

文章编号:1009-2722(2018)08-0045-10

# 缅甸沙林凹陷晚白垩世凝灰岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄与地质意义

黄聿晓<sup>1,2,3</sup>, 张训华<sup>3,4\*</sup>, 黄奇瑜<sup>5</sup>, 郭兴伟<sup>2,3</sup>, 孙建伟<sup>3</sup>

(1 山东科技大学, 青岛 266590; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266235;

4 中国地质调查局南京地质调查中心, 南京 210016; 5 同济大学, 上海 200092)

**摘要:**在沉积盆地沉积序列中,凝灰岩是源区火山活动与造山运动的直接产物,常见于在板块边缘。对缅甸中北部弧前盆地沙林凹陷内凝灰岩地层进行准确的年代学测量,探讨其形成的大地构造背景。研究认为,对凝灰岩中锆石的年代学测量,得到的年龄分别为  $70 \pm 1.0$  Ma,  $64.2 \pm 1.2$  Ma,  $65 \pm 1.0$  Ma,  $64 \pm 0.8$  Ma, 判断庞吉组沉积年代属于晚白垩世—早古新世;新特提斯洋的 B 型俯冲导致缅甸中央盆地的岩浆活动,在沙林凹陷内沉积了凝灰岩。

**关键词:**晚白垩世;凝灰岩;锆石;LA-ICP-MS;缅甸

中图分类号:P597.3

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2018.08006

缅甸中央盆地位于西缅甸地块,是缅甸境内最大、最主要的盆地,也是缅甸已探明最主要的油气产区。盆地内火山活动频繁,根据前人研究成果<sup>[1-6]</sup>,盆地内火山主要活动时间在 70~40 Ma,处于古新世—渐新世,而古新世对应的地层就是庞吉组。目前学者对于庞吉组的研究主要是在地层划分和对比方面上,因为庞吉组的生物化石属、种较少,且化石组合有明显的穿时性,缺少可以准确确定年的属种;而现有的钻井资料仅揭示到始新统地层,缺乏第一手的深部地层的岩心资料。前人对凝灰岩夹层未给予足够重视,导致了对于庞

吉组所属年代一直存在争议,严重影响了对沙林凹陷乃至缅甸中央盆地晚白垩世末期到古新世时期的构造格架转换、岩浆活动、生物演化等方面的进一步探索。

缅甸中央盆地晚白垩世以来先后受到新特提斯洋、欧亚板块和印度板块三大构造域所夹持,盆地内岩浆活动必然与俯冲造山带之间息息相关,通过盆地内沉积地层中凝灰岩的研究可以为构造演化、地层划分提供直接的证据。本文首次对缅甸中盆地沙林凹陷庞吉组顶部的凝灰岩进行取样研究,在锆石 U-Pb 同位素测年的基础上,结合凝灰岩地球化学特征,分析了凝灰岩成因及喷发的大地构造背景,以期对盆地内构造演化与地层对比的提供证据(图 1)。

## 1 地质概况及样品描述

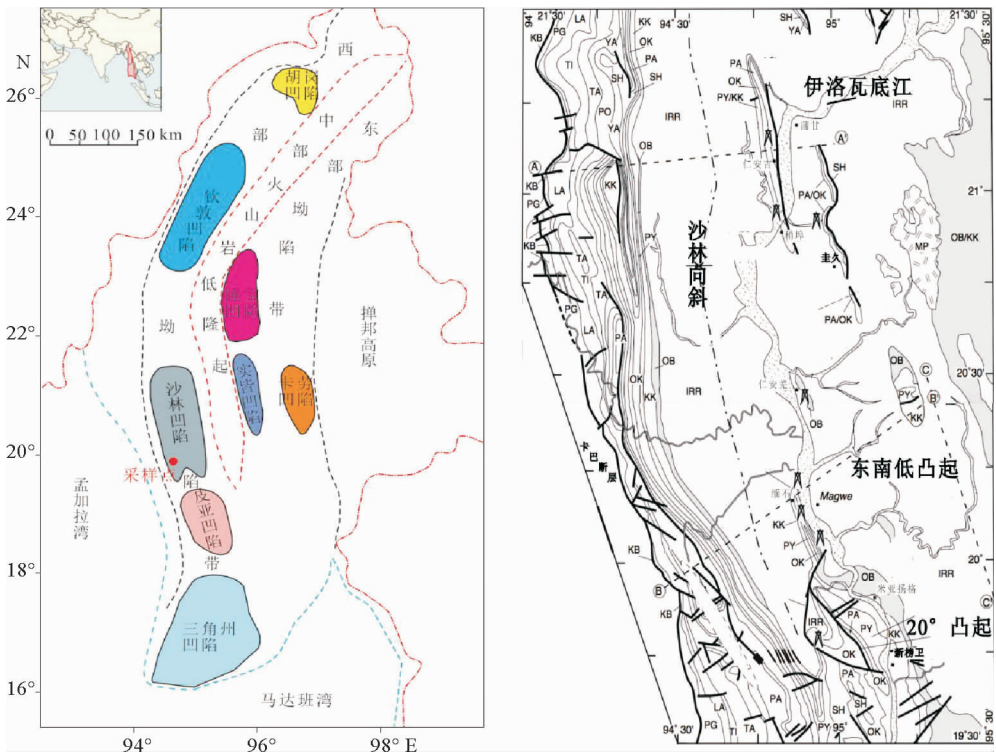
缅甸中央盆地坐落于西缅甸地块,位于西部若开山脉(Rakhine Range)与东部的掸邦高原

收稿日期:2018-05-02

基金项目:国家海洋地质专项(DD20160147);鳌山科技创新计划项目(2015ASKJ03);国家自然科学基金(41472093);国家自然科学基金联合基金(U1505231)

作者简介:黄聿晓(1991—),男,硕士,主要从事海洋地质构造的研究工作。E-mail:13573259157@163.com

\* 通讯作者:张训华(1961—),男,博士,研究员,博导,主要从事海洋地球物理的研究工作。E-mail:xunhuazh@vip.sina.com



红点: 采样位置; IRR: 伊洛瓦底群; OB: 奥博贡组; KK: 库奥科克组; PY: 标贝组; OK: 鄂霍明当组; PA: 巴当组; SH: 瑞泽道组; YA: 尧河组; PO: 蓬当组; TA: 塔本组; TI: 提林组; LA: 郎欣组; PG: 庞吉组; KB: 卡巴组

图1 缅甸中央盆地构造单元与沙林凹陷地质图(据文献[4])

Fig. 1 A tectonic map of the central basin in Burma and the geological map of Salin Depression(from reference [4])

(Shan Plateau)之间,内部被中央火山岩隆起分为西部弧前、东部弧后2个次级盆地。自晚白垩世开始,西缅甸地块一直向北漂移期间先受到大洋板块的俯冲,古新世—始新世时期受到印度板块的“软”、“硬”2次俯冲碰撞,中央盆地内构造应力由拉张变为挤压,内部各构造单元雏形出现;渐新世—中新世期间,受巽他地块加速逃逸、实皆断裂及安达曼海扩张影响,中央盆地发生广泛沉积;上新世时期,西缅甸地块向北运动与喜马拉雅山发生碰撞,向北运动受到阻挡,之后,进入稳定沉积阶段<sup>[7-11]</sup>。沙林凹陷位于西部弧前盆地,沉积了晚白垩世以来的地层,主要为新生代地层(图2)。凹陷内的现有钻井资料仅能揭示到中始新统<sup>[6]</sup>,但在沙林凹陷周缘地区受构造运动影响,发育大量逆冲断层,庞吉组地层有所出露。

近年来的地质调查结果表明,凝灰岩主要发育在西部拗陷带沙林凹陷与中部火山岩隆起(图3)。古新统庞吉组的主要岩性从下至上为:深灰色泥灰岩带、泥岩浅灰色中—粗粒砂岩、凝灰质岩

层。本次实验在凝灰岩地层中,采集4个样品用于定年(图4),采样地点大致围绕坐标:19°54'55" N, 94°30'24"E。

YX1和YX8样品岩石新鲜面呈灰褐色,凝灰结构,块状构造,镜下鉴定由晶屑(50%)、岩屑(25%)、玻屑(15%)、不透明矿物(10%)组成,填隙物为火山灰。晶屑由钾长石和石英组成,压实分布,不规则棱角状至次棱角状,大小为1~2 mm;岩屑呈刚性、半塑性,塑性岩屑相对较少,杂乱分布,大小为0.5~2 mm,推测为花岗岩、流纹岩等。

YX7和YX11样品岩石新鲜面呈灰白色,凝灰结构,块状构造,镜下鉴定由火山灰(60%)、晶屑(15%)、岩屑(10%)、不透明矿物(5%)组成,填隙物以<1 mm的凝灰级火山灰为主。晶屑由钾长石和石英组成,零星分布,不规则次棱角状,大小为0.05~1 mm;岩屑呈刚性、半塑性,杂乱分布,大小为0.3~2 mm,推测岩性成分为花岗岩、流纹岩等;玻屑呈弧面棱角状、鸡骨状,可见拉长、弯曲等现象。

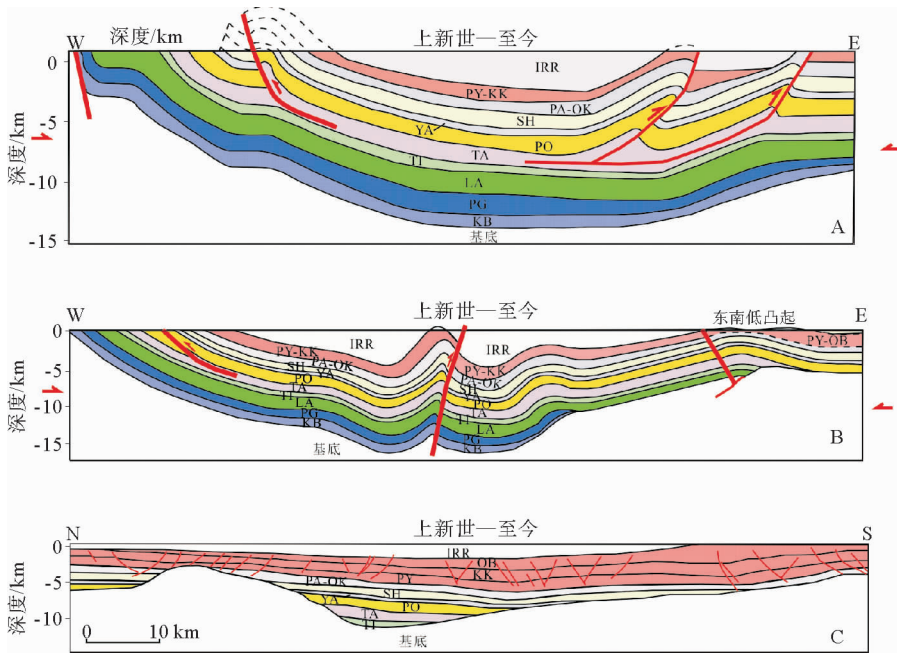


图 2 沙林凹陷地层剖面图

Fig. 2 Cross section of Salin Depression



图 3 沙林凹陷古新统凝灰岩凝灰岩野外露头照片

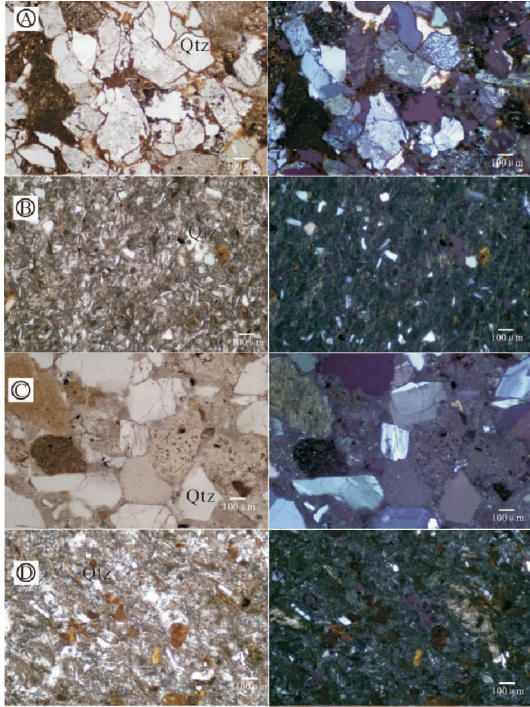
Fig. 3 Field outcrop of tuff in Salin Depression

## 2 实验与分析方法

锆石由河北廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司挑选;锆石制靶与阴极发光扫描仪进行图像分析交由同济大学国家海洋地质实验室,锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄测定在中国冶金总局

山东局测试中心;LA-ICP-MS 激光剥蚀系统为美国 Conherent 公司生产的 GeoLasPro193nmArF 准分子系统;ICP-MS 型号为 ThermoFisher 公司生产的 iCAPQ。激光剥蚀采样过程以氦气作为载气,氮气为辅助气。采用 GJ-1 标准锆石(TIMS 获得谐和年龄为  $600 \pm 5$  Ma)作为外标进行基体校正;成分标样采用 NISTSRM610,其中 Zr 作为

内标元素。同位素比值采用标准锆石 91500 进行校正。样品的同位素比值及元素含量计算采用 ICPMSDATA CAL 数据处理程序,普通铅校正采用<sup>[12]</sup>提出的 ComPbCorr # 3.17 校正程序,U-Pb 谐和图和年龄分布频率图绘制和年龄权重平均计算采用 Isoplot/Ex\_ver3<sup>[13]</sup>程序完成。



左:单偏光井;右:正交井;A: YX1;B: YX7;C: YX8;D: YX11

图 4 缅甸沙林凹陷凝灰岩镜下照片

Fig. 4 Photo of the tuff in Salin Depression, Burma

### 3 测试结果与分析

岩浆锆石通常显示典型的震荡环或者扇形分带结构,晶型常为半自形到自形,锆石粒径 20~250  $\mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>。CL 图像显示,凝灰岩中锆石的震荡环带较为清晰,自形程度较好,具有较明显的岩浆锆石特征(图 5)。

不同成因锆石有不同的 Th 和 U 含量及 Th/U 比值,岩浆锆石的 Th 和 U 含量较高,Th/U 比值较大(一般 $>0.4$ ),变质锆石的 Th 和 U 含量较低,Th/U 比值小(一般 $<0.1$ )<sup>[14-17]</sup>。沙林凹陷庞吉组中一共选取 4 块样品进行测试,编号分别为 YX1、YX7、YX8、YX11。YX7 的 Th/U 比值最

小为 0.4,最大为 1.1,均值为 0.67;YX11 的 Th/U 比值最小为 0.41,最大为 1.1,均值为 0.68。可以看出,均 $>0.4$ ,确定是岩浆锆石。

U-Pb 测年的结果谐和度较高(图 6、表 1~4),YX1 样品<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权平均值为  $70 \pm 1.0$  Ma(MSWD=0.85);YX7 样品<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权平均值为  $64.2 \pm 1.2$  Ma(MSWD=2.1);YX8 样品<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权平均值为  $65 \pm 1.0$  Ma(MSWD=1.6);YX11 样品<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U 的加权平均值为  $64 \pm 0.8$  Ma(MSWD=1.2)。

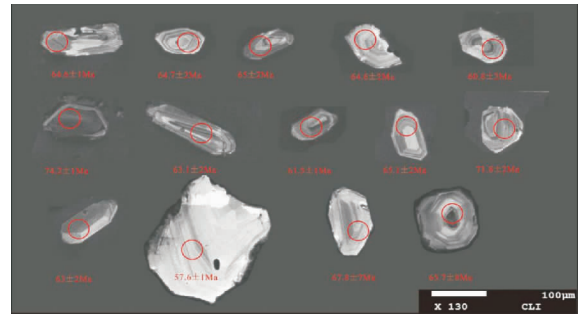


图 5 沙林凹陷庞吉组火山碎屑岩 CL 图像

Fig. 5 CL image of Paunggyi Formation volcaniclastic rock of in Salin Depression

## 4 讨论

### 4.1 地层时代归属

自晚白垩世弧前盆地形成以来,沙林凹陷接受沉积,包括上白垩统卡巴组以及新生代地层。庞吉组建组以来,缺乏比较可靠的定年依据,所以一直将其划分为古新统。这次对庞吉组顶部凝灰岩喷发时代的确定,是确定庞吉组地层年代可靠的依据。

从岩性上来看:白垩系卡巴组主要为黏土岩、浅变质岩类,而庞吉组主要为浅变质岩、硅质岩及喷出岩等<sup>[3]</sup>,这表明卡巴组到庞吉组存在一定时期的连续沉积,物源来源在庞吉组沉积早期没有发生明显变化,且都为海相沉积环境;而上覆郎欣组主要为浅色碎屑岩,沉积环境变为陆相,与庞吉组的沉积环境有较大差别,庞吉组与上白垩统卡巴组联系更密切;根据地层中生物化石来看,庞吉组主要发育放射虫、有孔虫及棘屑等,发现有

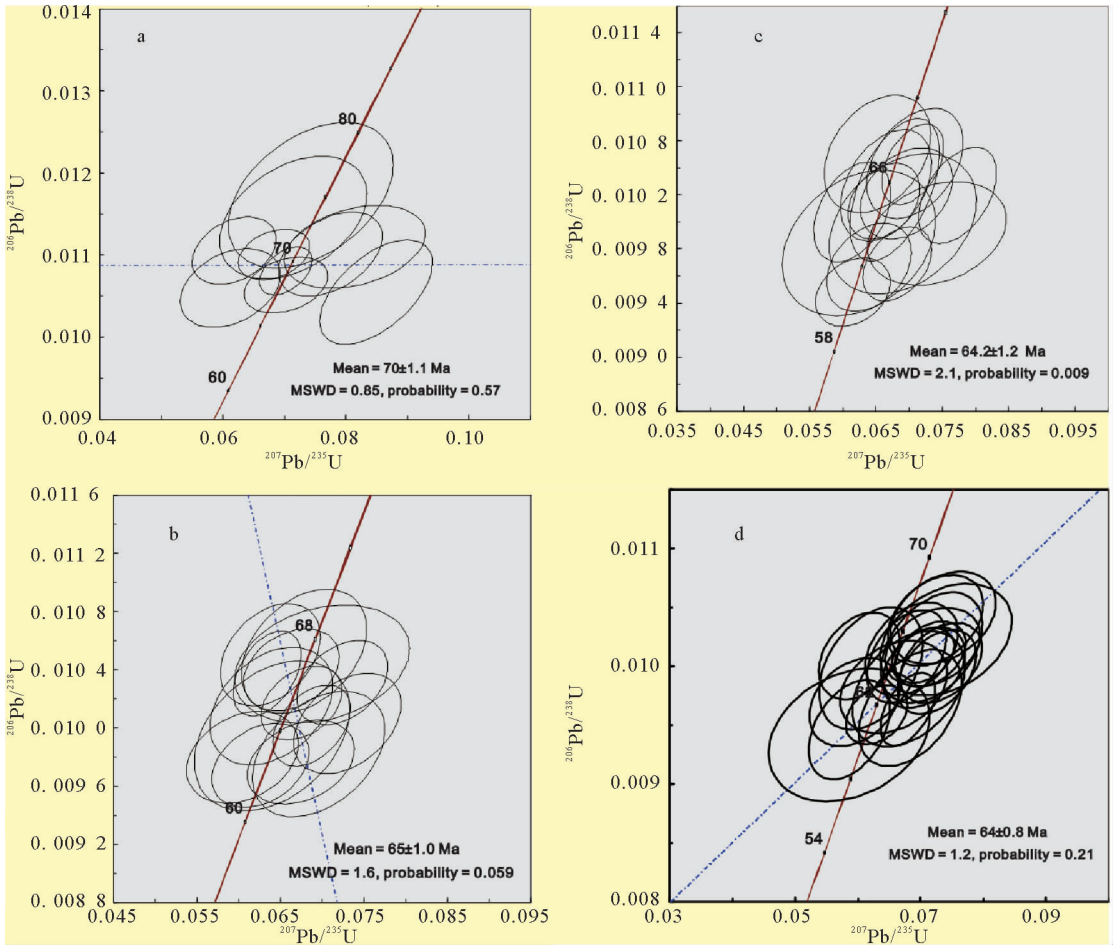


图 6 沙林凹陷古新统凝灰岩锆石 U-Pb 谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb harmonic diagrams of the Paleocene tuff in the Salin Depression

*Rugubivesiculites*、*Spinozunocolpites*、*Tricopites* A 等,在卡巴组地层也有所发现;而朗欣组常见珊瑚红藻、棘屑、大有孔虫、双列有孔虫及腕足生物化石等,与庞吉组生物组合有较大差别。

前人研究<sup>[18-23]</sup>通过对邻区钦敦凹陷内庞吉组中、下部砂岩中锆石测年得到年龄在 90~70 Ma 之间,而由表 1~4 可知,本文测年的庞吉组顶部沉积的凝灰岩地层年龄大致为 70~65 Ma,与下部地层存在连续性,但是,除此之外,庞吉组凝灰岩也是地层年代理想的横向对比标志,在中央盆地中部的岩浆岛弧带发现大段凝灰岩层,锆石测年得到年龄大致在 70~64 Ma<sup>[6]</sup>。

综上所述,本文认为沙林凹陷庞吉组地层属于晚白垩世—早古新世。

#### 4.2 构造演化

研究区的构造演化与新特提斯洋及印度板块

构造运动密切相关。西缅甸地块自晚白垩世以来发生的先后面临新特提斯洋的俯冲与印度洋“软”和“硬”两次碰撞。

大规模的洋壳俯冲在中央盆地内部引起了广泛的岩浆活动,前人的研究成果认为缅甸中央盆地自晚白垩世以来至少经历过 2 期岩浆活动,分别在晚白垩纪—古新世早期(69~64.5 Ma)和始新世时期(53~38 Ma),第一期岩浆活动时间要早于印度板块洋壳与西缅甸地块之间的俯冲碰撞(约为 59~56 Ma)。结合盆地中部岩浆岛弧的 I 型花岗岩、花岗闪长岩及锆石定年结果(69~65 Ma),晚白垩世的俯冲洋壳应该是新特提斯洋,根据锆石测年结果及印度板块北漂速度(图 7),最早大约 70 Ma 或者更早,新特提斯洋洋壳的俯冲消减就已经发生,这引起了盆地内的岩浆活动,而印度板块向北漂移速度也因此加快。此时,沙林凹陷还处于海平面以下,沉积海相暗色碎屑岩,后

黄聿晓表  
1  
和表  
2

黄  
聿  
晓  
表  
3

黄  
聿  
晓  
表  
4



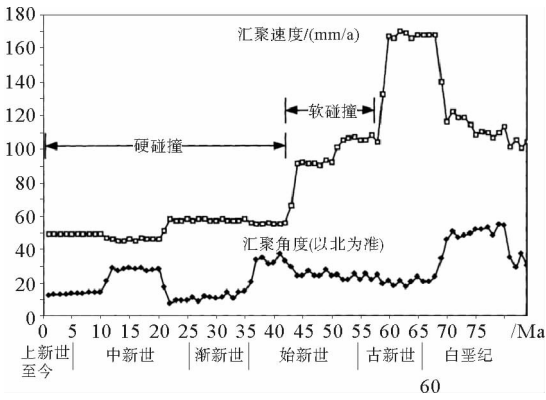


图7 85 Ma 以来印度板块与欧亚大陆汇聚速度和角度变化示意图(引自文献[10])

Fig. 7 A schematic diagram of the convergence rate and angle change of the India plate and Eurasian continent since 85 Ma (from reference [10])

期因俯冲碰撞而构造抬升沉积环境逐渐变为陆相。综合来看,沙林凹陷内沉积凝灰岩层,应该是新特提斯洋洋壳俯冲导致中央岛弧位置的火山活动岩浆。

研究区晚白垩世构造运动如下:

晚白垩世(70 Ma),新特提斯洋洋壳向东沿西缅甸地块发生俯冲,中央盆地中部发生岩浆活动,在中央岛弧位置及沙林凹陷内沉积凝灰岩;

中古新世末期(59 Ma),新特提斯洋洋壳保持稳定的俯冲消减直至闭合,印度板块向北漂移的速度在此期间保持稳定;

晚古新世(56 Ma),印度板块北部的洋壳与欧亚板块发生碰撞即“软”碰撞,印度板块洋壳部分向东沿西部西缅甸地块发生俯冲(西缅甸地块此时还未与欧亚板块分离),这次碰撞可能导致西缅甸地块与欧亚板块产生裂痕,并使得印度板块北移速度大幅下降。

## 5 结论

(1) 庞吉组顶部凝灰岩层中锆石年龄在 64 Ma 左右,生物化石组合与下伏白垩系卡巴组类似,沉积环境不存在沉积间断。本研究认为庞吉组地层属于晚白垩世。

(2) 晚白垩世新特提斯洋的俯冲导致了缅甸中央盆地内火山运动,中央火山岛弧的岩浆运动

在沙林凹陷内沉积了庞吉组凝灰岩夹层。

### 参考文献:

- [1] 陈剑光,刘怀山,周军,等. 缅甸 D 区块构造特征与油气储层评价[J]. 西北油气地质, 2006, 39(1): 105-114.
- [2] 谢楠,姜焱,朱光辉,等. 缅甸 Sagaing 走滑断裂及对睡宝盆地构造演化的控制和影响[J]. 现代地质, 2010, 24(2): 268-272.
- [3] 袁书坤. 缅甸伊洛瓦底盆地构造演化及层序地层学研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2015.
- [4] Pivnik D A, Nahm J, Tucker R S, et al. Polyphase deformation in a fore-Arc/back-arc basin, Salin subbasin, Myanmar (Burma)[J]. AAPG Bulletin, 1998, 82(10): 1837-1856.
- [5] Wang J G, Wu F Y, Tan X C, et al. Magmatic evolution of the Western Myanmar Arc documented by U-Pb and Hf isotopes in detrital zircon[J]. Tectonophysics, 2014, 612-613: 97-105.
- [6] 周浩玮. 缅甸中央岛弧带地层对比和发育的控制因素[J]. 地层学杂志, 2017(41): 1, 71-78.
- [7] Wandrey C J. Eocene to Miocene composite total petroleum system, Irrawaddy-Andaman and North Burma geological Provinces, Myanmar[J]. US Geological Survey Bulletin, 2006, 2208-E(1): 1-24.
- [8] Mitchell A, Chung S L, Oo T. Zircon U-Pb ages in Myanmar: Magmatic metamorphic events and the closure of a neotethys ocean[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 56: 1-23.
- [9] Curray J R. The Bengal Depositional System: From rift to orogeny[J]. Marine Geology, 2014, 352: 59-69.
- [10] Lee T T, Lawver L A. Cenozoic plate reconstruction of Southeast Asia[J]. Tectonophysics, 1995, 251: 85-138.
- [11] 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: 47-69.
- [12] Anderson T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report  $^{204}\text{Pb}$ [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [13] Ludwig K R. User's manual for Isoplot/EX, Version 3.00 [M]. Ageochronological Toolkit for Microsoft Excel; Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4: 1-70.
- [14] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18: 423-439.
- [15] Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the Western Alps [J]. Cathodoluminescence Geoscience, 2000: 373-400.

- [16] Möller A O, Brien P J, Kennedy A, et al. Linking growth episodes of zircon and metamorphic textures to zircon chemistry: An example from the ultrahigh-temperature granulites of Rogaland (SW Norway)[J]. *Geology Society*, 2003, 220: 65-81.
- [17] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. *科学通报*, 2004, 49: 1589-1604.
- [18] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 2009, 51: 537-571.
- [19] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]// *Geological Society Special Publication*, 1989, 42: 313-345.
- [20] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Geostandards and Geo-analytical Research*, 2004, 28(3): 353-370.
- [22] Wang J G, Wu F Y, Tan X C, et al. Magmatic evolution of the Western Myanmar Arc documented by U-Pb and Hf isotopes in detrital zircon[J]. *Tectonophysics*, 2014, 612-613: 97-105.
- [23] Zhang P, Mei L F, Hu X L, et al. Structures, uplift, and magmatism of the Western Myanmar Arc: Constraints to mid-Cretaceous-Paleogene tectonic evolution of the western Myanmar continental margin[J]. *Gondwana Research*, 2017, 52: 18-38.

## U-PB AGES OF LA-ICP-MS ZIRCON FROM LATE CRETACEOUS TUFF IN THE SALIN DEPRESSION OF MYANMAR AND THEIR GEOLOGICAL SIGNIFICANCE

HUANG Yuxiao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Xunhua<sup>3,4\*</sup>, HUANG Qiyu<sup>5</sup>, GUO Xingwei<sup>2,3</sup>, SUN Jianwei<sup>3</sup>

(1 Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China; 3 Qingdao Marine Science and Technology National Laboratory Marine Mineral Resource Evaluation and Detection Technology Function Laboratory, Qingdao 266235, China; 4 Nanjing Geological Survey Center, CGS, Nanjing 210016, China; 5 Tongji University, Shanghai 200092, China;)

**Abstract:** Tuff, as a direct product of volcanic activity, is often found along the edge of the plate. Accurate geochronological dating for the tuff formations in the Salin Depression of the pre-Arc Basin in the north-central part of Myanmar may found a reliable basis for stratigraphic division and calibration of the study area. The tectonic movement between blocks, supplemented by geochemical data, may provide time constraints for delineations of tectonic settings. Our data suggest that: 1) The ages of zircons in tuffs are  $70 \pm 1.0$  Ma,  $64.2 \pm 1.2$  Ma,  $65 \pm 1.0$  Ma, and  $64 \pm 0.8$  Ma., indicating that the Pangji Formation is Late Cretaceous in age. 2) The B-type subduction of the Neo-Tethys Ocean led to magmatic activity in the Central Basin of Myanmar. Tuff deposits derived are deposited in the Salin Depression.

**Key words:** Late Cretaceous; tuff; zircon; LA-ICP-MS; Burma

表 1 凝灰岩样品 YX1 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据

Table 1 YX1 LA-ICP-MS : U-Pb age data for tuff samples

样品号		含量/ $10^{-6}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
YX1	Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$
1	6.84	260	503	0.52	0.047 9	0.002 0	0.070 2	0.002 8	0.010 8	0.000 2	94.5	100	68.9	3	69.3	1
2	4.59	256	307	0.83	0.050 0	0.003 6	0.070 2	0.004 5	0.010 6	0.000 2	195	168	68.9	4	68.2	1
3	3.47	169	254	0.67	0.042 2	0.003 9	0.061 2	0.005 3	0.010 6	0.000 3	error		60.3	5	67.9	2
4	1.41	57.3	98.6	0.58	0.056 5	0.006 6	0.081 4	0.007 6	0.011 1	0.000 3	472	268	79.5	7	71.1	2
5	3.91	228	262	0.87	0.042 8	0.003 4	0.061 7	0.004 5	0.011 0	0.000 3	error		60.8	4	70.8	2
6	0.93	38.0	64.0	0.59	0.062 7	0.017 2	0.074 3	0.008 9	0.011 7	0.000 6	698	496	72.7	8	75.1	4
7	5.36	190	392	0.48	0.044 9	0.002 6	0.068 2	0.003 8	0.011 0	0.000 2	error		67.0	4	70.5	1
8	1.64	71.4	116	0.61	0.053 4	0.005 0	0.077 5	0.005 6	0.011 0	0.000 3	346	211	75.8	5	70.6	2
9	1.47	48.5	97.5	0.5	0.050 9	0.006 7	0.071 4	0.007 9	0.011 5	0.000 5	235	281	70.0	7	73.4	3
10	1.54	74.4	110	0.67	0.068 8	0.008 0	0.084 9	0.006 0	0.010 5	0.000 4	894	243	82.7	6	67.6	3

表 2 凝灰岩样品 YX7 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据

Table 2 Tuff sample YX7 LA-ICP-MS : U-Pb age data

样品号		含量/ $10^{-6}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
YX7	Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$
1	4.36	194	316	0.61	0.051 8	0.007 2	0.067 9	0.004 5	0.010 2	0.000 3	276	289	66.7	4	65.6	2
2	8.13	419	584	0.72	0.050 0	0.002 3	0.071 0	0.003 1	0.010 4	0.000 2	195	107	69.6	3	66.8	1
3	3.9	288	288	1	0.049 0	0.003 4	0.064 0	0.004 2	0.009 7	0.000 2	150	156	63.0	4	62.0	1
4	5.25	286	429	0.67	0.047 2	0.003 3	0.061 6	0.003 7	0.009 5	0.000 2	57.5	163	60.7	4	60.8	1
5	5.26	239	416	0.57	0.048 7	0.002 8	0.066 3	0.003 6	0.010 1	0.000 2	132	130	65.2	3	65.1	1
7	12.95	628	983	0.64	0.055 7	0.003 4	0.077 4	0.003 9	0.010 2	0.000 2	439	137	75.7	4	65.4	1
8	4.94	308	380	0.81	0.044 6	0.003 1	0.061 5	0.003 8	0.010 1	0.000 2	error		60.6	4	64.6	1
9	3.09	111	261	0.43	0.046 3	0.006 3	0.062 5	0.007 6	0.009 8	0.000 4	13.1	296	61.6	7	63.1	2
10	8.29	471	612	0.77	0.054 9	0.005 5	0.074 3	0.006 9	0.009 9	0.000 3	406	226	72.7	7	63.6	1
11	4.16	174	331	0.53	0.050 3	0.003 7	0.071 0	0.004 8	0.010 4	0.000 3	209	170	69.6	5	66.9	1
12	2.84	137	226	0.61	0.053 6	0.006 2	0.069 1	0.007 3	0.010 0	0.000 3	354	261	67.9	7	64.0	2
13	5	291	365	0.8	0.051 3	0.003 7	0.069 7	0.004 6	0.010 2	0.000 2	254	167	68.4	4	65.5	1
14	2.64	87.2	221	0.4	0.050 4	0.004 3	0.066 6	0.004 5	0.010 3	0.000 3	217	231	65.5	4	65.8	1
15	2.46	117	191	0.61	0.047 5	0.004 3	0.065 3	0.005 3	0.010 5	0.000 3	72.3	204	64.2	5	67.3	1
16	14.01	1129	1028	1.1	0.050 8	0.003 2	0.068 3	0.003 4	0.009 7	0.000 2	232	144	67.1	3	62.1	1
17	4.11	212	329	0.64	0.074 2	0.005 9	0.093 8	0.007 2	0.009 2	0.000 2	1056	160	91.1	7	59.3	1

表 3 凝灰岩样品 YX8 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据  
Table 3 Tuff sample YX8 LA-ICP-MS : U-Pb age data

样品号		含量/ $10^{-6}$			$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
YX8	Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$
1	5.84	300	444	0.67	0.049 7	0.002 4	0.068 8	0.003 1	0.010 0	0.000 2	183	111	67.6	3	64.2	1
2	8.53	392	646	0.61	0.044 5	0.002 0	0.063 5	0.002 7	0.010 4	0.000 2	error		62.5	3	66.5	1
3	5.39	234	414	0.56	0.051 7	0.002 7	0.072 5	0.003 6	0.010 3	0.000 2	272	120	71.0	3	66.1	1
4	5.01	244	406	0.6	0.047 1	0.003 1	0.062 7	0.003 8	0.009 7	0.000 2	53.8	157	61.7	4	62.5	1
6	3.29	135	254	0.53	0.047 0	0.003 1	0.066 4	0.003 8	0.010 4	0.000 2	55.7	139	65.3	4	66.7	1
7	4.42	196	364	0.54	0.051 1	0.003 7	0.067 5	0.004 2	0.009 8	0.000 2	256	197	66.3	4	62.6	1
8	2.51	101	196	0.52	0.050 5	0.004 6	0.067 9	0.004 9	0.010 5	0.000 3	217	200	66.7	5	67.5	2
9	7.80	509	565	0.9	0.048 8	0.002 4	0.067 6	0.003 2	0.010 2	0.000 2	200	121	66.5	3	65.2	1
10	2.77	102	220	0.46	0.051 1	0.006 3	0.070 1	0.006 9	0.010 4	0.000 3	243	263	68.8	7	66.9	2
11	3.23	135	253	0.54	0.046 6	0.003 9	0.064 0	0.004 8	0.010 1	0.000 3	27.9	193	63.0	5	65.1	2
12	13.5	1626	776	2.1	0.051 2	0.003 9	0.069 7	0.005 2	0.009 8	0.000 3	250	176	68.4	5	63.0	2
13	4.01	162	318	0.51	0.056 5	0.004 1	0.073 1	0.004 3	0.010 0	0.000 2	472	166	71.7	4	64.3	1
14	4.65	202	354	0.57	0.044 9	0.003 2	0.063 9	0.003 9	0.010 5	0.000 2	error		62.9	4	67.3	1
15	3.17	165	246	0.67	0.046 8	0.004 2	0.060 5	0.004 4	0.009 8	0.000 2	39.0	200	59.7	4	62.8	1
16	2.12	68.5	176	0.39	0.051 6	0.006 3	0.064 1	0.006 1	0.009 9	0.000 3	333	194	63.1	6	63.8	2

表 4 凝灰岩样品 YX11 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据  
Table 4 Tuff sample YX11 LA-ICP-MS : U-Pb age data

样品号	含量/ $10^{-6}$				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
	Pb	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Th/U	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	比值	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$	年龄/Ma	$1\sigma$
1	4.46	348	333	1.05	0.044 5	0.003 6	0.059 5	0.004 8	0.009 7	0.000 2	error		58.6	5	62.2	2
2	5.60	229	443	0.52	0.051 8	0.002 8	0.071 5	0.003 7	0.010 1	0.000 2	276	122	70.1	4	64.8	1
3	2.28	106	177	0.6	0.052 5	0.004 5	0.068 6	0.004 9	0.010 1	0.000 3	309	198	67.3	5	65.0	2
4	4.72	273	377	0.72	0.046 2	0.003 6	0.058 6	0.004 2	0.009 5	0.000 3	9.4	178	57.8	4	60.7	2
5	2.87	150	231	0.65	0.051 3	0.005 1	0.068 0	0.005 9	0.009 8	0.000 3	254	236	66.8	6	62.9	2
6	5.79	312	461	0.68	0.053 0	0.003 6	0.070 5	0.004 4	0.010 0	0.000 2	328	156	69.2	4	64.0	1
7	3.22	189	243	0.78	0.050 0	0.004 8	0.065 7	0.005 6	0.009 8	0.000 3	195	272	64.6	5	63.0	2
8	16.29	958	1234	0.78	0.051 6	0.003 3	0.067 9	0.002 9	0.009 6	0.000 2	333	142	66.7	3	61.8	1
9	11.74	771	858	0.9	0.050 5	0.002 7	0.070 4	0.003 3	0.010 1	0.000 2	217	122	69.0	3	64.7	1
10	3.60	196	273	0.72	0.051 1	0.003 6	0.067 7	0.004 2	0.010 1	0.000 3	256	197	66.6	4	64.6	2
11	3.49	178	270	0.66	0.045 3	0.003 8	0.060 2	0.004 2	0.010 1	0.000 2	error		59.4	4	64.7	2
12	3.15	104	253	0.41	0.052 9	0.004 7	0.071 7	0.005 3	0.010 2	0.000 3	324	206	70.3	5	65.1	2
13	13.38	1007	1006	1	0.047 4	0.002 4	0.062 9	0.003 3	0.009 6	0.000 2	77.9	109	62.0	3	61.5	1
14	3.03	162	219	0.74	0.053 6	0.006 0	0.074 0	0.006 9	0.010 2	0.000 3	367	256	72.5	7	65.5	2
15	5.27	335	427	0.78	0.052 0	0.004 1	0.068 4	0.005 4	0.009 6	0.000 3	287	179	67.1	5	61.8	2
16	4.47	207	354	0.58	0.052 6	0.003 9	0.071 9	0.005 0	0.010 2	0.000 2	322	136	70.5	5	65.1	1
17	5.62	321	422	0.76	0.051 4	0.004 0	0.072 4	0.005 0	0.010 4	0.000 3	257	175	70.9	5	66.6	2
18	1.54	98.1	120	0.81	0.045 6	0.007 7	0.058 6	0.008 5	0.009 4	0.000 4	error		57.8	8	60.4	2
19	5.88	400	416	0.96	0.054 2	0.003 7	0.073 3	0.004 3	0.010 0	0.000 2	376	154	71.8	4	64.3	1
20	4.11	176	341	0.52	0.054 6	0.003 9	0.072 5	0.004 1	0.009 9	0.000 2	394	156	71.1	4	63.8	2
21	4.09	306	285	1.07	0.048 1	0.005 3	0.062 1	0.005 5	0.010 0	0.000 3	106	241	61.1	5	64.0	2
22	3.43	203	248	0.82	0.053 4	0.004 5	0.073 6	0.005 5	0.010 4	0.000 3	346	193	72.1	5	66.7	2