

doi:10.3799/dqkx.2011.098

南沙海区万安盆地中新世碳酸盐台地的地震响应与沉积特征

吕彩丽^{1,2}, 姚永坚^{3*}, 吴时国¹, 姚根顺⁴

1. 中国科学院海洋研究所海洋地质与环境重点实验室, 山东青岛 266071

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 广州海洋地质调查局, 广东广州 510760

4. 中国石油天然气集团公司杭州地质研究院, 浙江杭州 310023

摘要: 利用反射地震并结合部分钻井资料, 通过对万安盆地大量地震资料的详细解释, 对研究区内碳酸盐台地进行地震识别, 进而探讨台地的沉积特征与时空分布。万安盆地碳酸盐台地最初发育于早中新世, 并于中中新世时达顶盛时期, 呈南北向展布, 主要分布在盆地中部走滑断块构造高部位及盆地南部边缘。东西两带台地具有不同的构造沉积背景, 西带为被断层复杂化的东倾斜坡, 离物源较近, 为碳酸盐岩与碎屑岩互层沉积; 东带濒临南海海盆, 离物源较远, 碳酸盐岩厚度大、岩性较纯。层序地层分析表明, 万安盆地碳酸盐台地主要发育于海侵体系域和高水位体系域。单个台地沉积相在平面上呈圈层结构展布, 相带窄但较规则, 可能包括: 台内相、台缘相、前缘斜坡相(缓坡与陡坡)和盆底相, 但只在台地东侧发育盆底相, 这与盆地东侧靠近南海海盆的地质环境有关。

关键词: 海洋地质; 碳酸盐台地; 沉积; 万安盆地; 南海。

中图分类号: P736

文章编号: 1000-2383(2011)05-0931-08

收稿日期: 2011-05-06

Seismic Responses and Sedimentary Characteristics of the Miocene Wan'an Carbonate Platform in the Southern South China Sea

LÜ Cai-li^{1,2}, YAO Yong-jian^{3*}, WU Shi-guo¹, YAO Gen-shun⁴

1. CAS Key Laboratory of Marine Geology & Environment, South China Sea Institute of Oceanology, Qingdao 266071, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760, China

4. Hangzhou Research Institute of Petroleum Geology, China National Petroleum Corporation, Hangzhou 310023, China

Abstract: Based on a large quantity of seismic data interpretation and some drilling data in Wan'an basin, the Miocene Wan'an carbonate platforms are identified from seismic reflection profiles and their sedimentary characteristics as well as spatial and temporal distributions are documented in detail. The Wan'an carbonate platforms developed initially during the Early Miocene and reached its prosperous period during the Middle Miocene, showing north-south orientation, and mainly occurring on the hanging wall of the strike-slip fault block in the centre of the basin and the southern basin margin. The Miocene Wan'an carbonate platform can be divided into the east band and the west band according to two different sedimentary tectonic forming backgrounds, where the west side is the slope dipping towards the east fractured by faults and approaches land-source areas resulting in alternating clastic and carbonate rocks, while the east side is close to the South China Sea basin and far from terrigenous areas showing thick and pure carbonate rocks. The sequence stratigraphic analyses show that the Wan'an carbonate platform exists mainly in transgressive and highstand system tracts. The sedimentary facies of single carbonate platform show ring construction in the plane view, and they are relatively narrow but regular, which may be divided into inner platform facies, fringing platform facies, foreslope facies (ramp and steep slope) and basin floor facies. However, the basin floor facies are

基金项目: 中国科学院知识创新项目(No. KZCX-YW-Q05-04); 国家重点基础性研究(No. 2009CB219406)。

作者简介: 吕彩丽(1984—), 女, 博士, 研究方向为海洋油气地质, E-mail: lvcl2004@126.com. * **通讯作者:** 姚永坚, E-mail: yjyao64@yahoo.com.cn

found only in the eastern side of carbonate platform which may be related to the geological settings near the South China Sea.

Key words: marine geology; carbonate platform; sedimentation; Wan'an basin; South China Sea.

南沙海区处于洋陆过渡带,发育了一系列新生代含油气沉积盆地. 油气勘探活动揭示,碳酸盐岩及生物礁地层中赋存有丰富的油气资源(Kusumastuti *et al.*, 2002),是南沙海区最重要的油气储集层之一. 但由于南沙海区的钻井相对较少,尤其针对碳酸盐岩的钻井更缺乏,因此对该区碳酸盐岩的发育情况不甚了解,对其在震上的识别特征仍无比较清晰的认识. 本文选择位于南沙海区西侧的万安盆地碳酸盐台地作为研究对象,结合钻井资料,通过对研究区大量地震资料的精细解释,对研究区内中新世万安盆地碳酸盐台地进行地震识别,揭示碳酸盐台地的结构、沉积发育与时空分布特征.

1 区域地质背景

万安盆地位于南沙海区西侧边缘的陆架及陆坡上,东邻西雅隆起带,与近南北向的万安断裂带分开,盆地北部、西北部为昆仑隆起区,西南部为纳土纳隆起区(图 1). 在地质构造上,万安盆地主要位于印支地块昆嵩地块的东南端,在其东侧可能为西南海盆的延伸裂谷(Lee *et al.*, 2000; Binh *et al.*, 2007). 万安盆地呈纺锤状近南北向展布,主体水深小于 500 m,最大水深为 1 800~2 000 m,是叠置在较薄陆壳和高热流值背景下的一个新生代走滑拉张盆地(杨木壮等,2003). 由于受盆地东界交替的左旋与右旋走滑断裂带的剪切及走滑作用影响,盆地内断裂发育广泛,以张扭性的 NE 向正断层为主,这些断层大多切割基底,导致基底变形、破裂,形成盆地 NE 向展布的隆坳相间格局,而坳陷带呈现东断西超、南断北超的箕状断陷特征,且具有下断上坳的双层结构性质. 始新世以来万安盆地发育新生代地层,其构造演化受南海海底扩张和万安走滑断裂双重控制,大致分为 3 个演化阶段,包括晚中生代—古近纪早期大陆抬升、局部裂谷拉张阶段、新近纪早中期断坳和改造阶段,以及新近纪晚期—第四纪区域沉降阶段(图 2).

2 万安盆地碳酸盐台地的地震响应特征

一般而言,碳酸盐台地在震剖面上表现为顶、底强振幅、连续性好、波形稳定的强反射界面. 生物

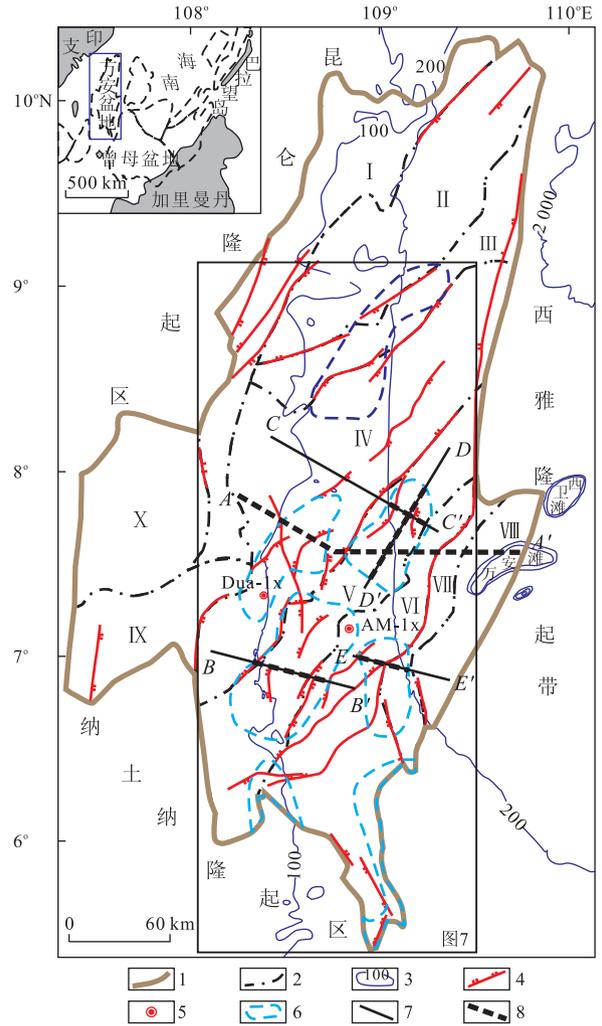


图 1 万安盆地构造区划与中新世万安盆地碳酸盐台地分布(左上图方框表示万安盆地位置)

Fig. 1 Geotectonic map of the Wan'an basin illustrating the distribution of the Miocene Wan'an carbonate platform

1. 盆地轮廓; 2. 二级构造单元界线; 3. 水深线(m); 4. 断裂; 5. 钻井; 6. 碳酸盐台地分布区; 7. 地震测线; 8. 文中地震剖面位置; I. 西北断陷带; II. 北部坳陷; III. 北部隆起; IV. 中部坳陷; V. 中部隆起; VI. 南部坳陷; VII. 东部隆起; VIII. 东部坳陷; IX. 西南斜坡; X. 西部坳陷

礁相碳酸盐岩在震剖面上主要表现为顶、底强振幅反射,内部反射断续、杂乱或空白,呈丘状、宝塔状、低起伏及桌状等反射外形,同时顶部具有披覆构造(邱燕和王英民, 2001; 马玉波等, 2009; Wu *et al.*, 2009). 在地震反射剖面上,碳酸盐台地规模相对较大,台地顶部为强反射且其连续性相对生物礁相碳酸盐岩较好一些,内部呈弱反射且成层性比较差,底界模糊. 碳酸盐台地之上常有生物礁相碳酸

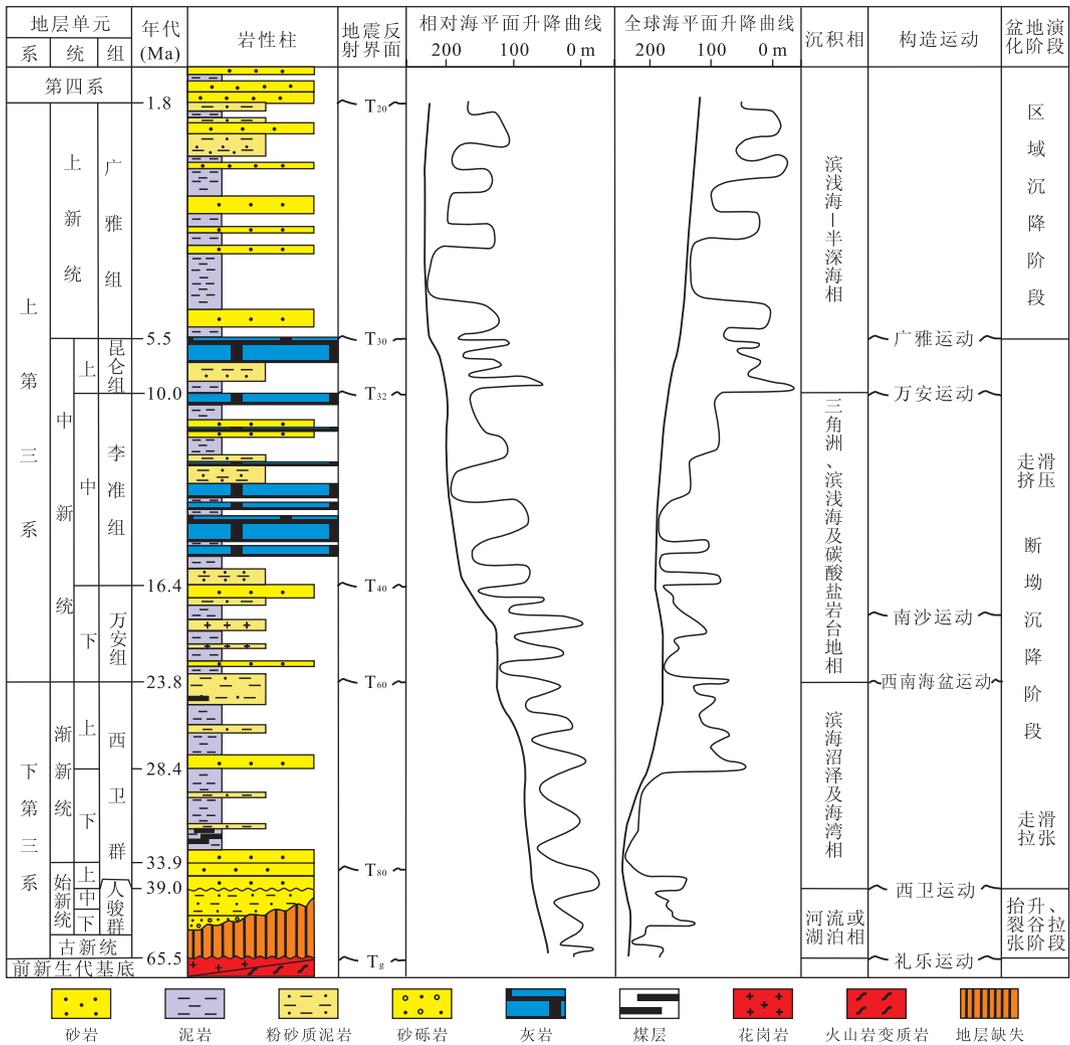


图2 万安盆地地层层序划分(据杨木壮等,2003 修改;其中,全球海平面升降曲线据 Haq *et al.*, 1987)
 Fig. 2 Chronostratigraphic chart illustrating the stratigraphic divisions in Wan'an basin

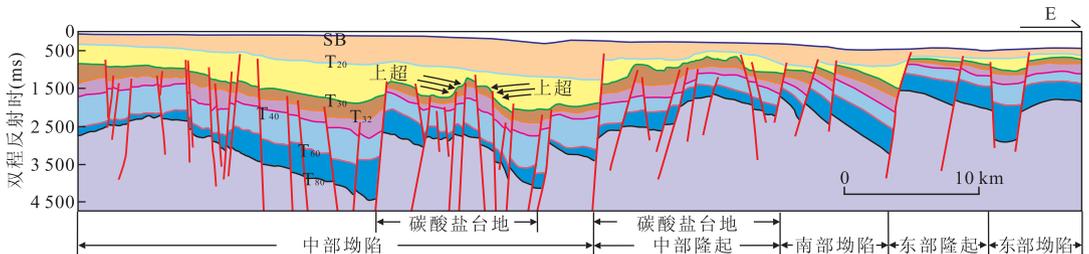


图3 穿过东西侧2个碳酸盐台地的地震解释剖面(测线位置见图1中AA')
 Fig. 3 Interpreted seismic profile transecting both the western carbonate platform and the eastern one

盐岩发育,呈现小规模丘状反射(Erlich *et al.*, 1990; Wilson, 2002,2008)。

根据目前掌握的地质资料与地震剖面的反射特征,结合国外万安盆地的钻井分析及古地理环境研究(May and Eyles, 1985),认为万安盆地碳酸盐台地具有如下特征:大致以 108°50'E 为界,万安

盆地碳酸盐台地可分为东西侧两带,且两带碳酸盐台地具有不同的沉积背景(图 1,3)。

自早中新世至晚中新世,万安盆地主要处于较稳定的滨海—浅海沉积环境,为碳酸盐岩沉积创造了有利条件,在盆地南部地区及北部的构造隆起上发育了一套碳酸盐台地及生物礁沉积。在地层层位

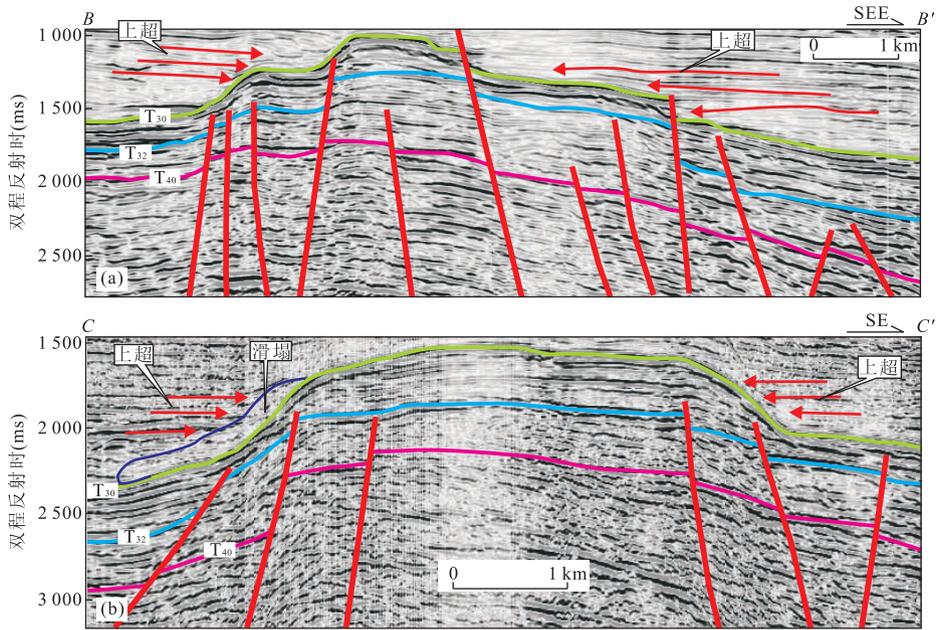


图 4 盆地西(a)、东(b)两侧碳酸盐台地地震响应特征(测线位置见图 1 中 BB'、CC')

Fig. 4 Seismic response characteristics in the western (a) and eastern (b) carbonate platforms

上,万安盆地碳酸盐台地主要发育于中新统,即:下中新统万安组($T_{60} - T_{40}$)、中中新统李准组($T_{40} - T_{32}$)和上中新统昆仑组($T_{32} - T_{30}$)。在早中新世时,只在盆地北部的构造高部位具有零星的碳酸盐岩发育;中中新世时碳酸盐台地发育达最繁盛时期(图 1, 3);晚中新世碳酸盐台地主要以生物礁建隆的形式存在。早中新世碳酸盐台地在地震剖面上不太容易识别,主要表现为规模很小的强振幅、断续地震反射特征,但以中中新世和晚中新世碳酸盐台地及生物礁的地震响应与发育特征最为典型。

2.1 中中新统碳酸盐台地的地震响应特征

盆地西侧的碳酸盐台地在地震剖面上,主要表现为顶部连续性好、波形稳定的强振幅反射界面,底界相对较模糊、振幅较弱,内部以弱振幅或强弱相间的平行连续地震反射特征为主,厚度稳定,地震相特征变化不大,侧向上相变极少(图 4a 中 $T_{40} - T_{32}$)。经钻井证实,沉积基底以白垩纪花岗闪长岩为主(Rudolph and Lehmann, 1989),推测沉积基底是纳土纳隆起在海域的延伸部分,自西向东形成被断层复杂化的东倾斜坡(图 3),其上是地垒、地堑,构造较复杂。该带碳酸盐台地沿宽广的低缓斜坡发育,但由于离物源较近,为碳酸盐岩与碎屑岩互层沉积。

盆地东侧的碳酸盐台地在地震剖面上,主要表现为顶部略显杂乱的中连续、强振幅地震反射界面,底界为中振幅、中连续的地震反射特征,内部以断

续、杂乱或空白反射地震相为主(图 4b 中 $T_{40} - T_{32}$)。表明中中新世末地层曾出露地表,碳酸盐岩经大气水淋滤作用后,均质的灰岩沉积变为多孔、缝、洞的非均质岩石,造成这种杂乱地震相。但由于其离物源较远,碳酸盐岩发育厚度大,岩性也较纯。

综上所述,在地震剖面上,中中新统碳酸盐台地表现为顶界强振幅反射、底界模糊、内部反射断续的弱振幅地震相特征。盆地西侧台地沉积在一个被断层复杂化的宽广东倾斜坡上,而盆地东侧台地沉积于面积相对较广的外陆架环境。然而,在地震反射剖面上没有发现中中新统碳酸盐台地有生物礁发育,推测此时台地边缘能量相对较低,或当时的气候和海平面升降速率不适合生物礁的生长。

2.2 上中新统碳酸盐台地的地震响应特征

在地震反射剖面上,上中新统($T_{32} - T_{30}$)碳酸盐台地地层表现为顶、底界强振幅反射,内部为频率较低的弱振幅,近平行的、强弱相间的反射特征(图 4a, 4b)。台缘发育大量生物礁相,地震相外形为宝塔状或丘状,上覆反射披覆,两侧上超,台地周缘伴生有碳酸盐岩和生物碎屑滑塌所形成的塌积岩沉积(图 4b)。上中新统碳酸盐台地界面起伏较大、面积变窄,台地两侧都朝内部迁移,导致台地面积迅速减小,台地边缘位置的迁移使中中新统与上中新统台地间的界线趋于明显。大部分晚中新世碳酸盐岩继续在原中中新统碳酸盐台地的发育区生长。台地面

积明显缩小及台地两侧大量的规则上超反射说明,上中新统碳酸盐台地是与海平面持续上升并大致保持平衡的沉积体系。

由上述分析得出,万安盆地碳酸盐台地可分为2个发育阶段,中间被一次中中新世末期的地表出露事件所形成的 T_{32} 不整合面所分隔,中中新统碳酸盐台地以面积较广的均质碳酸盐岩沉积为特征,上中新统碳酸盐台地面积变窄,层面起伏较大,以台缘发育大量的生物礁为特征。

3 万安盆地碳酸盐台地的分布及其沉积特征

根据碳酸盐台地的地震响应特征,并结合国外少量的钻井资料,圈出万安盆地碳酸盐台地分布区。万安盆地碳酸盐台地主要分布在 8°N 以南、盆地中部的走滑断块构造高部位与斜坡地区。台地外部形态呈近南北向展布,具体而言,在二级构造单元区划上,其主要分布于中部隆起、中部拗陷的南部斜坡、南部拗陷的南部斜坡、东部隆起的西南部以及盆地南部边缘位置;而在 8°N 以北的地区,只在二级构造单元北部隆起及邻近单元的斜坡上有碳酸盐岩发育(图1)。

3.1 碳酸盐台地的层序地层分析

早中新世末,万安盆地发生相对海平面下降事件,形成 T_{40} 不整合面,经层序地层学分析,这一不整合面为 I 型层序界面。中中新世末,万安运动又导致发生规模更大的海平面下降事件,地层变形、形成褶皱,区域上形成 T_{32} 不整合面。据分析, T_{32} 界面亦为 I 型层序界面(邱燕和王英民,2001)。因此,中中新统层序($T_{40}-T_{32}$)和上中新统层序($T_{32}-T_{30}$)均为 I 型沉积层序,由低水位体系域、海侵体系域和高水位体系域组成。在地震剖面上,难以识别万安盆地中中新统碳酸盐岩,而中中新统碳酸盐岩的地震反射特征不清楚,难以进行体系的识别。故笔者只分析上中新统地层中碳酸盐台地的层序地层学特征,结合钻井资料(Dua-1x、AM-1x),并参考前人的研究成果(邱燕,2000),推测万安盆地碳酸盐台地可能的岩性组成(图5)。

3.1.1 低水位体系域 层序早期低海平面时期,气候和水体条件发生变化,在台地外缘斜坡底部和盆底部位开始发生碳酸盐岩沉积(Rudolph and Lehmann, 1989; Sharaf *et al.*, 2005)。晚中新世早期,

低水位体系域甚为发育。在海平面迅速下降时期,由于台地边缘的侵蚀作用和冲积河谷的下切作用,在斜坡坡脚处堆积了低水位扇(异地),沉积物质主要是台地边缘和斜坡上部的被侵蚀碳酸盐岩和礁复合体碎屑,混有陆源石英颗粒和泥页岩。在海平面下降晚期或上升早期,台地边缘被侵蚀的碳酸盐岩碎屑以浊流的形式被搬运一段距离,形成异地低水位楔状体,地震相特征一般为下超充填。与此同时,在台地区部分被切割的河谷部位,发育了原地低水位楔。地震相特征为下超充填,顶部出现顶超。岩性多为富含泥晶的碳酸盐岩夹泥灰岩。

3.1.2 海侵体系域 随着海平面的迅速上升和盆地沉降,沉积物容纳空间增大,形成海侵体系域。由于台地的地形一般较高,海侵体系域多沉积在盆底和斜坡带。沉积地层大致呈楔状,在地震剖面上呈上超形式出现,内部为中、强振幅,高连续反射。水深迅速加大时,在盆地相出现低速沉积,形成凝缩段。本区上中新统层序为泥晶灰岩和灰岩,含水下胶结物,代表相对低能的沉积环境。由于海平面上升速度较快,碳酸盐的沉积跟不上沉积物容纳空间的增长速度,形成滞后型沉积。

3.1.3 高水位体系域 高水位体系域是海平面上升晚期、静止时期和下降早期的沉积物,可分为早期和晚期2个阶段。早期以容纳空间增长较快为特征,但其水质条件未必有助于大量碳酸盐岩的形成,其结果是沉积速率较低,形成沉积补偿滞后型碳酸盐岩体系;全球海平面开始下降时,沉积容纳空间增长速率减慢,海水循环变得良好而稳定,碳酸盐沉积速率增大,形成沉积补偿平衡型碳酸盐岩体系(Sharaf *et al.*, 2005)。从滞后型沉积到平衡型沉积,表现出孔隙度向上增大的趋势。本区上中新统层序中的高水位碳酸盐岩均发育了这2种沉积体系,而且厚度很大。

地震剖面显示(图5),在台地区上中新统层序下部为 S 型,属沉积速率较低的反射,分布范围窄,厚度不大,钻井(AM-1x)资料证实其孔隙度较低,泥质胶结物多,为滞后型沉积;上部平行状和叠瓦状,具明显的台缘丘状反射,属倾斜进积和丘状加积,分布广,厚度大,其含大量富颗粒的浅水相沉积,包括多孔红珊瑚、藻粘结灰岩、红珊瑚藻-棘皮类泥粒灰岩、颗粒灰岩和红藻-棘皮类-软体动物泥粒灰岩相,具高孔隙度,为平衡型沉积。可见,由于海平面相对变化、沉积物容纳空间和水质条件的不同,台地不同位置的高水位体系域有所不同,但总体而言,上中新统层序的滞后型沉积分布局限,以平衡型沉

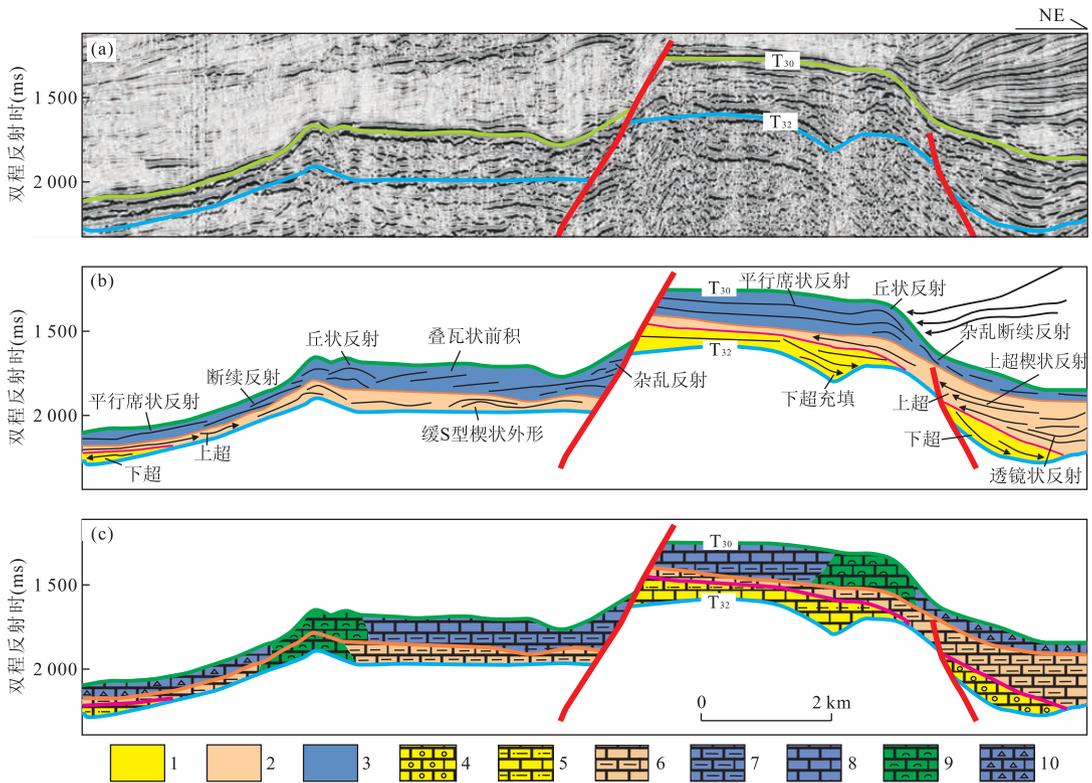


图 5 上中新统万安盆地碳酸盐台地层序地层分析(测线位置见图 1 中 DD')

Fig. 5 Sequence stratigraphic analysis in the Upper Miocene Wan'an carbonate platform

a. 原始地震剖面; b. 地震解释剖面; c. 岩性推测; 1. 低水位体系域; 2. 海侵体系域; 3. 高水位体系域; 4. 碳酸盐岩碎屑(异地低位楔); 5. 含泥晶碳酸盐岩(原地低位楔); 6. 泥晶灰岩与灰岩互层(海侵体系域); 7. 致密泥晶灰岩(高水位体系域, 滞后型); 8. 泥晶灰岩与粒状灰岩(高水位体系域, 平衡型); 9. 生物礁与礁灰岩; 10. 碳酸盐岩斜坡裙(高水位体系域)

积为主. 由于高水位时期海水循环条件适于生物礁的生长, 生物礁相在该时期大量发育. 生物礁岩性依造礁生物而定, 含颗粒灰岩和生物粘结灰岩.

由此可知, 不同体系域内发育的碳酸盐岩岩性有较大的差别, 并且碳酸盐台地主要发育于海侵体系域和高水位体系域内, 而低水位体系域主要为从台地边缘或斜坡滑塌的异地碳酸盐岩和礁复合体碎屑, 且可能含有陆源碎屑沉积.

3.2 碳酸盐台地的沉积相

在不同沉积背景下所形成的万安盆地碳酸盐台地具有不同的沉积相带分布和岩相组合. 尽管万安盆地碳酸盐台地分布广泛, 但由于我国未对该区开展钻探工作, 以目前所掌握的资料难以对这些碳酸盐岩沉积体系的相带做具体划分. 然而, 发育在地垒上的碳酸盐台地的特征却非常明显. 因此, 沉积相划分具体落实到单个碳酸盐台地上, 相带分布窄但比较规则(图 6), 在平面上略呈圈层结构展布(图 7). 结合国外钻井资料, 参考关士聪等(1980)碳酸盐岩沉积相划分方案, 推测万安盆地碳酸盐台地可能划

分为台内相、台缘相、前缘斜坡相(缓坡和陡坡)和盆底相, 各沉积相的特征分析如下.

3.2.1 台内相 地震相特征为席状、弱振幅、平行反射或角度极缓的“S”型或斜交型反射, 顶部多为强振幅、高连续、平行双相位反射. 岩性通常为骨骼灰泥岩和泥灰岩, 并向球粒状泥粒灰岩和颗粒灰岩过渡.

3.2.2 台缘相 地震相多为加积型丘状或宝塔状的生物礁相, 宽窄不一, 内部亚平行反射, 具程度不同的波折. 上覆披覆反射, 两侧上超, 顶界为强振幅反射, 内部空白或杂乱反射. 岩相组成较复杂, 包括颗粒灰岩、泥粒灰岩和生物粘结灰岩. 这一相带受较多高能波浪、海流作用, 常成为暴露面, 所形成的岩体孔隙度较高(Fyhn *et al.*, 2009).

3.2.3 前缘斜坡相(缓坡和陡坡) 位于台地前缘的斜坡上, 台地西侧濒临陆相沉积环境, 多以缓坡形式存在, 一般坡角小于 15° ; 台地东侧呈向海增生的进积滩, 呈陡坡形式, 一般坡角为 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 可达 35° 甚至更大. 在地震剖面上表现为楔状外形, 往台地方向为反射波终止现象, 向外反射层下超, 内部多为杂

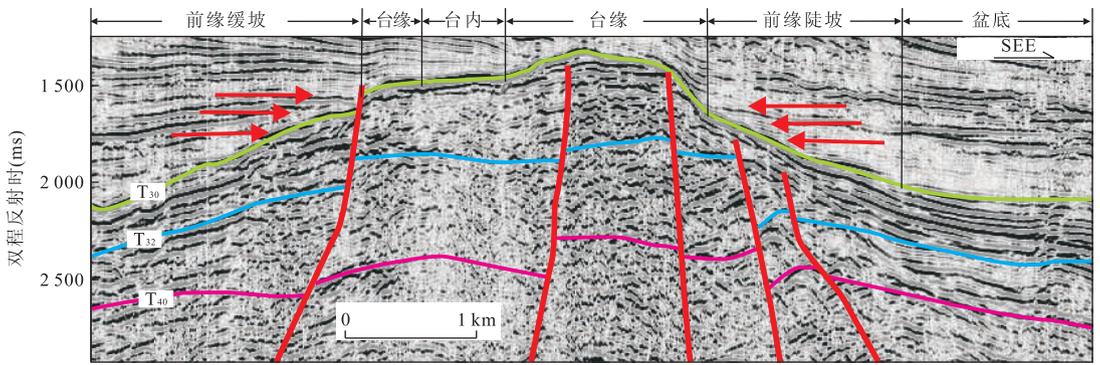


图 6 地震剖面上万安盆地碳酸盐台地的沉积相划分(测线位置见图 1 中 EE')

Fig. 6 Sedimentary facies of the Wan'an carbonate platform in the seismic section

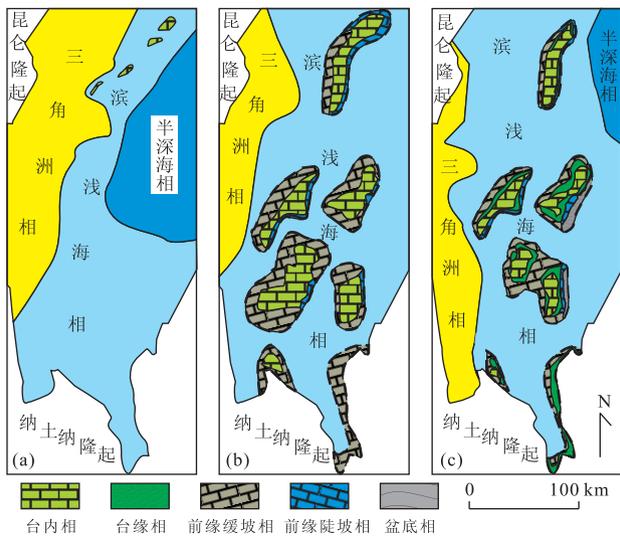


图 7 万安盆地碳酸盐台地沉积相的平面分布(位置见图 1)

Fig. 7 Sedimentary facies layout of the Wan'an carbonate platform in the plane view

a. 早中新世; b. 中中新世; c. 晚中新世

乱反射. 岩相为层状灰岩夹滑塌灰岩透镜体.

3.2.4 盆底相 台地东侧朝盆倾斜的前缘斜坡沉积单元在坡脚处迅速变薄,成为平坦的盆底相带沉积.地震相为强振幅、高连续平行反射.该相带的岩石成份视水的循环程度和深度而定.深 100 m 以内,盐度正常,是水流循环良好区,具生物潜穴,夹粒泥灰岩和骨骼粒泥灰岩.深度较大或受限缺氧区,沉积物类型主要是深色纹层状泥灰岩.只在台地东侧发育盆底相,而西侧无盆底相发育,这与盆地东侧靠近南海海盆,而盆地西侧为陆相沉积环境有关.

4 结论

南沙海区万安盆地碳酸盐台地发育于中新统地

层(下中新统万安组、中中新统李准组和上中新统昆仑组),主要分布在 8°N 以南,盆地中部的走滑断块构造高部位,且外部形态近南北向展布.在早中新世,只在盆地北部的构造高部位具有零星的碳酸盐岩发育,中中新世时碳酸盐岩发育达顶盛时期,而晚中新世碳酸盐岩主要以生物礁建隆的形式存在.万安盆地碳酸盐台地的沉积特征总结如下.

(1)万安盆地碳酸盐台地可分为 2 个发育阶段,中间被中中新世末的一次地表出露事件所形成的 T₃₂不整合面所分隔,中中新统碳酸盐台地以面积较广的均质碳酸盐岩沉积为特征,上中新统碳酸盐台地面积变窄,层面起伏较大,以台缘发育大量生物礁为特征.

(2)大致以 108°50'E 为界,中新世万安盆地碳酸盐台地可分为西侧和东侧 2 带.2 带碳酸盐台地具有不同的构造沉积背景,盆地西侧沉积基底可能为纳土纳隆起在海域的延伸部分,离物源较近,为碳酸盐岩与碎屑岩互层沉积;而盆地东侧靠近海区,离物源较远,碳酸盐岩发育厚度大,岩性较纯.

(3)在不同沉积背景下所形成的万安盆地碳酸盐台地具有不同的沉积相带分布和岩相组合.不同体系域内发育的碳酸盐岩岩性有较大的差别,并且万安盆地碳酸盐台地主要发育在海侵体系域和高水位体系域内,而低水位体系域内的碳酸盐岩成分含有较多的硅质碎屑物质.单个碳酸盐台地在平面上略呈圈层结构展布,相带分布窄而比较规则,推测其自内而外有台内相、台缘相、前缘斜坡相(缓坡和陡坡)和盆底相.只在台地东侧发育有盆底相,这与该侧靠近南海海盆的地质环境有关.

References

Binh, N. T. T., Tokunaga, T., Son, H. P., et al., 2007. Pres-

- ent-day stress and pore pressure fields in the Cuu Long and Nam Con Son basins, offshore Vietnam. *Marine and Petroleum Geology*, 24(10): 607—615. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2007.04.002
- Erllich, R. N., Barrett, S. F., Ju, G. B., 1990. Seismic and geologic characteristics of drowning events on carbonate platforms. *AAPG Bulletin*, 74(10): 1523—1537. doi: 10.1306/0C9B250B-1710-11D7-8645000102C1865D
- Fyhn, M. B. W., Nielsen, L. H., Boldreel, L. O., et al., 2009. Geological evolution, regional perspectives and hydrocarbon potential of the Northwest Phu Khanh basin, offshore central Vietnam. *Marine and Petroleum Geology*, 26(1): 1—24. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2007.07.014
- Guan, S. C., Yan, H. Y., Qiu, D. Z., et al., 1980. Investigations on the marine sedimentary environmental model of China in Late Proterozoic to Triassic periods. *Oil & Gas Geology*, 1(1): 2—17 (in Chinese with English abstract).
- Haq, B. U., Hardenbol, J., Vail, P. R., 1987. Chronology of fluctuating sea-levels since the Triassic. *Science*, 235(4793): 1156—1167. doi: 10.1126/science.235.4793.1156
- Kusumastuti, A., Van Rensbergen, P., Warren, J. K., 2002. Seismic sequence analysis and reservoir potential of drowned Miocene carbonate platforms in the Madura Strait, East Java, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 86(2): 213—232. doi: 10.1306/61EEDA94-173E-11D7-8645000102C1865D
- Lee, G. H., Lee, K., Watkins, J. S., 2000. Geologic evolution of the Cuu Long and Nam Con Son basins, offshore southern Vietnam, South China Sea. *AAPG Bulletin*, 85(6): 1055—1082. doi: 10.1306/8626CA69-173B-11D7-8645000102C1865D
- Ma, Y. B., Wu, S. G., Zhang, G. C., et al., 2009. Geophysical characteristics of biohermal carbonate in the northern margin deep water area of South China Sea. *Journal of China University of Petroleum*, 33(4): 33—39 (in Chinese with English abstract).
- May, J. A., Eyles, D. R., 1985. Well log and seismic character of Tertiary Terumbu carbonate, South China Sea, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 69(9): 1339—1358. doi: 10.1306/AD462C5E-16F7-11D7-8645000102C1865D
- Qiu, Y., 2000. The interpretation of carbonate sequence stratigraphy in the southwestern region of South China Sea. *Geological Research of South China Sea (Mémorial)*, 8: 62—74 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, Y., Wang, Y. M., 2001. Reefs and paleostructure and paleoenvironment in the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(1): 65—73 (in Chinese with English abstract).
- Rudolph, K. W., Lehmann, P. J., 1989. Platform evolution and sequence stratigraphy of the Natuna platform, South China Sea. *SEPM Special Publications*, 44: 354—361. doi: 10.2110/pec.89.44.0353
- Sharaf, E., Simo, J. A., Carroll, A. R., et al., 2005. Stratigraphic evolution of Oligocene-Miocene carbonates and siliciclastics, East Java basin, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 89(6): 799—819. doi: 10.1306/01040504054
- Wilson, M. E. J., 2002. Cenozoic carbonates in Southeast Asia: implications for equatorial carbonate development. *Sedimentary Geology*, 147(3—4): 295—428. doi: 10.1016/S0037-0738(01)00228-7
- Wilson, M. E. J., 2008. Global and regional influences on equatorial shallow-marine carbonates during the Cenozoic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 265(3—4): 262—274. doi: 10.1016/j.palaeo.2008.05.012
- Wu, S. G., Yuan, S. Q., Zhang, G. C., et al., 2009. Seismic characteristics of a reef carbonate reservoir and implications for hydrocarbon exploration in deepwater of the Qiongdongnan basin, northern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 26(6): 817—823. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2008.04.008
- Yang, M. Z., Wang, M. J., Liang, J. Q., et al., 2003. Tectonic subsidence and its control on hydrocarbon resources in the Wan'an basin in the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 23(2): 85—88 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 关士聪, 演怀玉, 丘东洲, 等, 1980. 中国晚元古代至三叠纪海域沉积环境模式探讨. 石油与天然气地质, 1(1): 2—17.
- 马玉波, 吴时国, 张功成, 等, 2009. 南海北部陆缘深水礁相碳酸盐岩的地球物理特征. 中国石油大学学报(自然科学版), 33(4): 33—39.
- 邱燕, 2000. 南海西南部主要盆地碳酸盐岩层序地层学解释. 南海地质研究, 8: 62—74.
- 邱燕, 王英民, 2001. 南海第三纪生物礁分布与古构造和古环境. 海洋地质与第四纪地质, 21(1): 65—73.
- 杨木壮, 王明君, 梁金强, 等, 2003. 南海万安盆地构造沉降及其油气成藏控制作用. 海洋地质与第四纪地质, 23(2): 85—88.