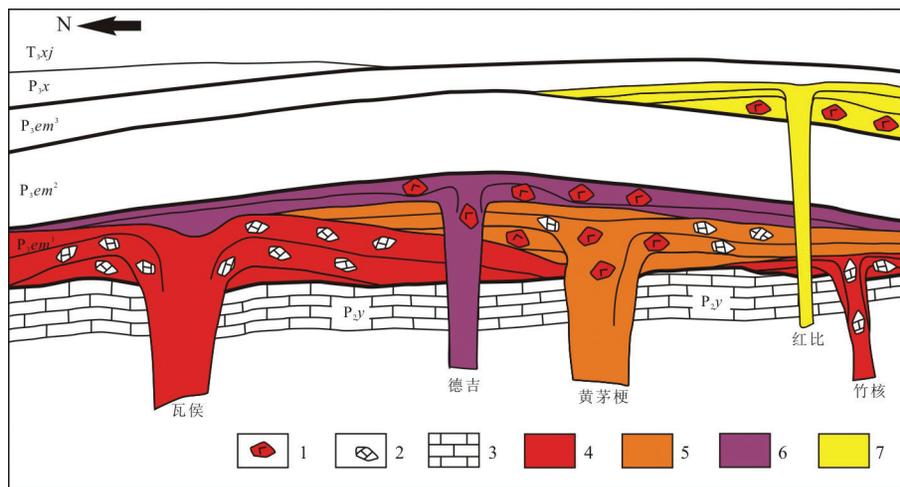


图6 峨眉山玄武岩火山机构示意图

1—玄武岩集块;2—灰岩集块;3—灰岩;4—旋回早期;5—旋回中期;6—旋回晚期;7—三旋回

Fig.6 Schematic diagram showing the volcanic apparatus of the Emeishan basalts

1—Basaltic agglomerate;2—Limestone agglomerate;3—Limestone;4—Early Cycle;5—Middle Cycle;6—Late Cycle;7—Cycle 3

不整合覆盖于中二叠统阳新组顶部风化壳之上,表明该期火山作用是在区内总体上升成陆后发生的。按火山岩相、旋回划分,该期火山作用属爆发、喷溢交替型。其中,爆发作用不仅局部地区属近火口堆积,广大地区有少量属远火口和火山间隙堆积,更多以火山溢出相为主,熔岩成层性好,韵律发育,沿走向延伸稳定。不同岩性分层处的氧化还原界面较清楚,如纵向上杏仁状熔岩具有“红顶绿底”现象,而致密状熔岩则普遍发育六方或五方柱状节理。部分岩石呈紫红色等,说明该期火山作用为陆相高原玄武岩,为氧化环境的产物,呈岩流或岩被产出。

综合相邻图幅研究资料,发现火山角砾岩等近火山口相岩石类型仅在大谷堆附近少量出现,往西至越西和冕宁一带未见报道。野外实地调查和大比例尺火山剖面实测表明,扬子西缘昭觉—美姑一带存在5处与峨眉山玄武岩组相关的古火山机构,而该区更多的古火山机构亟待发现。

5.3 对区域成矿成藏作用的启示

扬子西缘存在丰富的与峨眉山玄武岩组相关的金属成矿类型,例如晚二叠世峨眉山玄武岩型铜矿(高学震, 2014)和钒钛磁铁矿(卢记仁等, 1988)。由于缺少古火山机构的研究,导致有关峨眉山大火成岩省的喷发方式和沉积特征尚不清楚,这制约了对相关矿床的勘探和成矿机制研究。例如,扬子西缘的峨眉山玄武岩型铜矿(俗称乌坡式铜矿),其矿石矿物主要赋存于火山角砾岩裂隙或孔隙中,但针对这些火山角砾岩与溢流玄武岩的成因联系、地层层位及岩相特征却鲜有研究,这制约了对成矿模式和含矿层位的准确认识。本次地质工程调查发现,峨眉山玄武岩组第三喷发亚旋回形成的火山角砾岩层间裂隙可能是主要的容矿构造,角砾同胶结物间隙及角砾本身空隙是矿化次生富集的主要构造,矿化火山角砾岩为主要含矿层。火山通道相岩石与火山岩型铜矿存在密切联系,瓦侯等古火山机构的厘定和研究,不仅揭示了峨眉山玄武岩组火山岩相的类型和喷发旋回特征,同时为研究扬子西缘乌坡式铜矿等矿床的成矿模式提供了基础资料。近年来,在滇黔边界发现了至少5处大型古火山口,且存在玄武岩型铜矿(高学震, 2014),因此,深入开展扬子西缘二叠纪火山机构的厘定和研究,既

有利于认识峨眉山火山作用的喷发方式和空间叠置关系,也有利于理解区域成矿模式和指导找矿勘探工作。

众所周知,峨眉山玄武岩组在扬子西缘大面积发育,东至川东华蓥山和达州地区,西至云南大理,均可见峨眉山玄武岩组出露。而近年来在四川盆地西南的多口钻井内可见二叠纪火山岩存在裂缝型和孔隙型油气储层,部分钻井还在峨眉山玄武岩组内获得了工业气流(冯仁蔚等, 2008; 邓敏等, 2014),显然,扬子西缘的峨眉山玄武岩组具有较好的油气勘探前景。然而,扬子西缘的峨眉山玄武岩组还存在着钻井少、岩性岩相识别困难、储层分布不清等问题,这严重制约了对该区火山岩有利岩相的刻画及储层的定性定量研究。因此,系统厘定峨眉山玄武岩的喷发机制和火山机构分布特征对于建立火山岩油气成藏模式和评价油气资源勘探潜力均是亟待解决的关键科学问题。本文通过系统的野外地质工程调查和剖面研究对火山机构和火山岩相进行了识别与刻画。研究表明,峨眉山玄武岩组发育多个火山机构,存在三次快速喷发亚旋回及25个火山韵律。其中,第一亚旋回和第三亚旋回的岩相以爆发相与溢流相为主,而第二亚旋回则以溢流相为主。第一和第三亚旋回中的火山碎屑岩存在火山角砾,角砾之间的孔隙具有良好的储集空间,可能具有较好的油气勘探前景,是一个值得重视和研究的层位。建议结合地震资料进行深部火山机构和岩性岩相的识别与解释,从而更加全面地厘定扬子西缘峨眉山玄武岩组的成矿成藏特征,为该区火山岩型油气勘探提供理论支撑。

6 结 论

(1) 本项研究厘定的5处古火山机构进一步丰富了研究区内峨眉山玄武岩组的岩相类型,刻画了火山岩的物质构成、喷发旋回和喷发方式。

(2) 扬子西缘昭觉—美姑地区峨眉山玄武岩组火山岩古火山机构均具火山颈爆发相、溢流相和火山洼地相堆积构造的特征,且峨眉山玄武岩组火山岩存在3次喷发亚旋回及25个火山韵律,3次喷发亚旋回均属快速喷发,无火山间歇期。

(3) 第一亚旋回发现4处古火山机构,喷发方式以爆发相与溢流相为主,第二亚旋回以溢流相为

主,第三亚旋回发现1处古火山机构,喷发方式以爆发相与溢流相为主。第一和第三亚旋回的爆发相可能具有重要的成矿成藏意义。

References

- Ali J R, Fitton J G, Herzberg C. 2010. Emeishan large igneous province (SW China) and the mantle-plume up-doming hypothesis[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 167: 953–959.
- Bagherpour B, Bucher H, Yuan D X, Leu M, Zhang C, Shen S Z. 2018. Early Wuchiapingian (Lopingian, late Permian) drowning event in the South China block suggests a late eruptive phase of Emeishan large igneous Province[J]. *Global and Planetary Change*, 169: 119–132.
- Campbell I H, Griffiths R W. 1990. Implications of mantle plume structure for the evolution of flood basalts[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 99: 79–93.
- Day M O, Ramezani J, Bowring S A, Sadler P M, Erwin D H, Abdala F, Rubidge B S. 2015. When and how did the terrestrial mid-Permian mass extinction occur? Evidence from the tetrapod record of the Karoo Basin, South Africa[J]. *Proceedings of the Royal Society B*, 282, 20150834.
- Deng Min, Hou Mingcai, Zhang Benjian, Li Xiuhua. 2014. Favorable reservoir analysis of Emeishan basalt in Zhougongshan area of southwest Sichuan Province[J]. *Geology in China*, 41(2): 378–386 (in Chinese with English abstract).
- Fan Weiming, Wang Yuejun, Peng Touping, Miao Laicheng, Guo Feng. 2004. Ar–Ar and U–Pb geochronology of Late Paleozoic basalts in western Guangxi and its constraints on the eruption age of Emeishan basalt magmatism[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(18): 1892–1900 (in Chinese with English abstract).
- Feng Renwei, Wang Xingzhi, Zhang Fan, Yang Yueming, Li Yuegang, Pang Yanjun, Zhang Ruoxiang. 2008. The study on reservoir property and characteristics of the Emeishan basalts of Zhougongshan and its neighbour area in the Southwest Sichuan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 26(6): 912–924 (in Chinese with English abstract).
- Gao Xuezheng. 2014. Study on metallogenic model of basalt copper deposits in mount Emei[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, (2): 26–29 (in Chinese with English abstract).
- Green G W. 2008. Volcanic stratigraphical architecture of the East Mendip Silurian Inlier, Somerset, UK[J]. *Proceedings of the Geologists' Association*, 119: 339–350.
- He B, Xu Y G, Wang Y M, Luo Z Y. 2006. Sedimentation and lithofacies paleogeography in southwestern China before and after the emeishan flood volcanism: New insights into surface response to mantle plume activity[J]. *The Journal of Geology*, 114: 117–132.
- He Bin, Xu Yigang, Xiaolong, Wang Kangming, Sha Shaoli. 2003. Generation and spatial distribution of the Emeishan large igneous province: New evidence from stratigraphic records[J]. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 194–202 (in Chinese with English abstract).
- Huang H, Du Y S, Yang J H, Zhou L, Hu L S, Huang H W, Huang Z Q. 2014. Origin of Permian basalts and clastic rocks in Napo, Southwest China: Implications for the erosion and eruption of the Emeishan large igneous province[J]. *Lithos*, 208/209: 324–338.
- Huang H, Cawood P A, Hou M C, Yang J H, Ni S J, Du Y S, Yan Z K, Wang J. 2016. Silicic ash beds bracket Emeishan Large Igneous province to < 1 m.y. at ~260 Ma[J]. *Lithos*, 264: 17–27.
- Huang H, Hou M C, Qing H R, Zhou L, Yang J H, Du Y S, Tian J C, Ni S J, Xiong F H. 2019. The contribution of the Emeishan large igneous province to the strontium isotope evolution of the Capitanian seawater[J]. *International Geology Review*, 1–13.
- Liu Baojun, Xu Xiaosong. 1994. Atlas of Lithofacies and Paleogeography in South of China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese).
- Lu Jianlin, Zuo Zongxin, Shi Zheng, Dong Xia, Wu Qingjie, Song Xiaobo. 2019. Characteristics of Permian volcanism in the western Sichuan Basin and its natural gas exploration potential[J]. *Natural Gas Industry*, 39(2): 46–53 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jiren, Zhang Guangdi, Zhang Chengxin, Gu Guangxian, Liu Yushu, Huang Yuneng. 1988. A genetic model for layered intrusions and vanadic titanomagnetite deposits in Panzhihua–Xichang area[J]. *Mineral Deposits*, 7(2): 3–11 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xinhua, Yang Yu, Zhangjian, Xie Jirong. 2019. A major discovery in Permian volcanic rock gas reservoir exploration in the Sichuan Basin and its implications[J]. *Natural Gas Industry*, 39(2): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Pearce T H. 1971. Short distance fluvial rounding of volcanic detritus[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 41: 1069–1072.
- Sun Y D, Lai X L, Wignall P B, Widdowson M, Ali J R, Jiang H S, Wang W, Yan C B, Bond D P, Védrine S. 2010. Dating the onset and nature of the Middle Permian Emeishan large igneous province eruptions in SW China using conodont biostratigraphy and its bearing on mantle plume uplift models[J]. *Lithos*, 119: 20–33.
- Shellnutt J G. 2014. The Emeishan large igneous province: A synthesis[J]. *Geoscience Frontiers*, 5: 369–394.
- Thompson G M, Ali J R, Song X Y, Jolley D W. 2001. Emeishan basalts, SW China: Reappraisal of the formation's type area stratigraphy and a discussion of its significance as a large igneous province[J]. *Journal of the Geological Society*, 158: 593–599.
- Valentine G A, Cortés J A. 2013. Time and space variations in magmatic and phreatomagmatic eruptive processes at Easy Chair (Lunar Crater Volcanic Field, Nevada, USA) [J]. *Bulletin of Volcanology*, 75: 752.
- Wignall P B, Sun Y D, Bond D P G, Izon G, Newton R J, Védrine S,

- Widdowson M, Ali J R, Lai X L. 2009. Volcanism, mass extinction, and carbon isotope fluctuations in the Middle Permian of China[J]. *Science*, 324: 1179–1182.
- Wang Weifeng, Gao Bin, Wei Pingsheng, Pan Jianguo, Li Fei, Yi Zejun. 2012. Research of volcanic reservoir characters and hydrocarbon accumulation models[J]. *Progress in Geophys.*, 27(6): 2478–2491 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yan, Wang Kun, Xing Changming, Wei Bo, Dong Huan, Cao Yonghua. 2017. Metallogenic diversity related to the Late Middle Permian Emeishan large igneous province[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(3): 405–418 (in Chinese with English abstract).
- Wen L, Li Y, Yi H Y, Liu X, Zhang B J, Qiu Y C, Zhou G, Zhang X H. 2019. Lithofacies and reservoir characteristics of Permian volcanic rocks in the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry B.* 39(2): 17–27
- Xiao L, Xu Y G, Mei H J, Zheng Y F, He B, Pirajno F. 2004. Distinct mantle sources of low-Ti and high-Ti basalts from the western Emeishan large igneous province, SW China: Implications for plume–lithosphere interaction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 228: 525–546.
- Xu Y G, Chung S L, Jahn B M, Wu G Y. 2001. Petrologic and geochemical constraints on the petrogenesis of Permian–Triassic Emeishan flood basalts in southwestern China[J]. *Lithos*, 58:145–168.
- Xu Y G, He B, Chung S L. 2004. Geologic, geochemical and geophysical consequences of plume involvement in the Emeishan flood–basalt province[J]. *Geology*, 32(10):917.
- Xu Y G, Chung S L, Shao H, He B. 2010. Silicic magmas from the Emeishan large igneous province, southwest China: Petrogenesis and their link with the end–Guadalupian biological crisis[J]. *Lithos*, 119:47–60.
- Xu Yigang, Zhong Yuting, Wei Xun, Chen Jun, Liu Haiquan, Xie Wei, Luo Zhenyu, Li Hongyan, He Bin, Huang Xialong, Wang Yan, Chen Yun. 2017. Permian Mantle Plumes and Earth's Surface System Evolution[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 36(3): 359–373 (in Chinese with English abstract).
- Yang J, Cawood P A, Du Y, Condon D J, Yan J, Liu J, Huang Y, Yuan D. 2018. Early Wuchiapingian cooling linked to Emeishan basaltic weathering[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 492:102–111.
- Yu S Y, Song X Y, Chen L M, Li X B. 2014. Postdated melting of subcontinental lithospheric mantle by the Emeishan mantle plume: Evidence from the Anyi intrusion, Yunnan, SW China[J]. *Ore Geology Reviews*, 57: 560–573.
- Zheng L D, Yang Z Y, Tong Y B, Yuan W. 2010. Magnetostratigraphic constraints on two–stage eruptions of the Emeishan continental flood basalts[J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 11, Q12014.
- Zhong Y T, He B, Mundil R, Xu Y G. 2014. 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*, 204:14–19.
- Zhou M F, Malpas J, Song X Y, Robinson P T, Sun M, Kennedy A K, Lesher C M, Keays R R. 2002. A temporal link between the Emeishan large igneous province (SW China) and the end–Guadalupian mass extinction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 196:113–122.
- Zhou M F, Zhao J H, Qi L, Su W, Hu R. 2006. Zircon U–Pb geochronology and elemental and Sr–Nd isotope geochemistry of Permian mafic rocks in the Funing area, SW China[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 151:1–19.

附中文参考文献

- 邓敏, 侯明才, 张本健, 李秀华. 2014. 川西南部周公山地区峨眉山玄武岩有利储层分析[J]. *中国地质*, 41(2): 378–386.
- 范蔚茗, 王岳军, 彭头平, 苗来成, 郭峰. 2004. 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*, 49(18): 1892–1900.
- 冯仁蔚, 王兴志, 张帆, 杨跃明, 李跃纲, 庞艳君, 张若祥. 2008. 四川西南部周公山及邻区“峨眉山玄武岩”特征及储集性能研究[J]. *沉积学报*, 26(6): 912–924.
- 高学震. 2014. 峨眉山玄武岩铜矿成矿模式研究[J]. *四川有色金属*, (2): 26–29.
- 何斌, 徐义刚, 肖龙, 王康明, 沙绍礼. 2003. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布:来自沉积地层学的新证据[J]. *地质学报*, 77(2): 194–202.
- 刘宝珺, 许效松. 1994. 中国南方岩相古地理图集[M]. 北京:科学出版社.
- 卢记仁, 张光弟, 张承信, 顾光先, 刘玉书, 黄与能. 1988. 攀西层状岩体及钒钛磁铁矿床成因模式[J]. *矿床地质*, 7(2): 3–11.
- 陆建林, 左宗鑫, 师政, 董霞, 吴清杰, 宋晓波. 2019. 四川盆地西部二叠系火山作用特征与天然气勘探潜力[J]. *天然气工业*, 39(2): 46–53.
- 马新华, 杨雨, 张健, 谢继容. 2019. 四川盆地二叠系火山碎屑岩气藏勘探重大发现及其启示[J]. *天然气工业*, 39(2): 1–8.
- 王伟锋, 高斌, 卫平生, 潘建国, 李飞, 易泽军. 2012. 火山岩储层特征与油气成藏模式研究[J]. *地球物理学进展*, 27(6): 2478–2491.
- 王焰, 王坤, 邢长明, 魏博, 董欢, 曹永华. 2017. 二叠纪峨眉山山地幔柱岩浆成矿作用的多样性[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(3): 405–418.
- 徐义刚, 钟玉婷, 位荀, 陈军, 刘海泉, 颜伟, 罗震宇, 李洪颜, 何斌, 黄小龙, 王焰, 陈赞. 2017. 二叠纪地幔柱与地表系统演变[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 36(3):359–373.