

东海盆地椒江凹陷裂后期岩浆作用类型、活动期次及油气地质意义

何新建¹, 覃军¹, 叶青², 张朋^{3,4}, 梅廉夫², 冯桢鸣¹

1 中海石油(中国)有限公司上海分公司; 2 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室;

3 中国地质大学(北京)海洋学院; 4 中国地质大学(北京)极地地质与海洋矿产教育部重点实验室

摘要 东海盆地椒江凹陷裂后期岩浆广泛分布,但关于岩浆作用的类型、空间分布和形成期次一直缺少系统研究,严重制约了盆地的油气勘探部署。基于新采集的高精度三维地震数据体和钻井资料,对椒江凹陷裂后期岩浆体及通道进行了识别和精细雕刻,厘定了椒江凹陷岩浆作用的发育规律以及对油气成藏的控制作用。研究表明:椒江凹陷火山岩主要分布于凹陷中东部,以溢流相为主,沿 T_{20} 界面及其上下均有发育,但沿 T_{20} 界面更为发育。岩浆侵入体发育岩盆、岩床和岩墙3种产状,以岩盆为主;在温州期及之前(早于43 Ma)、平湖期—花港期(43~23.3 Ma)与龙井期及之后(晚于23.3 Ma)均有发育,其中平湖期—花港期是岩浆侵入的最主要时期。研究区岩浆上涌通道的分布与北西向基底隐伏断裂有关,但与盆内新生代断层分离,无共生关系。研究认为,椒江凹陷裂后期岩浆活动对早期油气藏具有破坏或改造作用,因此,在优选潜力目标时应尽可能规避岩浆作用的影响。但另一方面,岩浆侵入形成了大量强制背斜,属于优越的圈闭类型,因此强岩浆活动区的油气勘探潜力仍值得探索。

关键词 火山活动; 岩浆侵入; 伴生构造; 裂后期; 椒江凹陷; 东海盆地

中图分类号: TE132 **文献标识码**: A

引用: 何新建,覃军,叶青,等. 东海盆地椒江凹陷裂后期岩浆作用类型、活动期次及油气地质意义[J]. 海相油气地质, 2024, 29(4): 423-436.

HE Xinjian, QIN Jun, YE Qing, et al. Types, activity periods, and petroleum geological significance of post-rift magmatism in Jiaojiang Sag, East China Sea Basin[J]. Marine origin petroleum geology, 2024, 29(4): 423-436.

0 前言

裂后期岩浆作用在全球裂陷盆地中广泛存在,对于揭示盆地裂后期的动力学演化、岩浆喷发或侵位机制、断层-岩浆相互作用以及油气成藏与富集特征具有重要意义^[1-6]。东海盆地裂后期岩浆活动广泛存在,是解析盆地构造演化和评价油气勘探潜力需要考虑的重要因素。然而,过去基于二维地震测线或低品质三维地震数据体对裂后期岩浆活动的研究仍存在较多待解决和深入探索的问题,包括:①东海盆地裂后期岩浆作用的精确时间和期次性;②裂陷期—裂后期断层是否为岩浆(流体)向上运移的通道?两者之间是一种怎样的相互作用关系?③裂后期岩浆活动是否对盆地烃源岩有二次

加热的过程,是否影响盆地的二次生烃?④邻区丽水凹陷中广泛钻遇的 CO_2 气藏,其来源是受岩浆活动影响还是受断层活动影响?⑤裂后期岩浆活动对油气保存是否总是起负面影响^[7-10]?

已有的初步研究认为椒江凹陷岩浆活动主要发生在晚始新世—早中新世,且成藏期后的岩浆作用对油气保存十分不利^[8,11-12]。但是这些研究没有精确刻画椒江凹陷的岩浆侵入类型、岩浆通道特征和岩浆的主要活动时间,制约了对上述关键科学问题的认识。

对于像椒江凹陷这样“满盆”岩浆的凹陷,如果仍是采取对岩浆避之不及的思路进行研究和勘探,无疑会大大降低盆地的实际勘探价值。为此,本文利用东海盆地椒江凹陷最新采集处理的高品质三

收稿日期: 2024-04-08; 改回日期: 2024-08-30

本文受中海油“十四五”重大科技项目子课题“丽水—椒江凹陷早降晚抬背景下烃源岩与运汇单元研究”(编号: KJGG2022-0301)资助

第一作者: 何新建, 硕士, 工程师, 主要从事盆地构造研究。通信地址: 200335 上海市长宁区通协路388号; E-mail: hexj9@enooc.com.cn

通信作者: 叶青, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事盆地构造分析和教学工作。通信地址: 430074 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号; E-mail: qingye@cug.edu.cn

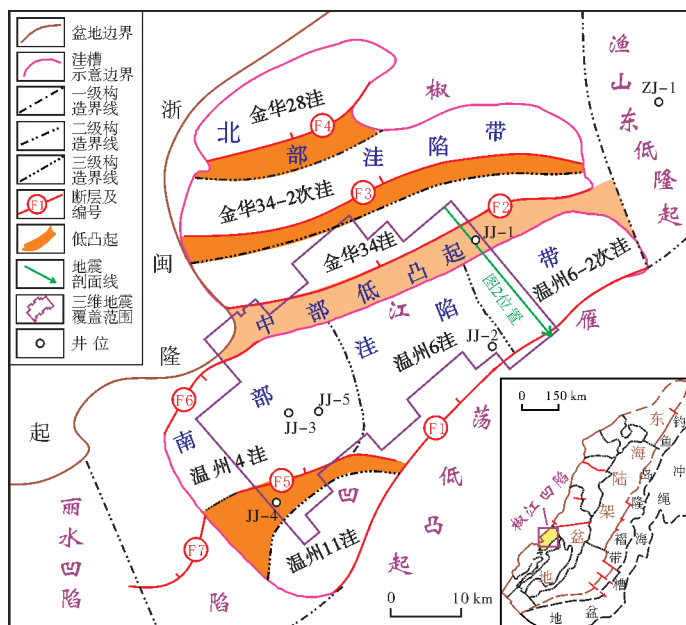
维地震数据和钻井资料,从岩浆的井震联合识别等基础工作着手,重点刻画火山岩和岩浆侵入岩的类型及其空间分布,开展岩浆活动时间、岩浆侵入活动与断层相互关系、伴生构造等研究,对椒江凹陷裂后期岩浆作用进行全面的梳理和总结,以期对东海盆地新层系、新类型油气勘探的突破提供科学指导。

1 区域地质背景

椒江凹陷是东海盆地西部坳陷带(台北坳陷)的一部分,是自晚白垩世发育起来的裂陷盆地。凹陷西侧为浙闽隆起,东部以雁荡低凸起与福州凹陷相隔,北与钱塘凹陷相连,南部紧邻丽水凹陷,是东海盆地的一个主要油气潜力区^[13-16](图1a)。椒江凹陷以中部低凸起(也称之为金华低凸起)为界,可以划分出南部洼陷带与北部洼陷带(图1a)。南部洼陷带又可以细分为温州6洼、温州6-2次洼、温州11洼、温州4洼,其中温州6洼、温州6-2次洼、温州11洼均由F1断裂控制,与F1断裂的分段活动有关,温州6洼与温州11洼被EW走向的F5断裂分隔,温州4洼是温州6洼北斜坡向西延伸的宽阔地堑区。北部洼陷带自南向北可以划分为金华34洼、金华34-2次洼、金华28洼,三者

呈平行排列。在椒江凹陷的众多洼陷之中,温州6洼的月桂峰组沉积厚度最大,其次为金华34洼与温州11洼。

在中、新生代多板块复合交叉与弧后伸展的区域演化背景下,椒江凹陷在新生代以来经历了断陷期、断拗转换期、抬升期和拗陷期等4个构造演化阶段(图1b)。早—中古新世断陷期(65~59.2 Ma)可以划分出2个断陷幕,分别充填有月桂峰组和灵峰组:月桂峰组属于湖相沉积,以大套暗色泥岩、灰色粉砂岩夹细砂岩为主,最大沉积厚度达1 800 m;灵峰组沉积期为局限浅海环境,发育大套灰色泥岩夹粉—细砂岩,偶见深灰色泥岩,下部可见灰色、浅灰色厚层细砂岩、含砾细砂岩,最大沉积厚度达2 450 m。晚古新世至始新世早期为断拗转换期(59.2~43 Ma),充填有明月峰组、瓯江组和温州组:下部的明月峰组是一套海退环境下形成的煤系沉积,以暗色泥岩为主,夹有薄层的碳质泥岩和煤,厚度300~1 200 m;上部的瓯江组和温州组为滨浅海相沉积。抬升期(43~23.3 Ma)经历了始新世中期平湖运动、始新世末期的玉泉运动和渐新世末期的花港运动,导致椒江凹陷整体缺失始新统平湖组、渐新统花港组,同时形成了一个明显的区域性构造不整合界面 T_{20} 。之后,椒江凹陷进入整体沉降期。



(a) 椒江凹陷构造单元



(b) 综合地层序列与构造活动期次

图1 椒江凹陷区域构造位置、构造单元及综合地层序列

Fig. 1 Tectonic location, structural unit, and comprehensive stratigraphic sequence of Jiaojiang Sag

2 火山岩与岩浆侵入体的识别及空间分布规律

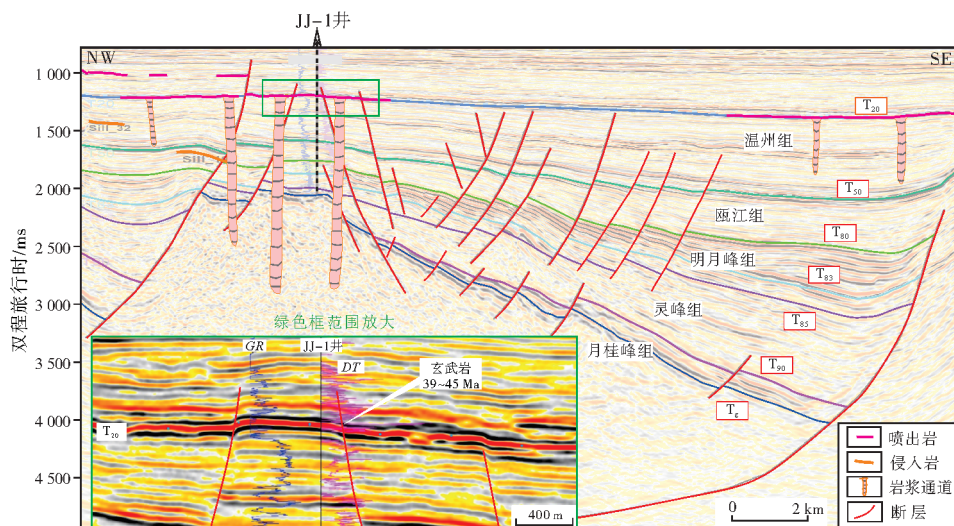
2.1 火山岩与岩浆侵入体的井-震联合识别

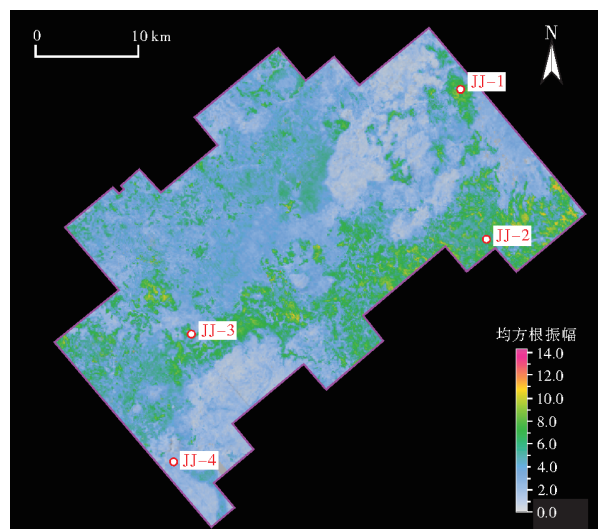
椒江凹陷已钻6口探井中有5口井钻遇火山岩,其中JJ-1井等4口探井在新生代沉积层中钻遇厚层状玄武岩,单层厚度最大可达25 m。这些厚层状玄武岩沿 T_{20} 界面广泛分布并在钻井、测井和地震资料中存在明显响应。本文基于椒江凹陷最新采集的高分辨率三维地震数据、测录井等资料对研究区火山岩和岩浆侵入体进行了精确识别与追踪,明确了其空间分布特征与发育规律。

以椒江凹陷JJ-1井为例,对井-震联合识别方法做简要说明。JJ-1井于1 199~1 206 m井段,沿 T_{20} 反射界面钻遇7 m厚的玄武岩层(图2)。这套玄武岩层在测井上表现为较低的自然伽马值、较高的声波速度,符合玄武岩的岩石物理属性,并与上下沉积岩层存在明显区别。在地震相上,玄武岩层表现为强反射特征,反射轴的振幅向两侧延伸逐渐减弱尖灭,符合

喷发相熔岩流的地质生长规律且与钻井结果吻合。 T_{20} 反射界面属于盆地抬升期(花港运动)产生的长时间跨度不整合面,地层和古生物资料约束其沉积间断为43~23.3 Ma^[17-19],因此沿该界面分布的火山岩绝对年龄必然在此范围内。这套玄武岩的K-Ar年龄为45~39 Ma^[20],与上述判别年龄保持一致。在其他钻井控制区同样可以识别这套玄武岩层。整体而言,火山岩以裂隙式喷发为主,少见标准的锥形火山堆,大部分火山岩与下部的岩浆侵入体相伴生。

除上述火山岩外,椒江凹陷还发育大量的侵入体(图2)。由于岩浆侵入体的声波速度和密度往往比围岩高,因此在岩浆侵入体与围岩之间会产生较大的波阻抗,从而在地震资料中岩浆侵入体的上界面表现为正相位强振幅反射特征,强振幅在两侧尖端突然终止;垂向延伸的岩浆通道或岩墙由于成层性较差,地震资料上往往表现为弱振幅的杂乱反射。此外,岩浆侵入体在剖面上的表现具有固定的形态特征,通常呈碟形、多个碟形交切、顺层或穿层的线形、阶梯状(顺层+断裂)、树枝状等形态^[21-23]。





注：红色—黄色—绿色区指示火山岩分布多的区域。

图3 椒江凹陷三维区 T_{20} 界面 ± 30 ms 时窗均方根振幅属性
Fig. 3 Root mean square amplitude attribute of T_{20} interface ± 30 ms time window in the 3D survey of Jiaojiang Sag

了熔岩渠及前锋的朵叶体。熔岩流从火山口喷出之后,以熔岩渠或熔岩隧道的方式补给到熔岩流前锋。熔岩渠是熔融岩浆的开放性流动渠道,渠道两侧通常会形成熔岩碛。熔岩流两侧冷却速率较快,最先凝固,并承受了较大的拖曳力,使得熔岩翻转、冷凝并形成熔岩碛;熔岩流中心部分冷却速度较慢,能够保持熔岩流的高流动性,形成熔岩渠。熔岩碛通常在熔岩流演化过程的早期形成,贯穿整个熔岩流长度。椒江凹陷三维地震覆盖区东北段的熔岩流(图4中②号)发育2个规模不等的熔岩渠,西分支较短、东分支较长。其中,东分支呈南北向延伸,反映了岩浆喷发时期海底地貌北部高(金华低凸起之上)、南部低;东分支熔岩流延伸超过20 km,宽近2 km。熔岩渠前锋发育舌形朵叶体,与老的朵叶体呈串珠状连接,反映了阵发性的熔岩流动。

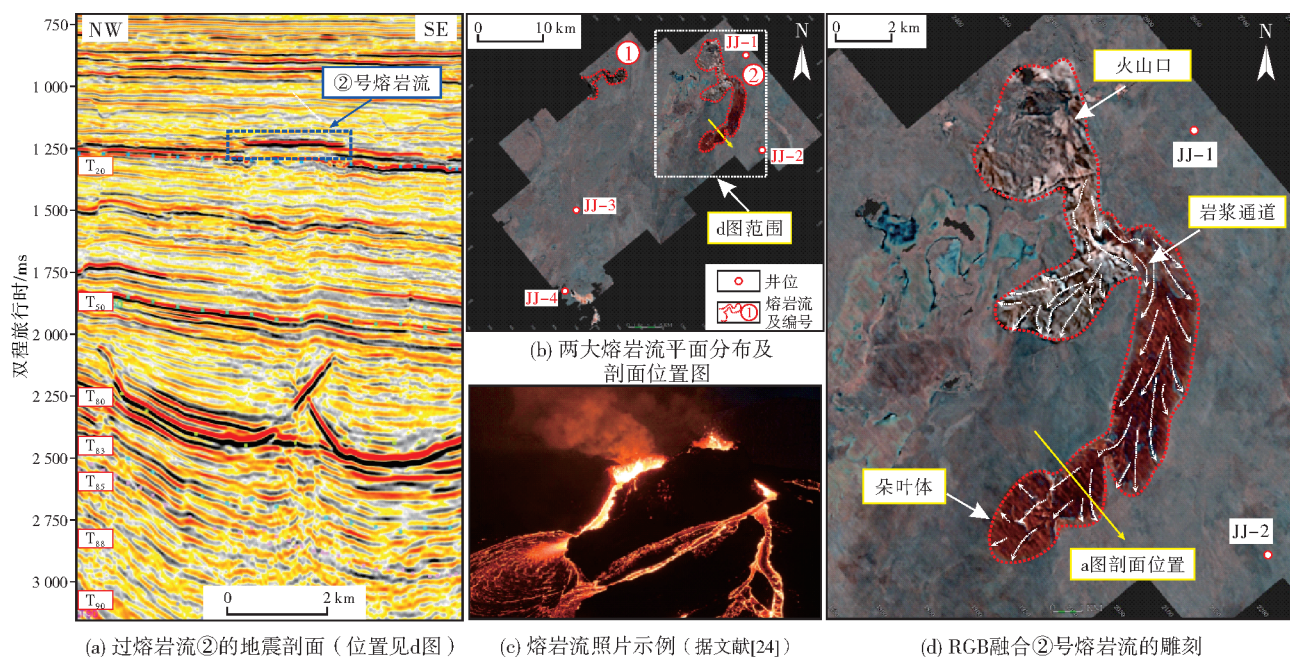


图4 椒江凹陷三维地震RGB融合对熔岩流的雕刻

Fig. 4 Identification of lava flow by RGB fusion of 3D seismic data in Jiaojiang Sag

2.3 侵入岩的空间分布特征

利用椒江凹陷三维地震反射资料对研究区的岩浆侵入体进行了三维空间追踪,在三维覆盖区共刻画出33个典型的岩浆侵入体(图5a)。平面上,侵入体主要分布在椒江凹陷南部陡坡边缘、金华低凸起及北部洼陷带3大区域,整体呈北东走向的条带状;三维覆盖区西部(南部洼陷带西部)不甚发育。

从岩浆侵入体与 T_g 构造图的叠合图上看(图5b),岩浆侵入体多发育在F1和F2深大断裂带以及两者之间的区域,这一区域也是地壳伸展和减薄最强的部位,这表明侵入体的发育可能与深大断裂充当岩浆通道且沟通深部岩浆房有关。纵向上,椒江凹陷岩浆侵入体主要分布在月桂峰组之上的地层,其中侵位地层主要为温州组、甌江组、明月峰组(上段),少量侵入灵峰组或龙井组及以上的地层。

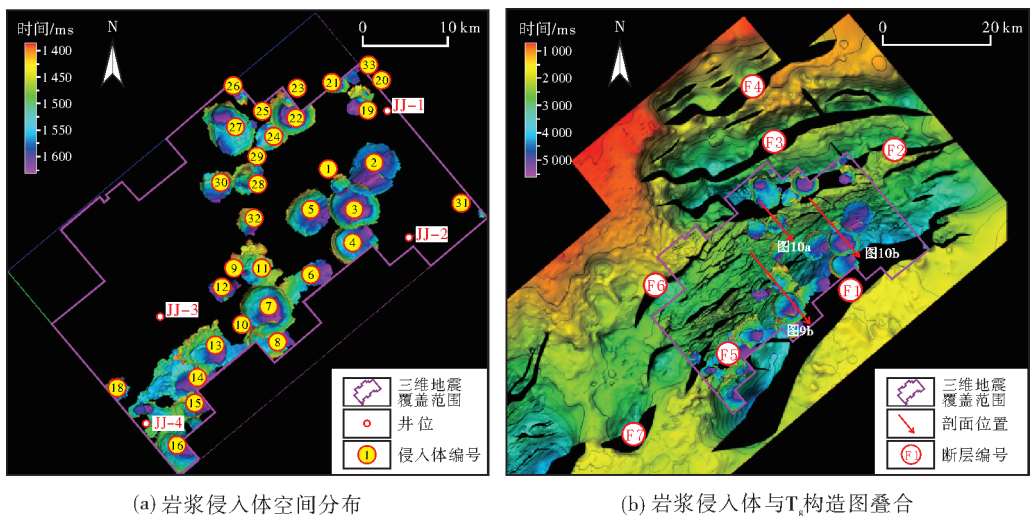


图5 椒江凹陷岩浆侵入体的空间分布及其与 T_g 构造图的叠合

Fig. 5 Spatial distribution of magma intrusive bodies and its superposition with T_g structural map in Jiaojiang Sag

3 岩浆侵入体类型及几何学特征

3.1 岩浆侵入体的分类方案

通常根据侵入体与围岩的接触关系分为协调(整合)侵入与不协调(不整合)侵入2类:协调侵入体表现为侵入体边界与围岩层理、片理大致平行;不协调侵入体表现为侵入体边界与围岩层理、片理斜交。椒江凹陷三维地震覆盖区的协调侵入体主要有岩盆、岩床2类,不协调侵入体主要为岩墙。整体来看,椒江凹陷岩浆侵入体以岩盆为主(图5),共计27个。研究区主要的侵入体类型在地震剖面上的识别特征和形态特征如表1所示。

3.2 岩浆侵入体的分类特征

3.2.1 岩盆(碟形)

岩盆在三维地震数据体中呈现极强振幅异常的特征,形态上呈碟形或盆状;在二维地震剖面上,通常表现为平坦的强振幅反射特征,形态上呈月牙状或勾状的层状侵入体(表1)。一个完整的碟形侵入体由3个部分组成:一是平坦或稍微凸起的底部岩席,与地层层面呈大致平行;二是向浅处攀升呈翘倾状的翼部岩席,向上或向外以一定的角度侵入围岩地层,呈明显的不整合接触,翼部边缘与围岩整合反射侵入角通常小于 40° ;三是外部岩席,翘倾向上的翼部在某处发生明显的转折,继续以向外的横向平缓延伸为主,外部岩席与围岩低角度斜交,其夹角要明显小于翼部岩席与地层形成的夹角。

这种类型的侵入体岩浆一般从底部注入,从中心向外呈辐射分布。碟形侵入体是研究区数量最多的一种类型,其中3号侵入体(位置见图5a)为较典型的碟形侵入体。

表1 椒江凹陷基于产状及地震反射特征的岩浆侵入体分类方案

Table 1 A classification scheme for magma intrusive bodies in Jiaojiang Sag based on the occurrence and seismic reflection characteristics

分类	形态	简图	地震识别特征	侵入体编号
协调侵入	岩盆		<ul style="list-style-type: none">● 强振幅且连续性好,两侧尖端突然中止● 中央下凸,呈碟状● 底部厚度最大,向边缘逐渐减薄	2~5号, 7~8号, 11~31号
	岩床		<ul style="list-style-type: none">● 强振幅且连续性好,两侧尖端突然中止● 近水平展布,与地层整合接触● 厚度分布均匀,横向延伸距离远大于其厚度	6号, 32号
不协调侵入	岩墙		<ul style="list-style-type: none">● 强振幅,连续性稍差,两侧尖端突然中止● 与上下地层呈不整合接触,穿层分布	1号, 9~10号, 33号

注:红色的表示岩浆侵入体,横向灰黑色虚线表示地层层线。

3号碟形侵入体由底部和翼部岩席两部分组成,外部岩席不明显。侵入体底部岩席完整,岩席西部边缘发育情况优于东部,呈不对称状分布(图6a)。岩席长约5 662 m,宽约5 414 m,最大厚度在岩席底部,约27 m,垂向跨度约422 m,轮廓接近于圆。侵入体的底部整体向东侧偏移,其东侧厚度大于西

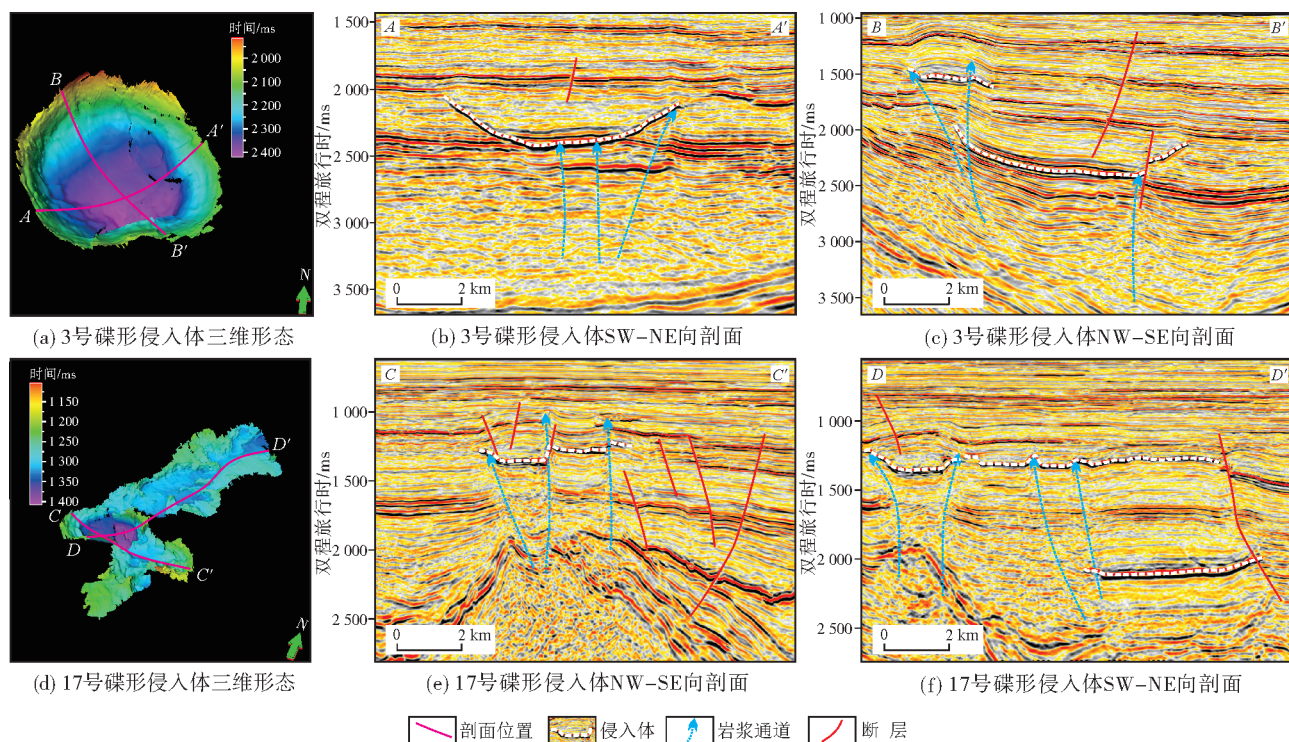


图6 椒江凹陷三维地震区碟形岩浆侵入体特征

Fig. 6 Characteristics of saucer-shape magma intrusive bodies in the 3D seismic survey of Jiaojiang Sag

侧。与东北翼岩席相比,西南翼稍高、厚度稍大,且西南翼与地层夹角较小(图6b),延伸长度更长。西北翼岩席稍高于东南翼,东南翼连续性较差,被一个小断层断开(图6c)。

17号碟形侵入体由底部、翼部与外部岩席3部分组成。侵入体长约9 319 m,宽约4 144 m,最大厚度约15.1 m,垂向跨度约206 m。侵入体中心呈碟形(图6d),岩浆由中心侵入而后向四周涌散,南西—北东向延伸范围比北西—南东向延伸范围要广得多,导致整个侵入体长宽比达到2.2:1,呈不对称分布。北西—南东向剖面显示该侵入体仍呈现出较典型的碟形岩浆侵入体特征(图6e)。两侧均发育完整的翼部和外部岩席,且外部岩席和地层层面基本保持平行,角度较缓。相比于东南翼,西北翼高度小、厚度大,外部岩席的延伸范围和侵入角更小。东南翼处有一断裂,推测应是早期断层,由于断层影响,岩浆流动方向改变,沿着高角度断面侵入;侵入角增大,顺着断层继续以外部岩席的形式横向延伸,侵入体出现阶梯向上现象(图6e),横向宽度3 301 m。南西—北东向剖面上,两侧翼部、外部岩席均发育(图6f),两翼侵入角较小,高度相差不大,与该侵入体北西—南东向剖面不同的是,东北翼

外部岩席延伸范围很广,形态上类似于板状,横向宽度约9 292 m。

3.2.2 岩床(板状)

这类侵入体主要表现为顺层发育的板状岩浆岩(岩床),是岩浆顺地层面流动而形成的近水平展布、与地层呈整合接触的平板状或饼状侵入体。这类岩浆侵入体横向延伸范围要远大于厚度,厚度通常由一侧向另一侧递减。研究区内6号和32号岩浆侵入体是较典型的顺层侵入体。

6号侵入体三维形态呈长条形(图7a),地震剖面上呈线形,NE—SW走向,与地层倾向基本相同。该侵入体的长度约为6 607 m,宽度约为2 947 m,厚约24.5 m,垂向跨度极小,基本与上下层面平行(图7b)。

3.2.3 岩墙

岩墙是岩浆沿围岩的裂缝挤入后冷凝形成的侵入体。通过近乎垂直的裂隙,岩浆侵入并凝固成不规则切入围岩层面的“墙体”,其与岩床侵入体不同之处在于其通常与地层斜交^[22]。研究区内以岩墙形态存在的岩浆侵入体较典型的是1、9、23及33号侵入体(图5)。

本文以9号岩墙(图8a)为例加以说明。9号侵入体三维形态上,以不规则形态侵入围岩,与地层呈不整合接触。侵入体长约3 019 m,宽约2 080 m,最大厚度约54.8 m,垂向跨度约344 m;在北西—南

东向剖面中,右翼不发育,发育倾斜的底部和侵入角较大的左翼。与碟形侵入体不同的是,岩浆从底部侵入后,并未向四周涌散,而是沿着左翼向上攀升(图8b)。

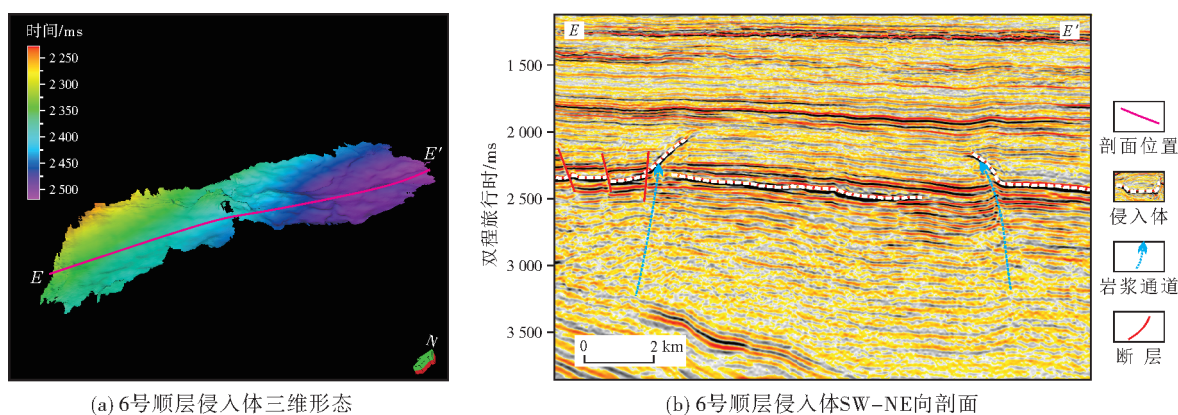


图7 椒江凹陷三维地震区板状岩浆侵入体特征

Fig. 7 Characteristics of plate-like magma intrusive bodies in the 3D seismic survey of Jiaojiang Sag

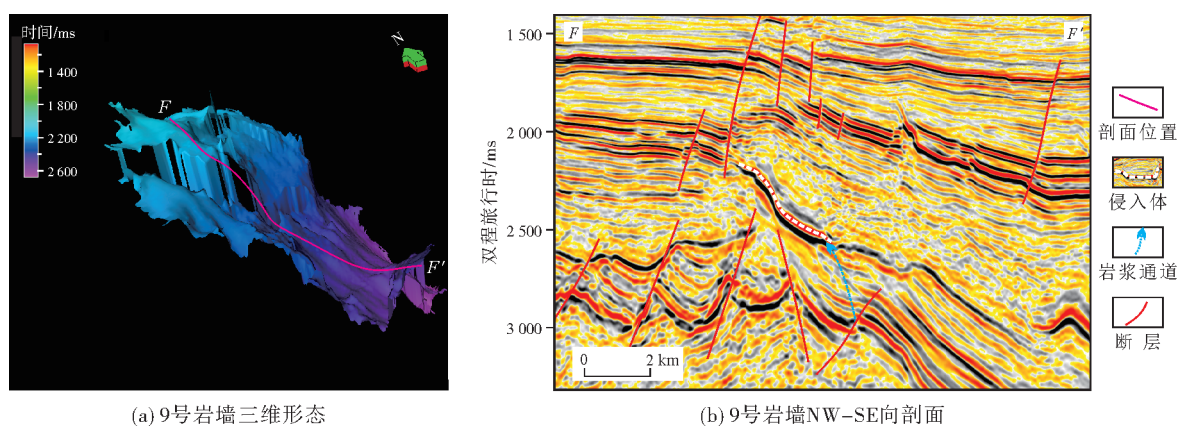


图8 椒江凹陷三维地震区岩墙岩浆侵入体特征

Fig. 8 Characteristics of dike magma intrusive bodies in the 3D seismic survey of Jiaojiang Sag

3.3 岩浆侵入体的整体特征

为了对椒江凹陷岩浆侵入体的形态有更加直观的了解,利用研究区新采集三维地震资料,根据岩浆侵入体典型的强振幅和岩浆通道内部反射杂乱的特征进行岩浆侵入体的识别。结果表明,研究区碟形岩盆大量发育,并且可以观察到侵入体穿插、阶梯向上及垂向接力等现象,少量的侵入体以板状岩床和岩墙

岩浆;另一种是垂向供给,岩浆沿着原有断裂或者依靠自身高压开拓通道。岩浆侵入体附近发育有较多的断裂,部分侵入体以断裂为岩浆通道,继续向上运动,可见岩浆侵入体与断裂的关系密切。

椒江凹陷岩浆侵入体中,碟形岩盆侵入体约占78%,规模相比于岩床、岩墙形态的侵入体也更大。其中,规模最大的为7号侵入体,长约6 283 m,宽约5 663 m,最大厚度约19.8 m,最大垂向高度约389.1 m,面积约31.08 km²,是典型的碟形侵入体。规模最小的为31号侵入体,长约1 328 m,宽约618 m,最大厚度约16.1 m,最大垂向高度约49.2 m,面积约0.55 km²,同样呈碟形(表2)。

表2 椒江凹陷岩浆侵入体产状几何学参数统计表

Table 2 Statistics of geometrical parameters for the occurrence of magma intrusive bodies in Jiaojiang Sag

编号	长度/m	宽度/m	最大厚度/m	最大垂向高度/m	面积/km ²	形态	上覆地层形态
1	2 379	2 022	9.0	144.5	4.15	岩墙	褶皱
2	6 422	5 711	41.6	388.3	27.76	岩盆	无明显变形
3	5 662	5 414	27.0	419.1	25.41		无明显变形
4	5 130	3 874	24.3	220.6	17.44		轻微褶皱
5	5 237	4 725	21.5	357.9	21.19		无明显变形
6	6 607	2 947	24.5	40.1	17.12	岩床	无明显变形
7	6 283	5 663	19.8	389.1	31.08	岩盆	褶皱
8	6 500	4 749	26.0	205.2	15.08		
9	3 019	2 080	54.8	301.8	4.52	岩墙	轻微褶皱
10	3 988	2 924	25.0	230.8	8.53		无明显变形
11	5 637	3 647	25.4	384.1	18.38	岩盆	褶皱
12	2 613	2 308	13.8	125.7	4.93		轻微褶皱
13	5 364	5 231	17.5	200.2	25.06		褶皱
14	6 097	6 026	30.2	394.7	24.25		轻微褶皱
15	3 604	3 080	18.4	339.8	8.62		
16	6 067	5 941	21.4	388.3	22.15		褶皱
17	9 319	4 144	15.1	190.8	28.23		
18	2 830	2 299	42.4	133.9	5.07		轻微褶皱
19	3 651	3 279	38.5	227.3	8.26		褶皱
20	1 139	796	39.5	73.7	0.82		
21	2 596	1 506	21.6	108.9	2.68		无明显变形
22	5 318	4 604	35.5	293.2	17.43		下凹
23	1 472	897	35.0	78.1	1.04		褶皱
24	3 630	3 085	28.9	95.9	9.10		轻微褶皱
25	1 319	916	13.5	51.2	0.85	岩盆	
26	1 768	1 286	18.5	55.2	1.94		无明显变形
27	6 610	4 859	42.1	402.1	25.87		
28	4 044	3 501	35.0	176.9	10.53		
29	2 221	2 221	30.3	324.7	3.92		
30	3 877	3 539	26.4	256.3	10.55		褶皱
31	1 328	618	16.1	49.2	0.55		
32	1 638	1 564	20.0	43.9	2.23	岩床	
33	2 974	2 811	26.8	97.9	7.06	岩墙	无明显变形

4 岩浆侵入期次与形成机制

4.1 岩浆侵入期次及伴生构造

确定火成岩形成地质年代较常规的方法是同位素测年,但是对于海域沉积盆地钻井样品较为难得,通常缺少足够的火山岩样进行测年分析。对于有地震反射资料的区域,根据喷发岩或侵入体附近沉积层同相轴的终止和接触关系也可以准确划分岩浆活动期次^[2,6,22]。本文在研究区三维地震资料解释的基础上,根据岩浆侵入地层以及卷入强制褶皱地层的最小年龄与上部超覆地层的年龄

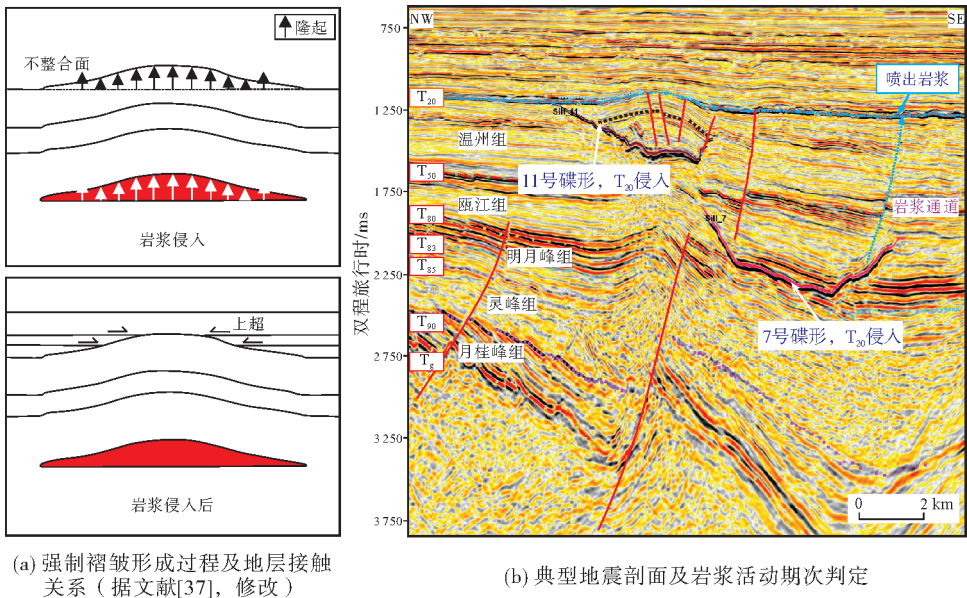
进行约束,划分了椒江凹陷岩浆侵入体的活动时间与期次(表3)。

前人对岩浆的侵入过程与伴生构造变形进行过大量的研究^[22,25-26]。岩浆侵入通常会导致其周围沉积地层发生变形,其中位于侵入体上方的已沉积地层通常会隆起而发生褶皱,称为强制褶皱,以发育背斜居多,也称之为强制背斜^[25-31]。强制背斜隆升幅度不同,背斜顶部或出露水面遭受剥蚀形成局部不整合,或未出露水面继续接受沉积。无论是否发生剥蚀,强制背斜顶部会形成局部的地貌高点,后期最先沉积的地层会向隆起顶部超覆(图9a)。

表3 椒江凹陷岩浆侵入体产状与侵入时期

Table 3 The occurrence and intrusion period of magmatic bodies in Jiaojiang Sag

	侵入地层与时间	侵入体编号
侵位地层	T_{20} 以上	1
	温州组 (T_{20} — T_{50})	11、12、13、15、17、20、21、23、25、26、31、32
	瓯江组 (T_{50} — T_{80})	2、3、4、7、8、16、28、29、33
	明月峰组 (T_{80} — T_{85})	2、5、6、7、8、14、19、22、24、27、30、33
	灵峰组 (T_{85} — T_{90})	9、10、18
侵入时期	晚期(龙井期及之后, 晚于 23.3Ma)	1、2、3、15、17、20、21、22、23 (部分为 T_{20} 侵入后, 后期存在再次岩浆补充侵入)
	中期(平湖期—花港期, 43~23.3Ma)	4、5、6、7、9、10、11、12、13、14、15、16、18、19、22、23、24、25、26、27、31、32
	早期(温州期及之前, 早于 43Ma)	28、29、30、33



(a) 强制褶皱形成过程及地层接触关系 (据文献[37], 修改) (b) 典型地震剖面及岩浆活动期次判定

图9 椒江凹陷强制背斜典型地震剖面及岩浆活动期次判定 (剖面位置见图5b)

Fig. 9 The typical seismic section of forced anticline and the determination of magmatic activity period in Jiaojiang Sag (location is shown in Fig.5b)

根据发生强制背斜沉积地层的最小年龄, 或者根据强制背斜顶部超覆地层的最大年龄, 可以约束岩浆侵位的时间。此外, 对于脉冲式的岩浆侵入, 即早期已发生强制变形、后期岩浆再次补给的地质过程, 可以形成多期次的地层超覆现象。椒江凹陷多数的岩浆侵入体都伴随有强制褶皱及地层削截、超覆的现象, 因此, 基于地震反射资料可以判断岩浆的侵入时间与期次。如图9b切过地震剖面, 11号侵入体之上、 T_{20} 之下的沉积地层发育显著的褶皱变形形成强制背斜, 背斜的分布范围与侵入体的延展范围具有很好的吻合关系, 侵入体厚度大的部位(强反射轴)对应背斜高部位, T_{20} 之上的沉积地层未卷入到背斜变形之中, 而表现为向背斜两翼超覆的特征。根据这一特征可以判断出该侵入体形成于 T_{20}

界面时期, 且由于 T_{20} 不整合界面在整个椒江凹陷对应于43~23.3 Ma的暴露剥蚀与沉积间断期, 因此可以将11号侵入体的形成时间限定在43~23.3 Ma之间。

值得注意的是, 并非所有的侵入体在地震剖面上都可以见显著的强制背斜, 如图9b中7号碟形侵入体, 其上方未见显著的强制背斜发育, 这类侵入体可以根据与其相伴生的火山通道与喷发岩进行判断。通常, 岩浆侵入体除了自身存在岩浆源通道之外, 其自身也可以为更浅层的侵入体或者地表的喷发岩提供岩浆, 如图中7号侵入体上部可见裂缝状的岩浆通道, 该岩浆通道为 T_{20} 界面溢流相玄武岩提供了岩浆来源, 侵入体与溢流相玄武岩具有相同的形成时间, 都是在 T_{20} 界面时期, 即43~23.3 Ma。

上述示例的43~23.3 Ma是椒江凹陷岩浆侵入

体的主要发育时期(共识别22个侵入体),除此以外,椒江凹陷还发育早于43 Ma及晚于23.3 Ma的岩浆侵入体,这与前文所介绍的火山岩的时代分布一致。据此本文将岩浆侵入体的侵入时间划分为早期(温州期及之前,早于43 Ma),中期(平湖期—花港期,43~23.3 Ma),晚期(龙井期及之后,晚于23.3 Ma)3个阶段(表3)。下文分别对早于43 Ma与晚于23.3 Ma的岩浆侵入体作简单解剖。

图10a所示椒江凹陷28号、29号碟形侵入体形

成时间早于43 Ma,二者在垂向上呈叠置的特征。侵入体上部地层形成明显的强制褶皱,强制褶皱顶部呈现显著的局部削截现象,而该不整合界面位于 T_{20} 界面之下,且不整合界面与 T_{20} 界面之间的地层未卷入褶皱变形,呈向背斜两翼超覆的特征,说明这2个侵入体是在 T_{20} 之前侵入的,侵入时间早于43 Ma。但该部位在43~23.3 Ma期间存在岩浆补充,补充的岩浆沿着岩浆通道上涌,在 T_{20} 界面形成了广泛覆盖的玄武岩强反射层。

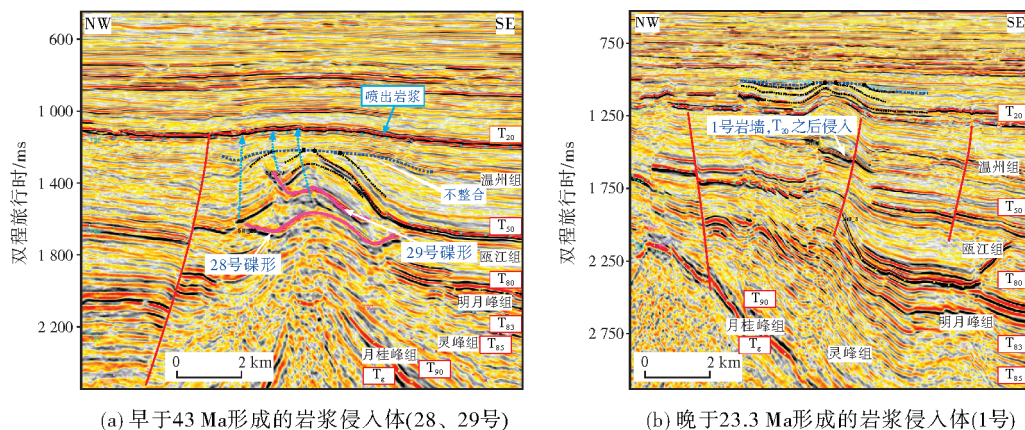


图10 椒江凹陷早于43 Ma及晚于23.3 Ma形成的岩浆侵入体识别(剖面位置见图5b)

Fig. 10 Identification of magma intrusive bodies formed earlier than 43 Ma and later than 23.3 Ma in Jiaojiang Sag (location is shown in Fig.5b)

椒江凹陷1号侵入体是晚于23.3 Ma侵入的典型代表,以岩墙形态存在(图10b)。侵入体的出现引起上部地层形成强制褶皱,强制褶皱顶部发现显著的局部削截现象,而该不整合界面位于 T_{20} 界面之上,上部两侧地层向背斜顶部超覆,说明岩浆侵入时 T_{20} 界面已经形成,并导致包括 T_{20} 在内的上部地层形成强制褶皱;岩浆活动在 T_{20} 界面之上的某个界面停止,因此侵入时间晚于23.3 Ma。

总体来看,平湖期—花港期(43~23.3 Ma)是椒江凹陷岩浆侵入体大规模发育期,此时椒江凹陷正处于区域性的抬升时期;23.3 Ma之后,也存在较多岩浆侵入,部分为早期侵入后,后期存在再次岩浆补充侵入;仅少量侵入体在43 Ma之前形成(表3)。

4.2 岩浆侵入体的形成机制

高分辨率的三维地震资料除了可以清晰识别火山岩与侵入岩体之外,对火山岩和侵入体对应的岩浆通道也有很好的成像效果。岩浆通道在地震剖面上表现为杂乱的弱反射特征,且由于岩浆向上运移对围岩进行破坏,因此通常表现为通道周围沉

积层向上牵引,岩浆通道最终与侵入体或者火山相连接(图6—图8)。本次研究对椒江凹陷三维地震覆盖区的岩浆通道进行了面上追踪(图11)。图11所示仅仅是研究区地震反射清晰可见的岩浆通道,这些通道主要以管状、长条状(裂隙)为主,事实上还存在很多地震反射不可见或不明显的裂隙式通道。

图11 T_g 界面图上的岩浆通道与NW向构造的空间分布特征显示,椒江凹陷岩浆通道极为发育,NW向构造发育区岩浆通道更为密集,表明先存NW向深大断裂的活化对岩浆的输导具有促进作用。此外,岩浆通道在断层下盘翘倾高部位更为发育。从图12的解释剖面上可以看到,一部分岩浆通道源自基底深部,向上进入沉积层形成侵入体或到达古地表(T_{20} 附近)喷发;另一部分侵入体下部与沉积层内部的侵入体相连形成树枝状,或向上连接更浅层的岩浆侵入体或者到达古地表喷发,表明部分侵入体作为岩浆中转站为岩浆喷发提供供给。

研究表明,断裂是岩浆在沉积盆地内部运移的重要通道。椒江凹陷断裂作用极其发育,那么椒江凹陷的岩浆活动是否与这些断裂有着密切的关系呢?

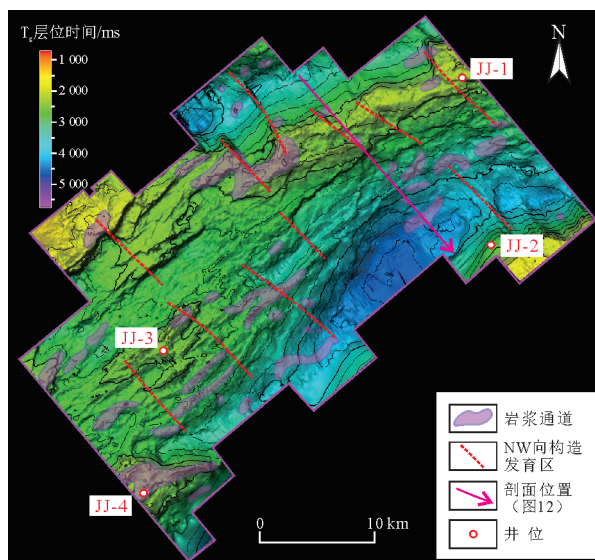


图 11 椒江凹陷三维地震区岩浆通道平面分布及 NW 向构造发育区

Fig. 11 Plane distribution of magmatic channels and NW trending structural development zone in the 3D seismic survey of Jiaojiang Sag

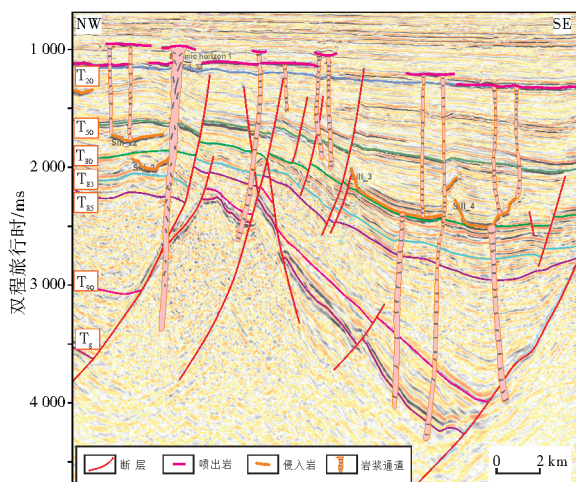


图 12 椒江凹陷三维地震区岩浆通道特征的地震解释剖面 (剖面位置见图 11)

Fig. 12 Seismic interpretation profile showing the characteristics of magmatic channel in the 3D seismic survey of Jiaojiang Sag (location is shown in Fig. 11)

通过对该问题的研究,发现椒江凹陷的岩浆通道与断裂在空间上基本呈现分离的特征,即岩浆在沉积层内部基本不沿着断裂运移。从切过研究区自东向西的剖面(图 12)可以看出,岩浆通道普遍呈 90°直立的特征,而断裂通常为 45°~60°倾斜,岩浆通道常常是自下而上穿过断裂而非沿断层面延伸,岩浆活动并非严格依赖断裂的产状。产生这种现象的原因可能是,椒江凹陷断层活动远早于岩浆活动的时间。换言之,虽然断裂和岩浆通道在空间上可能相邻,但它们的活动时间并不同步。因此,研究

区的断裂和岩浆通道往往表现为分离的状态。通常,断裂是油气运移的重要通道,研究区岩浆通道与断裂呈分离的这一特征在一定程度上很可能对研究区的油气保存是有利的,即后期的岩浆活动并不改变断层的封闭性。

5 讨论

椒江凹陷是东海盆地岩浆活动最强烈、岩浆岩最发育的地区。据上述分析可知,椒江凹陷岩浆最活跃的时间是平湖期—花港期,该时期的东海盆地处于构造变革的关键阶段,沉降中心由西部坳陷带向东迁移至东部坳陷带,椒江、丽水等凹陷强烈抬升剥蚀,西湖凹陷、钓北凹陷则快速沉降^[17-18,32-36]。诱发东海盆地沉降中心向东迁移的主要因素是向西俯冲的太平洋板片在同一时期发生了折返,两者具有密切的耦合关联^[37]。在椒江、丽水凹陷及西湖凹陷西部斜坡带,钻井岩心普遍揭示了古近纪中晚期发育的这套侵入岩与喷发岩组合,包括凝灰岩、安山岩、英安岩和安山角砾岩等岩性,K-Ar 和锆石 U-Pb 测年结果显示其形成时间集中于 45.9~24.7 Ma 之间^[38-39]。这些火山岩和侵入岩即是在此弧后伸展背景下沿地壳薄弱或破碎带向上涌入椒江凹陷。岩浆活动在时间上晚于椒江凹陷断陷期断层的主要发育时间,因此断层并未成为岩浆向上侵入或喷发的优势通道;在地震剖面上,岩浆通道常常是与断层斜交而并非沿断层面运移(图 12)。至于北西向先存构造是否决定了岩浆的侵入位置和层系,还有待进一步的研究证实:其一是北西向构造的属性、形成时间及其在地震资料中的识别尚无定论;其二是虽然发现了北西向先存构造与岩浆侵入岩的空间分布有重合,但在地震剖面中并未见到岩浆沿此类构造活动的明确证据。总之,现有的证据更倾向于支持岩浆上涌与断层无直接的耦合关系。

椒江凹陷岩浆岩的上述特征对指导盆地的油气勘探具有重要意义。首先,火山岩分布区集中于凹陷中东部,一般认为对油气的保存不利,因此在优选潜力目标时应规避火山岩的影响。其次,火山喷发和岩浆侵入的时间主要集中于裂后期盆地隆升剥蚀阶段,晚于烃源岩油气生成高峰期,对早期油气藏的破坏风险较高。最后,岩盆侵入体及伴生的强制背斜构造形态和规模优越,是潜在的高价值勘探目标。

本文基于高精度三维地震和大量钻井资料的

联合使用,对岩浆的分布和活动时间有了相当可靠的制约。但由于缺少深部与浅层资料的对比研究,目前对椒江凹陷岩浆岩作用的成因机制以及断陷盆地裂后期岩浆的活动特点仍缺少系统认识。因此今后的研究方向至少包括以下几个方面:

(1)加强对火山岩和岩浆侵入体年代学、地球化学和单体同位素的分析研究,明确岩浆来源及岩浆活动期盆地的大地构造环境。在具体实施过程中,可以系统选择不同层位和不同类型岩浆岩进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄、全岩地球化学和Sr-Nd同位素等分析。

(2)加强岩浆上涌通道与断层的耦合关联分析,对确定岩浆的溢出、侵位机制具有重要意义。虽然本文认为岩浆的活动主要与北西向先存断裂有关,与晚期北东向断层无关,但岩浆侵入体的平面分布又呈北东走向,与北东向控洼断层的走向一致,这些矛盾显然需要更进一步的研究。

(3)加强岩浆岩对盆地油气成藏影响的研究。虽然岩浆侵入体及火山岩的出现通常被认为是不利因素,特别是这类成藏期后的岩浆活动,但是岩浆活动预示着烃源岩可能存在二次加热生烃的可能,这对椒江凹陷而言可能属于有利因素;其次是岩浆侵位形成了大量的强制背斜,它们数量众多、形态完整、规模较大,如果能有合适的油气运移通道,其勘探潜力是巨大的。在澳大利亚西北陆架Exmouth盆地,Investigator-1井于侵入岩上部强制背斜内揭示到了良好的气测显示^[40];在泰国武里南盆地也在强制背斜顶部钻遇良好的油层^[41]。这些案例证实了由岩浆侵入诱发的强制背斜可能属于油气勘探的新领域。对于椒江凹陷及丽水凹陷而言,除了断陷期发育的断背斜、断块及岩性圈闭外,中浅层发育的众多强制背斜也是未来油气勘探的一个重要方向。

(4)加强对椒江凹陷多类型岩浆侵入体的研究,无疑对认识裂后期岩浆作用及岩浆侵位具有重要理论价值,甚至成为全球的研究样板。

6 结 论

(1)椒江凹陷岩浆作用主要包括喷发相和侵入相2种类型,其中喷发相可见明显的岩浆通道、火山口和熔岩流等组构;侵入相则包括了岩盆、岩床和岩墙等多种类型,它们形态典型但规模相差大,其中岩盆是数量最多的一种类型。

(2)基于同位素定年、与上下地层接触关系等

约束条件,认为椒江凹陷岩浆的主要活动时间是平湖期—花港期凹陷抬升阶段(43~23.3 Ma),前平湖期(早于43 Ma)和花港期之后(晚于23.3 Ma)的岩浆活动较弱,这些岩浆活动的产生与西太平洋俯冲板片折返诱发的弧后伸展相关。

(3)岩浆侵入通道与凹陷内发育的断层并无明显的耦合关系,在地震剖面上更多的表现为相交或分离状态,因此,断层可能并不是研究区岩浆上涌的通道。

(4)火山盆地和岩浆侵入在椒江凹陷中诱发了众多强制背斜,它们形态规整、规模较大,是未来油气勘探的一个重要领域。

参 考 文 献

- [1] DENG Peng, MEI Lianfu, LIU Jun, et al. Episodic normal faulting and magmatism during the syn-spreading stage of the Baiyun Sag in Pearl River Mouth Basin: response to the multi-phase seafloor spreading of the South China Sea [J]. Marine geophysical research, 2019, 40(1): 33-50.
- [2] LI Gang, MEI Lianfu, PANG Xiong, et al. Magmatism within the northern margin of the South China Sea during the post-rift stage: an overview, and new insights into the geodynamics [J]. Earth-science reviews, 2022, 225: 103917.
- [3] CARTWRIGHT J, HANSEN D M. Magma transport through the crust via interconnected sill complexes [J]. Geology, 2006, 34(11): 929-932.
- [4] PHILLIPS T B, MAGEE C, JACKSON C A L, et al. Determining the three-dimensional geometry of a dike swarm and its impact on later rift geometry using seismic reflection data [J]. Geology, 2018, 46(2): 119-122.
- [5] SUN Qiliang, ALVES T M, ZHAO Minghui, et al. Post-rift magmatism on the northern South China Sea margin [J]. GSA bulletin, 2020, 132(11/12): 2382-2396.
- [6] SUN Qiliang, ALVES T M, WU Shiguo, et al. Early miocene magmatism in the Baiyun Sag (South China sea): a view to the origin of intense post-rift magmatism [J]. Gondwana research, 2023, 120: 127-144.
- [7] CUKUR D, HOROZAL S, KIM D C, et al. The distribution and characteristics of the igneous complexes in the northern East China Sea Shelf Basin and their implications for hydrocarbon potential [J]. Marine geophysical researches, 2010, 31(4): 299-313.
- [8] GUO Rui, ZHANG Gongcheng, ZHANG Jinwei, et al. Fingering intrusion of shallow saucer-shaped igneous sills: insights from the Jiaojiao Sag, East China Sea [J]. Acta geologica sinica, 2013, 87(5): 1306-1318.
- [9] HAN H C, LEE Y S, HWANG J S, et al. Geophysical characteristics of the Hupijiao rise and their implication to Miocene volcanism in the northeastern part of the East China Sea [J]. Marine geology, 2015, 363: 134-145.
- [10] YAO Zewei, LI Chunfeng, HE Guangyu, et al. Cenozoic sill intrusion in the central and southern East China Sea Shelf Basin [J]. Marine and petroleum geology, 2020, 119: 104465.

- [11] 牛杏, 何云龙, 庄新国. 东海盆地丽水凹陷 CO₂ 分布特征及成藏主控因素[J]. 地球科学, 2021, 46(10): 3549–3559.
NIU Xing, HE Yunlong, ZHUANG Xinguo. Distribution and major controlling factors of CO₂ reservoirs in Lishui Sag, East China Sea Basin[J]. Earth science, 2021, 46(10): 3549–3559.
- [12] 马清. 东海盆地椒江凹陷火成岩发育特征及其对油气成藏的影响[J]. 录井工程, 2023, 34(2): 95–102.
MA Qing. Development characteristics of igneous rocks and their influence on hydrocarbon accumulation in Jiaojiang Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Mud logging engineering, 2023, 34(2): 95–102.
- [13] 杨传胜, 李刚, 杨长清, 等. 东海陆架盆地及其邻域岩浆岩时空分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(3): 125–133.
YANG Chuansheng, LI Gang, YANG Changqing, et al. Temporal and spatial distribution of the igneous rocks in the East China Sea Shelf Basin and its adjacent regions[J]. Marine geology & Quaternary geology, 2012, 32(3): 125–133.
- [14] ZHANG Ming, ZHANG Jinliang, XU Fa, et al. Paleocene sequence stratigraphy and depositional systems in the Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Marine and petroleum geology, 2015, 59: 390–405.
- [15] ZHU Weilin, ZHONG Kai, FU Xiaowei, et al. The formation and evolution of the East China Sea Shelf Basin: a new view [J]. Earth-science reviews, 2019, 190: 89–111.
- [16] ZHU Zhenjun, LI Qi, CHEN Hehe, et al. Tectonic-sedimentary evolution in a Palaeocene rifted Lishui Sag, East China Sea Shelf Basin [J]. Marine and petroleum geology, 2024, 160: 106616.
- [17] 杨彩虹, 王英民, 曾广东, 等. 东海陆架盆地西湖凹陷新生代断-拗转换面的厘定[J]. 海相油气地质, 2014, 19(3): 18–26.
YANG Caihong, WANG Yingmin, ZENG Guangdong, et al. Delimitation of Cenozoic rift-depression transitional unconformity in Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin [J]. Marine origin petroleum geology, 2014, 19(3): 18–26.
- [18] 刘金水, 许怀智, 蒋一鸣, 等. 东海盆地中、新生代盆架结构与构造演化[J]. 地质学报, 2020, 94(3): 675–691.
LIU Jinshui, XU Huaizhi, JIANG Yiming, et al. Mesozoic and Cenozoic basin structure and tectonic evolution in the East China Sea Basin [J]. Acta geologica sinica, 2020, 94(3): 675–691.
- [19] 邹玮, 余一欣, 刘金水, 等. 东海盆地西湖凹陷中央反转构造带发育主控因素及宁波背斜形成过程[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 176–185.
ZOU Wei, YU Yixin, LIU Jinshui, et al. Main controlling factors of the central inversional structure belt and the development of Ningbo anticline in Xihu Sag, East China Sea Basin [J]. Acta petrolei sinica, 2021, 42(2): 176–185.
- [20] 李继亮. 台北坳陷西部凹陷带火成岩与气烟窗的识别研究[R]. 上海: 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 1999.
LI Jiliang. Identification of igneous rock and gas smoke window in the western sag belt of Taipei Depression [R]. Shanghai: CNOOC (China) Co., Ltd. Shanghai Branch, 1999.
- [21] MORLEY C K. Early syn-rift igneous dike patterns, northern Kenya Rift (Turkana, Kenya): implications for local and regional stresses, tectonics, and magma-structure interactions [J]. Geosphere, 2020, 16(3): 890–918.
- [22] PONGWAPEE S, WON-IN K, MORLEY C K. Synrift magmatism in a Cenozoic rift basin, from 3D seismic data, Wichianburi Sub-basin, Phetchabun Basin, Thailand: part 1 distribution and timing of intrusions and forced folds [J]. Journal of the Geological Society, 2019, 177(1): 189–210.
- [23] CAO Liu, SUN Qiliang, WANG Jinyi. Post-rift magma plumbing system in the northern Great South Basin, New Zealand [J]. Tectonophysics, 2023, 864: 230030.
- [24] Baidu graph [EB/OL]. (2024-08-14) [2014-08-14]. http://mms2.baidu.com/it/u=3372182793_1217215220&fm=253&app=138&f=JPEG?w=603&h=400.
- [25] REEVES J, MAGEE C, JACKSON C A. Unravelling intrusion-induced forced fold kinematics and ground deformation using 3D seismic reflection data [J]. Volcanica, 2018, 1(1): 1–17.
- [26] KUMAR P C, NIYAZI Y, ERUTEYA O E, et al. Anatomy of intrusion related forced fold in the offshore Otway Basin, SE Australia [J]. Marine and petroleum geology, 2022, 141: 105719.
- [27] JACKSON C A, SCHOFIELD N, GOLENKOV B. Geometry and controls on the development of igneous sill-related forced folds: a 2-D seismic reflection case study from offshore southern Australia [J]. GSA bulletin, 2013, 125(11/12): 1874–1890.
- [28] AGIRREZABALA L M. Syndepositional forced folding and related fluid plumbing above a magmatic laccolith: insights from outcrop (Lower Cretaceous, Basque-Cantabrian Basin, western Pyrenees) [J]. Geological Society of America bulletin, 2015, 127(7/8): 982–1000.
- [29] MONTANARI D, BONINI M, CORTI G, et al. Forced folding above shallow magma intrusions: insights on supercritical fluid flow from analogue modelling [J]. Journal of volcanology and geothermal research, 2017, 345: 67–80.
- [30] OMOSANYA K O, JOHANSEN S E, ERUTEYA O E, et al. Forced folding and complex overburden deformation associated with magmatic intrusion in the Vring Basin, offshore Norway [J]. Tectonophysics, 2017, 706/707: 14–34.
- [31] MCHARG S, ELDERS C, CUNNEEN J. Extensional fault-related folding of the North West Shelf, Western Australia [J]. AAPG bulletin, 2020, 104(4): 913–938.
- [32] 孙肇才. 从东海石油地质重要进展看西太平洋大陆边缘新生代盆地的构造演化: 一种海沟向洋后退的残余弧后盆地演化模式[J]. 海相油气地质, 2004, 9(1): 1–17.
SUN Zhaocai. Progress of petroleum geology research for the East China Sea and on tectonic evolution of Cenozoic basins in the continental margins along the West Pacific Ocean: an evolutionary model of oceanwards-receding residual rear-arc basins [J]. Marine origin petroleum geology, 2004, 9(1): 1–17.
- [33] 赵志刚, 王鹏, 祁鹏, 等. 东海盆地形成的区域地质背景与构造演化特征[J]. 地球科学, 2016, 41(3): 546–554.
ZHAO Zhigang, WANG Peng, QI Peng, et al. Regional background and tectonic evolution of East China Sea Basin [J]. Earth science, 2016, 41(3): 546–554.
- [34] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(上)[J]. 海洋石油, 2004, 24(4): 6–14.

- ZHAO Jinhai. The forming factors and evolvement of the Mesozoic and Cenozoic basin in the East China Sea[J]. Offshore oil, 2004, 24(4): 6–14.
- [35] 赵金海. 东海中、新生代盆地成因机制和演化(下)[J]. 海洋石油, 2005, 25(1): 1–10.
- ZHAO Jinhai. The forming factors and evolvement of the Mesozoic and Cenozoic basin in the East China Sea[J]. Offshore oil, 2005, 25(1): 1–10.
- [36] 葛和平, 高顺莉, 周平, 等. 东海丽水凹陷断陷结构特征及其油气地质意义[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(11): 1025–1035.
- GE Heping, GAO Shunli, ZHOU Ping, et al. Fault structural characteristics and its petroleum geological significance of Lishui Sag in Donghai Basin [J]. Advances in geosciences, 2019, 9(11): 1025–1035.
- [37] 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中新代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 249–267.
- SUO Yanhui, LI Sanzhong, CAO Xianzhi, et al. Mesozoic–Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate [J]. Earth science frontiers, 2017, 24(4): 249–267.
- [38] 纪友亮, 周勇. 西湖凹陷西部斜坡带前平湖组地层及沉积特征研究[R]. 上海: 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 2018.
- JI Youliang, ZHOU Yong. Study on the stratigraphic and sedimentary characteristics of Qianpinghu Formation in the western slope zone of Xihu Depression [R]. Shanghai: CNOOC (China) Co., Ltd. Shanghai Branch, 2018.
- [39] 刘彬, 唐友军. 火成岩 U–Pb 测年[R]. 上海: 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 2018.
- LIU Bin, TANG Youjun. U–Pb dating of igneous rocks [R]. Shanghai: CNOOC (China) Co., Ltd. Shanghai Branch, 1999.
- [40] HOLFORD S P, SCHOFIELD N, JACKSON C A L, et al. Impacts of igneous intrusions on source reservoir potential in prospective sedimentary basins along the western Australian continental margin [C]. Perth, WA, 18–21 August 2013, West Australian Basins Symposium 2013.
- [41] MAGEE C, JACKSON C A L, HARDMAN J P, et al. Decoding sill emplacement and forced fold growth in the Exmouth Sub-basin, offshore northwest Australia: implications for hydrocarbon exploration [J]. Interpretation, 2017, 5(3): SK11–SK22.

编辑:黄革萍

Types, activity periods, and petroleum geological significance of post-rift magmatism in Jiaojiang Sag, East China Sea Basin

HE Xinjian¹, QIN Jun¹, YE Qing², ZHANG Peng^{3,4}, MEI Lianfu², FENG Zhenming¹

1. Shanghai Branch of CNOOC Ltd; 2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences, Wuhan), Ministry of Education; 3. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing; 4. Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources (China University of Geosciences, Beijing), Ministry of Education

Abstract: Post-rift magma is widely distributed in Jiaojiang Sag, East China Sea Basin. However, the type, spatial distribution and formation period of magmatism have not been systematically studied, which seriously limits the oil and gas exploration and deployment in the basin. Based on the newly acquired high-precision 3D seismic data, drilling data, this paper identifies and finely describes the magma in the post-rift period, and determines the development regulation of magmatism and the control effects on oil and gas accumulation in Jiaojiang Sag. The results show that the volcanic rocks are mainly distributed in the central and eastern parts of Jiaojiang Sag, with overflow facies as the main type. They are developed along the T_{20} interface and up and down, but more developed along the T_{20} interface. There are three types of occurrences of magma intrusion, including saucer, sill, and dike, with saucer being the main occurrence. The emplacement of magma intrusions in the Jiaojiang Sag mainly include three stages: before the Wenzhou stage (>43 Ma), during the Pinghu–Huagang stage (43–23.3 Ma), during and after Longjing stage (<23.3 Ma), and the Pinghu–Huagang stage is the most important period for magma intrusion. The distribution of magma intrusion channels in the study area are related to the northwest striking basement hidden faults, but separated from the Cenozoic faults and have no symbiotic relationship between them. It is traditionally suggested that the magmatism in the post-rift stage may cause damage or alteration to early oil and gas reservoirs, therefore, when selecting potential targets, efforts should be made to avoid the influence of magmatic activity as much as possible. On the other hand, magma intrusion has formed a large number of forced anticlines, and their formation time is later than the peak period of oil and gas generation, which belongs to a good potential trap type. Therefore, these forced anticlines in the magma-rich activity area within Jiaojiang Sag are still worth exploring.

Key words: volcanic activity; magma intrusion; associated structures; post-rift stage; Jiaojiang Sag; East China Sea Basin

HE Xinjian, First author: MSc, Engineer, mainly engaged in comprehensive research on oil and gas geology. Add: No. 388 Tongxie Rd., Changning District, Shanghai 200335, China. E-mail: hexj9@cnooc.com.cn

YE Qing, Corresponding author: PhD, Associate Professor, mainly engaged in basin structure analysis and teaching work. Add: No. 388 Lumo Rd., Hongshan District, Wuhan, Hubei 430074, China. E-mail: qingye@cug.edu.cn