

文章编号: 0253-2697(2013)S2-129-08 DOI: 10. 7623/syxb2013S2015

## 南沙海域晚中新世火山侵入伸展幕

关成尧<sup>1,2</sup> 张厚和<sup>3</sup> 漆家福<sup>2</sup> 邱楠生<sup>2</sup> 吴景富<sup>3</sup> 杨桥<sup>2</sup> 高剑波<sup>3</sup>

(1. 防灾科技学院地震科学系 河北三河 065201; 2. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249;  
3. 中海油研究总院 北京 100027)

**摘要:**南海在 17 Ma 已经停止扩张,其中南沙海域在晚中新世进入盆岭构造期,在 10.4 Ma 和 5.5 Ma 发生两期次火山喷发,形成南沙盆岭构造带,火山切割原有盆地结构,并导致盆地内复杂变形。10.4 Ma 后南沙海域基底沉降是西沙海域基底沉降的 4 倍,为了分析西沙和南沙之间巨大沉降差异的原因,建立了火山的二维和三维平衡地质剖面模型,经计算发现南沙海域的火山侵入体积远大于地层变形体积,火山侵入约占地壳体积的 1/4。火山侵入早期在深部形成的局部挤压伸展形成盆地浅部的拉张伸展环境,形成南沙海域晚中新世火山侵入伸展幕。

**关键词:**南沙盆地区;盆岭构造;火山侵入;伸展幕;晚中新世;火山平衡地质剖面

中图分类号:TE121.2

文献标识码:A

## Volcano intrusive stretching episode in Late Miocene Nansha basins of South China Sea

GUAN Chengyao<sup>1,2</sup> ZHANG Houhe<sup>3</sup> QI Jiafu<sup>2</sup> QIU Nansheng<sup>2</sup> WU Jingfu<sup>3</sup> YANG Qiao<sup>2</sup> Gao Jianbo<sup>3</sup>

(1. Department of Earthquake Science, Institute of Disaster Prevention Science and Technology, Sanhe 065201, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

3. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China)

**Abstract:** The spreading of the South China Sea had stopped and fault activity weakened, but it started nurturing volcanic intrusion in 17 Ma. In the Late Miocene "basin-range" period, there occurred two volcanic eruptions at 10.4 Ma and 5.5 Ma. The volcano cutting the original volcanic basin structure and lead to and complexed the deformation of those basins. The basement subsidence in Nansha is four times the Xisha after 10.4 Ma. To anysis the huge difference of the post-rift subsidence between Nansha and Xisha, the 2D and 3D volcano balanced geological section model were established, and the paper calculated that the volcanic intrusion volume in Nansha basins was much larger than the volume of stratum deformation. The volcanic intrusion had made those basins extending and fast stretching, volcanic intrusive crustal volume was accounted for about 1/4 of the crust. Volcanic intrusion in "volcano intrusive stretching episode" bring an extensional environment in the shallow formation of the basin and again bring a new fast stretching in late Miocene.

**Key words:** Nansha basins; basin-range; volcano intrusive; stretching episode; late Miocene; volcano balanced geological section

中国南海南沙海域发育的新生代盆地中蕴含着丰富的油气资源,已成为近几年的研究热点<sup>[1-3]</sup>。由于南沙海域火山侵入和喷出形成了现今南沙海域的构造格局,火山侵入和喷出切割了原有的盆地结构,导致盆地内复杂变形,使原有的构造信息更加难以识别;同时喷发的火山成为现代生物礁的定植基岩,盆岭构造成为南沙的定型构造。因此,对南沙海域的火山进行研究具有重要的意义,通过火山分布统计,研究南沙火山分布规律,从而认清火山喷出的动因以及火山对构造发展以及油气聚集的影响,这是认识南沙构造演化的重要环节之一,也是研究火山喷出之前盆地构造原型的重要手段。

### 1 南沙海域盆岭构造带火山活动

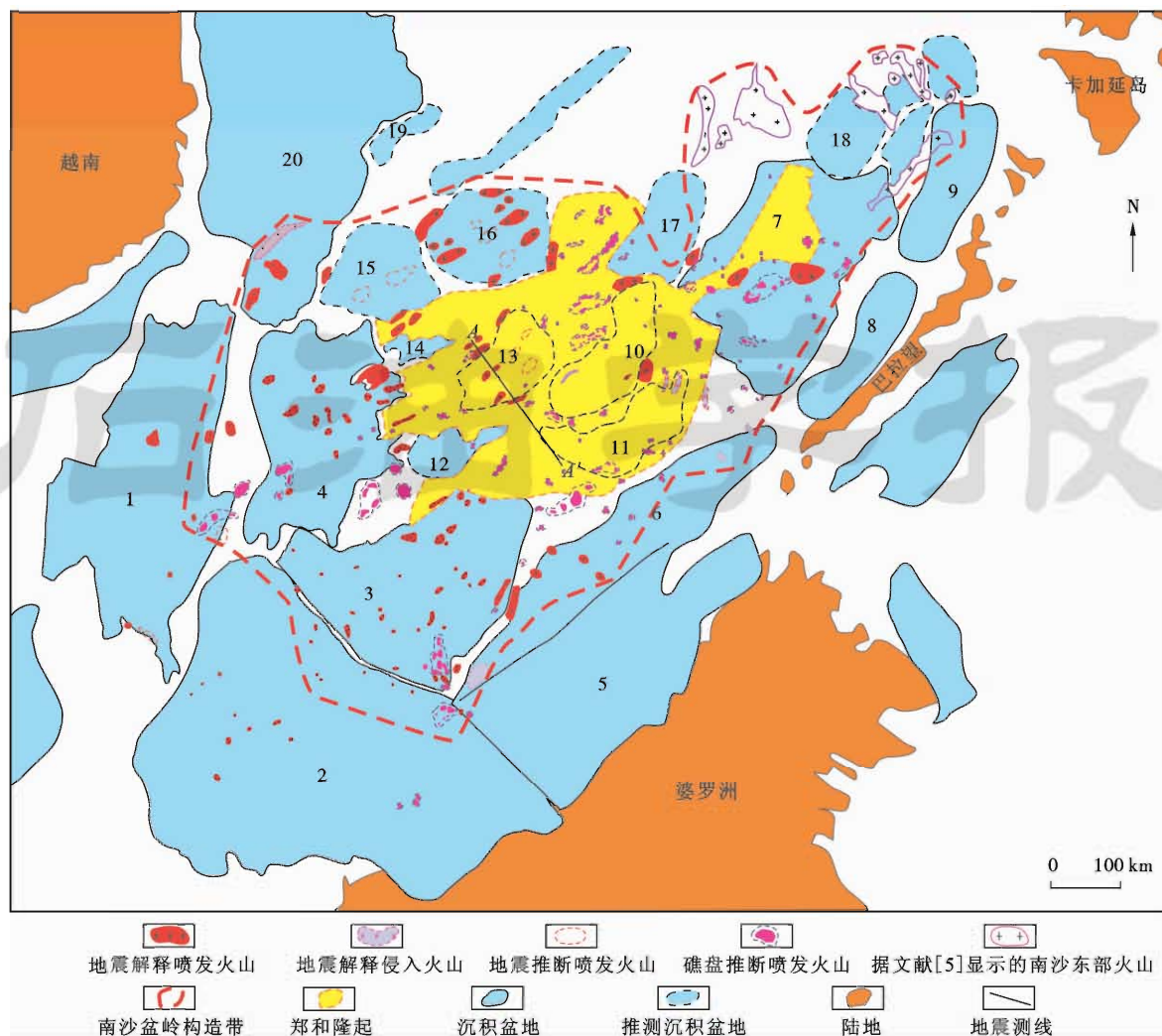
#### 1.1 南沙海域盆岭构造带火山分布特点

南沙在 32 Ma 开始中央海盆扩张<sup>[4]</sup>,17 Ma 时南海海盆扩张停止<sup>[4]</sup>,在 17 Ma 之后,南海开始整体进入裂后沉降期,但裂后沉降期的南沙并没有进入完全意义上的拗陷盆地阶段,而是发生了大规模的火山活动,通过南沙海域的地震测线数据,以及南沙群岛“岛下必有火山”的论断,获得了南沙海域盆岭构造带的火山分布情况(图 1)。

对目前尚不完善的火山分布情况进行了统计,得到的分布密度有以下特点:

基金项目:国家重大科技专项(2011ZX05025-005)资助。

第一作者及通信作者:关成尧,男,1976年4月生,1999年毕业于石油大学(华东)石油工程专业,2013年获中国石油大学(北京)地质学专业博士学位,现为防灾科技学院讲师,主要从事构造地质和油气盆地研究工作。Email:gcyywww@126.com



注:1—万安盆地;2—曾母盆地;3—北康盆地;4—南薇西盆地;5—文莱—沙巴盆地;6—南沙海槽盆地;7—礼乐盆地;8—西巴拉望盆地;9—北巴拉望盆地;10—九章盆地;11—安渡北盆地;12—南薇东盆地;13—太平盆地;14—永署南盆地;15—康泰盆地;16—中业盆地;17—永登盆地;18—礼北盆地;19—渚碧盆地;20—中建南盆地。

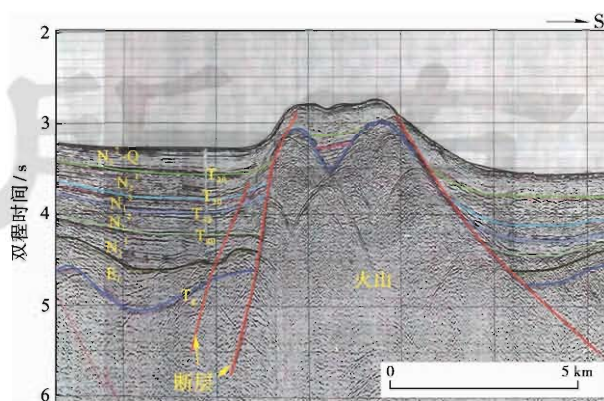
图1 南沙海域盆岭构造带火山岩分布

Fig. 1 Mainly volcanoes in the Nansha basin-ridge belt of South China Sea

(1) 盆岭带火山以郑和隆起为核心,产生与郑和隆起具有一定相似性的火山发育带,由于郑和隆起为一个相对刚性的地块,这种沿相对刚性地块喷出的特性值得进一步深入研究。

(2) 盆岭构造带范围大于郑和隆起。从图1可见,南沙海域的盆岭构造带范围大于郑和隆起,其影响的面积约为郑和隆起的2倍。且除郑和隆起广泛被火山切割外,火山侵入和喷发影响了古南沙广盆的南薇西、北康、南沙海槽北部等盆地,同时影响了西南次深海盆南缘,在南沙的东部影响了礼北、礼东等盆地群。万安盆地、曾母盆地、南沙海槽南部、文莱—沙巴盆地、西北巴拉望盆地的火山则相对较少。

(3) 火山主要沿断裂部位上侵(图2、图3),火山喷出位置两侧地层厚度差异巨大,说明喷出位置是地堑-地垒的边界断裂,此时期可能为伸展环境。

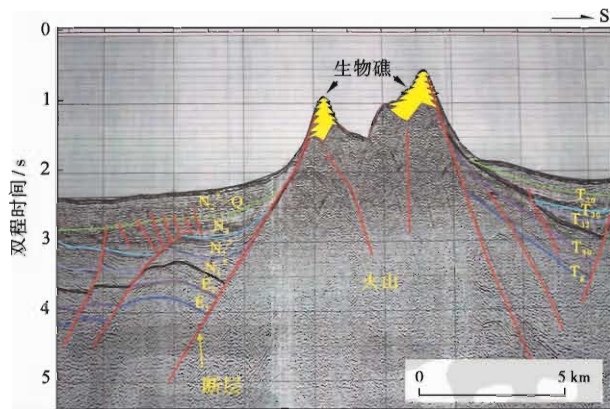


注: $T_{20}$ — $T_g$ 为地震反射界面, $E_1$ 为古新统, $N_1^1$ 为下中新统, $N_1^2$ 为中中新统, $N_1^3$ 为上中新统, $N_2^1$ 为上新统, $N_2^2$ 为更新统。

图2 太平盆地火山  $T_{32}$  喷发(10.4 Ma)

Fig. 2 Volcano intrusive and eruption in Taiping Basin before  $T_{32}$  (10.4 Ma)





注:  $T_{30}$ — $T_{32}$  为地震反射界面,  $E_1$  为古新统,  $E_2$  为始新统,  $N_1^3$  为中中新统,  $N_1^3$  为上中新统,  $N_2^1$  为上新统,  $N_2^2$  为更新统。

图 3 九章盆地西缘火山  $T_{30}$  喷发 (5.5 Ma)

Fig. 3 Volcano intrusive and eruption in western Jiuzhang Basin before  $T_{30}$  (5.5 Ma)

## 1.2 南沙海域盆地的火山喷发时间

由于中国在南沙海域尚无钻井,也缺乏火山岩同位素测年和地层古生物方面的研究,因此火山喷发时间只能根据地震剖面来获取。确定南沙火山喷发时间的方法大致有 3 类:

(1) 依据火山喷发口的地层确定。太平盆地的火山在地震反射界面  $T_{32}$  的对应时间 (10.4 Ma) 喷发,由于火山口沉积了  $T_{32}$ — $T_{30}$  界面之间 (10.4~5.5 Ma) 的地层,故认为喷发时间在  $T_{32}$  界面对应时间左右 (10.4 Ma),而侵入时间要早于 10.4 Ma (图 2)。

(2) 依据火山附近地层的变形判断,这是南沙大多数火山需要采用的判断方法。九章盆地西缘火山在地震反射界面  $T_{30}$  对应时间 (5.5 Ma) 喷发 (图 3)。

(3) 根据个别海山的年龄测试数据<sup>[6]</sup>。一些火山喷发时间数据和南海海盆内的玄武岩喷发时间较为一致<sup>[7-11]</sup>;15~10 Ma 是南沙周边盆地火山喷发的鼎盛期,也是南海海盆火山喷发的时期;5.5 Ma 左右是南沙海域盆地火山喷发的主要时期。

## 1.3 两种火山喷发/侵入构造形貌

南沙火山有 2 种侵入形貌,分别是“1”字形剖面 and “人”字形剖面。“1”字形火山形貌一般代表快速侵入/喷发;“人”字形火山形貌一般代表慢速侵入/喷发,其侵入/喷发持续时间较长。南沙腹地绝大多数火山为“人”字形侵入/喷发构造,火山烘烤影响范围大,影响半径可达 10~20 km 以上,对地层的烘烤时间长,是南沙腹地勘探的有利地带。

## 2 晚中新世火山侵入伸展幕

### 2.1 西沙海域 15 Ma 后沉降量

西沙海域盆地的古水深可由生物礁的钻孔数据获

得,虽然各个岛礁因为差异沉降有一定差别,但是其对于认识古水深的变化趋势是有一定意义的。针对西沙群岛西琛 1 井和西永 1 井生物礁钻探情况,根据相关文献的地层深度数据整理<sup>[12-19]</sup>,获得了南沙西琛 1 井和西永 1 井生物礁基底沉降随时间的变化情况。根据西沙群岛琛航岛西琛 1 井的层序划分,西沙岛礁区的沉降过程在 15 Ma 之后的沉降约为 550 m,而 10.4 Ma 之后的热沉降只有约 410 m,大于南海海域 100~200 m 的动力地貌<sup>[20]</sup>,这说明了裂后盆地韧性延伸继续发挥作用。

### 2.2 南沙海域 15 Ma 后沉降量

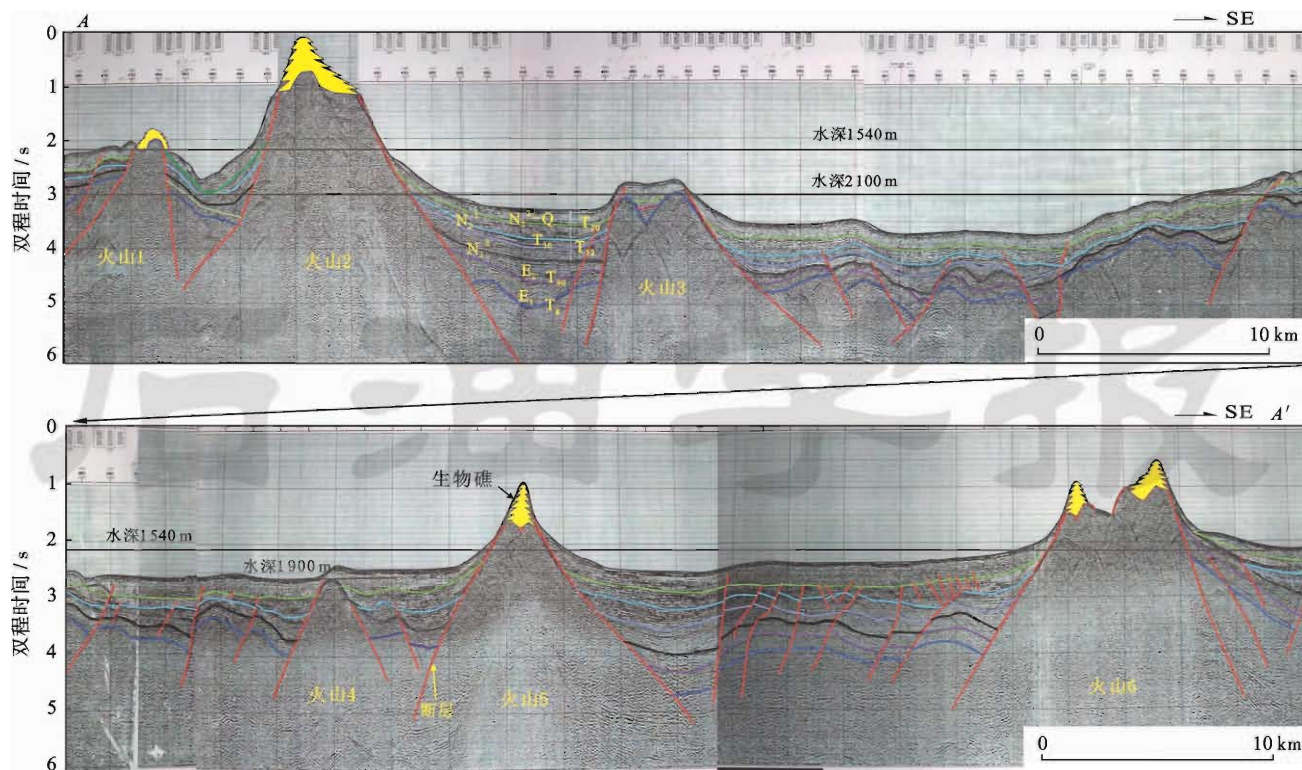
南沙海域的古水深数据很少,且对南沙的生物礁研究也很少。从图 4 中 NS95-240 剖面的生物礁发育情况可以看出:南沙 10 Ma 左右火山喷发,火山 1 生物礁发育于 1540 m 深度;火山 2、火山 5、火山 6 的生物礁深度均小于 1540 m;火山 3 的山顶为 2100 m,没有发育生物礁;火山 4 的山顶深度为 1900 m,没有发育生物礁。由于 1900 m 水深的海山上没有生物礁,1540 m 以及浅层的火山广泛发育生物礁,说明从 10.4~0 Ma 南沙的水深增量在 1540~1900 m,此数据大于南海西北部西沙海域 10.4~0 Ma 之间 410 m 的沉降量。因此,南沙海域 10.4 Ma 后的隆起区沉降量是西沙海域隆起区 10.4 Ma 后沉降量的 4 倍多。

进一步探究南沙海域在 10.4~0 Ma 之间沉降量为西沙海域同期沉降量 4 倍多的原因,可见西沙海域盆地的沉积层厚度大于南沙腹地浅薄小盆地的沉积层厚度,据此可以推断南沙的裂后压实沉降应该小于西沙海域,而动力地貌的变化数值可能是南沙大于西沙,但是两者之间的差距也应小于 1200 m。因此,这种巨大的差异可能是由于南沙在 10.4 Ma 发生与火山有关的盆地伸展减薄,即存在“火山侵入伸展”这一次独特的幕式运动,从而导致了南沙巨大的“裂后”热沉降。

## 3 火山剖面平衡性定量计算

### 3.1 火山侵入的二维平衡计算模型

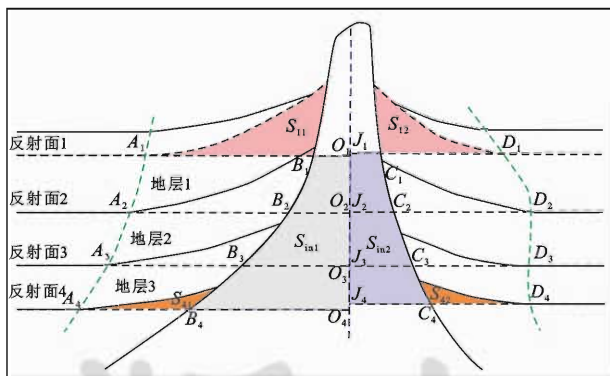
带状火山或者火山岩墙可以通过一般的二维平衡剖面计算即可判断火山侵入的地体“平衡剖面”是否平衡。以图 5 中有效地层 (地震剖面可准确识别的火山喷发前地层) 的 3 层 (4 反射界面) 为例,说明其计算方法:①取上部的边界层,确认火山喷发前地层顶界,存在明显超覆的地层则认为是火山喷发时间和之后沉积的地层。②确定有效层数,自上而下命名为地层 1、地层 2、地层 3,对应的反射界面命名为反射面 1、反射面 2、反射面 3、反射面 4。③确定变形边界  $A_1$ — $A_4$  线和  $D_1$ — $D_4$  线。④计算变形面积  $S_{11}$ 、 $S_{12}$ 、 $S_{41}$ 、 $S_{42}$ 。⑤计算火山轴线两侧火山占据有效地层的截面积  $S_{in1}$  和  $S_{in2}$ 。



注:  $T_{20}$ — $T_R$  为地震反射界面,  $E_1$  为古新统,  $E_2$  为始新统,  $N_1^1$  为中中新统,  $N_2^1$  为上新统,  $N_2^2$  为更新统。

图 4 太平盆地—九章盆地西部的生物礁发育与水深关系(剖面位置见图 1)

Fig. 4 Relationship between reef development and sea-water depth from Taiping Basin to western Jiuzhang Basin(location see Fig. 1)





替  $S_{inV}$  和  $S_{LiV}$ 。定义一个辅助参数“火山侵入变形剖面系数  $\eta_s$ ”在二维平衡计算时代替  $\eta_V$ 。在  $\eta_s \approx 1$  时可以认为火山的侵入变形符合面积平衡原理。

$$\eta_s \approx S_{in}/S_{Li} \quad (5)$$

由于南沙的火山侵入量很大,南沙海域的火山侵入量  $S_{inV}$  和地层的变形量  $S_{LiV}$  明显不平衡,从二维平衡模型本身无法判断不平衡产生的原因,这就需要建立更加准确的三维平衡模型。

### 3.2 火山侵入的三维平衡计算模型

由于中国在南沙海域的地震测线过于稀疏(没有通过同一火山的两条以上的测线),因此无法通过地震测线来研究南沙海域盆地火山走向和形貌。依据姚伯初等的《南海地形图》和《南海海域磁性体(顶面)埋藏深度图》可知<sup>[21]</sup>,火山长短轴比值  $\lambda$  大致为 2.8,且该倍数关系在南海已有实例,如周蒂等<sup>[11]</sup>研究的“东生海山”长短轴比就在 2.8 左右。实践中根据剖面方向判断剖面显示的为火山的长轴还是短轴,椭圆长轴对应的参数系列为图 6 中的  $a$  角标所示,计算模型如图 6 中的下部图。以椭圆长轴数据系为例可知

$$a_{s+in} = 2(L_{ain} + L_{as}) \quad (6)$$

式中: $a_{s+in}$  为变形边界的椭圆长轴尺度,km; $L_{ain}$  为火山侵入半长轴长度,km; $L_{as}$  为长轴地层变形宽度,km;

同理可得椭圆短轴数据系情况下的变形边界的椭圆短轴尺度

$$b_{s+in} = 2(L_{bin} + L_{bs}) \quad (7)$$

式中: $b_{s+in}$  为变形边界的椭圆短轴尺度,km; $L_{bin}$  为火山侵入半短轴长度,km; $L_{bs}$  为短轴地层变形宽度,km。

将图 5 剖面中  $S_{in}$  和  $S_{Li}$  分别简化为图 6 中的矩形和三角形,就可以在每个研究层分别计算对应的  $S_{in}$  和  $S_{Li}$ 。图 6 中的火山侵入体的侵入跨度  $L_{bin}$  就是图 5 剖面中的  $B_iO_i$  或者  $J_iC_i$ ,挤压变形的单侧影响宽度  $L_{bs}$  就是图 5 剖面中的  $A_iB_i$  或者  $C_iD_i$ 。三角形的高度为  $2h_{bs}$ 。

$$h_{bs} = S_{Li}/L_{bs} \quad (8)$$

$$h_{bin} = S_{in}/L_{bin} \quad (9)$$

根据图 6“火山椭圆”的关系有

$$S_{inE} = \pi a_{in} b_{in} = 4\pi L_{ain} L_{bin} = 4\pi \lambda L_{bin}^2 = 4\pi L_{ain}^2 / \lambda \quad (10)$$

式中, $S_{inE}$  为侵入体在水平切面上的椭圆面积,km<sup>2</sup>。

图 6 中对应的挤压变形体对应的在水平切面上的椭圆面积为

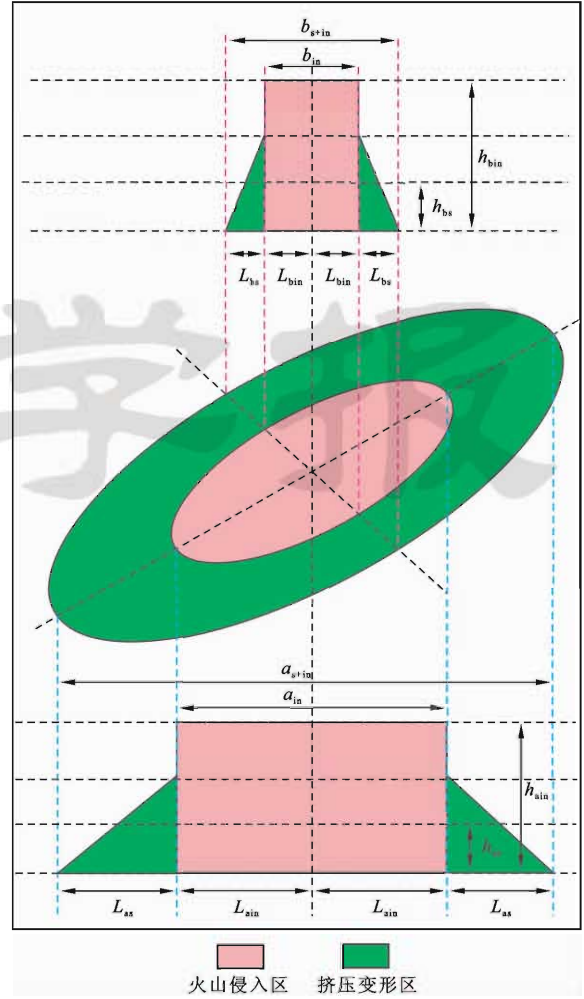
$$S_{LiE} = \pi(a_{s+in} b_{s+in} - a_{in} b_{in}) \quad (11)$$

同理有

$$S_{LiE} = 4\pi \lambda [(L_{bin} + L_{bs})^2 - L_{bin}^2] \quad (12)$$

研究层(组)对应的侵入体体积为

$$V_{inV} = S_{inE} h_{bin} \quad (13)$$



注:角标 in 表示火山侵入,角标 s 表示火山侵入导致的变形参数,角标 a 表示椭圆长轴数据系,角标 b 表示椭圆短轴数据系; $a_{in}$  为火山侵入的椭圆长轴尺度,km; $h_{ain}$  为参考地层变形前厚度,km; $h_{as}$  为地层变形等效高度,等于 1/2 变形三角形高度,km; $b_{in}$  为火山侵入的椭圆短轴尺度,km; $h_{bin}$  为参考地层变形前高度,km; $h_{bs}$  为地层变形等效高度,km。

图 6 火山水平切面椭圆的长轴剖面(下部)和短轴剖面(上部)参数关系

Fig. 6 Extension amount calculation model of volcanic-intrusive ellipse

研究层(组)对应的挤压变形体积为  $V_{LiV}$ ,严格地讲, $V_{LiV}$  需要用实际剖面变形的积分式来计算,这里已经简化为三角形,一级近似方法是把这个三角形竖截面进行积分计算,如下式:

$$V_{LiV} = \int_{L_{in}}^{L_{s+in}} h_{bs} dL \quad (14)$$

式(14)的积分显然繁琐,如在计算要求不高的情况下,若  $\eta_s > 5$ ,那么可以近似计算为

$$V_{LiV} = S_{LiE} h_{bs} \quad (15)$$

则火山侵入变形体积系数为

$$\eta_V = V_{inV}/V_{LiV} \quad (16)$$

在  $\eta_v \approx 1$  时,可以认为火山的侵入变形是体积平衡的。

### 3.3 南沙海域火山分布密度

盆地群尺度的平均伸展量和伸展率可以采用火山侵入体占平截面的面积比重来大致估算。首先确定南沙盆岭构造带的火山分布密度,并在此基础上做火山锥的水平切面投影尺度估算。南沙海域西部火山较为集中,测线相对于东部更多,图 1 中“火山密度统计选区”(面积为  $430\,296\text{ km}^2$ ) 区域内有约 200 座火山分布,平均每座火山的控制面积为  $2\,151\text{ km}^2$ ,相当于平均每座火山控制边长为  $46.3\text{ km}$  的正方形面积。如果按照长短轴比为 2.8 的矩形划定单火山平均控制区域,则每个火山控制  $23.8\text{ km} \times 66.64\text{ km}$  的矩形区域。

### 3.4 南沙海域火山侵入占据体积

在南沙海域选择大、中、小型火山各 4 座,分别进行盆地的变形计算,12 座抽样的火山剖面如图 7 所示。依据本文模型,计算得出 12 座抽样火山有效地层参数如表 1 所示,其中火山长短轴比值采用 2.8 来计算。南沙海域 12 座抽样火山计算得平均变形参数及伸展率也如表 1 所示。从表 1 中可以看出,变形体积系数差异较大,从 1.42 到 136.3 都有分布,说明不同火山动力过程差异较大。总的来说,图 7 中除了大型火山所示的火山挤压变形量和火山侵入体积的比值较大外,其他火山挤压变形量和火山侵入体积的比值均较小。

研究发现,南沙地震剖面显示的大型火山相对较少,以中型火山和小型火山为主,假设大、中、小型火山的比例为 1:4:5,而经过火山比重加权后的基底面侵入椭圆面积为  $546.27\text{ km}^2$ ,则火山侵入体积占地壳体积的比重(由基底面处平面截面比重代替)达到 25.4%,大约为 1/4。

探究变形体积系数的成因:①火山侵入导致地壳主动伸展。②火山侵入处于“地壳正在伸展,火山恰好也正在上侵”,笔者称这种情况为“耦合侵入模式”。③岩浆上侵后使得地层受热而原地熔融。④破火山口作用导致的岩浆切割—破碎—熔融地层,将围岩以块体和碎屑的形式带入到岩浆中,并随喷发物喷出地表。

由于这 4 种成因可能都是存在的,很难给予量化。深部地层原始温度较高,熔融总吸热量较小,更容易熔融;浅部地层则由于总热阻小、温度低等原因,岩浆容易凝固而较少发生原地熔融。如果假设“耦合侵入模式”和破火山口切割—破碎—熔融作用都不存在,则可以将火山侵入体积近似地作为地壳伸展量,则可以获得地壳伸展率为 1.34。

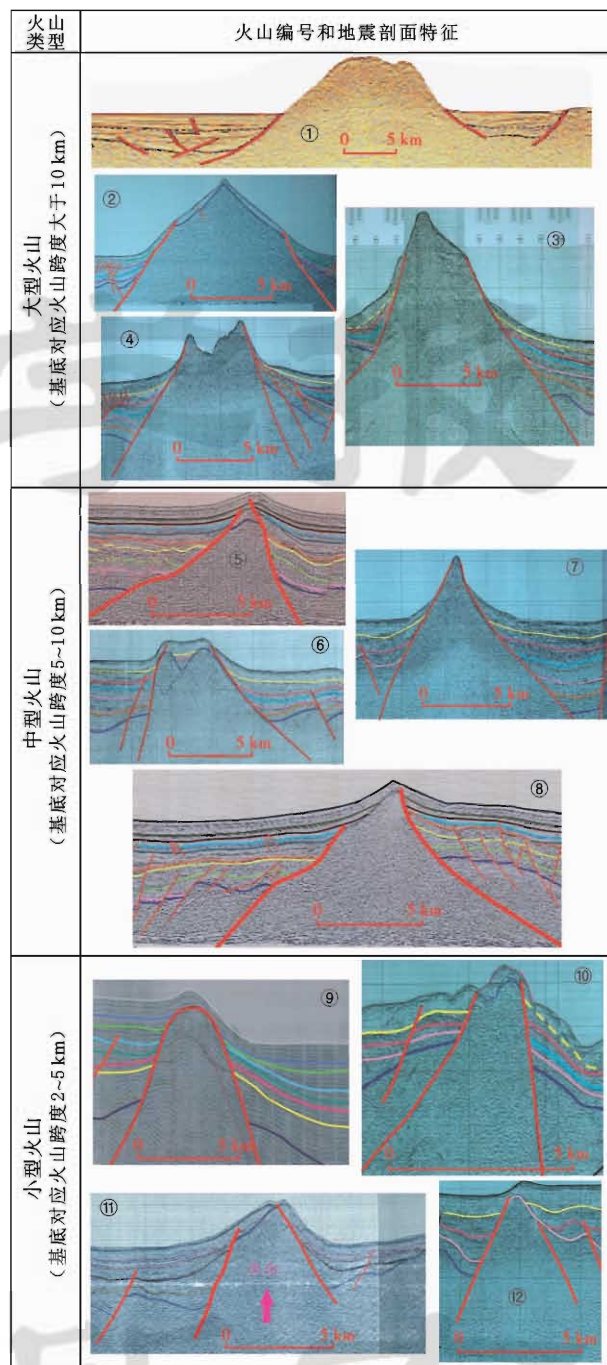


图 7 抽样选区 12 座火山的地震剖面

Fig. 7 Seismic sections of 12 volcanos random sampling in selected area

目前,火山侵入是属于“纯粹主动侵入”还是“耦合侵入模式”无法确定,但是基本可以排除纯粹被动侵入的可能,因为纯粹被动侵入不会产生图 7 中火山所示的挤压地层变形。并且跨度超过  $1\,000\text{ km}$  的非火山挤压成因的被动伸展在动力学上也很难解释。

## 4 火山侵入伸展幕动力学模式

火山侵入发生在  $15\text{ Ma}$  之后,此时南海西南次海

盆已经停止扩张,南沙南缘的挤压应力已经开始发挥作用。周边环境提供给南沙的整体上是一个挤压应力环境。笔者认为火山是导致盆地继续伸展最直接的原因。火山侵入是一个自下而上的侵入过程,侵入和喷发会大致经历 3 个阶段,上侵岩浆在地壳的下部形成岩浆房后,由于压差和浮力作用,火山会在一定的深度推开韧性变形较为容易的地层。3 个过程的应力和变形的大致规律如下:

表 1 南沙海域 12 座火山抽样计算平均变形参数及伸展率  
Table 1 Deformation parameters and extensional proportions of 12 random sampling volcanos in Nansha

火山 编号	跨度 /km	侵入面积 /km <sup>2</sup>	变形面积 /km <sup>2</sup>	椭圆侵入 面积/km <sup>2</sup>	变形面积 系数	变形体积 系数
①	24.261	33.200	0.294	5177.80	113.000	93.43
②	10.748	14.053	0.085	1016.20	164.900	136.30
③	11.086	24.598	1.075	1081.10	22.880	17.30
④	9.929	20.948	0.862	867.20	24.290	24.29
⑤	8.045	13.501	0.842	569.28	16.040	64.14
⑥	7.472	12.302	0.306	491.11	40.260	62.91
⑦	9.790	24.861	1.746	843.12	14.240	17.58
⑧	7.983	11.069	0.570	560.51	19.430	121.40
⑨	6.162	18.817	0.507	334.00	37.110	25.77
⑩	2.971	3.838	0.438	77.62	8.767	4.47
⑪	5.449	5.857	1.702	261.16	3.440	1.42
⑫	3.334	3.648	0.430	97.76	8.485	8.48
平均	8.936			948.07	39.400	48.12
权平均	6.969			546.27		

(1) 韧性剪切带侵入期。韧性剪切带地层的塑性很强,火山侵入后推动韧性剪切带地层向周围运动。此时韧性剪切带形成挤压应力环境,韧性剪切带地层向周围的运动拖动其上部的脆性基底层和更上部的沉积盖层以较慢的速度伸展。在此期间,脆性基底层有可能发生微弱的断裂活动,而沉积盖层主要以韧性伸展变形的形式来实现,整体上盆地实现伸展和沉降,并产生了如文献[1]中图 3 和图 6 所示的明显裂后期小断裂分布。

(2) 脆性基底层侵入期。随着韧性剪切带变形加大,火山侵入脆性基底层,脆性基底层由伸展应力场转化为挤压应力场,脆性基底层可能发生小幅度的隆升,但是此间沉积盖层仍然处于伸展应力场状态,整体上盆地处于伸展状态。

(3) 沉积盖层侵入期。随着火山侵入量进一步加大,火山侵入到新生代沉积盖层,此时的沉积盖层由伸展应力场转化为挤压应力场,整个火山邻域表现为局部隆升的现象,顶部地层出现倾斜。因此,应用地层变形判断的时间是沉积盖层的侵入时间,而韧性剪切带侵入和脆性基底层侵入阶段是早于沉积盖层变形时间的。单就第 3 个阶段来讲,侵入量和盖层变形量并不

意味平衡,因为下部的韧性剪切带和脆性基底带仍然发生挤压伸展运动,导致火山周围局部拉张。对盖层上部来说,此时的运动就是下部的拉张拖动和上部的挤压推动的角力。

经过这 3 个侵入过程后,火山推开地层一定的距离,大量火山同时侵入韧性剪切带和基底层,在深部提供了一个挤压应力环境,浅部却表现为伸展沉降环境。由于南沙盆岭构造带挤压—伸展—沉降同时存在,“火山侵入伸展幕”的动力就来源于火山的侵入,主动侵入火山可以在盆地浅部产生伸展效果,而应力场和伸展之间关系也很复杂,火山侵入则是一个应力场分层转换的过程。火山侵入期下地壳地体的增量伸展导致了上地壳和盆地的相对拉张,造成南沙海域的裂后伸展形式,但是该“伸展幕”以韧性伸展为主,此时期的韧性伸展量明显大于断裂滑移的伸展量,由于此期间没有形成很强烈的断裂活动,断裂活动只是形成一系列的小型调整断裂。“火山侵入伸展幕”主要是差异沉降导致断裂调整,属于重力剪切型断裂,不是拉张型断裂。

5 结 论

(1) 南沙海域盆地 15 Ma 之后的沉降量是西沙海域盆地同期沉降量的 4 倍多,这是由于南沙海域盆地大幅度的裂后沉降与火山侵入相关。

(2) 应用二维和三维火山侵入平衡剖面计算模型计算的火山侵入体积远大于火山导致的挤压变形量,说明南沙海域被侵入地层存在被动伸展。

(3) 南沙海域火山侵入体积占地壳的体积比重(由基底面处平面截面比重代替)达 25.4%。

(4) 火山侵入伸展幕是南沙海域盆地裂后伸展的重要原因,火山在深部侵入阶段导致的盆地伸展是南沙海域构造伸展与裂后沉降的主要动力。

参 考 文 献

[1] 孙珍,赵中贤,李家彪,等.南沙地块内破裂不整合与碰撞不整合的构造分析[J].地球物理学报,2011,54(12):3196-3209.  
Sun Zhen,Zhao Zhongxian,Li Jiabiao,et al. Tectonic analysis of the breakup and collision unconformities in the Nansha[J]. Chinese Journal of Geophysics,2011,54(12):3196-3209.

[2] 孙龙涛,田振兴,詹文欢,等.南沙海域礼乐地块构造地层及地壳结构特征[J].地球科学:中国地质大学学报,2011,36(5):861-868.  
Sun Longtao,Tian Zhenxing,Zhan Wenhuan,et al. Crust structure and tectonostratigraphy of Liyue block,northeast of Nansha area[J]. Earth Science:Journal of China University of Geoscience,2011,36(5):861-868.

[3] Sun Zhen,Zhong Zhihong,Keep M,et al. 3D analogue modeling of the South China Sea,a discussion on breakup pattern[J]. Journal of Asian Earth Sciences,2009,34(4):544-556.



- [4] Taylor B, Hayes D E. The tectonic evolution of the South China Basin[M]// Hayes D E. The tectonic and geologic evolution of southeast asian seas and islands. Washington, DC: American Geophysical Union, 1980: 89-104.
- [5] Franke D, Barckhausen U, Baristean N, et al. The continent-ocean transition at the southeastern margin of the South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(6): 1187-1204.
- [6] Yan Pin, Deng Hui, Liu Hailing, et al. The temporal and spatial distribution of volcanism in the South China Sea region[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 27(5): 647-659.
- [7] 王叶剑, 韩喜球, 罗照华, 等. 晚中新世南海珍珠-黄岩海山岩浆活动及其演化: 岩石地球化学和年代学证据[J]. 海洋学报, 2009, 31(4): 93-102.
- Wang Yejian, Han Xiqiu, Luo Zhaohua, et al. Late miocene magmatism and evolution of Zhenbei-Huangyan seamount in the south China sea: evidence from petrochemistry and chronology[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(4): 93-102.
- [8] 鲍才旺, 薛万俊. 南海深海平原海山丘分布规律及形成环境[J]. 海洋学报, 1993, 15(6): 83-90.
- Bao Caiwang, Xue Wanjuan. Distribution and formation environment of seamount in the South China Sea abyssal plain[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1993, 15(6): 83-90.
- [9] 邹和平. 试谈南海海盆地壳属性问题-由南海及其邻区玄武岩的比较研究进行讨论[J]. 大地构造与成矿学, 1993, 17(4): 293-303.
- Zou Heping. On the problem about the crusts attribution of South China Sea Basin-discussion from comparative study on basalts of seamounts in South China Sea basin and the neighboring areas[J]. Geotectonica et Metallogenia, 1993, 17(4): 293-303.
- [10] 鄯全树, 石学法. 南海盆海山火山碎屑岩的发现及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 3327-3334.
- Yan Quanshu, Shi Xuefa. Characteristics of volcanoclastic rocks from seamounts in the South China Sea and its geological implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(12): 3327-3334.
- [11] 周蒂, 施小斌, 陈汉宗, 等. 南沙岛礁区中西部海底岩石拖网和发现早第三纪半深海沉积的地质意义[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 32-42.
- Zhou Di, Shi Xiaobin, Chen Hanzong, et al. Phosphate and other rocks dredged from central and western Nansha block, Southern South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(2): 32-42.
- [12] 张明书. 西沙西永1井礁相第四纪地层的划分[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(2): 7-64.
- Zhang Mingshu. Quaternary reef stratigraphic division in hole Xiyong-1[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1990, 10(2): 7-64.
- [13] 韩春瑞. 西琛一井礁相沉积碳酸盐矿物及氧、碳稳定同位素特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1989, 9(4): 29-40.
- Han Chunrui. Reef carbonate mineral and oxygen and carbon stable isotope characteristics of Xichen-1 well[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1989, 9(4): 29-40.
- [14] 王玉净, 勾韵娟, 章炳高, 等. 西沙群岛西琛1井中新世地层、古生物群和古环境研究[J]. 微体古生物学报, 1996, 13(3): 215-223.
- Wang Yujing, Gou Yunxian, Zhang Binggao, et al. Studies of Miocene strata, biota and palaeoenvironment from Xi-chen NO. 1 hole in Xisha Islands[J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 1996, 13(3): 215-223.
- [15] 许红, 王玉净, 蔡峰, 等. 西沙中新世生物地层和藻类的造礁作用与生物礁演变特征[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- Xu Hong, Wang Yujing, Cai Feng, et al. Biostratigraphy and algae reef-building processes and evolution characteristics of reefs in Xisha in Miocene[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [16] 韩春瑞, 孟祥营. 西沙晚中新世以来礁相地层中有孔虫动物群的分布及其意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1990, 10(2): 65-80.
- Han Chunrui, Meng Xiangying. Foraminiferal fauna distribution in reef-facies beds since late Miocene in Xisha Island and its significance[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1990, 10(2): 65-80.
- [17] 秦国权. 西沙群岛“西永一井”有孔虫组合及该群岛珊瑚礁成因初探[J]. 热带海洋, 1987, 6(3): 10-24.
- Qin Guoquan. A preliminary study on foraminiferal assemblages of well 1, Xisha Island and their coral reef formation[J]. Tropic Oceanology, 1987, 6(3): 10-24.
- [18] 张锡南, 梁名胜. 西永一井介形类化石几个新种[J]. 海洋地质研究, 1982, 2(4): 72-79.
- Zhang Xinan, Liang Mingsheng. New species of ostracoda fossils in Xiyong NO. 1 well[J]. Marine Geological Research, 1982, 2(4): 72-79.
- [19] 王崇友, 何希贤, 裴松余. 西沙群岛西永一井碳酸盐岩地层与微体古生物的初步研究[J]. 石油实验地质, 1979, 1: 23-38.
- Wang Chongyou, He Xixian, Qi Songyu. preliminary study on carbonate strata and micropalaeontology in Xiyong NO. 1 well in Xisha Islands[J]. Petroleum Geology & Experiment, 1979, 1: 23-38.
- [20] Wheeler P, White N. Measuring dynamic topography: an analysis of Southeast Asia[J]. Tectonics, 2002, 21(5): 4-14-26.
- [21] 姚伯初, 万玲, 吴能友, 等. 中国南海海域岩石圈三维结构及演化[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Yao Bochu, Wan Ling, Wu Nengyou, et al. Three-dimensional structure and evolution of the lithosphere in South China Sea[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.

(收稿日期 2013-08-20 改回日期 2013-11-25 编辑 王培玺)