

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020053001

南海中央海盆之东部次海盆后扩张期地层特征与影响因素

邱燕¹, 杜文波¹, 黄文凯¹, 王英民², 聂鑫¹

1. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广州 510760

2. 浙江大学海洋学院, 舟山 316000

摘要:海底扩张形成的边缘海盆构造演化可划分为前扩张期、同扩张期与后扩张期等阶段。南海中央海盆巨厚的沉积地层大部分是扩张结束之后形成的,尤以东部次海盆地层厚度为最大。因受到不同因素的影响,在该次海盆不同的区域后扩张期发育的地层特征差别较大。这些现象反映海底扩张结束之后所发育的厚层地层中蕴含了大量南海构造演化的信息,因此深入分析该次海盆后扩张期的地层特征与影响因素是南海构造演化研究中不容忽视的环节。利用若干大洋钻孔年代地层资料,在过井剖面上进行合成地震记录标定、划分层序地层并确定其年代属性,并以此为依据分析讨论了本区的地层特征和相关的影响因素。结果表明,东部次海盆北部持续均衡的基底沉降和充足的陆缘物质形成厚度稳定的地层沉积;东部以微板块向马尼拉海沟俯冲为主要影响因素,使不同年代的地层各具特征;中部和西部岩浆活动是主要的影响因素,形成以火山碎屑物质为主的地层沉积;南部因当时的陆坡沉积环境和浊流活动的影响形成具有沉积物波特征的地层沉积。

关键词:后扩张期;地层特征;影响因素;合成地震记录与过井剖面;东部次海盆;南海中央海盆

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

Stratigraphic features and controlling factors in the eastern Sub-basin of the Central Basin, South China Sea during the post-spreading period

QIU Yan¹, DU Wenbo¹, HUANG Wenkai¹, WANG Yingmin², NIE Xin¹

1. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

2. Ocean College of Zhejiang University, Zhoushan 316000, China

Abstract: Driven by sea-floor spreading, the tectonic evolution of a marginal basin could be divided into three stages, namely the pre-spreading, spreading and post-spreading stages. Most of the thick deposits developed in the Central basin of the South China Sea, especially the thickest in the eastern Sub-basin was deposited in the post-spreading stage. Various factors were active in different parts of the eastern Sub-basin, resulting in a great variety of post-spreading stratigraphic features. A great amount of information about the formation and evolution of the South China Sea was preserved in the thick sediments. Therefore, it is important to study the stratigraphic features in the eastern Sub-basin formed during the post-spreading stage. According to the age data from some ODP and IODP drilling holes, the synthetic seismic records passing through the wells were calibrated and then the sequence stratigraphy of the region was established and dated. Upon the basis, we discussed in this paper the characteristics of the strata and related factors. The result shows that deposition of the sediments with stable thickness was mainly caused by stable basement subsidence with substantial terrigenous sediments input from the north, and the micro-plate subducting toward Manila trench was the main influence factor which gave rise to the characters of the strata in different age in the east. The sediments containing certain amount of volcanic debris was deposited in the west and middle part owing to the frequent magmatic activities. And in the south of the basin, turbidite sediment waves occurred due to the control of slope environment.

Key words: post-spreading period; strata characteristics; influence factor; synthetic seismic record and the multi-seismic profile passing through wells; the eastern Sub-basin; the Central Basin in the South China Sea

资助项目: 国家自然科学基金“南海的破裂不整合与各次海盆的海底初始扩张年代”(41572083)

作者简介: 邱燕(1956—), 女, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为石油地质和海洋地质, E-mail: zqiuyan60@163.com

收稿日期: 2020-05-30; 改回日期: 2020-06-07. 周立君编辑

1 地质背景

南海北依中国大陆南缘,东邻菲律宾岛弧,西邻印支半岛,南接加里曼丹岛(图 1),平面形态呈不规则菱形,长轴方向为 NE-SW,长约 3 100 km,短轴方向为 NW-SE,宽约 1 200 km,总面积达 $350\times 10^4\text{ km}^2$,是西太平洋大型边缘海之一。南海海盆地势从周边向中央倾斜,具有洋壳性质的中央海盆位于中部,地壳厚度 6~8 km,呈 NE-SW 展布。根据中央海盆的构造特征,又可进一步划分为西北次海盆、东部次海盆和西南次海盆,以东部次海盆面积为最大。东部次海盆呈不规则长方形,长轴方向为 S-N 向,南北距离大于 1 500 km,东西宽大约 500 km (图 1)。其北部边缘均与南海北部陆坡坡脚相接壤,南部边缘连接南沙群岛,东缘被马尼拉海沟所限,西界与西北次海盆、中沙地块和西南次海盆相

接壤(图 1)。

南海因其特殊的大地构造位置和复杂的演化过程,一直被认为是研究边缘海构造演化的天然实验室。自 20 世纪 70 年代初、尤其是 80 年代以来,南海吸引了许多中、外专家学者对其进行调查研究,诸多学者认为南海中央海盆是新生代海底扩张形成的洋壳海盆,并对海盆的扩张进行了广泛的研究,提出不少有关南海成因演化的模式^[1-12]。

扩张海盆的构造演化一般划分为前扩张期(裂谷期)、同扩张期(漂移期)、后扩张期(海底扩张结束之后的所有活动)等阶段^[13-15]。但是多年来讨论南海形成演化时,绝大部分学者都注重于前扩张期与同扩张期的分析,对后扩张期在海盆发生的各种地质作用的研究就颇为单调,一般都是在详细分析研究了前两个阶段之后带上一笔,提出海盆进入扩张结束之后热沉降稳定发育阶段等。不可否认,后扩张期主要是海盆的热沉降阶段,一般会认为其构

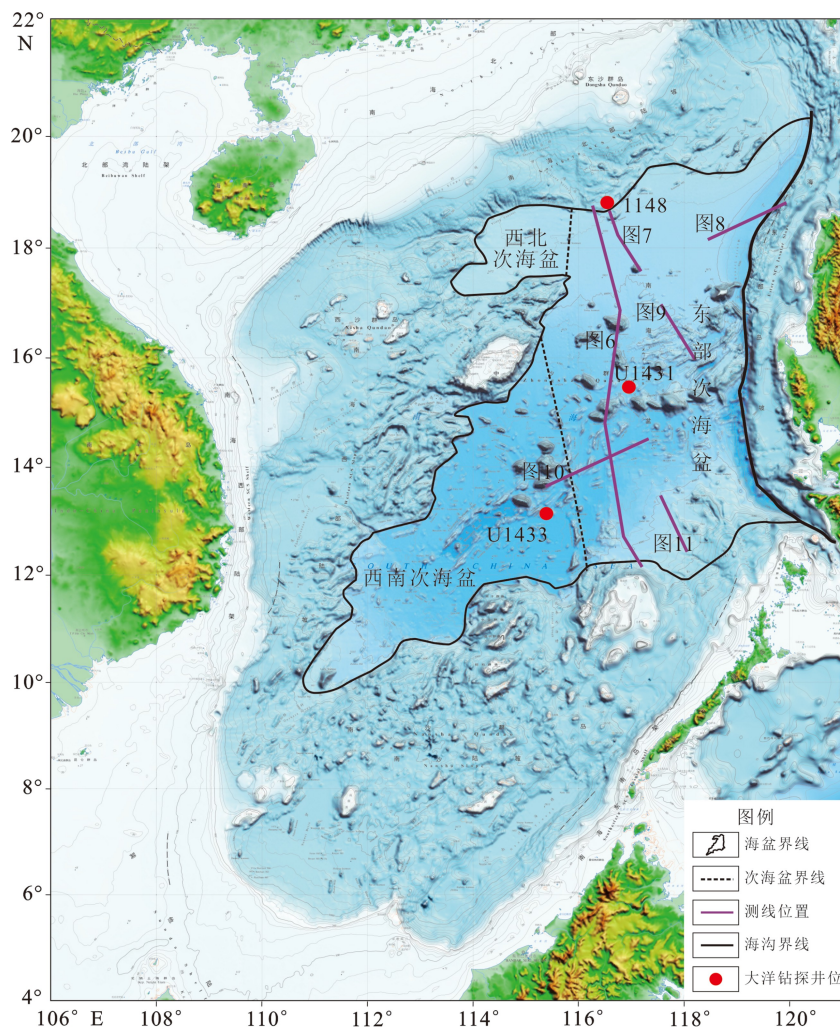


图 1 南海地形特征和次海盆划分以及大洋钻探井位

Fig.1 Topography and the division of the Sub-basins of the Central Basin in the South China Sea and the locations of the ODP and IODP wells

造演化以及地层特征的变化比较简单,迄今为止,除了南海大洋钻探航次对柱状岩心样品进行专门的分析之外^[16],尚无有关南海东部次海盆扩张结束之后地层特征的研究成果问世,更谈不上分析解释其影响因素了。当然对南海陆缘沉积盆地构造热沉降的地质构造特征的研究成果还是比较多的,不过大多都是3个阶段综合讨论^[17-19]。

与太平洋、大西洋等大洋海盆相比,南海边缘海扩张时间比较短暂,仅有15~17 Ma^[20-24],但是中央海盆洋壳基底之上的沉积层厚度却十分巨大,一般大于1000 m,有的可厚达2000 m。经分析绝大部分沉积层都是后扩张期形成的^[25-27],这就暗示海盆的沉积层中蕴含了大量南海构造演化的信息。何况在这3个次海盆当中,恰好又是东部次海盆的沉积层最厚,地层特征最为复杂,因此,有必要对该次海盆后扩张期的地层特征作深入分析。另一方面,有学者甚至提出威尔逊创立的板块构造旋回的5个主要阶段在南海都能发现踪迹。实事求是地说,目前为止还没有在南海完全证实有这些构造发展阶段,但是至少海底扩张的残余洋中脊与洋壳板块向马尼拉海沟之下俯冲等特征在南海可以清楚地识别,况且马尼拉海沟的俯冲活动至今没有停止^[25-26],这无疑对东部次海盆后扩张期的地层特征产生一定的影响。可见分析东部次海盆后扩张期的地层特征与影响因素具有重要意义。本文深入剖析了南海东部次海盆后扩张期的地层特征,进而分析相关的影响因素,为南海形成演化的系统研究补上重要的一环。

2 数据与方法

2.1 数据资料

本文使用2009—2014年在南海东部次海盆采集的近6000 km的多道地震叠前时间偏移剖面及中、外科学家近十多年来在南海北部陆坡和中央海盆的ODP和IODP航次钻孔资料(图1)。

多道地震资料采集海上施工由广州海洋地质调查局地球物理勘探船“探宝号”承担,采集参数为:电缆长度6 km,接受道数480,道间距12.5 m,覆盖次数60次,炮间距50 m,最小偏移距125 m,采样率2 ms,记录长度12 s,震源容量5600Cu.in,工作压力6400P.S.I,震源沉放深度6 m,电缆沉放深度8 m,测网密度为40 km×80 km。

地震资料处理流程为预处理、叠前去噪、SRME

压制多次波、Radon变换压制多次波技术、绕射多次波压制、振幅一致性处理、反褶积、速度分析、叠前偏移归位处理等。

本文使用的南海ODP和IODP航次钻孔资料数据是精确的,而地震剖面数据无论是海上采集参数设置和施工调查,还是地震剖面处理方法,均采用目前世界上最为先进的技术方法,所获得的多道地震剖面的反射同相轴清晰、可靠,其质量和精度完全满足本研究的需要。

2.2 分析方法

分析方法包括大洋钻孔年代地层资料合成地震记录标定和多道地震叠前时间偏移剖面的解释。需掌握扩张海盆沉积层序发育特点,以便达到正确解释和分析层序地层特征的目的。

2.2.1 扩张海盆沉积层序发育特点与剖面解释

与一般陆缘沉积盆地的基底特征不同,洋壳海盆的沉积基底是因海底扩张而形成的。海盆扩张期逐渐形成的洋盆基底是一个穿时界面,随着海盆的扩张,沉积地层从洋盆两侧向中间超覆,往海盆中心方向上超在洋壳基底之上,导致基底之上沉积物年龄向洋中脊方向逐渐变新,故而在地震反射剖面上可形成扩张海盆沉积层独特的地震响应,即扩张期形成上超层序,后扩张期形成加积层序,这种现象在沉积速率高的南海东部次海盆更是如此。因此,解释地震剖面时应遵循扩张洋盆之上有两种层序类型的规律,区分上超层序和加积层序,正确追踪各种地震反射界面。

2.2.2 合成地震记录年代地层标定

合成地震记录是反射系数时间序列与子波褶积的结果,将钻井所确定的年代地层界面标定在地震剖面上,是判定各地震界面的地质年代的最有效方法。解释方法为首先利用钻孔资料将已取得的年代地层数据和测井资料在过井地震剖面上进行合成地震记录标定,井震结合划分层序地层并确定其年代属性,进而以这些过井剖面为骨干剖面,追踪解释海盆内的地震反射界面与层序地层,以此为基础分析地层特征及影响因素。

3 东部次海盆层序地层划分与年代属性确定

3.1 大洋钻孔过井剖面合成地震记录年代地层标定

利用在南海实施的1148、U1431、U1433这3个

钻孔数据确定年代地层界面。

3.1.1 大洋钻孔连井对比

1148 钻孔位于南海北部陆坡区, 终孔地层时代为 32 Ma, U1431 和 U1433 两口钻孔位于洋壳海盆区, 均钻穿中中新统后钻遇洋壳玄武岩^[28]。沿革南海北部陆架沉积盆地的层序划分和年代地层界面的代号^[29], 将连井对比的第四系底界、上新统底界、上中新统底界、中中新统底界、下中新统底界自上而下命名为 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 以及上渐新统(出露不全)底界 T_7 , 连井对比结果如图 2 所示。

3.1.2 过井剖面合成地震记录界面标定

在 1148、U1431 和 U1433 钻孔上进行合成地震记录标定。

例如 1148 站位, 合成地震记录标定了 3 个地震界面, 分别是上中新统底界, 双程走时为 4780 ms, 与钻井确定的深度相当吻合; 中中新统底界, 双程走时为 4870 ms, 与钻井确定的深度只有些许差别; 下中新统底界, 双程走时为 4980 ms, 与钻井确定的深度差别不大(图 3)。以这 3 个界面为基础, 根据剖面特征又标定了其他几条地震界面(图 3)。

为了解释 1148 过井剖面的地震反射界面, 通过综合分析合成地震记录标定结果和钻孔资料, 得到如下结果: 第四系仅厚 100 m(图 2), 为一套强振幅

反射波组, 底界 T_2 为强反射界面; 上新统厚 94 m, 以大套弱振幅波组为特征, 与下覆层序的反射特征相差较大, 由此造成较强的波阻抗界面, 形成上新统底界 T_3 界面; 上中新统厚 92 m, 因上、下的岩性区别大, 形成显著的波阻抗差, 由此形成上中新统底界 T_4 强反射界面; 中中新统厚 74 m, 按照合成地震记录的标定确定了中中新统底界 T_5 界面; 下中新统厚 97 m, 本区著名的“双轨反射波”形成下中新统底界 T_6 反射界面(图 4); 上渐新统厚 402 m(未见底), 在地震剖面上 T_7 界面为双相位强振幅连续反射界面, 反射特征明显。需要说明的是 1148 钻孔位于海盆北部的陆坡区, 虽然紧邻东部次海盆, 毕竟属于陆缘区, 不是海底扩张形成的区域, 因此可以解释为 T_7 界面, 往扩张海盆 T_7 界面推测应该大致与海盆基底重合, 故而在该钻孔解释 T_7 界面, 而在海盆中就无此界面了。

同样, 在 U1431 和 U1433 钻孔上(图 2)也按上述步骤做了相应的合成地震记录标定, 追踪解释了这 2 口钻孔过井剖面的地震反射界面。

例如 U1431 站位, 第四系厚 134 m(图 2), 底部岩性与下覆岩性的不同造成很强的波阻抗差, 形成 T_2 界面; 上新统厚 146 m; 底界 T_3 是两套岩性的分界面, 在钻孔附近表现为整一的特点(图 5); 上中新

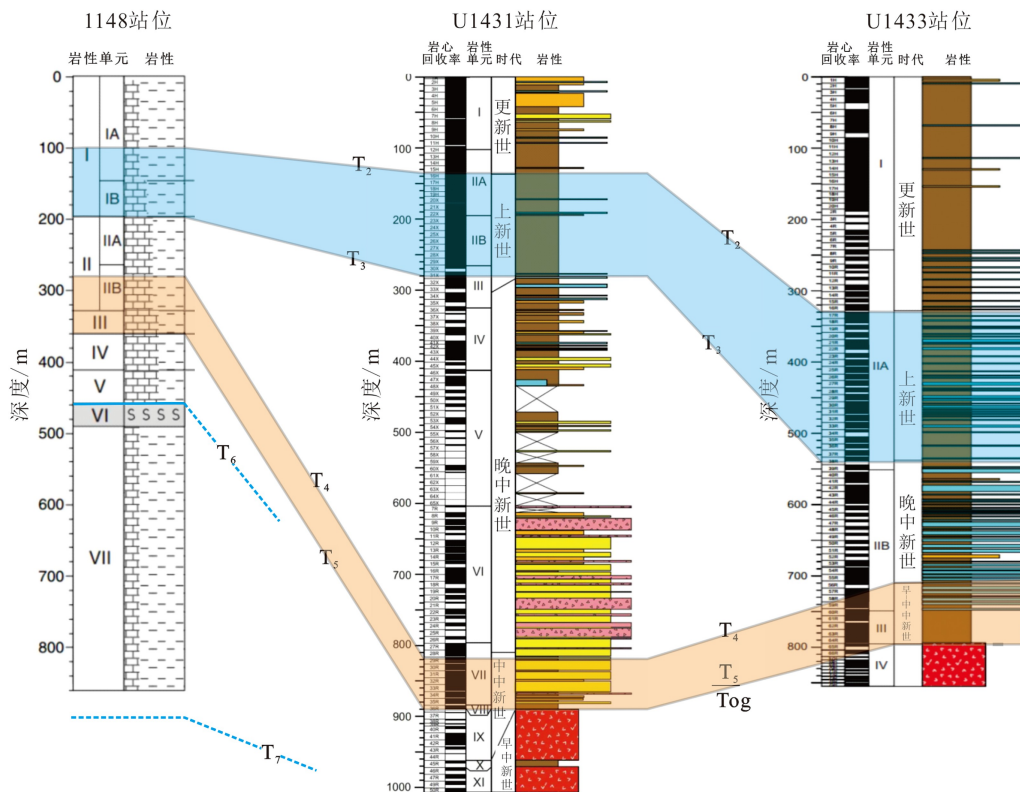


图 2 大洋钻孔 1148-U1431-U1433 连井对比图

Fig.2 Stratigraphic correlation among the wells of 1148-U1431-U1433

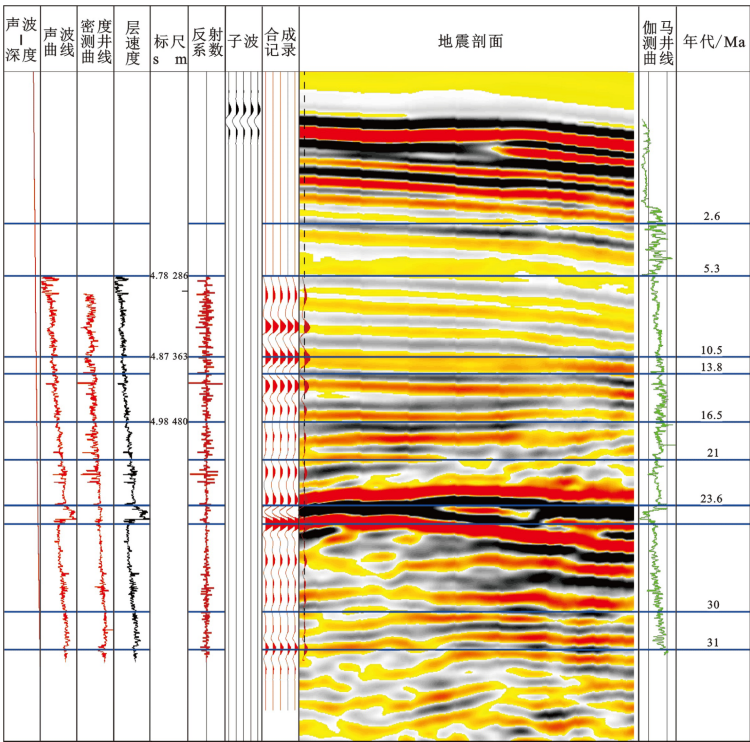


图 3 1148 站位合成地震记录标定
Fig.3 Calibration of the synthetic seismic records of 1148 well

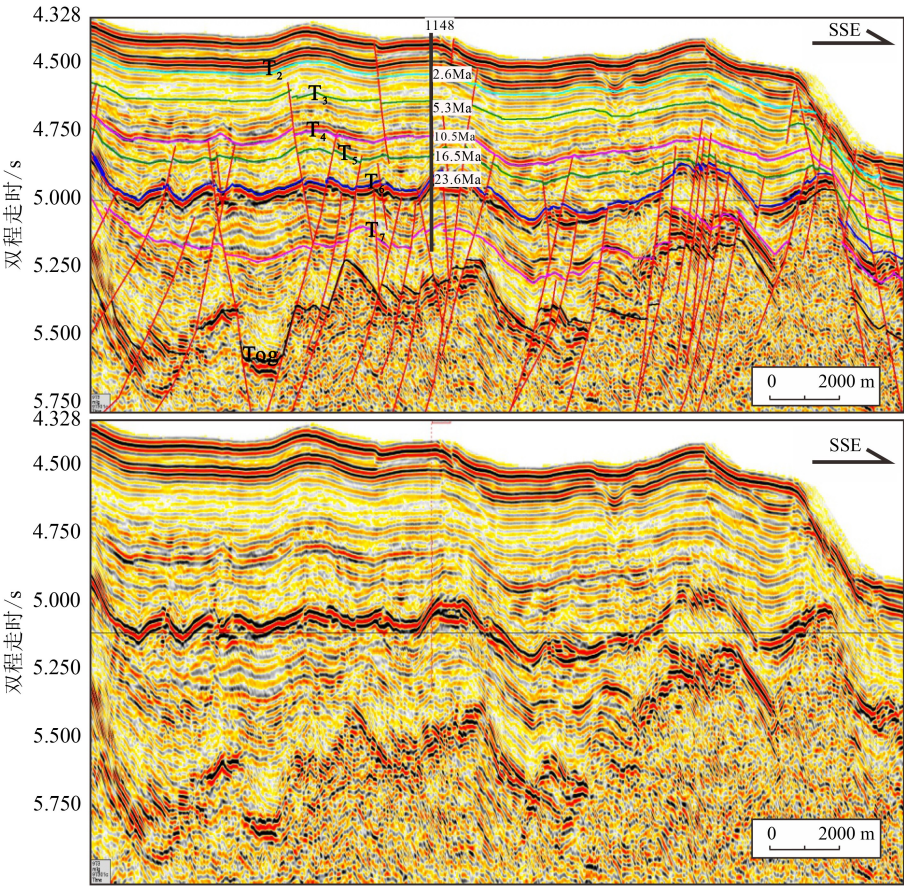


图 4 过 1148 钻孔剖面的地震界面标定
Fig.4 Calibration of seismic boundaries on the seismic profile through 1148 well

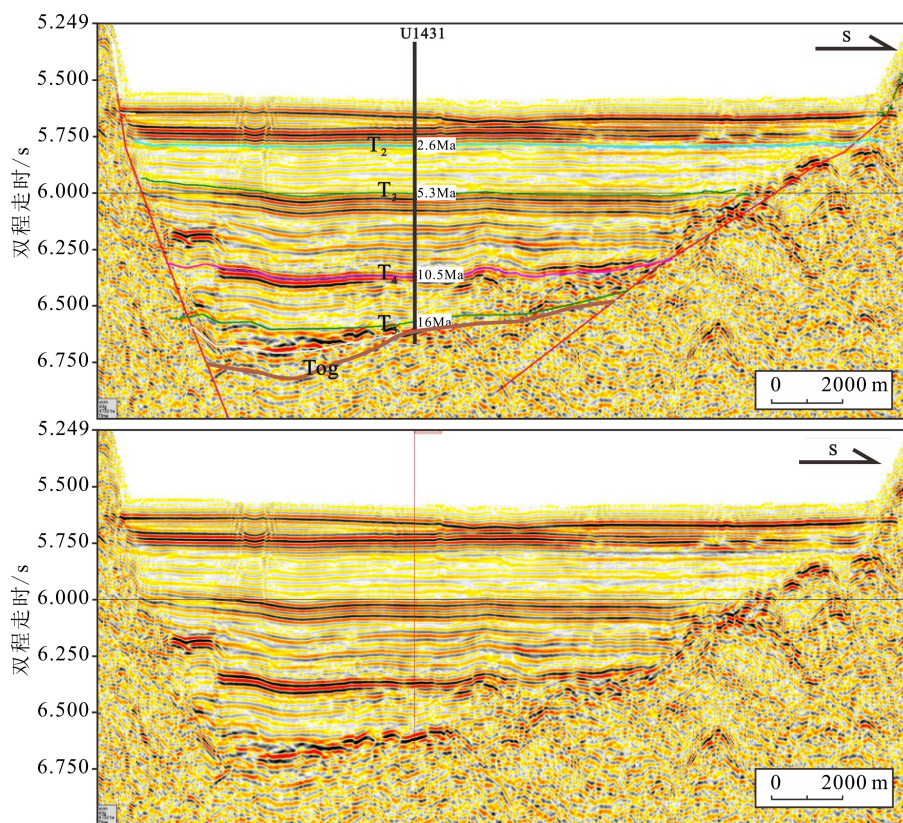


图 5 过 U1431 钻孔剖面的地震界面标定

Fig.5 The calibration of seismic boundaries on the seismic profile passing through U1431 well

统厚 538 m, 因底部岩性变化造成很强的波阻抗差, 形成上中新统底界 T_4 界面; 中中新统厚 62 m, 沉积岩与下覆玄武岩接触面形成中中新统底界 T_5 界面; 玄武岩顶界为 T_{og} 界面(图 2), 在钻孔附近与 T_5 界面重合(图 5)。

3.2 东部次海盆层序地层划分与年代属性的确定

应用上述井、震结合建立的区域等时(地震界面)格架, 以过井剖面为骨干剖面, 根据地震界面的反射标志(超覆、削截、平行、上超、下超)、界面上下不同的波组特征以及地震相特征等, 对东部次海盆数千千米的地震剖面进行了追踪对比与闭合, 解释了全区的地震反射界面和层序地层, 并确定了层序地层的年代属性。

3.2.1 地震反射界面特征

在东部次海盆识别出 6 个地震反射界面(表 1)。根据合成地震记录的标定结果, 确定其地质年代为: T_2 (第四系底界)、 T_3 (上新统底界)、 T_4 (上中新统底界)、 T_5 (中中新统底界)、 T_6 (下中新统底界)和洋壳基底 T_{og} (o: ocean, 意思是穿时的洋壳基底), 以示与 T_g 的区别(表 1)。

图 6 是一条自北而南延伸的长剖面, 由 Nhg-2-4、Nhg-2-5 两条测线组合而成, 指示东部次海盆地

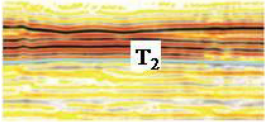
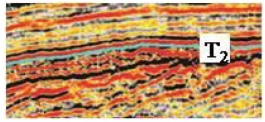
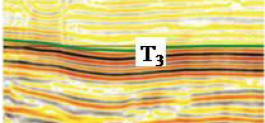
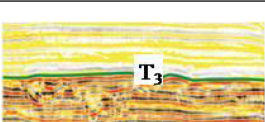
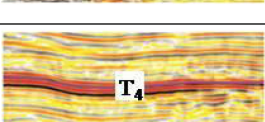
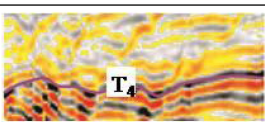
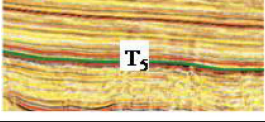
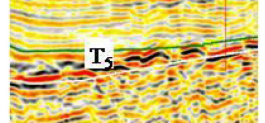
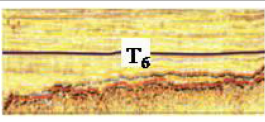
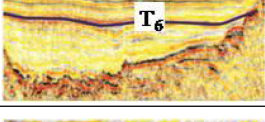
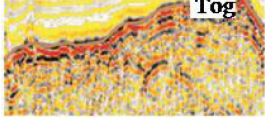
震反射界面的划分。

3.2.2 层序地层划分及其年代属性的确定

在上述地震界面解释的基础上, 以海底反射界面 T_0 为辅助界面, 相应地划分出 7 套地震层序。利用合成记录标定确定了层序的地质年代, 那么地震层序就成为具有年代属性的层序地层(图 6, 表 2)。这 7 套层序地层自上而下分别为 T_0 - T_2 (第四系)、 T_2 - T_3 (上新统)、 T_3 - T_4 (上中新统)、 T_4 - T_5 (中中新统)、 T_5 - T_6 和局部 T_5 - T_{og} (T_6 界面尖灭之后 T_5 界面直接与 T_{og} 相对应的区域, 下中新统)、 T_6 - T_{og} (上渐新统)。

前已述及, 扩张形成的洋壳海盆的沉积基底是穿时的。从地震反射界面解释结果可知, 以 T_5 界面为分水岭, 之上为扩张海盆的加积层序, 之下为扩张海盆的上超层序(自 T_5 界面和 T_6 界面, 都具有从海盆两侧向海盆中部逐渐超覆尖灭在 T_{og} 界面之上的现象), 据此可将海盆的沉积层序分为两个超层序。将 T_0 至 T_5 之间的加积层序划分为超层序 I, 包含 T_0 - T_2 (第四系)、 T_2 - T_3 (上新统)、 T_3 - T_4 (上中新统)、 T_4 - T_5 (中中新统)四套层序; T_5 至 T_{og} 之间的上超层序为超层序 II, 包含 T_5 - T_6 (局部 T_5 - T_{og} , T_6 上超尖灭之后)和 T_6 - T_{og} 两套层序(表 2)。当然, 超层序 II 不是本文讨论的范畴。

表 1 东部次海盆地震界面反射特征
Table 1 Characteristics of seismic reflective boundaries in the eastern Sub-basin

地震界面及年代	分布范围	界面反射特征与层序接触关系	地震测线命名	界线在剖面上的特征
T ₂ 第四系底界	全区分布	中-强振幅高连续双相位反射, 一套强振幅反射层组的底界面, 界面上下整合接触	973-2	
T ₂ 第四系底界	南部局部区域	中-强振幅高连续反射, 一套强振幅连续断续反射层组的顶界面	Nhg-2-5	
T ₃ 上新统底界	全区分布	中-强振幅连续反射, 界面上下整合或假整合接触, 一套中-强振幅高连续层组的顶界面	973-2	
T ₃ 上新统底界	该次海盆北部局部区域	界面之下中-强振幅断续或波状反射, 局部下伏地层遭受削截	zsm400	
T ₄ 上中新统底界	基本上全区分布, 有些区域不易识别该界面	中-强振幅中-高连续双相位反射, 局部中-弱振幅、中-高连续反射, 界面上下整合接触	Nhg-2-4	
T ₄ 上中新统底界	南部局部区域	局部上覆地层沿反射界面上超, 界面之上局部上超接触	Nhg-2-5	
T ₅ 中中新统底界	该次海盆南、北两侧, 海盆中部略有缺失	中-强振幅连续反射, 局部界面之下有削截现象, 不少区域出现无反射现象	zsm640	
T ₅ 中中新统底界	在次海盆中部与基底界面几乎为同一界面	在海盆中部为强反射界面, 上覆地层直接与玄武岩接触, 是沉积层与洋壳玄武岩的分界	973-2	
T ₆ 下中新统底界	该次海盆南、北两侧, 次海盆中部大范围缺失	中-弱振幅、中连续反射, 局部弱振幅、低连续反射, 与上下层序均为整合或假整合接触	Nhg-2-4	
T ₆ 下中新统底界	从该次海盆两侧往中部追踪渐出现上超	局部为弱振幅、中低连续反射, 往海盆中部该界面逐渐超覆尖灭在Tog基底之上	zsm400	
Tog 上渐新统底界至中中新统底界	该次海盆全区分布, 也是洋壳的顶界面	强振幅低频高连续粗糙扭曲的不规则双相位反射, 界面起伏、凹凸不平特征明显	zsm520	
Tog 扩张海盆的沉积基底	在该次海盆南北两侧常见此现象	界面之上可见明显的地层上超现象, 界面经常被断层错断, 多数断层即断面向海盆中部倾斜	Nhg-2-4	

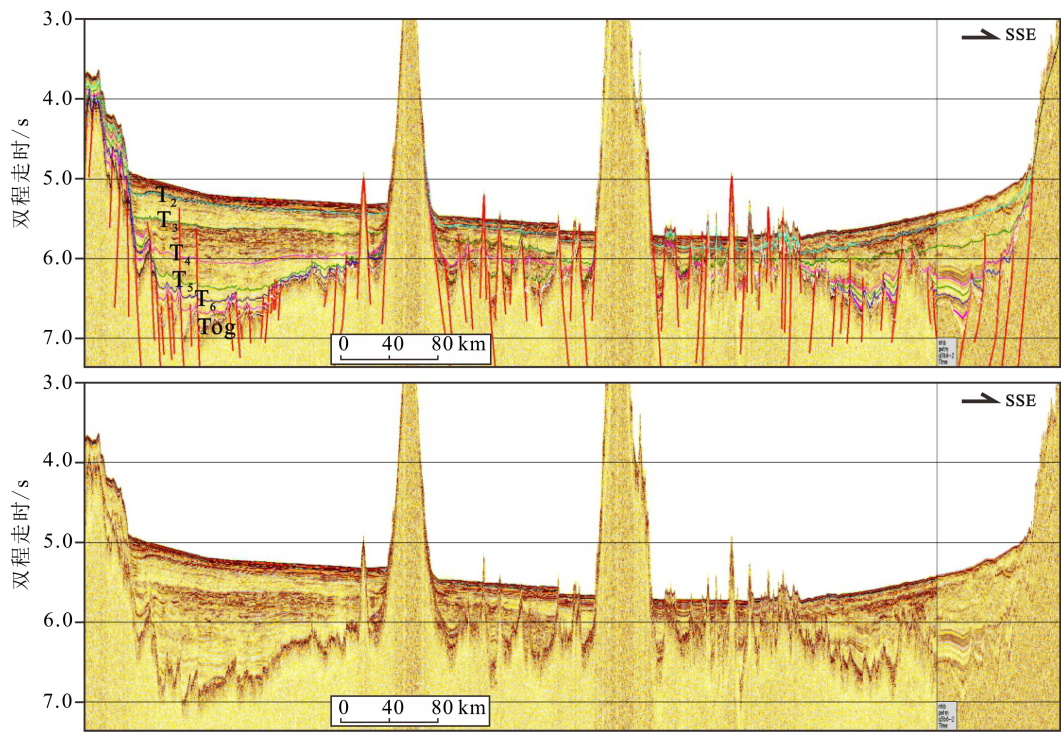


图 6 贯穿东部次海盆剖面地震反射界面与层序地层

Fig.6 The seismic reflectives and sequence stratigraphy on the seismic profile from north to south at the eastern Sub-basin

表 2 东部次海盆地震界面划分和层序地层与年代属性
Table 2 Seismic boundaries and sequence stratigraphy with geological ages in the eastern Sub-basin

地 层				地震反射界面	超层序	层序地层
界	系	统				
	第四系		Q		I	T ₀ -T ₂
新生界	新近系	上新统		N ₂		T ₂ -T ₃
		中	上	N ₁ ³		T ₃ -T ₄
			中	N ₁ ²		T ₄ -T ₅
	新统	下	N ₁ ¹		T ₅ -T ₆ 与 T ₅ -Tog	
		渐新统			II	T ₆ -Tog
古近系	上	E ₃ ²	T ₆ Tog			

4 东部次海盆后扩张期不同区域地层特征与影响因素

在正常情况下,如果没有其他的影响因素,东部次海盆进入后扩张期稳定的热沉降阶段之后,在具有统一的深海盆水动力条件下,沉积层的发育应该还是比较单调的,一般仅有远洋、半远洋物质的沉积,沉积环境也均为深海、半深海相。但事实是,在该次海盆的不同部位,地层特征有很大的差异,这与诸多的影响因素有关。

4.1 北部的地层特征与影响因素

本区域与南海北部陆坡相邻(图 1),后扩张期的地层特征大致相同,尤其是中中新统(层序 T₄-T₅)、上中新统(层序 T₃-T₄)和上新统(层序 T₂-T₃)的地层厚度都相当稳定,均为 800~900 ms 的时间厚度(图 7),第四系(层序 T₀-T₂)的时间厚度全区基本上都为 150 ms,表现为稳定水体环境下形成的地层特征。可见在扩张结束之后该区具有均衡而稳定的较大沉降幅度,同时表明沉积物源比较丰富。推测北部陆坡的陆缘碎屑物质是本区的主要沉积物来源,远洋悬浮物质的比例较小。距本区较近、位于南海北部陆坡的 1148 钻孔,钻遇第四系含生物碳酸盐岩石英及超微化石浅灰色黏土、上新统橄榄绿-灰色和红棕色含超微化石黏土、上中新统橄榄灰色含碳酸盐岩成分较高的黏土层、中中新统红褐色富含超微化石的黏土岩和灰绿色黏土质超微化石软泥等沉积物,这些沉积物是组成本区沉积地层的主要物源。因此,稳定的水体环境、均衡的热沉降和来自北部陆缘充足的物源供应,是北部区域的主要影响因素。

4.2 东部的地层特征与影响因素

本次海盆的最东边是马尼拉海沟(图 1)。与北

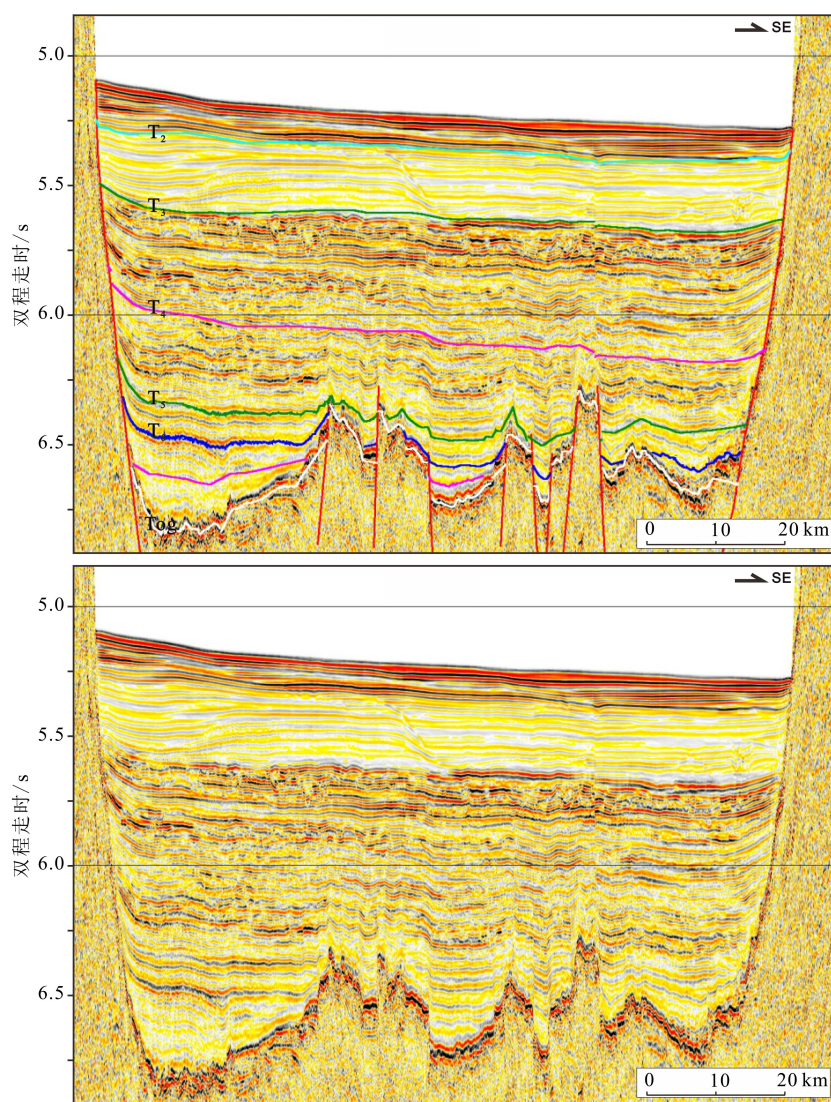


图 7 东部次海盆北部地震反射界面与层序地层

Fig.7 Seismic reflectives and sequence stratigraphy on the seismic profile 1n the north of the eastern Sub-basin

部区域相比,东部的地层特征比较特殊,中中新统和上中新统的地层厚度明显减薄,一般仅有 400 ms 左右的时间厚度(图 8),暗示当时沉积物源发生了变化,来源于北部陆坡的碎屑物质所占比例减少,远洋悬浮物质所占比例加大,导致地层厚度变薄。可是上新统的地层厚度仍然保持 800 ms 的时间厚度,推测此时本区的沉积环境已经发生了变化,比较特殊的是在海盆中心第四系的地层时间厚度仅 150 ms 左右,往海沟方向逐渐增大,在海沟中心增至 1200 ms 左右的时间厚度。本区地层还具有一个显著的特征,就是在马尼拉海沟附近,包括洋壳基底在内,所有的地层产状都向海沟方向倾斜(图 8)。

马尼拉海沟是南海微板块与菲律宾海微板块交互作用的区域^[27]。本区地层特征的变化显然受到南海微板块向马尼拉海沟之下俯冲等构造作用

的影响。证据至少有三:一是第四系(T_0 - T_2)呈明显的楔状外形,越往东边地层越厚,在马尼拉海沟形成巨厚的地层沉积(图 8)。这是南海微板块向马尼拉海沟之下俯冲形成了宽大的“V”型可容空间,而当时物源又非常充足,大量从台湾等地沿海沟搬运而来的物质在此堆积所致。Li 和丁巍伟等^[29-30]认为台湾造山带强烈抬升剥蚀与南海东北部陆坡区大量发育的峡谷-冲沟体系,是马尼拉海沟第四系厚层沉积的物质来源;二是尽管上新统(T_2 - T_3)是本区厚度最大的地层,但是在马尼拉海沟一带厚度变薄程度明显,应该是受到南海微板块向马尼拉海沟之下俯冲的影响。推测该部位上新世的沉积尚未完成就已经到海沟的位置而发生俯冲了,而当时海沟的物质不够充足,因此未能形成第四纪以来的厚层楔状地层沉积,亦进一步说明上新世与第四纪本区物源供给条件不同;三是从海盆到马尼拉海沟,上

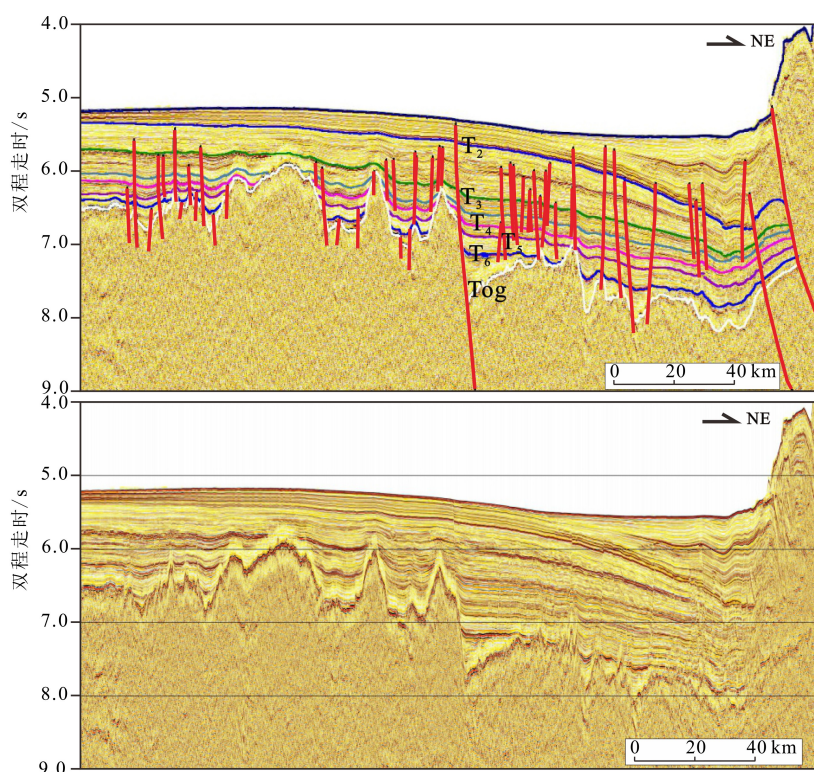


图8 东部次海盆东部地震反射界面与层序地层

Fig.8 Seismic reflectives and sequence stratigraphy on the seismic profile in the east of the eastern Sub-basin

中新统(T_3 - T_4)、中中新统(T_4 - T_5)及包括海盆基底(T_4 -Tog)在内的所有地层,其产状全部朝海沟倾斜。但是需注意包含上中新统在内及其之下的地层,无论在海盆还是海沟的位置,其厚度基本无变化,中中新统时间厚度大致为150 ms,上中新统时间厚度大致为100 ms(图8),与上覆地层的特征完全不同。这是否包含了板块初始俯冲时间的信息,有待今后结合更多的资料加以研究。由此可见,南海微板块向马尼拉海沟的俯冲作用大大影响了本区的地层特征,是主要的影响因素。

4.3 中部的地层特征与影响因素

U1431 钻孔直接揭示了东部次海盆中部的地层岩性特征。该钻孔的柱状岩心揭示:第四系上部深绿灰色厚层泥岩和粉砂质泥岩以及少量泥质粉砂岩夹层,下部深绿灰色厚层泥岩,底界为大套泥岩夹薄砂层;上新统为大套深绿灰色泥岩,岩性比较均一;上中新统上部呈现从泥岩到砂岩的正旋回岩性组合,即自上而下由深绿灰色黏土岩与浅绿灰色超微化石软泥互层过渡到由泥岩、超微化石软泥、粉砂岩组成的互层,下部主要为富含火山碎屑的砂岩和粉砂岩,底部为含砂泥岩夹层的绿黑色火山角砾岩,具有浊积岩的特点;中中新统主要由深绿灰色砂岩、粉砂岩、泥岩和深橄榄褐色黏土岩组成,

底部为含砂泥岩夹层的绿黑色火山角砾岩。显然本区地层的沉积物源主要为远洋悬浮沉积、岩浆活动产生的火山碎屑物质和火山角砾岩等^[28]。从钻孔地层岩性中含不少火山角砾岩等特征分析,扩张结束之后发生的岩浆活动(图6、图9)是本区的主要影响因素。

本区因后扩张期甚至第四纪(层序 T_0 - T_2)以来岩浆活动的干扰,有些部位的地层沉积颇具特点。岩浆岩与沉积层的相互作用,导致地层反射比较杂乱,有些地段后期强烈的岩浆活动甚至将先期沉积的地层整体抬升(图9),使 T_2 、 T_3 和 T_4 界面反射变得复杂,侧向上连续性很差而无法追踪,层序内部的波组特征也不明显(图9),尤其是中中新统(T_4 - T_5)还形成杂乱反射层组,暗示曾受过不同期岩浆作用的影响。

4.4 西部的地层特征与影响因素

东部次海盆西部(图1)以一系列的海山和海丘为界与西南次海盆相邻^[31],这些海山和海丘大部分是海盆后扩张期的岩浆岩活动所形成的(图10)。因此本区的地层特征和影响因素与海盆中部很相似,表现为多期活动的岩浆岩与沉积层相互作用的特征,区别在于本区海底火山更为发育,致使地层分布范围非常局限(图10,剖面左侧)。

在部分海山周围, 因岩浆活动使先期形成的地层被海山体所牵引, 沉积层往海山边缘上超, 原有的沉积特征被火山活动破坏, 火山角砾岩形成独特的地层特征等, 均形成不同的地震相反射。在地震剖面上对其进行详细分析解释, 甚至可以辨别火山活动的具体时间和岩浆活动期次^[32]。

4.5 南部的地层特征与影响因素

次海盆南部虽然也与北部区域一样, 洋盆在后扩张期经历了大而稳定的构造热沉降过程, 但是其沉降幅度却比北部要大得多, 地层显著增厚且不均匀, 越往盆地边缘厚度越大(图 6、图 11), 尤其是各

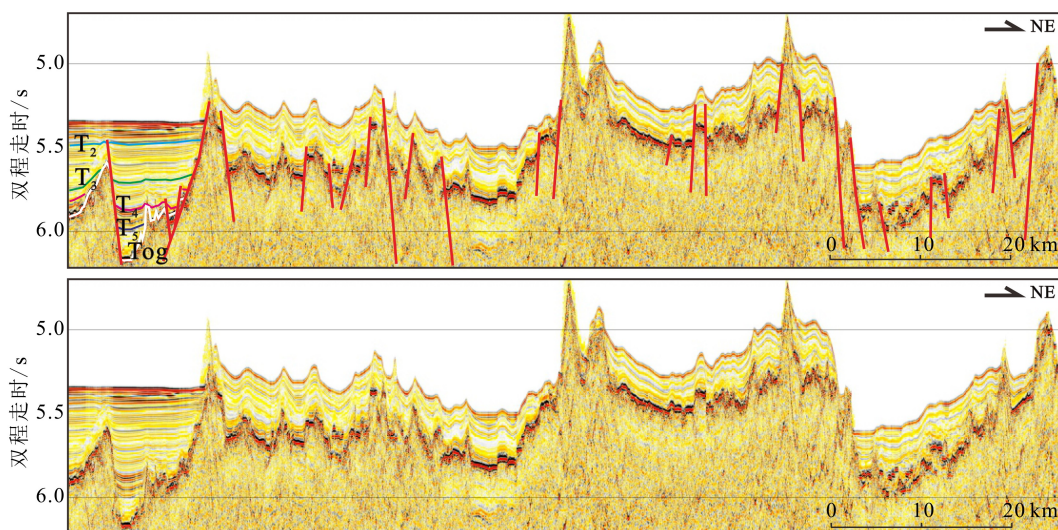


图 9 东部次海盆中部剖面选段, 示岩浆活动所导致的层序地层特征

Fig.9 A seismic section showing the characteristics of sequence stratigraphy by magmatic activity in the centre of the eastern Sub-basin

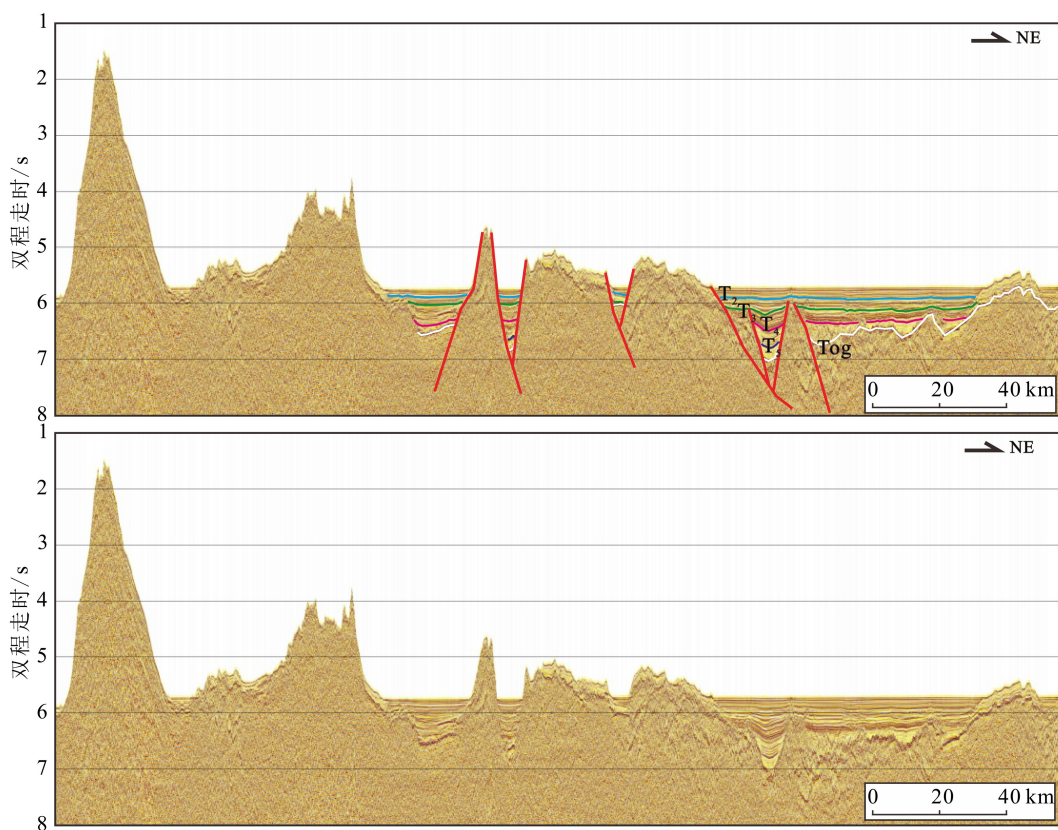


图 10 东部次海盆西部地震反射界面与层序地层

Fig.10 Seismic reflectives and sequence stratigraphy on the seismic profile in the west of the eastern Sub-basin

层组的地震相特征发生了变化,从中中新统至第四系所有地层都具有典型的波状反射(图 11)。通过分析认为,这些波状反射是沉积物波的地震响应。

沉积物波一般发育在陆坡地段,可分为 3 种类型^[33]:①浊流沉积物波,沉积物波形不对称,沉积优先发生在沉积物波的上坡一侧,下坡一翼则整体向上坡迁移,因此又称为前积沉积物波(图 12);②底流沉积物波,沉积物波的两翼基本对称,波峰和波谷长度基本一致,具有明显的垂向加积特征,又称为加积沉积物波;③变形沉积物波,空间上波形变化总体上不具有规律性^[30]。如图 11 所示,本区沉积物波两翼不对称,上坡一翼厚而陡,下坡一翼短而薄,整体波形以向上坡迁移为主要特征,为不对称沉积物波,尤其是第四系(T_0 - T_2)和上新统(T_2 - T_3)的特征与图 12 更为相似,因此判断为浊流沉积物波。仔细分析图 11 还发现,中中新统(T_4 - T_5)和上

中新统(T_3 - T_4)的沉积物波形比较杂乱,推测有重力滑塌沉积掺杂其中,暗示中中新统和上中新统发育时该区的沉积环境与目前的半深海沉积环境有所区别。推测当时本区的水深与陆坡区相似,为 1000~2600 m,而且地形较陡,故而容易形成滑塌沉积。IODP 钻探 349 航次 1431 钻孔在次海盆中部钻遇多层具有浊积岩特征的红色碎屑岩沉积,证实本区曾经发生过浊流活动^[34-35]。显而易见,浊流活动是本区重要的影响因素,沉积环境的变化也是重要的因素之一。

5 结论

在南海中央海盆之东部次海盆区,由于各种影响因素作用于不同的区域,导致后扩张期发育的地层具有不同的特征。

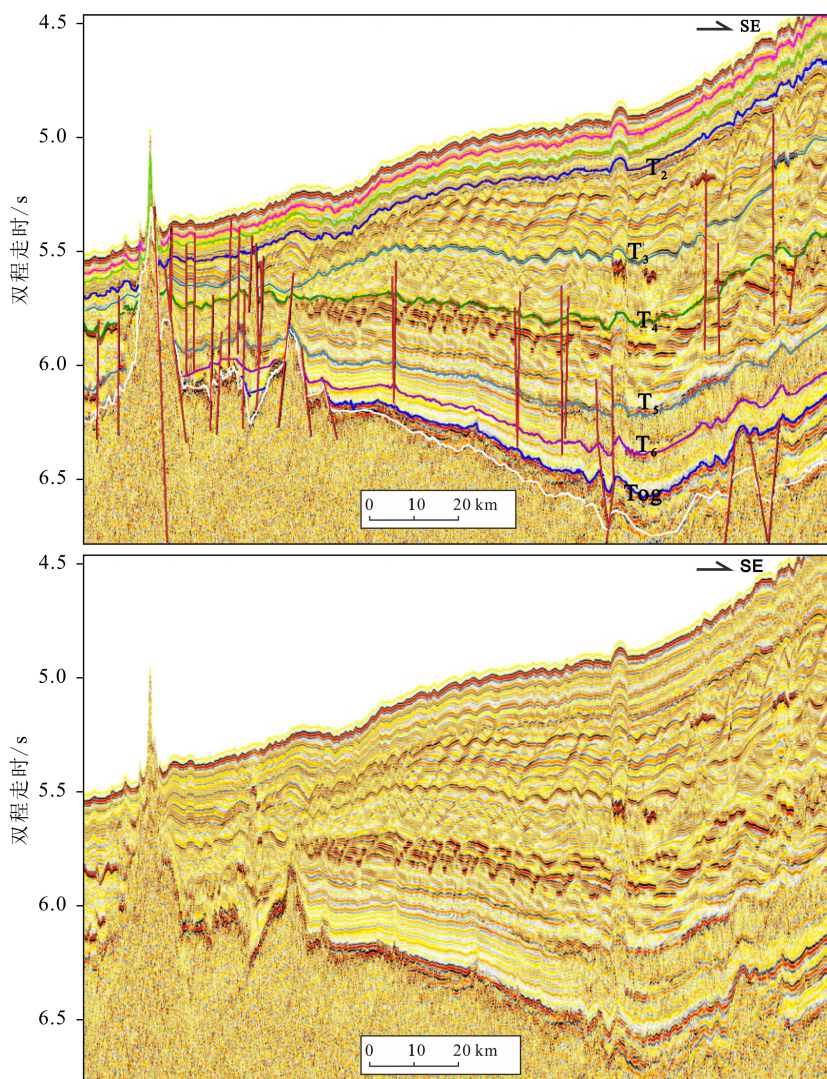


图 11 东部次海盆南部地震反射界面与层序地层

Fig.11 Seismic reflectives and sequence stratigraphy on the seismic profile in the south of the eastern Sub-basin

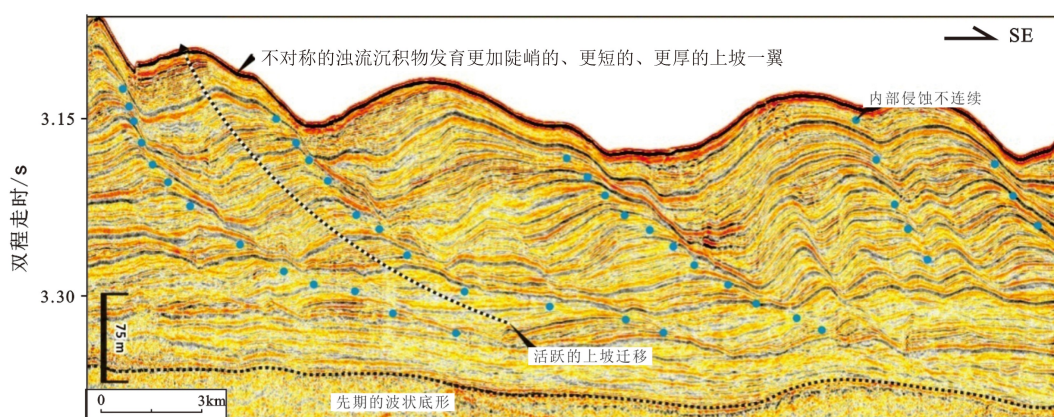


图12 多道地震剖面选段, 示浊流沉积物波的剖面形态及内部沉积构成 (据邱燕等, 2017, 有修改)

Fig.12 A selected multi-seismic profile showing types and inner-configuration of turbidite sediment waves

(1)次海盆北部因洋壳基底具有持续均衡、稳定的较大沉降幅度,同时来源于陆坡的陆缘碎屑物质占了很大的比例,形成沉积厚度相当稳定的后扩张期的地层。

(2)次海盆东部受南海微板块向马尼拉海沟之下俯冲等构造活动的影响,不但所有地层的产状都朝海沟倾斜,而且不同年代的地层其特征差异较大,期间可能蕴含了海沟初始俯冲时间的信息。

(3)次海盆中部和西部以频繁的岩浆活动为主要影响因素,形成了含大量火山碎屑物质和火山角砾岩的地层沉积。

(4)在次海盆的南部,沉降幅度、浊流活动和沉积环境的变化均为该区的影响因素,使得洋壳基底具有比北部更大规模的沉降幅度,地层具有典型的沉积物波的特征,中中新统和上中新统显示为陆坡环境下的沉积。

参考文献 (References)

- [1] Karig D E. Origin and development of marginal basins in the western Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76 (11): 2542-2561.
- [2] Ru K, Pigott J D. Episodic rifting and subsidence in the South China Sea [J]. *AAPG Bulletin*, 1986, 70 (9): 1136-1155.
- [3] 吕文正, 柯长志, 吴声迪, 等. 南海中央海盆条带磁异常特征及构造演化[J]. *海洋学报*, 1987, 9 (1): 69-78. [LV Wenzheng, KE Changzhi, WU Shengdi, et al. The characters of the magnetic anomaly and the revolution history in the South China Sea's central [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 9 (1): 69-78.]
- [4] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1986, 19 (1): 113-157.
- [5] Miyashiro A. Hot regions and the origin of marginal basins in the Western Pacific [J]. *Tectonophysics*, 1986, 122 (3-4): 195-216.
- [6] 姚伯初, 曾维军, Hayes D E, 等. 中美合作调研南海地质专报[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1994. [YAO Bochu, ZENG Weijun, Hayes D E, et al. *The Geological Memoir of South China Sea Surveyed Jointly by China & USA* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994.]
- [7] Kerr A C, Saunders A D, Tarney J, et al. Depleted mantle-plume geochemical signatures: No paradox for plume theories [J]. *Geology*, 1995, 23 (9): 843-846.
- [8] Hall R. Reconstructing Cenozoic SE Asia [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1996, 106 (1): 153-184.
- [9] Morley C K. A Tectonic model for the Tertiary evolution of strike-slip faults and rift basins in SE Asia [J]. *Tectonophysics*, 2002, 347 (4): 189-215.
- [10] 许浚远, 杨巍然, 曾佐勋, 等. 南中国海成因: 右行拉分作用与左行转换挤压作用交替[J]. *地学前缘*, 2004, 11 (3): 193-206. [XU Junyuan, YANG Weiran, ZENG Zuoxun, et al. Genesis of South China Sea: Intervening of dextral pull-apart and sinistral transpression [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11 (3): 193-206.]
- [11] 梁锡武, 张亮. 南海构造演化模式: 综合作用下的被动扩张[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29 (6): 59-74. [LUAN Xiwu, ZHANG Liang. Tectonic evolution modes of South China Sea: passive spreading under complex actions [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29 (6): 59-74.]
- [12] 李家彪, 丁巍伟, 吴自银, 等. 南海西南海盆的渐进式扩张[J]. *科学通报*, 2012, 57 (24): 3182-3191. [LI Jiabiao, DING Weiwei, WU Ziyin, et al. The propagation of seafloor spreading in the southwestern subbasin, South China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57 (24): 3182-3191.]
- [13] Pubellier M, Monnier C, Maury R, et al. Plate kinematics, origin and tectonic emplacement of supra-subduction ophiolites in SE Asia [J]. *Tectonophysics*, 2004, 392 (1-4): 9-36.
- [14] Hayes D E, Nissen S S, Buhl P, et al. Throughgoing crustal faults along the northern margin of the South China Sea and their role in crustal extension [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1995, 100 (B11): 22435-22446.
- [15] Franke D. Rifting, lithosphere breakup and volcanism: comparison of magma-poor and volcanic rifted margins [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 63-87.

- [16] Sun Z, Stock J. Expedition 367 Scientists South China Sea Rifted Margin Testing hypotheses for lithosphere thinning[R]. IODP Program Expedition 367 Preliminary Report 2017.
- [17] 秦国权. 珠江口盆地新生代地层问题讨论及综合柱状剖面图编制[J]. 中国海上油气(地质), 2000, 14(1): 21-28. [QIN Guoquan. Investigation to the stratigraphy and construction of the comprehensive geologic columnar section of Cenozoic formation in pearl river mouth basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2000, 14(1): 21-28.]
- [18] 袁玉松, 杨树春, 胡圣标, 等. 琼东南盆地构造沉降史及其主控因素[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 376-383. [YUAN Yusong, YANG Shuchun, HU Shengbiao, et al. Tectonic subsidence of Qiongdongnan Basin and its main control factors [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51(2): 376-383.]
- [19] 刘振湖, 郭丽华. 北康盆地沉降作用与构造运动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 51-57. [LIU Zhenhu, GUO Lihua. Subsidence and tectonic evolution of the Beikang Basin, the south China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(2): 51-57.]
- [20] 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: American Geophysical Union, 1980: 23-56.
- [21] Holloway N H. North Palawan block, Philippines-its relation to Asian mainland and role in evolution of South China Sea [J]. AAPG Bulletin, 1982, 66(9): 1355-1383.
- [22] Hutchison C S. Marginal basin evolution: the southern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(9): 1129-1148.
- [23] Fyhn M B W, Boldreel L O, Nielsen L H. Geological development of the Central and South Vietnamese margin: implications for the establishment of the South China Sea, Indochinese escape tectonics and Cenozoic volcanism [J]. Tectonophysics, 2009, 478(3-4): 184-214.
- [24] 林间, 李家彪, 徐义刚, 等. 南海大洋钻探及海洋地质与地球物理前沿研究新突破[J]. 海洋学报, 2019, 41(10): 125-140. [LIN Jian, LI Jiabiao, XU Yigang, et al. Ocean drilling and major advances in marine geological and geophysical research of the South China Sea [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(10): 125-140.]
- [25] 邱燕, 汪俊, 韦成龙, 等. 南海西南次海盆及邻区地壳结构探测[M]. 北京: 地质出版社, 2020. [QIU Yan, WANG Jun, WEI Chenglong, et al. China-France Cooperative Survey and Study of the deep Crust on the Southwest Sub-basin of the South China Sea[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.]
- [26] 詹文欢, 李健, 唐琴琴. 南海东部古扩张脊的俯冲机制[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2017, 37(6): 1-11. [ZHAN Wenhuan, LI Jian, TANG Qinqin. Subduction of the paleo-spreading-ridge in eastern South China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2017, 37(6): 1-11.]
- [27] 陈传绪, 吴时国, 赵昌垒. 马尼拉海沟北段俯冲带输入板块的不均一性[J]. 地球物理学报, 2014, 57(12): 4063-4073. [CHEN Chuanxu, WU Shiguo, ZHAO Changlei. Incoming plate variation along the northern Manila Trench [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(12): 4063-4073.]
- [28] Li C F, Li J B, Ding W W, et al. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(3): 1377-1399.
- [29] 丁巍伟, 李家彪, 李军. 南海北部陆坡海底峡谷形成机制探讨[J]. 海洋学研究, 2010, 28(1): 26-31. [DING Weiwei, LI Jiabiao, LI Jun. Forming mechanism of the submarine canyon on the north slope of the South China Sea [J]. Journal of Marine Sciences, 2010, 28(1): 26-31.]
- [30] Li Y H. Denudation of Taiwan island since the Pliocene epoch [J]. Geology, 1976, 4(2): 105-107.
- [31] 邱燕, 王立飞, 黄文凯, 等. 中国海域中新代沉积盆地[M]. 北京: 地质出版社, 2016. [QIU Yan, WANG Lifei, HUANG Wenkai, et al. Sedimentary Basins in Mesozoic and Cenozoic in the China Sea[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.]
- [32] Jiang T, Gao H F, He J K, et al. Post-spreading volcanism in the central South China Sea: insights from zircon U-Pb dating on volcanoclastic breccia and seismic features [J]. Marine Geophysical Research, 2019, 40(2): 185-198.
- [33] 邱燕, 彭学超, 王英民, 等. 南海北部海域第四系侵蚀过程与沉积响应[M]. 北京: 地质出版社, 2017. [QIU Yan, PENG Xuechao, WANG Yingmin, et al. Erosive Process and Sedimentary Characteristics of the Quaternary Sediments in the Northern South China sea[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.]
- [34] Expedition 349 Scientists. South China Sea tectonics: opening of the South China Sea and its implications for southeast Asian tectonics, Climates, and deep mantle processes since the late Mesozoic[R]. New York: International Ocean Discovery Program Preliminary Report 349, 2014.
- [35] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 153: 238-273.