

DOI:10.16562/j.cnki.0256-1492.2017.06.004

# 南海北缘白云凹陷新生代岩浆活动特征与期次

杨率<sup>1</sup>,金振奎<sup>1</sup>,韩建辉<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;  
2. 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,成都 610059)

**摘要:**白云凹陷隶属于南海北缘珠江口盆地珠二坳陷,进入新生代以后白云凹陷及其邻区发育了剧烈的、多期次的岩浆活动,表现为强烈的火山喷发与岩浆侵入作用。从白云凹陷地质资料、井资料、地震资料出发,并震结合总结了不同类型岩浆岩体地震响应特征,并识别出了白云凹陷新生代发育的岩浆岩体,绘制了岩浆岩体平面分布图。白云凹陷新生代岩浆岩体主要分布于白云凹陷周围的隆起或凸起部位,且以白云凹陷南侧为主要分布区,白云凹陷内部岩浆岩体发育较少,在凹陷内部呈零星分布。利用岩浆活动期次划分方法(接触关系法、上覆沉积地层厚度法、两侧地层对比法),将白云凹陷新生代岩浆活动分为4期:32~23.8、23.8~10.5、10.5~5.5、5.5 Ma至今,绘制了各时期岩浆岩发育平面图,第1期对应构造演化阶段中的断拗转换期,后3期对应构造演化阶段中的拗陷期,并且随着区域构造演化的进行岩浆活动具有减弱的特征。

**关键词:**岩浆活动;构造演化;地震响应;白云凹陷;珠江口盆地

中图分类号:P736.1 文献标识码:A 文章编号:0256-1492(2017)06-0034-13

岩浆活动是指自岩浆的产生、上升到岩浆冷凝固结成岩的全过程,其中喷出地表的岩浆活动为火山活动或火山作用,停留在地壳中的岩浆活动为侵入型岩浆活动<sup>[1-3]</sup>。岩浆活动对油气成藏的影响具有双重性,大规模的岩浆活动会破坏盆地内部已经形成的油气藏,还会对围岩产生烘烤作用,从而使得周围沉积地层发生热接触性变质,可能会导致角岩化现象的产生<sup>[4]</sup>,从而使沉积岩层物性变差,失去油气勘探价值,而小规模的岩浆活动所产生的热量可以提高地层温度,降低生烃门限深度,加速烃源岩的成熟,促进油气成藏<sup>[4,5]</sup>。

珠江口盆地在新生代发生了剧烈的、多期次的岩浆活动,表现为强烈的火山喷发与岩浆侵入作用<sup>[6]</sup>。南海北缘珠江口盆地白云凹陷新生代岩浆活动的特征、岩浆活动的期次划分及区域构造演化与岩浆活动之间的关系等问题尚未解决,对岩浆活动期次的划分,对于研究区域岩浆活动规律、岩浆岩相带分布特征、区域油气地质条件、油气资源分布及聚集规律都有重要的意义<sup>[7-9]</sup>。

**基金项目:**国家“十二·五”科技重大专项项目(2011ZX05025-003-006)

**作者简介:**杨率(1992—),男,硕士研究生,主要从事岩浆活动与火成岩油气储层研究,E-mail:yangshuaiys@126.com

**通讯作者:**金振奎(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事沉积学和储层成岩作用研究,E-mail:jinzhenkui@188.com

**收稿日期:**2016-09-17; **改回日期:**2016-11-23. 文凤英编辑

## 1 区域地质背景

### 1.1 区域构造特征

南海是西太平洋地区濒临我国大陆面积最大的一个重要边缘海<sup>[10,11]</sup>,位于欧亚大陆的东南缘,自中生代以来就一直受到欧亚、印度-澳大利和菲律宾海板块的相互作用,是全球构造运动最为频繁的地区之一<sup>[12]</sup>。南海自中渐新世海底扩张以来至近代海底火山活动尚未停止,尤其是到了晚新生代,海底扩张、马尼拉海沟俯冲、台湾造山带的形成、青藏高原隆升以及印支地块的挤出等各种因素叠加影响着南海,使晚新生代被动陆缘经历频繁强烈的岩浆活动<sup>[13]</sup>。

珠江口盆地位于南海北部边缘(图1),是我国非常重要的一个海上油气盆地,位于 $18^{\circ}30' \sim 23^{\circ}00'N$ 、 $111^{\circ}30' \sim 118^{\circ}00'E$ ,东西长约800 km,南北宽100~360 km,总面积约 $1.75 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。珠江口盆地平面上具有南北分带和东西分块的特点,盆地由珠一、珠二、珠三坳陷和北部断阶、神狐隆起、东沙隆起、南部隆起、番禺低隆起和潮汕坳陷9个二级构造单元组成<sup>[14]</sup>。盆地经历了新生代喜马拉雅期陆缘扩张构造运动,使得新生界火山岩大量发育,主要为中基性岩类,以玄武岩为主,新近纪—第四纪火山活动集中在珠江口盆地的白云凹陷<sup>[15]</sup>。



图1 珠江口盆地构造格局及白云凹陷大地构造位置(据文献[6]、[19]有改动)

Fig. 1 Tectonic framework of the Pearl River Mouth Basin and tectonic location of the Baiyun Sag  
(modified after references [6], [19])

白云凹陷(图1)位于南海北部陆缘深水区珠江口盆地西南端,整体走向为东西向,面积约为 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,隶属于珠江口盆地珠二坳陷,为南海北缘面积最大的一个新生代凹陷,同时也是该区域油气储量最大的一个凹陷<sup>[16]</sup>。白云凹陷是一个复式地堑,白云凹陷的北侧为番禺低隆起,西侧为珠二坳陷西段与神狐暗沙隆起,其东侧是东沙隆起<sup>[17]</sup>。白云凹陷西南部与东北部发育了大量断裂(图1),走向大致为北西西—近东西向。白云主凹与白云南凹被南部隆起隔开,在南部隆起带上可以见到尖峰状叠瓦构造与碟形构造,从基底开始向上刺穿了某些沉积地层,可能为岩浆侵入所导致的结果<sup>[18]</sup>。

## 1.2 区域构造演化

南海北缘发生了多期构造运动<sup>[20]</sup>,这些构造运动分别为神狐运动、珠琼运动一幕、珠琼运动二幕、南海运动、白云运动(23.8 Ma 重要事件)以及东沙运动<sup>[21]</sup>。白云凹陷的构造演化与这些构造运动有着密切的关系,白云凹陷的构造演化可以分为3个阶段,分别为断陷裂谷阶段、断拗转换与热沉降阶段及新构造运动与热沉降拗陷阶段<sup>[22]</sup>,3个阶段形成了几个重要的不整合界面,具有垂向上断陷、断拗及坳陷三层结构的特征<sup>[6]</sup>。

## 1.3 区域地层

白云凹陷位于珠江口盆地中南部,是一个长期

继承发育的凹陷,最大沉积厚度大于11 000 m,其古近系沉积厚度大于6 000 m,和新近系厚度相当,除了神狐组、文昌组未钻遇以外,其他地层都已被钻井所证实<sup>[12]</sup>。白云凹陷自下而上主要沉积充填了始新统湖相沉积的文昌组、下渐新统河湖相煤系沉积的恩平组、上渐新统浅海陆架—三角洲沉积的珠海组、下中新统深水陆坡—深水扇沉积的珠江—韩江组和晚中新世粤海组、上新世万山组以及第四系<sup>[23]</sup>(图2)。

## 2 岩浆岩类型

根据研究区钻井资料以及相关文献可知南海北部珠江口盆地新生界侵入岩岩性一般为花岗岩,火山岩岩性包括火山角砾岩、玄武岩、凝灰岩、英安岩等<sup>[15]</sup>。南海北缘中生代岩浆岩主要为酸性,从古新世和始新世开始,中性—基性增加,使岩浆岩性变得多样化,进入中新世岩性则变为成分单一的基性玄武岩<sup>[3]</sup>。

白云凹陷ZJK-15井钻遇了凝灰岩,钻遇厚度约为140 m(表1),BY6-1-1(图3,表2)井钻遇珠江组玄武岩123.7 m,钻遇珠海组玄武岩76.75 m、凝灰岩81.25 m,BY7-1-1(图3,表2)井钻遇珠江组玄武岩302.5 m,钻遇珠海组玄武岩44.5 m。

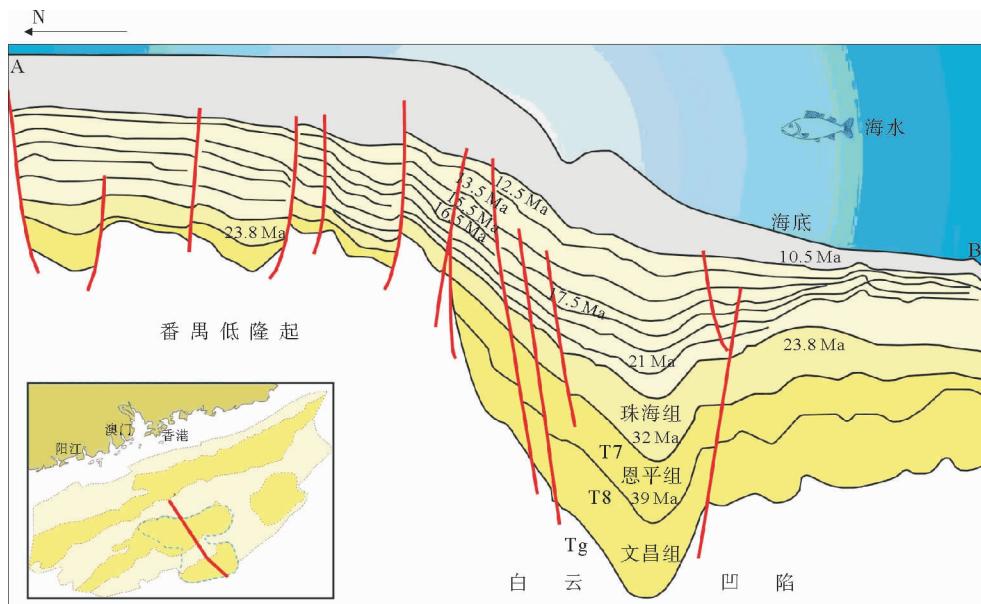


图2 白云凹陷近南北向剖面图(据文献[12]有改动)

Fig. 2 A N-S section through the Baiyun Sag (modified after reference [12])

表1 珠江口盆地新生界钻井揭示岩浆岩特征(据文献[15])

Table 1 Characteristics of Cenozoic igneous rocks revealed by drilling in Pearl River Mouth Basin (modified after reference [15])

构造单元		井号	层位	岩性	揭示厚度/m	来源
一级	二级					
珠二坳陷	云开低凸起	ZJK-14	珠江组	凝灰岩夹玄武岩	416	[15]
			恩平组	火山角砾岩	15	[15]
			文昌组	安山质凝灰熔岩	72	[15]
白云凹陷	ZJK-15			凝灰岩	约 140	[15]
珠三坳陷	阳春凹陷	ZJK-16	文昌组	流纹质凝灰熔岩	8	[15]
	阳江低凸起	ZJK-17	珠海组	玄武岩	52	[15]
	文昌 A 凹陷	ZJK-18	文昌组	凝灰岩	不详	[15]
	文昌 B 凹陷	ZJK-19	神狐组	英安斑流岩 蚀变珍珠岩	不详 不详	[15]
						[15]
番禺低隆起		ZJK-20	文昌组	玄武岩	14	[10]
		ZJK-21	文昌组	玄武岩	24	[15]
东沙隆起		ZJK-22	文昌组	流纹质凝灰岩	219	[15]
		ZJK-23	神狐组、珠海组	凝灰岩	不详	[15]
		ZJK-24	神狐组	凝灰岩、凝灰熔岩、集块岩、玄武岩	281	[15]

### 3 岩浆岩体识别过程及结果

岩浆岩体具有高速度、高密度的特点,其与沉积岩的性质明显不同,一般沉积岩的速度都小于岩浆岩,二者的地震反射波阻抗有着明显的差异,因而岩浆岩体在地震剖面上会表现出与沉积岩明显不一样

的地震响应特征。由于岩浆岩较高波阻抗的屏蔽作用,使得岩浆岩内部均为杂乱或空白反射,岩浆岩周围的沉积围岩的地震同向轴又具有向上牵引和聚拢的特征<sup>[24-28]</sup>,因此在地震剖面上不难看出岩浆岩体的外部几何形态与产状。本文主要通过岩浆岩体的内部反射特征(地震响应)与外部几何形态(产状)来识别岩浆岩体。

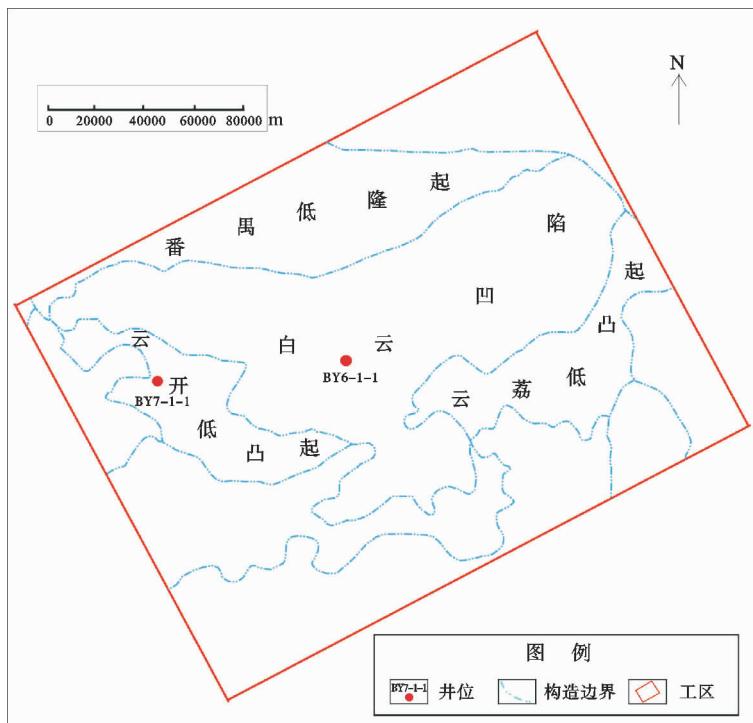


图3 白云凹陷研究井位置

Fig. 3 The location map of the research well in Baiyun Sag

### 3.1 地震响应

利用研究区钻测井资料,井震结合来研究岩浆岩体地震响应特征。对研究区现有井资料钻遇岩浆岩情况进行了统计,统计了每口井的岩浆岩钻遇层位及钻遇总厚度,统计结果显示研究区一共有6口井钻遇岩浆岩体(表2)。

LH18-1-1、LH18-2-1、PY27-1-1与PY27-2-1四口井仅钻遇了前第三系花岗岩基底,且钻遇厚度较小;BY6-1-1与BY7-1-1均钻遇了较厚的岩浆岩, BY6-1-1钻遇珠江组玄武岩123.7 m,钻遇珠海组玄武岩76.75 m、凝灰岩81.25 m,合计钻遇岩浆岩281.7 m;BY7-1-1钻遇珠江组玄武岩302.5 m,钻

遇珠海组玄武岩44.5 m,合计钻遇岩浆岩347 m。

本次选取BY6-1-1与BY7-1-1两口井钻遇较厚岩浆岩的井,利用这两口井的声波时差测井资料进行人工合成地震记录。人工合成地震记录是用声波测井资料经过人工合成转换成的地震记录(地震道),其过程是一个简化的一维正演的过程,合成地震记录是地震子波与反射系数褶积的结果。其计算公式为: $S(t)=R(t)\times W(t)$ ,式中 $S(t)$ —合成地震记录; $R(t)$ —反射系数序列; $W(t)$ —地震子波。

从BY6-1-1的地震剖面与人工合成地震记录(图4)可以看出,下部岩浆岩具有平行—亚平行的地震反射特征,表现出较为连续的层状反射、强振幅、低频率;上部岩浆岩具有内部杂乱反射、低振幅、

表2 研究区钻井资料岩浆岩统计(据中海油深圳分公司资料)

Table 2 Igneous rocks found in drilling holes in the study area (from CNOOC Shenzhen branch)

井号	韩江组	珠江组	珠海组	恩平组	前第三系	岩浆岩总厚/m
BY6-1-1	0	123.7	158	0	0	281.7
BY7-1-1	0	302.5	44.5	0	0	347.0
LH18-1-1	0	0	0	0	30.5	30.5
LH18-2-1	0	0	0	0	20.3	20.3
PY27-1-1	0	0	0	0	32.15	32.15
PY29-1-1	0	0	0	0	12.23	12.23

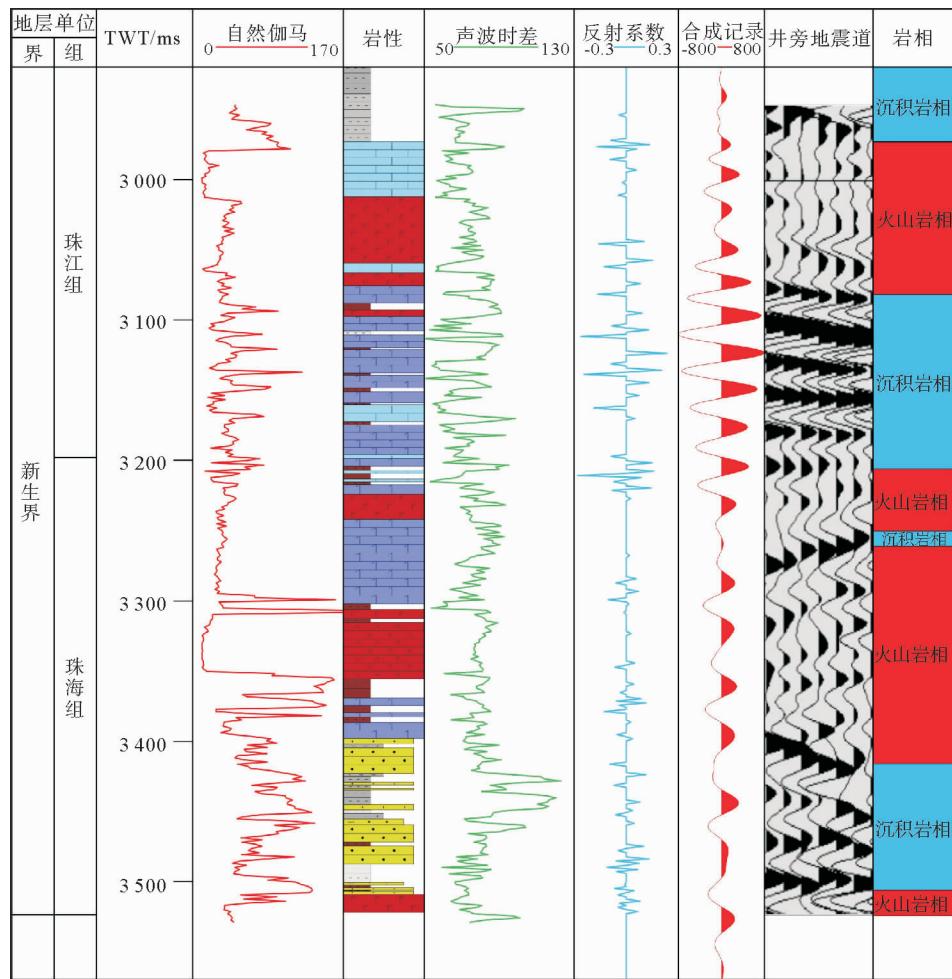


图4 BY6-1-1 人工合成地震记录  
Fig. 4 Synthetic seismogram of BY6-1-1

高频的反射特征。从BY7-1-1的地震剖面与人工合成地震记录(图5)可以看出,下部岩浆岩具有杂乱反射、强振幅、低频率的反射特征;上部岩浆岩体外形清晰,内部为空白反射或较弱的亚平行—杂乱反射,无任何连续反射,内部频率较低,振幅中等,其与沉积围岩的接触面呈强振幅连续性反射。

### 3.2 外部几何形态

通过岩浆岩体在地震剖面上的外部几何形态和产状,可以将南海北缘白云凹陷岩浆岩体分为两大类型:侵入型与喷出型火山。根据侵入型的产状可以将其分为岩基、岩株、岩脉、岩盖与岩床(图6),根据火山喷发方式可以将其分为中心式火山与裂隙式火山。根据识别结果,研究区侵入型与喷出型火山岩浆岩体约各占一半,下面将具体描述各类岩浆岩的产状及地震响应特征。

#### 3.2.1 侵入型岩浆岩

岩基(图7a)内部呈空白反射或杂乱反射,连续

性极差,强振幅,低频,其与沉积围岩的接触面呈强振幅连续性反射。岩株(图7b)内部呈杂乱反射,连续性极差,强振幅、高频,与顶部围岩接触面呈强振幅连续性反射。岩脉(图7c)内部呈杂乱反射或空白反射,连续性差,强振幅、低频,与顶部围岩接触面呈强振幅连续性反射。岩盖(图7d)内部呈亚平行—杂乱状反射,连续性中等,强振幅、高频。岩床(图7e)内部呈较连续的层状反射,连续性中等,振幅较强,低频,其与沉积围岩的接触面呈强振幅连续性反射。

#### 3.2.2 喷出型火山

中心式火山(图7f,g)内部呈杂乱反射,有岩浆上升的迹象,连续性极差,强振幅、高频,与沉积围岩的接触面表现为清晰的强反射界面。裂隙式火山(图7h,i)内部呈杂乱—空白反射,连续性差,强振幅、高频,与沉积围岩的接触面表现为清晰的强反射界面。

根据岩浆岩体内部反射特征(地震响应),结合岩浆岩体外部几何形态(产状),识别出了研究区新

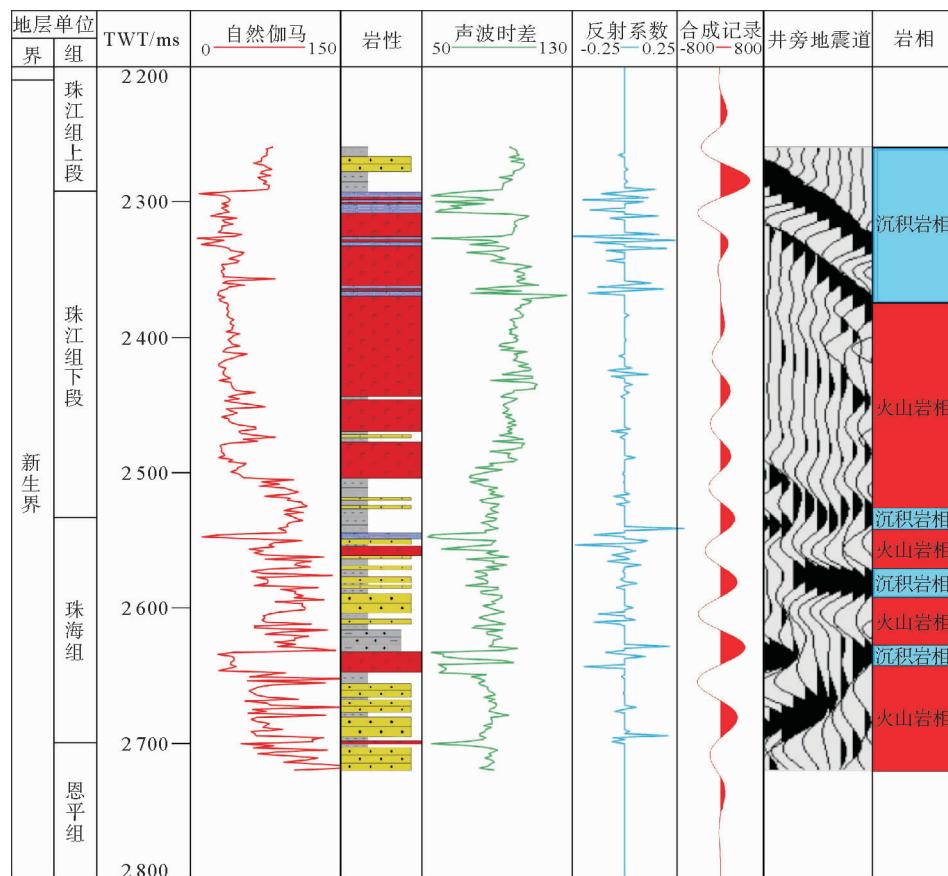


图 5 BY7-1-1 人工合成地震记录

Fig. 5 Synthetic seismogram of BY7-1-1

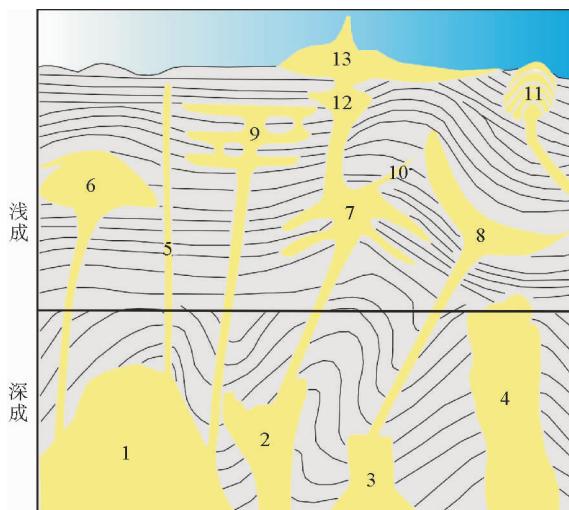


图 6 侵入岩产状(据文献[1]有改动)

1-岩基;2-岩斗;3-岩栓;4-岩株;5-岩墙(脉);  
6-岩盖(岩盘);7-岩鞍;8-岩盘;9-岩床;  
10-岩枝;11-岩钟;12-岩浆源地;13-熔岩

Fig. 6 Occurrence of eruptive rocks

(modified from Wu Tairan, 2011)

1- Batholith; 2- Funnel shaped rock; 3- Rock bolt;  
4- Rock plant; 5- Dyke; 6- Laccolithic; 7- Phacolith;  
8- Batholite; 9- Sill; 10- Apophyse; 11- Kupola;  
12- Magma source; 13- Lava

生代发育的各种类型的岩浆岩体,并绘制了白云凹陷新生代岩浆岩类型分布图(图 8)。

## 4 岩浆活动特征与期次

### 4.1 岩浆活动特征

研究区岩浆岩体主要分布于白云凹陷周围的隆起或凸起部位,且以白云凹陷南侧为主要分布区,岩浆岩体分布较为密集,其北部岩浆活动较少,岩浆岩体分布较为零星。白云凹陷内部岩浆岩体发育较少,在凹陷内部呈零星分布(图 8)。

白云凹陷及其周围新生代岩浆活动既有侵入作用又存在火山作用(喷出作用),侵入作用发育了岩基、岩株、岩脉、岩盖、岩床产状所产出的侵入型岩浆岩体,火山作用主要为中心式喷发与裂隙式喷发两种类型。

白云凹陷内部的岩浆活动主要以侵入作用为主,其产状类型主要为岩株、岩盖,岩株零星分布,岩盖呈带状分布,推测其可能是受断裂的影响;白云凹陷内部的火山活动很少,只发育了4处中心式喷发

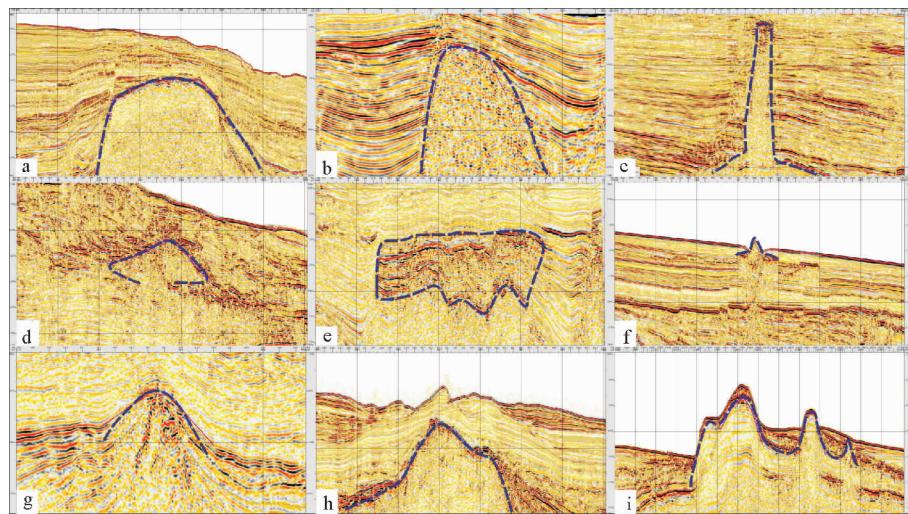


图7 典型岩浆岩体识别图

a-岩基;b-岩株;c-岩脉;d-岩盖;e-岩床;f、g-中心式火山;h、i-裂隙式火山

Fig. 7 Occurrences of typical magmatic rocks

a- Batholith; b- Rock plant; c- Dyke; d- Laccolithic; e- Sill; f, g- Central type volcano ; h, i- Fissure volcano

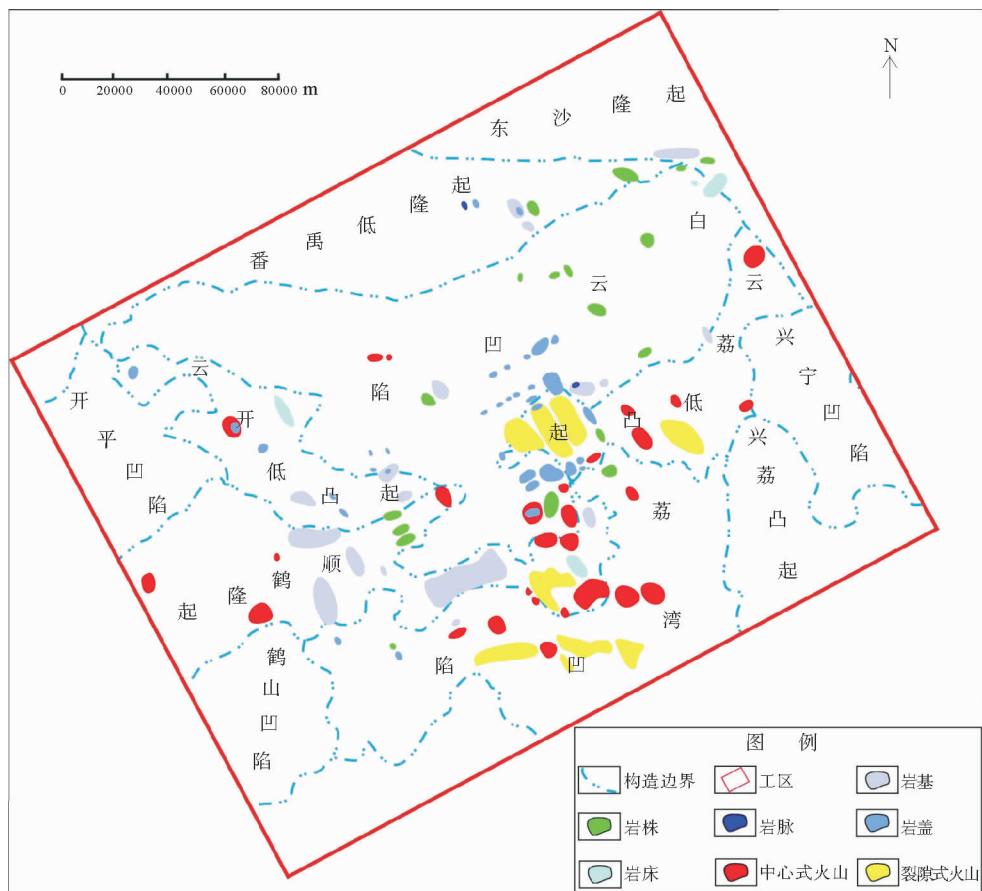


图8 白云凹陷新生代岩浆岩类型分布图

Fig. 8 Distribution map of Cenozoic magmatic rocks in Baiyun Sag

火山,这4处中仅一处是位于白云凹陷中央部位,其余均分布于白云凹陷与隆起的交界部位。

白云凹陷四周的隆(凸)起部位为岩浆岩体的主要分布区域,火山分布范围较广,以中心式喷发火山

为主,说明在白云凹陷四周的隆(凸)起部位的岩浆活动类型主要为火山作用。

#### 4.2 岩浆活动期次划分

岩浆活动期次的划分是了解岩浆活动时空演化规律的基础,不同期次具有不同的岩浆活动方式,其对于识别岩浆岩有利相带以及油气分布与富集规律具有重要意义<sup>[4]</sup>。

本文通过对研究区域主要界面的解释,根据岩浆活动间歇期沉积地层与岩浆岩体接触关系,结合南海北缘白云凹陷新生代岩浆岩类型分布图(图8)的内容进行岩浆活动期次划分。

##### 4.2.1 接触关系法

利用岩浆岩体与其周围沉积地层的接触关系去判断岩浆岩形成的时期范围,最明显的标志就是侵入岩形成过程中所引起的岩层刺穿<sup>[24]</sup>,因为岩浆能量不足以刺穿其活动时期的每套地层,所以只有部分地层被刺穿,而未被刺穿的地层将会向上拱起,之后沉积的地层与上拱地层会形成明显的角度不整合。

从图9a可以看出,岩浆向上侵入沉积地层,刺穿了部分地层,例如SB23.8与SB21之间的地层被刺穿,其顶部部分地层未被刺穿,如SB21与MFS18.5之间

的地层未被刺穿但发生了明显的上拱现象,之后的沉积地层与下伏地层呈明显的角度不整合,SB8.5、SB6.3界面与下伏地层出现了明显的地层上超现象,因此可以判断该岩浆岩体形成于18.5与8.5 Ma之间。

##### 4.2.2 上覆沉积地层厚度法

火山形成之后,在其之上沉积的地层会出现顶部薄两翼厚的特征,这是受后期沉积压实的影响而形成的,因此火山上覆地层的厚度出现顶薄翼厚的特征,可以作为判断该火山为地层沉积之前就已经形成的一个标志<sup>[24]</sup>。如果火山形成时,其上覆地层就已经形成,那么上覆地层将会整体隆起,但是顶部厚度与两翼厚度一致,因此,如果火山上覆地层发生向上隆起,且顶部厚度与两翼厚度一致,那么火山形成于上覆地层形成之后。

从图9b可以看出,岩浆岩体上覆的T70与SB23.8之间的沉积地层,具有顶部厚度较薄两翼厚度较厚的特征,这是由于后期沉积压实而产生的,说明T70与SB23.8之间的沉积地层沉积之前就形成了该岩浆岩体,因此可以判断该岩浆岩体形成于T70与23.8 Ma之间,即32~23.8 Ma之间。

##### 4.2.3 两侧地层对比法

大规模的岩浆向上侵入沉积围岩,会使两侧地层产生明显的上牵引现象,说明岩浆活动发生于

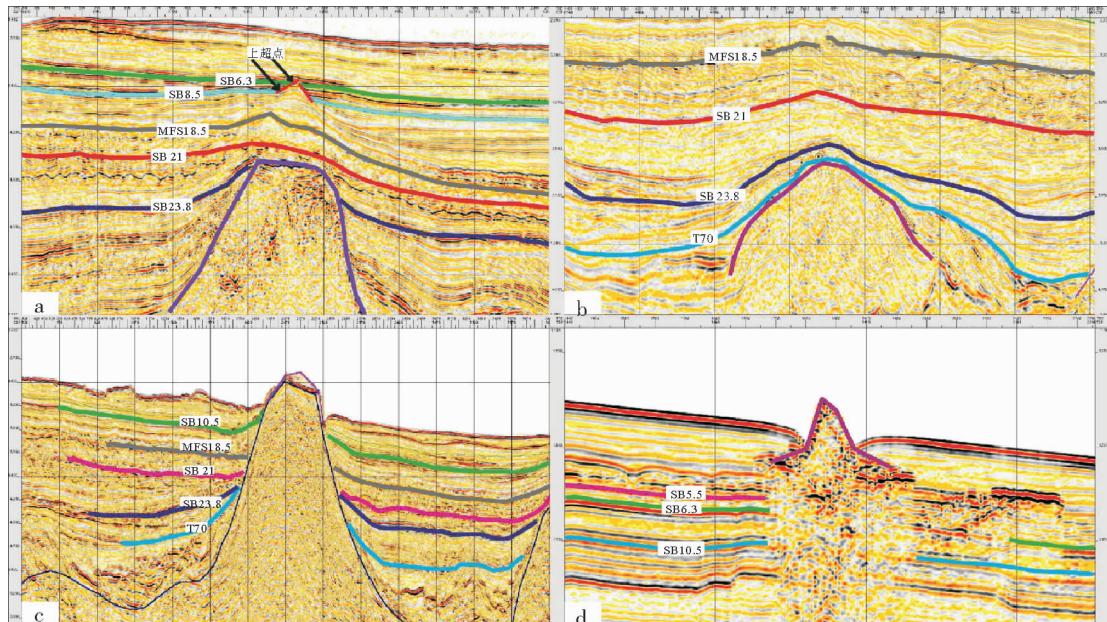


图9 岩浆活动期次划分方法  
a-接触关系法; b-上覆沉积地层厚度法; c-两侧地层对比法; d-现今火山

Fig. 9 Determination of magmatic stages

a- according to contact relationship; b- according to thickness of overlying strata; c- correlation of surrounding strata;  
d- present-day volcanoes

两侧地层沉积之后,如果岩浆岩体两侧地层未见上牵引现象,说明岩浆活动发生于两侧地层沉积之前,之后岩浆岩体两侧才沉积了地层<sup>[24]</sup>。

从图9c可以看出,岩浆岩体向上侵入沉积围岩,使其两侧的T70与SB23.8之间的沉积地层、SB23.8与SB21之间的沉积地层发生了明显的上牵引现象,说明岩浆岩体形成于21 Ma之后,而岩浆岩体两侧SB21与MFS18.5之间的沉积地层未见上牵引现象,且两侧厚度大致相等,又说明岩浆岩体形成于18.5 Ma之前,因此可以判断出该岩浆岩体形成于21~18.5 Ma之间。

从图9d可以看出,该火山向上刺穿了较新的沉积地层,就连地表都被其刺穿,因此不难判断该岩浆岩体为现今发育的火山。

通过研究可以将南海北缘白云凹陷新生代岩浆活动划分为4个期次,分别为32~23.8、23.8~10.5、10.5~5.5、5.5 Ma至今,并绘制了南海北缘白云凹陷新生代各期次岩浆岩发育平面图(图10)。

从白云凹陷各期次岩浆岩发育平面图(图10)可以看出,这4期岩浆活动中,32~23.8、23.8~10.5 Ma两期岩浆活动形成了大量的岩浆岩体,说明在这段时期内岩浆活动较为发育,10.5~5.5、5.5 Ma至今两期岩浆活动形成的岩浆岩体较少,说明在这段时期岩浆活动发育程度较之前减弱,总体来看,形成岩浆岩体的数量具有32~23.8 Ma>23.8~10.5 Ma>10.5~5.5 Ma≥5.5 Ma至今的特点,说明研究区岩浆活动发育程度具有随着时间的推移而减弱的特点。

## 5 构造演化与岩浆活动的关系

根据前面内容可知,研究区岩浆活动可以分为32~23.8、23.8~10.5、10.5~5.5、5.5 Ma至今4个期次,而且每一期岩浆活动与研究区构造演化都有着必然的联系,下面主要讨论研究区构造演化与岩浆活动之间的关系。

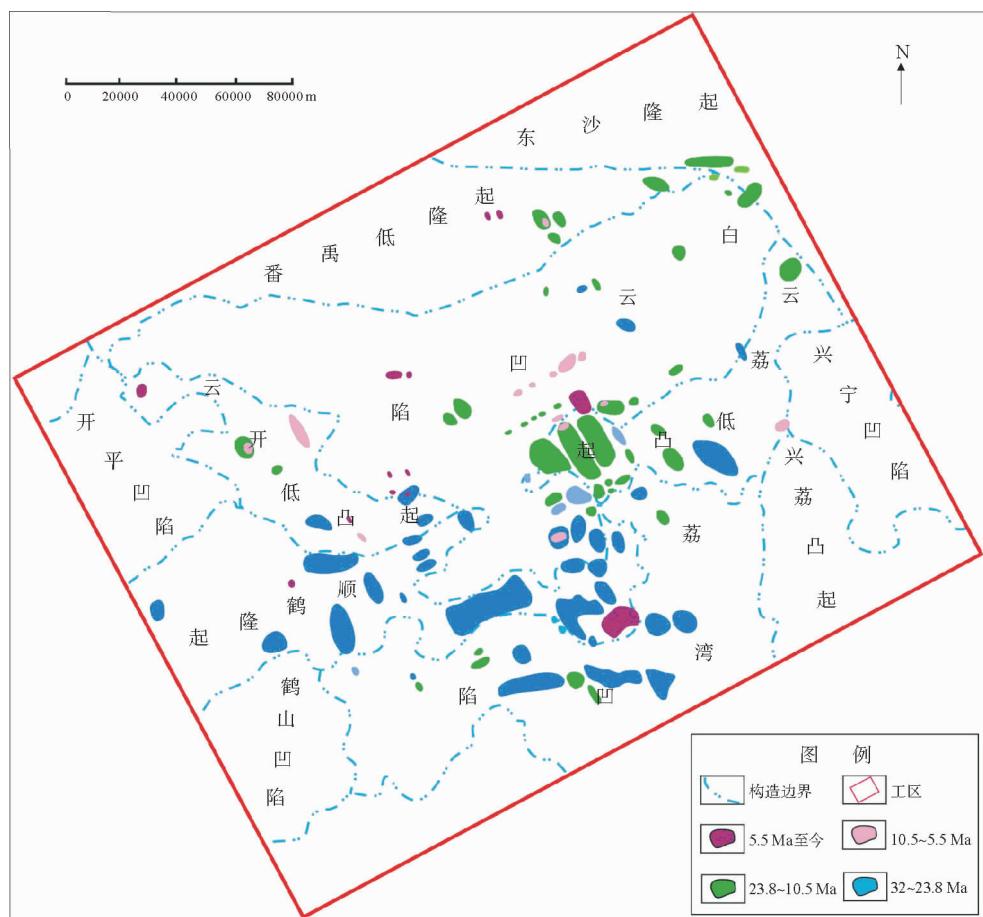


图10 白云凹陷各期次岩浆岩发育平面图

Fig. 10 Spatial distribution of the magmatic rocks in different stages of Baiyun Sag

### 5.1 32~23.8 Ma

与该期岩浆活动对应的区域构造演化阶段为断拗转换过渡阶段, 并且在该时期范围内发生了南海运动, 南海运动为珠江口盆地内发生的最剧烈的一次构造运动, 其持续时间较长, 盆地从本次运动开始由裂陷阶段向拗陷阶段过渡, 海水开始由南向北大规模侵入, 盆地的中部与北部地区发生了区域性抬升, 强烈剥蚀作用使珠江口盆地形成了破裂不整合界面, 并且伴随着断裂活动与岩浆活动, 岩浆活动较为发育<sup>[14, 21]</sup>。

该期的岩浆活动具有侵入型岩浆作用和火山作用两种类型, 岩浆作用主要集中在白云凹陷以南的隆(凸)起部位, 侵入岩相主要为深成相, 火山岩相主要为喷出相, 产出的类型主要有岩基、岩株、岩盖、岩床、中心式火山与裂隙式火山(图 8 与图 10)。结合构造演化来看, 该期次处于白云凹陷断拗转换过渡阶段, 该期次的岩浆作用是由区域抬升而引起的, 因为区域抬升伴随着大量的断裂活动, 所以表现为被抬升的隆(凸)起部位发育大量岩浆活动。

### 5.2 23.8~10.5 Ma

与该期岩浆活动对应的区域构造演化阶段为拗陷阶段, 并且在 23.8 Ma 左右发生了白云运动, 白云运动的发生使得白云凹陷的深部地幔开始向上隆起, 陆架坡折由白云凹陷南侧变到了北侧, 沉积环境由浅海陆架环境变换为陆坡深水环境, 白云凹陷开始进入了稳定的热沉降阶段<sup>[22]</sup>。

该期的岩浆活动同时具有侵入作用与喷出作用两种类型, 岩浆活动主要集中在白云凹陷以北与番禺低隆起、东沙隆起、云荔低凸起相邻的部位, 白云凹陷内部岩浆岩体分布很少, 呈零星分布, 侵入岩相主要为深成相, 火山岩相主要为喷出相, 产出的类型主要有岩基、岩株、岩盖、岩床、中心式火山与裂隙式火山(图 8 与图 10)。结合构造演化来看, 该时期为白云凹陷拗陷期, 由于白云运动的产生, 使得白云凹陷深部地幔向上隆起, 并且该区域处于一个拉张背景之下, 导致岩浆活动再次发育起来, 岩浆岩体主要分布于凹陷与隆(凸)起的交界部位。

### 5.3 10.5~5.5 Ma

与该期岩浆活动对应的区域构造演化阶段为拗陷阶段, 并且在 10 Ma 左右发生了东沙运动, 东沙运动的发生使得珠江口盆地在沉降过程中发生了断块升降变化, 隆起部位遭受剥蚀, 并且还伴随着挤压

褶皱、断裂以及频繁的岩浆活动<sup>[14, 21]</sup>, 这次运动为珠江口盆地断裂系统的再次活动期, 并伴随着多次基性岩浆的喷溢, 对于本次研究区域白云凹陷来说, 东沙运动对其内部的影响并不明显, 没有发生大的区域抬升和剥蚀, 只有断层的活动与发育, 白云凹陷陆坡区形成了新的断层以及老断层重新活动, 并且断裂活动逐渐减弱。

该期的岩浆活动较之前弱, 主要为侵入作用, 仅发育一处中心式火山, 岩浆岩体在研究区内分布很少, 岩浆活动主要集中在凹陷内部, 侵入岩相主要为浅成相, 产状主要为岩盖与岩床(图 8 与图 10)。结合构造演化来看, 该期次处于白云凹陷拗陷阶段, 东沙运动对白云凹陷的影响并不明显, 仅仅只是一些断裂活动, 没有发生区域性抬升与沉降, 因此该期岩浆活动较弱, 浅成相的侵入岩体可能是从断裂侵入到地层之中去的。

### 5.4 5.5 Ma 至今

该期岩浆活动对应于区域构造演化阶段中的拗陷阶段, 这段时间内断裂基本停止了活动。该期岩浆活动已经非常微弱了, 岩浆岩体数量在研究区的分布较之前期次少, 且个体面积较小, 分布范围较广, 具有侵入作用与喷出作用两种岩浆活动方式。主要分布于白云凹陷四周隆(凸)起之上, 侵入岩相主要为浅成相, 火山岩相为喷出相, 产出类型主要为岩盖与中心式火山, 白云凹陷内部发育了一处现今中心式火山(图 8 与图 10)。结合构造演化来看, 该时期断裂基本停止了活动, 岩浆活动较之前来说相对微弱, 可能在原来断裂基础之上所形成的。

## 6 结论

(1) 南海北缘白云凹陷内部各类岩浆岩体地震响应特征与外部几何形态各不相同。

(2) 南海北缘白云凹陷新生代岩浆岩体主要分布于白云凹陷周围的隆起或凸起部位, 且以白云凹陷南侧为主要分布区, 白云凹陷内部岩浆岩体发育较少, 在凹陷内部呈零星分布。

(3) 南海北缘白云凹陷新生代一共发育 4 期岩浆活动, 分别为 32~23.8、23.8~10.5、10.5~5.5、5.5 Ma 至今。

(4) 南海北缘白云凹陷 4 期岩浆活动, 第 1 期对应构造演化阶段中的断拗转换期, 后 3 期对应构造演化阶段中的拗陷期, 并且随着区域构造演化的进行岩浆活动具有减弱的特征。

## 参考文献(References)

- [1] 吴泰然. 普通地质学第2版[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011: 243-246. [WU Tairan. The second edition of general geology[M]. Beijing: Peking University Press, 2011: 243-246.]
- [2] 李捷. 岩浆岩与变质岩简明教程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 23-27. [LI Jie. A concise course on magmatic rocks and metamorphic rocks [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 23-27.]
- [3] 王璞珺,印长海,朱如凯,等. 中基性火山作用喷出物类型、特征与成因[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(3): 469-481. [WANG Pujun, YIN Changhai, ZHU Rukai, et al. Classification, Description and interpretation of the volcanic products: Ancient and modern examples from China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2010, 40(3): 469-481.]
- [4] 刘进,吴冲龙. 胶莱盆地岩浆活动特征及其油气地质意义[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(5): 36-40. [LIU Jin, WU Chonglong. Characteristics and geologic meaning of the magmatic activities in Jiaolai basin[J]. Petroleum Geology and Oil-field Development in Daqing, 2007,26(5): 36-40.]
- [5] 胡治华,申春生,刘宗宾,等. 渤海湾盆地火山岩喷发旋回和期次研究的方法及应用[J]. 油气地球物理, 2013,11(2): 30-33. [HU Zhihua, SHEN Chunsheng, LIU Zongbin, et al. The research method and application of the volcanic rock eruption cycle and stage in the Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geophysics, 2013,11(2): 30-33.]
- [6] 孙杰,詹文欢,丘学林. 珠江口盆地白云凹陷构造演化与油气系统的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2011,31(1): 101-107. [SUN Jie, ZHAN Wenhuan, QIU Xuelin. Relationship between tectonic evolution and petroleum systems in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2011,31(1): 101-107.]
- [7] 王玲,靳久强,张研. 松辽盆地徐家围子断陷营城组一、三段火山喷发期次划分及意义[J]. 中国石油勘探, 2009,14(2): 6-14. [WANG Ling, JIN Jiuqiang, ZHANG Yan. Division of volcanic eruption periods of the first and third members of Yingcheng Formation in Xujiaweizi Fault Depression in Songliao Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2009,14(2): 6-14.]
- [8] 陈建文,王德发,张晓东,等. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析[J]. 地学前缘, 2000,7(4): 371-379. [CHEN Jianwen, WANG Defa, ZHANG Xiaodong, et al. Analysis of volcanic facies and apparatus of Ying Cheng formation in Xu Jia Wei Zi faulting depression, Song Liao Basin Northeast China[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(4): 371-379.]
- [9] 杜景霞,石文武,王全利,等. 南堡凹陷火山岩时空展布特征及岩石类型[J]. 石油地质与工程, 2013,27(6): 11-14. [DU Jingxia, SHI Wenwu, WANG Quanli, et al. Study on space-time distribution characteristics of volcanic rock and rock types of Nanpu depression[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2013,27(6): 11-14.]
- [10] 赵海玲,邓晋福,李凯明,等. 东南沿海及南海新生代火山作用与南海的形成演化[J]. 地质论评, 1999,45(S1): 809-816. [ZHAO Hailing, DENG Jinfu, LI Kaiming, et al. Cenozoic volcanism in the Southeast Coast of China and the South China Sea and the formation and evolution of the South China Sea[J]. Geological Review, 1999,45(S1): 809-816.]
- [11] 阙晓铭,李元森,陈会霞,等. 深部地幔在白云凹陷的岩浆记录: 基于 BY7 火山岩的地球化学研究[J]. 华南地质与矿产, 2013,29(2): 105-115. [QUE Xiaoming, LI Yuansen, CHEN Huixia, et al. Geochemistry research on the deep mantle activity in Baiyun Sag during the Cenozoic from the volcanic rocks of well BY7[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2013,29(2): 105-115.]
- [12] 米立军,张功成,王良书,等. 南海北部陆坡深水海域油气资源战略调查及评价[M]. 北京: 地质出版社, 2011: 136-137. [MI Lijun, ZHANG Gongcheng, WANG Liangshu, et al. Strategic Survey and Evaluation of Oil and Gas Resources in Deep Waters of Northern Slope of the South China Sea [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2011: 136-137.]
- [13] 李志珍. 南海深海表层沉积物中的火山碎屑矿物及火山作用[J]. 海洋学报(中文版), 1989, 11(2): 176-184. [LI Zhizhen. Pyroclastic minerals and volcanism in the deep sea surface sediments of the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989,11(2): 176-184.]
- [14] 聂逢君,姜美珠,吴克强,等. 珠江口盆地构造岩浆活动与热流体的形成[J]. 东华理工学院学报, 2005,28(2): 107-111. [NIE Fengjun, JIANG Meizhu, WU Keqiang, et al. Tectono-magmatism and hot fluid flow in the Pearl River Mouth Basin South China Sea[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2005,28(2): 107-111.]
- [15] 张斌,王璞珺,张功成,等. 珠—琼盆地新生界火山岩特征及其油气地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2013,40(6): 657-665. [ZHANG Bin, WANG Pujun, ZHANG Gongcheng, et al. Cenozoic volcanic rocks in the Pearl River Mouth and Southeast Hainan Basins of South China Sea and their implications for petroleum geology[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013,40(6): 657-665.]
- [16] 张功成,杨海长,陈莹,等. 白云凹陷——珠江口盆地深水区一个巨大的富生气凹陷[J]. 天然气工业, 2014,34(11): 11-25. [ZHANG Gongcheng, YANG Haizhang, CHEN Ying, et al. The Baiyun Sag:A giant rich gas-generation sag in the deepwater area of the Pearl River Mouth Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014,34(11): 11-25.]
- [17] 孙珍,庞雄,钟志洪,等. 珠江口盆地白云凹陷新生代构造演化动力学[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 489-498. [SUN Zhen, PANG Xiong, ZHONG Zhihong, et al. Dynamics of Tertiary tectonic evolution of the Baiyun Sag in the Pearl River Mouth Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 12(4): 489-498.]
- [18] 孙龙涛,周蒂,陈长民,等. 珠江口盆地白云凹陷断裂构造特征及其活动期次[J]. 热带海洋学报, 2008,27(2): 25-31.

- [SUN Longtao, ZHOU Di, CHEN Changmin, et al. Fault structure and evolution of Baiyun Sag in Zhujiang River Mouth Basin[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(2): 25-31.]
- [19] Sun Z, Xu Y, Yao J, et al. Numerical simulation of produced water reinjection technology for water-soluble gas recovery [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2014, 21: 700-711.
- [20] 庞雄,陈长民,彭大钧,等. 南海北部白云深水区之基础地质[J]. 中国海上油气, 2008, 20(4): 215-222. [PANG Xiong, CHEN Changmin, PENG Dajun, et al. Basic geology of Baiyun deep-water area in the northern South China Sea[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2008, 20(4): 215-222.]
- [21] 陈长民,施和生,许仕策,等. 珠江口盆地(东部)第三系油气藏形成条件[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 5-8. [CHEN Changmin, SHI Hesheng, XU Shicai, et al. Formation Conditions of the Tertiary Reservoir in the Pearl River Mouth Basin (East)[M]. Beijing: Science Press, 2003: 5-8.]
- [22] 庞雄,陈长民,邵磊,等. 白云运动:南海北部渐新统一中新统重大地质事件及其意义[J]. 地质论评, 2007, 53(2): 145-151. [PANG Xiong, CHEN Changmin, SHAO Lei, et al. Baiyun Movement, a great tectonic event on the Oligocene-Miocene boundary in the Northern South China Sea and its implications[J]. *Geological Review*, 2007, 53(2): 145-151.]
- [23] 李云. 珠江口盆地白云凹陷中新统珠江组深水沉积学[D]. 成都理工大学, 2012. [LI Yun. Deep-water Sedimentology of the Miocene Zhujiang Formation in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [D]. Chengdu University of Technology, 2012.]
- [24] 张峤,吴时国,吕福亮,等. 南海西北陆坡火成岩体地震识别及分布规律[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(4): 919-938. [ZHANG Jiao, WU Shiguo, LV Fuliang, et al. The Seismic Characteristics and the Distribution of the Igneous Rocks in the Northernwest Slope of the South China Sea[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 2014, 38(4): 919-938.]
- [25] 司学强,陈薇,杨志力,等. 火山岩岩相-地震相响应关系及其应用——以三塘湖盆地马朗凹陷哈加乌组为例[J]. 岩性油气藏, 2012, 24(2): 53-60. [SI Xueqiang, CHEN Wei, YANG Zhili, et al. Response relation between volcanic lithofacies and seismic facies and its application: A case study from Haerjiawu Formation in Malang Sag, Santanghu Basin [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2012, 24(2): 53-60.]
- [26] 姚新玉,何正怀,吴建华. 准噶尔盆地火山岩地震相及分布特征[J]. 新疆石油地质, 1994, 15(3): 214-219. [YAO Xinyu, HE Zhenghuai, WU Jianhua. Seismic facies and distribution characteristics of volcanic rocks in Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1994, 15(3): 214-219.]
- [27] Zhang K, Wan Z, Zhan S, et al. Seismic attribute illumination of an igneous reservoir in China[J]. *The Leading Edge*, 2011, 30: 266-270.
- [28] Sun Q, Wu S, Cartwright J, et al. Neogene igneous intrusions in the northern South China Sea: Evidence from high-resolution three dimensional seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 54: 83-95.

## CENOZOIC MAGMATIC ACTIVITIES AND STAGES IN THE BAIYUN SAG, NORTHERN MARGIN OF SOUTH CHINA SEA

YANG Shuai<sup>1</sup>, JIN Zhenkui<sup>1</sup>, HAN Jianhui<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China;  
2. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The Baiyun Sag is a second-order depression of the Pearl River Mouth Basin located on the northern margin of the South China Sea. Since Cenozoic, it has suffered strong magmatic activities characterized by both intensive eruption and intrusion. By integration of geological and seismic data, this paper summarized the seismic features of different types of magmatic bodies and some Cenozoic magmatic bodies were distinguished from the others. Spatial distribution pattern of the magmatic bodies was mapped. It is found that the Cenozoic magmatic bodies are mainly distributed on uplifts or higher parts around the Baiyun sag, especially on the south side. Magmatic bodies are few within the sag. Using the traditional classification of magmatic stages based upon contact relationship, thickness of sediment cover and stratigraphic correlation, the Cenozoic magmatic activities in the Baiyun sag might be grouped into four periods: 32~23.8 Ma, 23.8~10.5 Ma, 10.5~5.5 Ma, and 5.5 Ma up to present. Spatial distribution maps are compiled for each period. The first period corresponds to the transforming stage from faulting to depression. The next three, however, are all within the stage of depression. The magmatic activities weakened with time.

**Key words:** magmatic activity; tectonic evolution; seismic response; Baiyun Sag; Pearl River Mouth Basin