

doi:10.3799/dqkx.2016.107

万安盆地生物礁及碳酸盐台地的发育演化及控制因素

杨 振, 张光学*, 张 莉

国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州海洋地质调查局, 广东广州 510075

摘要: 生物礁及碳酸盐台地是南海南部重要的油气储层之一,但目前对万安盆地生物礁的识别及碳酸盐台地沉积相带的划分尚不够深入。基于钻井和地震数据对该区的生物礁及碳酸盐台地进行了精细刻画,万安盆地中生物礁及碳酸盐台地的发育可分为4个演化阶段:早中新世时期,碳酸盐台地初始发育,台地规模小、数量少,零星分布于盆地中部;中中新世台地发育进入繁盛阶段,主要分布于北部隆起、中部隆起及隆起周缘的斜坡之上,横向上呈东、西带状展布,此时期的生物礁以台地边缘礁和块状礁为主;至晚中新世时期,碳酸盐台地开始衰退,而生物礁类型全、数量多,包括台地边缘礁、块状礁、塔礁、点礁等;上新世以来,生物礁及碳酸盐台地全面被淹没,盆地内部不再有生物礁及碳酸盐台地的发育。构造作用和相对海平面变化控制了碳酸盐台地的发育演化过程,古近纪基底断裂产生的地形控制了生物礁及碳酸盐台地初始发育位置及后期发育的空间分布,晚中新世以来的快速沉降和相对海平面变化控制了台地的衰退及淹没过程。

关键词: 万安盆地;碳酸盐台地;时空分布;控制因素;海洋地质。

中图分类号: P736

文章编号: 1000—2383(2016)08—1349—12

收稿日期: 2016—01—10

The Evolution and Main Controlling Factors of Reef and Carbonate Platform in Wan'an Basin

Yang Zhen, Zhang Guangxue*, Zhang Li

Key Laboratory of Marine Mineral Resources of Ministry of Land and Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510075, China

Abstract: The reef and carbonate platform is one of the most important reservoirs in the south of South China Sea, and the reefs and the sedimentary facies of carbonate platform in the Wan'an basin should be further studied. The high-resolution seismic profiles associated with well data in this paper facilitate the understanding of the reefs and carbonate platforms in the study area. The evolution of reefs and carbonate platform can be divided into four stages. In Early Miocene, a few isolated carbonate platforms that were small in size firstly initiated in center of this basin. They flourished in Middle Miocene and mainly developed around the Northern Uplift, Central Uplift. Transversely, two bands there, namely western band and eastern band, were the distinct characteristic of its spatial distributions in this time. Platform-edge reef and massive reef were the main style of reef and there were also a few point reefs developing on the edge of carbonate platform. In Late Miocene, the carbonate platforms began to backstep to elevated topographic positions in response to a relative sea level rise. While, the number and style of reef increased in this stage, such as platform-edge reef, massive reef, atoll reef and point reef. Tectonics and eustasy are the two main controlling factors on platform development. Tectonics mainly controlled both the initial topography for reef growth and the distribution of platforms, and eustasy controlled carbonate sequence development. Since the Late Miocene, the rapid tectonic subsidence and the rise of relative sea-level should have led to the drowning of carbonate platform.

Key words: Wan'an basin; carbonate platform; spatial-temporal distributions; controlling factors; marine geology.

基金项目: 国家海洋地质保障工程项目(No. GZH20120511); 国家基金委南海重大计划一重点基金项目(No. 91228208).

作者简介: 杨振(1984—), 男, 在站博士后, 主要从事碳酸盐岩深水油气研究. E-mail: yangzhen011043@163.com

* **通讯作者:** 张光学, E-mail: zhguangxue@tom.com

引用格式: 杨振, 张光学, 张莉, 2016. 万安盆地生物礁及碳酸盐台地的发育演化及控制因素. 地球科学, 41(8): 1349—1360.

碳酸盐岩基于自身“高孔、高渗、高产”的特点，在油气勘探中占有重要的地位(卫平生等，2006)。目前世界碳酸盐岩储层的油气产量占世界油气总产量的 60%以上，主要分布于北美、中东、东南亚等地区，我国南海正位于东南亚碳酸盐岩型油气藏富集区(Khain and Polyakova, 2004; Wilson, 2008; 张功成等，2013)。作为南海南部生物礁及碳酸盐台地主要发育区之一的万安盆地，自早中新世以来沉积了大量的生物礁及碳酸盐岩，蕴含丰富的油气资源(邱燕和王英民，2001; Lü *et al.*, 2013; 杨楚鹏等，2014)。前人关于万安盆地生物礁及碳酸盐台地的研究已经有一定的基础，杨楚鹏等(2011)分析认为该盆地碳酸盐岩可作为一种重要的储层类型；吕彩丽等(2011)初步识别出盆地中的碳酸盐台地，认识到了中新世时期台地具有东、西分带的特点，而其对于两侧台地的岩性多以推测为主。受限于地震资料的品质以及有限的钻井资料，学者们对该盆地中碳酸盐台地的研究仍然存在一些问题。首先，尚未识别出具有明显地震反射特征的生物礁；其次，对碳酸盐台地沉积相的划分仅依据少量的地震数据，缺乏有效的井震结合手段对沉积相带做进一步刻画。本文利用广州海洋地质调查局的地震数据，结合盆地中钻井、测井信息，理清了生物礁及碳酸盐台地的时空分布，总结其分布规律，分析了各时期生物礁的类型，并详细描述其地震反射特征，这对下一步开展南海南部万安盆地生物礁及碳酸盐岩储层预测以及勘探

远景评估具有重要的理论指导意义。

1 区域地质背景

南海作为西太平洋一个特殊的边缘海，位于太平洋板块、欧亚板块和印度—澳大利亚板块的交汇处，特殊的构造位置决定了其新生代构造演化的复杂性。南海的形成起源于大陆边缘的张裂，自早古新世至早渐新世其经历了大陆边缘伸展、岩石圈减薄、地幔剥露等过程，并在南海北部形成了一系列的 NE 向构造(李家彪，2011; Franke *et al.*, 2014)。随后，晚渐新世至早中新世末南海发生了海底扩张，扩张脊首先在南海北部形成，至渐新世末期，扩张脊跃迁至中央海盆和西南次海盆(Taylor and Hayes, 1983; Briaies *et al.*, 1993; Li *et al.*, 2015)。在南海的扩张过程中，原位于南海北部的南沙—北巴拉望地块逐渐向南运动，于早中新世末与西北婆罗—苏绿地块碰撞，同时南海扩张停止。最新的 IODP349 航次考查为南海扩张年龄的精确确定提供了重要证据，海底地条带年龄揭示：南海扩张始于 33 Ma，洋脊跃迁发生于 23.6 Ma，中央海盆的扩张终止于 15 Ma，稍晚于西南次海盆 16 Ma 的扩张终止年龄(Li *et al.*, 2014; Song and Li, 2015)。南海在扩张过程中形成了一系列新生代的沉积盆地，且以南海南部的沉积盆地最为典型。

万安盆地主体位于南海西南部的陆架区(图 1)，

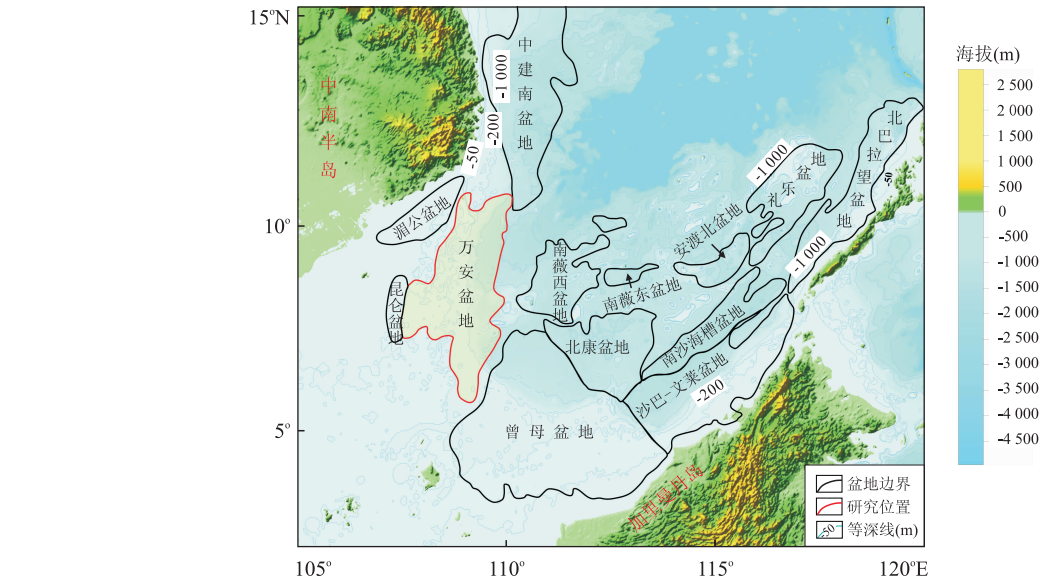


图 1 南海南部主要沉积盆地分布及研究区位置

Fig. 1 The location of main sedimentary basins and the studying area in the southern South China Sea

据中华人民共和国(1 : 500 000)地图,中国地图出版社,2013

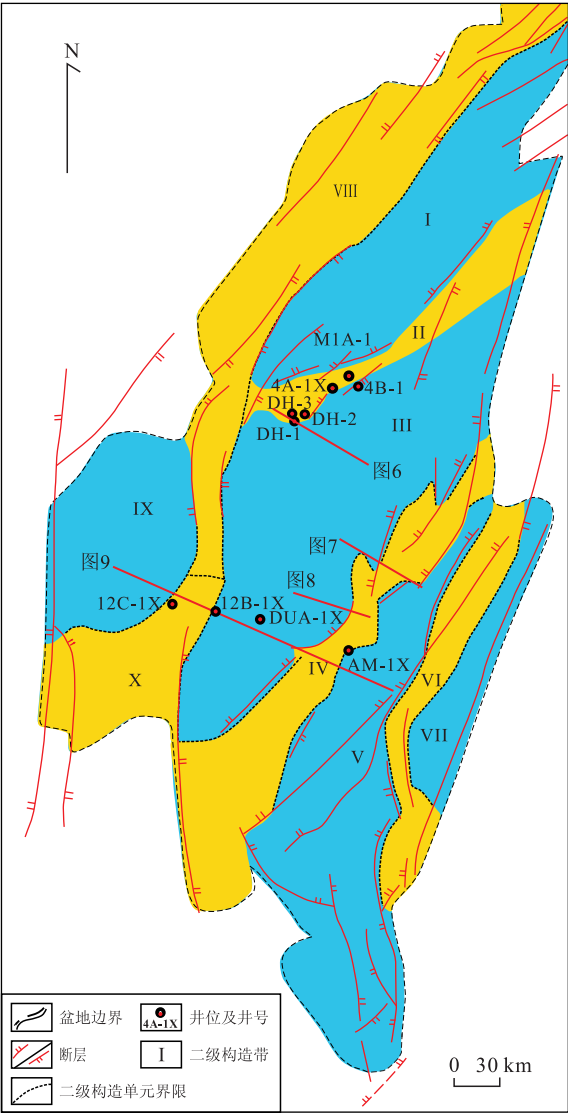


图 2 万安盆地构造区划及测线、钻井分布

Fig. 2 Tectonic divisions of Wan'an basin and the locations of seismic lines and wells mentioned in the text

I. 北部拗陷; II. 北部隆起; III. 中部拗陷; IV. 中部隆起; V. 南部拗陷; VI. 东部隆起; VII. 东部拗陷; VIII. 西北断阶带; IX. 西部拗陷; X. 西南斜坡; 据吕彩丽等(2011)修改

整体近 NS 向展布,呈纺锤状,面积约为 $6.6\times 10^4\text{ km}^2$ (图 2). 它是一个由地壳伸展张裂而形成,并受走滑作用改造的断陷复合型盆地. 受南海海底扩张及其东侧万安走滑断裂的双重影响,盆内断裂分布广泛,且活跃于渐新世—中新世的地层中,这些以 NE 向为主的正断层大多切割基底,致使基底变形、破裂,导致盆地内部呈 NE 向隆拗相间的构造格局. 盆地新生代的构造演化大致以西卫运动和广雅运动为界将其分为 3 个演化阶段:古新世—中始新世的大陆抬升、局部裂谷拉张阶段;晚始新世—晚中新世的断拗和再改造阶段;上新世以来的区域沉降阶段(图 3).

2 数据与方法

本次研究利用了广州海洋地质调查局于 1989 年至 1993 年采集的、经 2009 年重新处理的 10 000 km 左右高分辨率二维地震数据. 地震采集参数:炮间距为 25 m,道间距为 12.5 m,采样率为 2 ms,最大记录长度为 9 s. 通过井震结合,同时根据研究需要,笔者自下而上解释了 T_4 、 T_{31} 、 T_3 、 T_2 这 4 个与碳酸盐台地发育相关的层序界面. 9 口钻井、测井数据来自于笔者对前人数据的整理及再分析(金庆焕等, 2001; 杨楚鹏等, 2011). 此外,地震数据的解释工作在 Geoframe 4.3 中完成.

3 钻井沉积特征

前人对万安盆地碳酸盐岩的研究多以品质有限的地震数据为主,鲜有文献涉及万安盆地的钻井、测井数据. 本次工作基于盆地中的 9 口钻井数据,通过并联井对比详细分析了万安盆地各时期碳酸盐岩的沉积特点,同时结合测井信息,笔者对不同区域碳酸盐岩的岩性做出了分析. 钻井结果显示:早中新世时期,万安盆地西部以三角洲沉积为主(图 4 和图 5),岩性为砂泥岩互层沉积. 盆地中部、东部为滨浅海的砂泥岩、泥岩沉积,盆地北部的 M1A-1 井的钻井资料表明该时期已有碳酸盐岩的沉积,但是其规模较小,零星分布于三角洲外围.

至中中新世时期,北部钻穿李准组的 4 口钻井中有 3 口井钻遇碳酸盐岩,从单井上看,李准组也是碳酸盐岩沉积的主要时期. 南部的 12B-1、DUA-1 和 AM-1 井均钻遇碳酸盐岩,然而这 3 口井碳酸盐岩沉积状况有一定的差异. 12B-1 井仅有两层较薄的碳酸盐岩沉积,似透镜体状夹杂于砂泥岩之中; DUA-1 井的碳酸盐岩与泥岩互层沉积,每层碳酸盐岩的厚度约为 100 m,反映了沉积环境旋回性的变化;而 AM-1 井处沉积了大套碳酸盐岩. 该时期,万安盆地碳酸盐岩的含量从西向东逐渐增加,而 DH-1 井、4A-1 井、DUA-1 井在钻遇碳酸盐岩层的 GR 值普遍偏低,其曲线局部呈锯齿状变化,表明盆地西部碳酸盐岩的岩性不纯,可能是由于西部的碳酸盐台地靠近印支半岛,部分陆源碎屑输入所导致. 而盆地东部 AM-1 井同时期的 GR 值也相对较低,但 GR 曲线表现为箱形,反映了碳酸盐岩的岩性较纯、杂质含量较低. 同时该时期同一层位盆地东、西部不同的

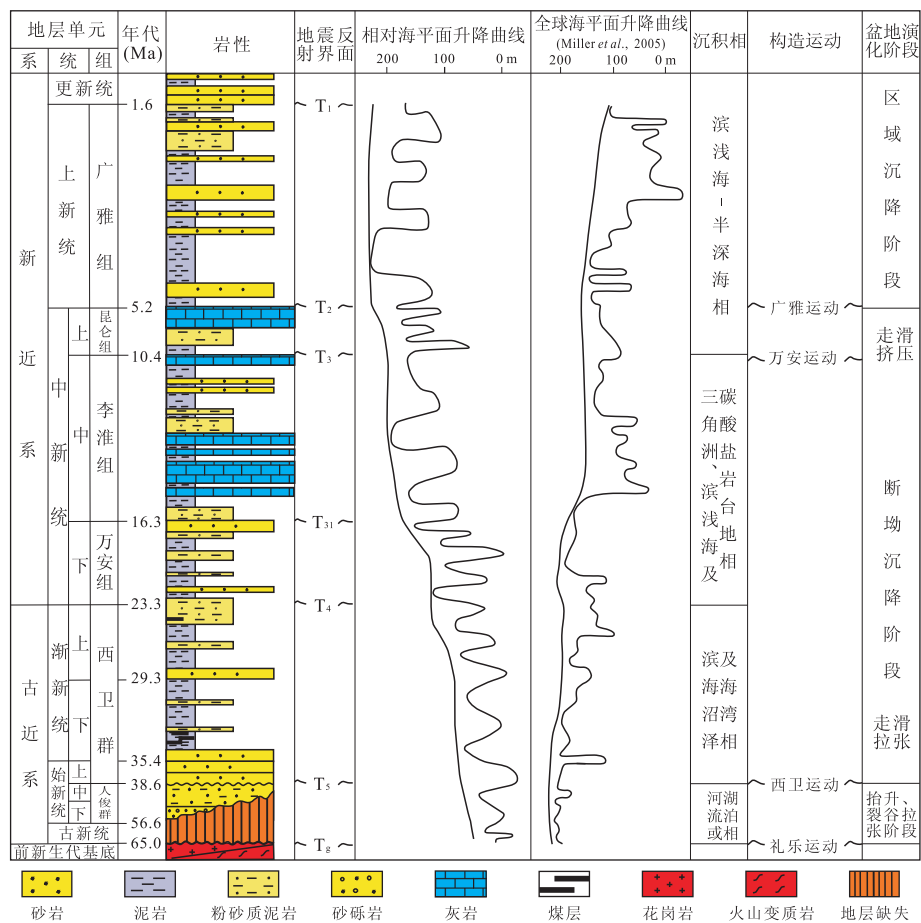


图 3 万安盆地综合地层柱状图

Fig. 3 The integrated stratigraphic column of Wan'an basin
据杨木壮等(2003)

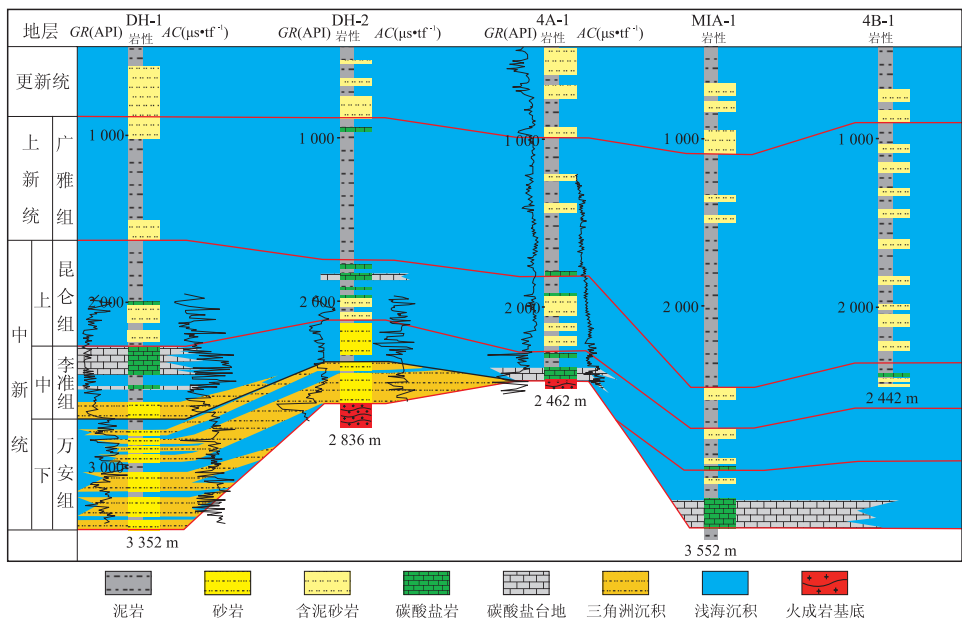


图 4 万安盆地北部钻井联井对比

Fig. 4 The association of wells on north of Wan'an basin

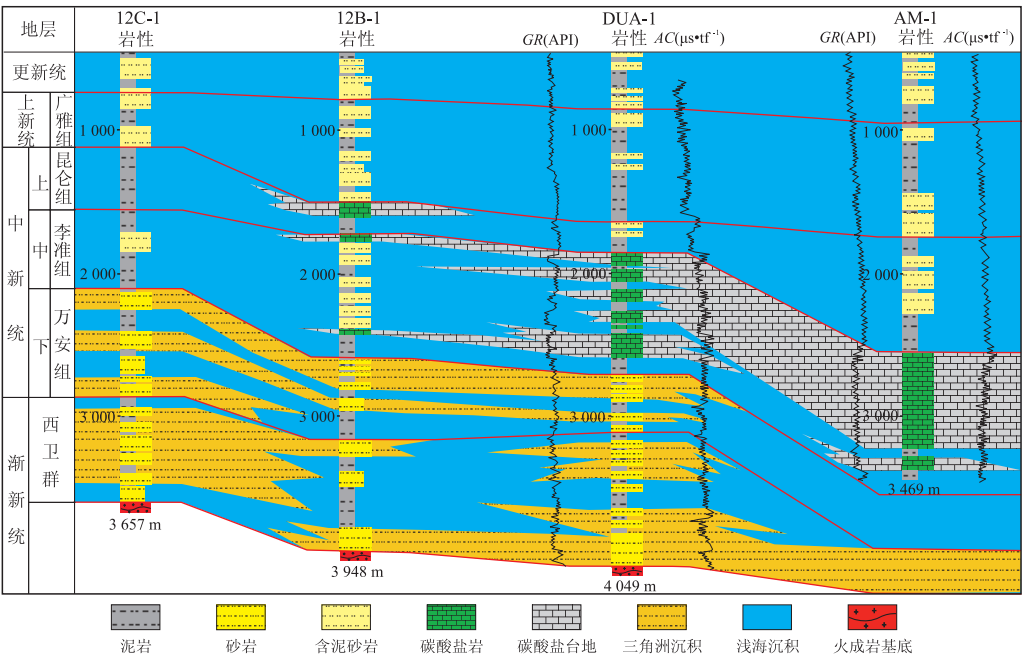


图 5 万安盆地南部钻井联井对比

Fig. 5 The association of wells on south of Wan'an Basin

据金庆焕等(2001)和杨楚鹏等(2011)修改

声波曲线反映了东部碳酸盐岩的层速度比西部碳酸盐岩的层速度稳定,这种速度差异可能是由岩性差异所致,这与 *GR* 曲线反映的结果一致。

晚中新世时期,盆地北部有少量薄层生物礁沉积以夹层的形式存在于砂泥岩之中,而南部仅有 12B-1 井发育近 100 m 厚的生物礁,其余 3 口井的钻井资料均显示该区域已进入浅海砂泥岩沉积环境,为陆架或陆架边缘的沉积,这与早中新世三角洲相砂泥岩有一定的区别,具体表现为盆地晚中新世地层岩性相对单一,以泥岩为主,对应的 *GR* 值相对稳定,这与笔者在 DH-1 井和 DH-2 井获得的早中新世呈锯齿状波动的 *GR* 曲线有很大差异。整体看来,这些生物礁是昆仑组碳酸盐岩沉积的主要形式,但沉积厚度较薄、零星分布。上新世至第四纪,该盆地为稳定的浅海陆架—陆坡沉积,岩性自下而上砂岩含量有逐渐增高的趋势,可能是由陆源碎屑输入增加导致陆架逐渐向东推进造成的。

4 生物礁及碳酸盐台地的地震识别

生物礁及碳酸盐台地的地震识别主要是根据其外部几何形态、内部反射结构、与周围岩层的接触关系等(May and Eyles, 1985; Ma *et al.*, 2011; Lü *et al.*, 2013; Wu *et al.*, 2014; 杨振等, 2014)。根

据碳酸盐台地周缘斜坡的类型及其与周缘地层的接触关系,同时结合地震反射特征,汪瑞良等(2011)将碳酸盐岩边界类型分为:断层界面、岩性界面和潮汐水道 3 种类型。而生物礁的分类相对复杂,不同的分类标准造就了其分类的多样性(邱燕和王英民, 2001; Riding, 2002; 米立军等, 2013),本文主要根据生物礁发育的位置和生长形态对其进行分类。通过对万安盆地高精度地震剖面的解释,同时结合钻井以及测井等数据,笔者对生物礁及碳酸盐台地进行了系统的识别,结果显示:生物礁类型多样,主要有点礁、块状礁、台地边缘礁、塔礁等,关于生物礁及碳酸盐台地的地震反射特征将在文中 4.1、4.2 部分做重点剖析。

4.1 生物礁的地震识别

4.1.1 点礁

外形呈丘形,两翼近对称,顶部为连续的强反射,内部反射杂乱,底部反射较弱,与下部碳酸盐台地的界限不是很明显(图 6)。其多发育于台地顶部,主要分布于盆地北部。由于规模较小(直径约 2 km),礁前不发育滑塌体。

4.1.2 台地边缘礁

该类礁体外形随台地边缘类型的不同而有所差异,其顶部反射较强、连续性较好,内部为亚平行的强弱相间反射,礁体周缘的地层具有明显的上超(图 6),多发育于台地边缘的陡坡之上,礁体前缘常为沉积反射较强但较杂乱的碳酸

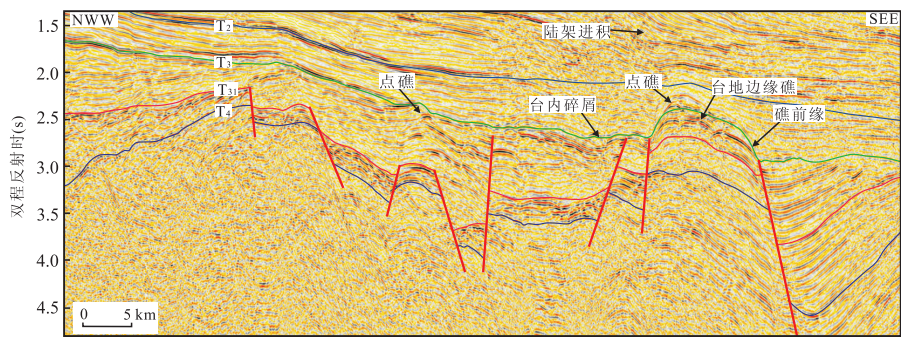


图 6 万安盆地北部典型的生物礁碳酸盐台地地震剖面

Fig. 6 Typical seismic profile of reefs and carbonate platform in north of Wan'an basin
剖面位置见图 2

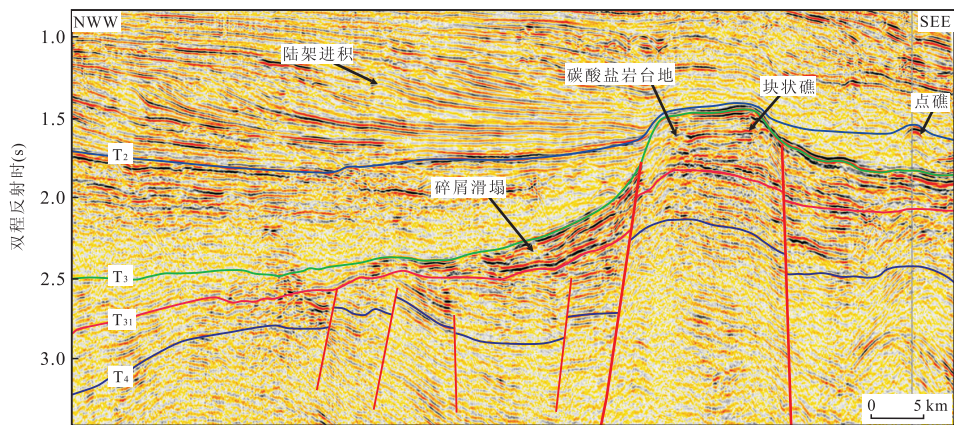


图 7 万安盆地中部典型的生物礁碳酸盐台地地震剖面

Fig. 7 Typical seismic profile of reefs and carbonate platform in center of Wan'an basin
剖面位置见图 2

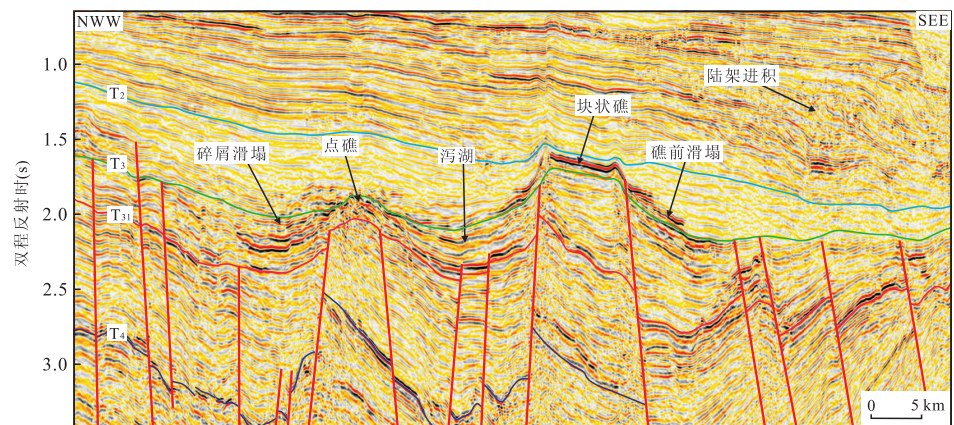


图 8 万安盆地中南部典型的生物礁碳酸盐台地地震解释剖面

Fig. 8 Typical seismic profile of reefs and carbonate platform in center and south of Wan'an basin
剖面位置见图 2

盐碎屑,主要分布于盆地北部。

4.1.3 块状礁 外形呈块状,顶部为连续的强反射,内部可见一个或多个连续性较好的同相轴,底部反射较弱(图 7~图 9),主要发育于相对狭窄的台地

顶部,该类礁体广泛发育于盆地的中部和南部,而其礁体厚度有一定的差异。12B-1 井钻井资料表明:南部块状礁的厚度约为 100 m(图 5,图 9),而盆地中部的块状礁厚度超过 500 m,礁体周缘的滑塌体反

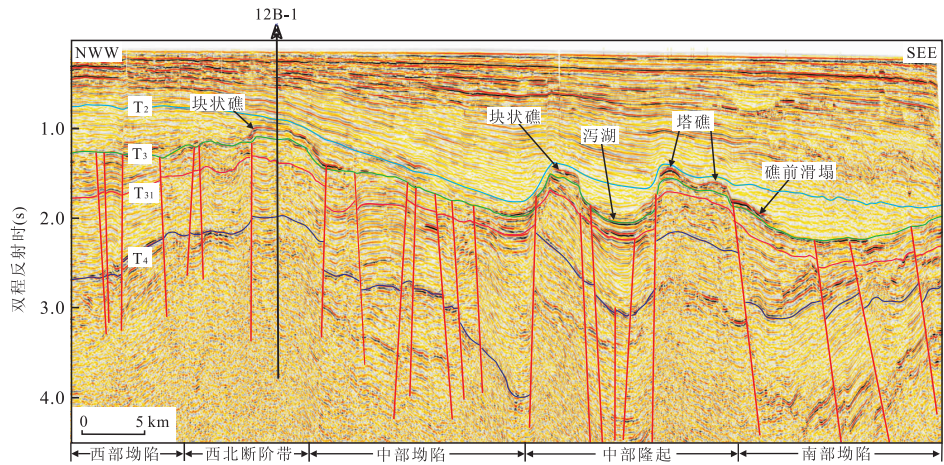


图 9 万安盆地南部典型的生物礁碳酸盐台地地震剖面

Fig. 9 Typical seismic profile of reefs and carbonate platform in south of Wan'an basin
剖面位置见图 2

射较强,但连续性较差.

4.1.4 塔礁 垂向生长是其主要特点,整体呈塔形,内部常见多个连续且平行的同相轴,顶部为连续的强反射,易于与上覆反射较弱的地层区分开来,而底部反射较弱并与台地连在一起(图 9). 该类礁体多发育于孤立台地的顶部,其生长高度可达 300 m,反映出塔礁的生长速率与海平面的上升速率一致,其主要分布于盆地南部台地的东侧边缘.

4.2 碳酸盐台地的地震识别

万安盆地中碳酸盐台地多为孤立台地,多发育于构造断块之上,台地边缘多以断层陡坡为主. 台地整体反射较强,顶部的连续强反射与上覆地层的弱反射界面明显,内部反射也较强,而底部与下伏地层的界面不是很明显. 台地内沉积大量的生物碎屑,呈中连续一强反射,这种台内沉积在北部比较明显(图 6). 台缘坡脚沉积了地震结构呈强反射且杂乱的碎屑滑塌体,在台地边缘具有明显的上超,且越远离台地边缘其沉积厚度越薄(图 7),反映了碳酸盐碎屑搬运能力随距离的增加而减小. 盆地南部碳酸盐台地具有明显的东西分带性,两侧的碳酸盐台地均发育于断块之上(图 8). 东侧台地由于生物礁的生长,致使台地两侧边缘高于台地地形,形成台内洼地,其强弱相间的连续性反射为典型的泻湖相沉积,而泻湖规模较小(图 9). 强反射的碳酸盐台地与弱反射的上覆地层存在一个明显的不整合界面(T3),表明在此界面之上碳酸盐台地的发育进入了另一个时期. 这些孤立台地空间上的展布受断层的限制,宽度相对较小,约为 5~20 km. 沉积厚度自西向东逐渐增加,东部最厚超过 1 000 m(图 5, 图 7).

5 生物礁及碳酸盐台地的时空分布

关于万安盆地碳酸盐台地的沉积相,前人已做了初步的分析,在品质有限的地震数据和无井推测的情况下(Lü *et al.*, 2013),早期沉积相图的建立缺乏可靠的依据. 本次工作根据区域钻井、测井信息和构造演化背景,在对万安盆地地震数据精细解读的基础之上,对盆地中的生物礁及碳酸盐台地进行了详细地识别,理清了研究区各时期的沉积相,明确了生物礁及碳酸盐台地的时空分布.

5.1 早中新世时期

该时期存在 4 个明显的沉积相区(图 10a),西部为典型的三角洲沉积相沉积;盆地西北部 and 西南部水体较浅,处于滨海环境;盆地中、东部另有浅海和半深海两个沉积相区. 这 4 个沉积相区呈条带状分布,自西向东水体逐渐加深,除盆地最西部缺乏数据之外,盆地内部也存在局部的沉积缺失,4A-1 井的钻井结果也证实了这一点. 该时期,仅在盆地中部三角洲前缘的局部地势高部位发育少量的孤立台地,北部的孤立台地得到了 MIA-1 井钻井资料的证实,而南部也有规模较小的孤立台地. 台地面积小,零星分布于盆地中部是该时期的主要特点.

5.2 中中新世时期

盆地中部及中南部以大面积的沉积碳酸盐台地为该时期沉积相带的主要特点(图 10b). 碳酸盐台地有两大发育区,盆地中部和中南部,这两个区域的台地沿北部隆起和中部隆起分布. 台地周缘的斜坡相对较窄,以陡坡为主. 横向上看,碳酸盐台地呈明

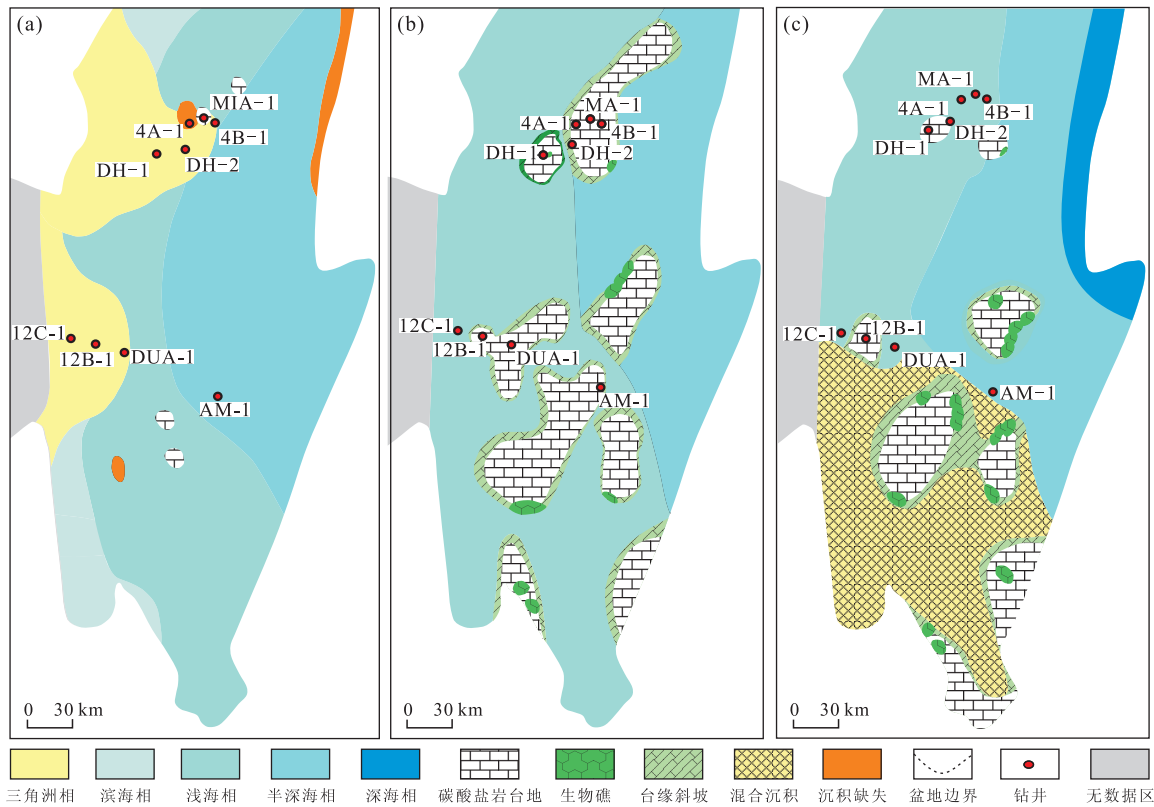


图 10 万安盆地生物礁碳酸盐台地的时空分布

Fig. 10 The space-time distribution of reef and carbonate platform in Wan'an basin
a. 初始发育阶段; b. 繁盛阶段; c. 衰退阶段

显的东、西带状分布,大致以 $108^{\circ}50'E$ 为界,这与前人早期的初步研究结果一致 (May and Eyles, 1985). 生物礁零星地分布于台地边缘,数量少、规模不等是其主要特征. 此外,该时期三角洲退出了在万安盆地的沉积,盆地西部整体处于浅海,仅西北部有小范围继承性的滨海相沉积.

5.3 晚中新世时期

与中中新世相比,碳酸盐台地的规模有大尺度的萎缩,盆地的南部多了碳酸盐岩与泥岩混合沉积这一相区(图 10c). 此时期的碳酸盐台地主要分布于盆地中南部,沿中部隆起分布. 台地周缘斜坡的沉积范围增大,致使两个孤立台地斜坡连成一体,其西部有一个面积较小的孤立台地. 盆地最南部的台地位于南部拗陷东南和南部的斜坡上,与曾母盆地西部斜坡区的“L”礁连在一起(吕彩丽等, 2011),有一定的规模,而盆地北部仅有两个孤立的小台地. 整体上,盆地中台地规模尽管很小,但仍有东、西带状分布的特点. 生物礁的数量、规模都超过了中中新世,这些生物礁主要分布于台地边缘的陡坡上.

5.4 上新世—第四纪时期

此时期,受陆架进积的影响(图 6~图 8),万安

盆地自西向东水体逐渐加深,沉积相带依次为浅海陆架砂泥岩沉积、浅海一半深海的陆架边缘泥岩、半深海陆坡、深海盆泥岩沉积等(金庆焕等, 2001). 盆地中、西部区域几乎整体在陆架进积的控制之下,大量的陆源碎屑输入不利于生物礁及碳酸盐岩的发育,而盆地东部处于深海一半深海环境也不利于碳酸盐台地的发育. 总之,上新世以来,万安盆地中不再有生物礁及碳酸盐台地的残存,因而,本次工作不再刻画该时期的沉积相.

6 生物礁及碳酸盐台地的发育演化

通过对万安盆地生物礁及碳酸盐台地精细地解释和钻井、测井资料分析,根据时空分布特点,同时结合该区的层序地层格架和相对海平面变化(图 3),笔者将万安盆地生物礁及碳酸盐台地的发育演化分为 4 个阶段,分别为:初始发育阶段、繁盛阶段、衰退阶段及淹没阶段.

6.1 初始发育阶段

早中新世时期,万安盆地整体处于滨浅海环境,该环境利于碳酸盐台地的初始发育,而盆地西部处

于河口三角洲的控制下,不利于台地的广泛发育,仅在盆地中浅海地势高部位发育少量的孤立台地,此时期尚未有生物礁发育. 尽管该阶段台地的规模小、数量少(图 10a),但对于碳酸盐台地的发育演化至关重要,是碳酸盐台地初始发育阶段的主要特点.

6.2 繁盛阶段

中中新世早期以来,随着海平面的上升,生物礁及碳酸盐台地的发育进入了繁盛阶段. 碳酸盐台地广泛发育于盆地中部的浅海环境中,规模大、数量多是其特点(图 10b). 巨厚的碳酸盐岩沉积(图 5,图 7 和图 9),反映出碳酸盐岩生长速率与相对海平面的上升速率一致. 该时期的生物礁已出现块状礁、点礁、台地边缘礁等类型的礁体,但其数量少,且主要发育于台地边缘的陡坡之上. 中中新世末期,相对海平面快速下降,致使生物礁及碳酸盐台地暴露(图 6 和图 7),其发育持续时间较短.

6.3 衰退阶段

至晚中新世早期,相对海平面再次快速上升,生物礁及碳酸盐台地的发育演化进入衰退阶段. 该时期,碳酸盐台地主体已经停止生长,仅有小规模的孤立台地发育于盆地南部区域(图 10c). 礁体类型有点礁、块状礁、塔礁等,同时数量众多的生物礁也是该阶段碳酸盐岩沉积的主要形式.

6.4 淹没阶段

上新世以来,相对海平面持续上升,超过碳酸盐台地的生长速率,致使生物礁及碳酸盐台地进入淹没时期. 盆地主体处于深海一半深海环境,不再有碳酸盐台地的发育,仅在盆地最东部万安滩附近有些环礁的残存.

7 生物礁及碳酸盐台地的控制因素

生物礁及碳酸盐台地的发育演化受多种因素的共同制约(Zampetti *et al.*, 2004; Fournier *et al.*, 2005; Sattler *et al.*, 2009). 基于万安盆地生物礁及碳酸盐台地空间分布特点、发育演化过程及钻井揭示的碳酸盐岩的岩性变化,笔者认为研究区生物礁及碳酸盐台地发育演化主要受控于构造作用和相对海平面变化. 尽管陆源碎屑的输入也有一定的影响(Fyhn *et al.*, 2013),但根据研究数据,本文将重点讨论构造作用和相对海平面变化这两大因素.

7.1 构造作用

构造作用对生物礁及碳酸盐台地发育及演化的影响作用主要表现在台地发育前古地形和台地生长

期构造的活动性两个方面. 前期剧烈的构造运动(如俯冲、碰撞、挤压等)可形成一些构造高地形,如:断层的上升盘、古隆起、古潜山等构造高点,利于生物礁及碳酸盐台地初始发育,而后期稳定的构造环境对于生物礁及碳酸盐台地的发育演化也非常重要(Bosence, 2005; Ding *et al.*, 2015; 方鹏高等, 2015).

发生在早一晚白垩世时期的礼乐运动,是万安盆地早期较为重要的一次构造运动,影响范围较大,使前新生代地层遭受强烈的剥蚀和褶皱,大量中酸性火成岩的侵入和喷发,形成了大量的花岗岩、火山岩及变质岩,构成了万安盆地的基底. 随后,受盆地东部万安走滑断裂的影响,始新世中晚期发生了全区最为重要的西卫运动(张光学和白志琳, 1998),盆地内部产生了大量的以 NE 向为主兼有 NS 向的断裂. 这些断裂主体活跃于始新世晚期至渐新世末期,其产生的构造断块为早中新世生物礁及碳酸盐台地的初始发育创造了地势高点. 在断裂控制下,盆地内部隆坳分布的格局限定了后期生物礁及碳酸盐台地的空间分布(图 2,图 10). 同时,这些高角度的正断层也决定了碳酸盐台地边缘的斜坡类型,即以陡坡为主(图 6,图 7). 早中新世以来,盆地内部断裂活动基本停止(Lü *et al.*, 2013),而且早中新世晚期至中中新世,相对缓慢的构造沉降为生物礁及碳酸盐台地的全面发育提供了稳定的构造环境.

而在中中新世早期,尽管南海扩张已经停止,但南沙地块继续向东南方向运动并与婆罗洲地块碰撞,导致了南海南部的挤压,形成了南沙海域重要的万安运动(Li *et al.*, 2014, 2015),该次挤压运动于中中新世末期达到了最大强度,致使南沙海域沉积地层整体抬升并遭受大规模的剥蚀. 这次构造抬升事件导致了万安盆地与中中新世早期发育的碳酸盐台地暴露而遭受剥蚀,形成了重要的 T₃ 不整合面(图 3),其剥蚀的碳酸盐碎屑与泥岩混合后,再次沉积形成了中中新世晚期全区大规模的混合沉积带(图 10c). 晚中新世以来,盆地演化进入了快速沉降阶段,生物礁及碳酸盐台地再次发育. 由于沉降速率超过了生物礁及碳酸盐台地生长速率,仅在早期台地的高点发育垂向生长的生物礁,并被海水快速淹没. 上新世以来,随着沉降的加速(Lü *et al.*, 2013),全区处于半深海环境,不利于生物礁及碳酸盐台地的生长.

7.2 相对海平面变化

生物礁及碳酸盐台地的生长对水深变化极为敏感,相对海平面的过快上升或下降都会影响其发育

(Wu *et al.*, 2014). 相对海平面的变化是区域构造沉降和全球海平面变化综合作用的结果. 早中新世时期, 万安盆地构造活动开始减弱, 相对海平面较为稳定(图 3), 利于生物礁及碳酸盐台地的初始发育. 至中中新世时, 构造沉降速率较慢, 整体上相对海平面上升速率缓慢, 适宜的水体环境利于万安盆地中生物礁及碳酸盐台地全面发育. 该时期, 相对海平面变化表现出了多个旋回, 与钻井揭示生物礁及碳酸盐岩台地发育演化的多个旋回一致(图 4, 图 5). 中中新世末, 受万安运动的影响, 全区相对海平面下降幅度超过 100 m(图 3), 致使早期沉积的生物礁及碳酸盐台地全面暴露, 遭受剥蚀, 形成明显的区域不整合面(T_3). 随后, 相对海平面快速下降, 生物礁及碳酸盐台地再次发育, 但相对海平面的下降速度超过了生物礁及碳酸盐台地的生长速度, 导致台地大规模萎缩而进入了衰退阶段. 上新世以来, 相对海平面持续上升, 导致生物礁及碳酸盐台地被全面淹没.

8 结论

(1) 万安盆地中新世的生物礁以点礁、台地边缘礁、块状礁及塔礁为主, 主要发育于台地边缘的陡坡之上, 其中晚中新世时期生物礁最为发育.

(2) 中新世碳酸盐台地主要分布于北部隆起和中部隆起及其周缘地带, 横向上具有东、西分带的特点. 钻井及测井结果表明: 东、西两带碳酸盐岩的岩性及沉积环境有一定的差异, 东侧碳酸盐岩的岩性较纯, 沉积厚度大; 而西侧靠近陆源碎屑, 碳酸盐岩中含有碎屑杂质, 沉积厚度较小.

(3) 万安盆地碳酸盐台地的发育演化经历了 4 个演化阶段, 早中新世的初始发育阶段、中中新世的繁盛阶段、晚中新世的衰退阶段和上新世以来的淹没阶段.

(4) 在生物礁及碳酸盐台地的发育演化过程中, 构造作用和相对海平面变化是两个重要的控制因素. 其中, 基底断裂控制着生物礁及碳酸盐台地初始发育及后期发育的空间分布, 晚中新世以来的快速沉降控制了台地的衰退及淹没过程; 而相对海平面变化也影响了生物礁及台地的发育演化阶段.

致谢: 在地震剖面的解释和钻井信息分析时, 得到了广州海洋地质调查局、海洋矿产地质调查所领导和同事的大力帮助; 同时两位匿名审稿人提出了宝贵的意见, 在此一并表示衷心的感谢!

References

- Bosence, D., 2005. A Genetic Classification of Carbonate Platforms Based on Their Basinal and Tectonic Settings in the Cenozoic. *Sedimentary Geology*, 175(1–4): 49–72. doi:10.1016/j.sedgeo.2004.12.030
- Briaies, A., Patriat, P., Tapponnier, P., 1993. Updated Interpretation of Magnetic Anomalies and Seafloor Spreading Stages in the South China Sea: Implications for the Tertiary Tectonics of Southeast Asia. *Journal of Geophysical Research*, 98(B4): 6299–6328. doi:10.1029/92jb02280
- Ding, W. W., Li, J. B., Dong, C. Z., et al., 2015. Oligocene-Miocene Carbonates in the Reed Bank Area, South China Sea, and Their Tectono-Sedimentary Evolution. *Marine Geophysical Research*, 36(2–3): 149–165. doi:10.1007/s11001-014-9237-5
- Fang, P. G., Ding, W. W., Fang, Y. X., et al., 2015. Development of Carbonate Platform and Its Response to Cenozoic Tectonic in Reef Bank Area, the South China Sea. *Earth Science*, 40(12): 2052–2066 (in Chinese with English abstract).
- Franke, D., Savva, D., Pubellier, M., et al., 2014. The Final Rifting Evolution in the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 58: 704–720. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.11.020
- Fournier, F., Borgomano, J., Montaggioni, L. F., 2005. Development Patterns and Controlling Factors of Tertiary Carbonate Buildups: Insights from High-Resolution 3D Seismic and Well Data in the Malampaya Gas Field (Offshore Palawan, Philippines). *Sedimentary Geology*, 175(1–4): 189–215. doi:10.1016/j.sedgeo.2005.01.009
- Fyhn, M. B. W., Boldreel, L. O., Nielsen, L. H., et al., 2013. Carbonate Platform Growth and Demise Offshore Central Vietnam: Effects of Early Miocene Transgression and Subsequent Onshore Uplift. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76(25): 152–168. doi:10.1016/j.jseaes.2013.02.023
- Jin, Q. H., Wu, J. M., Xie, Y. Q., 2001. The Analysis and Oil Resource of Sedimentary Basins in West of Nansha Sea Area. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Khain, V. E., Polyakova, I. D., 2004. Oil and Gas Potential of Deep- and Ultradeep-Water Zones of Continental Margins. *Lithology and Mineral Resources*, 39(6): 530–540. doi:10.1023/b:limi.0000046956.08736.e4
- Li, C. F., Li, J. B., Ding, W. W., et al., 2015. Seismic Stratigraphy of the Central South China Sea Basin and Im-

- plications for Neotectonics, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(3): 1377–1399. doi:10.1002/2014jb011686
- Li, C. F., Xu, X., Lin, J., et al., 2014. Ages and Magnetic Structures of the South China Sea Constrained by Deep Tow Magnetic Surveys and IODP Expedition 349. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(12): 4958–4983. doi:10.1002/2014jc005567
- Li, J. B., 2011. Dynamics of the Continental Margins of South China Sea: Scientific Experiments and Research Progresses. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(12): 2993–3003 (in Chinese with English abstract).
- Lü, C. L., Wu, S. G., Yao, Y. J., et al., 2013. Development and Controlling Factors of Miocene Carbonate Platform in the Nam Con Son Basin, Southwestern South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 45: 55–68. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.04.014
- Lü, C. L., Yao, Y. J., Wu, S. G., et al., 2011. Seismic Responses and Sedimentary Characteristic of the Miocene Wan'an Carbonate Platform in the Southern South China Sea. *Earth Science*, 36(5): 931–938 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Y. B., Wu, S. G., Lü, F. L., et al., 2011. Seismic Characteristics and Development of the Xisha Carbonate Platforms, Northern Margin of the South China Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(3): 770–783. doi:10.1016/j.jseaes.2010.11.003
- May, J. A., Eyles, D. R., 1985. Well Log and Seismic Character of Tertiary Terumbu Carbonate, South China Sea, Indonesia. *AAPG Bulletin*, 69(4): 1339–1358. doi:10.1306/ad462c5e-16f7-11d7-8645000102c1865d
- Mi, L. J., Zeng, Q. B., Yang, H. C., 2013. Types of Organic Reefs and Exploration Direction in Zhujiang Formation of Dongsha Uplift. *Acta Petrolei Sinica*, 34(2): 24–31 (in Chinese with English abstract).
- Miller, K. G., Kominz, M. A., Browning, J. V., et al., 2005. The Phanerozoic Record of Global Sea-Level Change. *Science*, 310(5752): 1293–1298. doi:10.1126/science.1116412
- Qiu, Y., Wang, Y. M., 2001. Reefs and Paleoenvironment in the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(1): 65–73 (in Chinese with English abstract).
- Riding, R., 2002. Structure and Composition of Organic Reefs and Carbonate Mud Mounds: Concepts and Categories. *Earth-Science Reviews*, 58(1–2): 163–231. doi:10.1016/s0012-8252(01)00089-7
- Sattler, U., Immenhauser, A., Schlager, W., et al., 2009. Drowning History of a Miocene Carbonate Platform (Zhujiang Formation, South China Sea). *Sedimentary Geology*, 219(1–4): 318–331. doi:10.1016/j.sedgeo.2009.06.001
- Song, T. R., Li, C. F., 2015. Rifting to Drifting Transition of the Southwest Subbasin of the South China Sea. *Marine Geophysical Research*, 36(2–3): 167–185. doi:10.1007/s11001-015-9253-0
- Taylor, B., Hayes, D. E., 1983. Origin and History of the South China Sea. In: Hayes, D. E., ed., *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands, Part 2. American Geophysical Union, Geophysical Monograph*, 27: 23–56.
- Wang, R. L., Zhou, X. K., Zeng, Y., et al., 2011. Seismic Response Characteristics and Identification of Miocene Carbonate Rocks in Dongsha Uplift of Pearl River Mouth Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 33(8): 63–68 (in Chinese with English abstract).
- Wei, P. S., Liu, Q. X., Zhang, J. L., et al., 2006. Re-Discussion of the Relationship between Reef and Giant Oil-Gas Fields. *Acta Petrolei Sinica*, 27(2): 38–42 (in Chinese with English abstract).
- Wilson, M. E. J., 2008. Global and Regional Influences on Equatorial Shallow-Marine Carbonates during the Cenozoic. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeogeology*, 265(3–4): 262–274. doi:10.1016/j.palaeo.2008.05.012
- Wu, S. G., Yang, Z., Wang, D. W., et al., 2014. Architecture, Development and Geological Control of the Xisha Carbonate Platforms, Northwestern South China Sea. *Marine Geology*, 350: 71–83. doi:10.1016/j.margeo.2013.12.016
- Yang, C. P., Yao, Y. J., Li, X. J., et al., 2011. Cenozoic Sequence Stratigraphy and Lithostratigraphic Traps in Wan'an Basin, the Southwestern South China Sea. *Earth Science*, 36(5): 845–852 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C. P., Yao, Y. J., Li, X. J., et al., 2014. Sequence Stratigraphy and Sedimentary Cycle of Miocene Carbonate Buildups in Zengmu Basin, the Southern South China Sea. *Earth Science*, 39(1): 91–98 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. Z., Wang, M. J., Liang, J. Q., et al., 2003. Tectonic Subsidence and Its Control on Hydrocarbon Resources in Wan'an Basin in the South China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 23(2): 85–88 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z., Wu, S. G., Lü, F. L., et al., 2014. Evolutionary

- Model and Control Factors of Late Cenozoic Carbonate Platform in Xisha Area. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 34(5): 47—55 (in Chinese with English abstract).
- Zampetti, V., Schlager, W., van Konijnenburg, J. H. V., et al., 2004. Architecture and Growth History of a Miocene Carbonate Platform from 3D Seismic Reflection Data: Luconia Province, Offshore Sarawak, Malaysia. *Marine and Petroleum Geology*, 21(5): 517—534. doi: 10.1016/j.marpetgeo.2004.01.006
- Zhang, G. X., Bai, Z. L., 1998. The Characteristics of Structural Styles and Their Influences on Oil and Gas Accumulation of the Wan'an Basin in the Southwestern South China Sea. *Experimental Petroleum Geology*, 20(3): 210—216 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. C., Mi, L. J., Qu, H. J., et al., 2013. Petroleum Geology of Deep-Water Area in Offshore China. *Acta Petrolei Sinica*, 34(2): 1—14 (in Chinese with English abstract).
- 附中文参考文献**
- 方鹏高, 丁巍伟, 方银霞, 等, 2015. 南海礼乐滩碳酸盐台地的发育及其新生代构造响应. *地球科学*, 40(12): 2052—2066.
- 金庆焕, 吴进民, 谢元秋, 2001. 南沙西部海域沉积盆地分析与油气资源. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 李家彪, 2011. 南海大陆边缘动力学: 科学实验与研究进展. *地球物理学报*, 54(12): 2993—3003.
- 吕彩丽, 姚永坚, 吴时国, 等, 2011. 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. *地球科学*, 36(5): 931—938.
- 米立军, 曾清波, 杨海长, 2013. 东沙隆起珠江组生物礁类型及勘探方向. *石油学报*, 34(2): 24—31.
- 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.
- 汪瑞良, 周小康, 曾驿, 等, 2011. 珠江口盆地东部东沙隆起中新世碳酸盐岩与生物礁地震响应特征及其识别. *石油天然气学报*, 33(8): 63—68.
- 卫平生, 刘全新, 张景廉, 等, 2006. 再论生物礁与大油气田的关系. *石油学报*, 27(2): 38—42.
- 杨楚鹏, 姚永坚, 李学杰, 等, 2011. 万安盆地新生代层序地层格架与岩性地层圈闭. *地球科学*, 36(5): 845—852.
- 杨楚鹏, 姚永坚, 李学杰, 等, 2014. 南海南部曾母盆地中新世碳酸盐岩的层序地层. *地球科学*, 39(1): 91—98.
- 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.
- 杨振, 吴时国, 吕福亮, 等, 2014. 西沙海区晚新生代碳酸盐台地的发育模式及控制因素. *海洋地质与第四纪地质*, 34(5): 47—55.
- 张光学, 白志琳, 1998. 南海西南部万安盆地构造样式特征、成因及找油意义. *石油实验地质*, 20(3): 210—216.
- 张功成, 米立军, 屈红军, 等, 2013. 中国海域深水区油气地质. *石油学报*, 34(2): 1—14.