

doi: 10.12029/gc20170302

杨振, 张光学, 张莉, 鄢伟, 林珍, 骆帅兵, 钱星. 2017, 南海南部北康盆地生物礁的类型及油气勘探前景[J]. 中国地质, 44(3): 428-438.

Yang Zhen, Zhang Guangxue, Zhang Li, Yan Wei, Lin Zhen, Luo Shuaibin, Qian Xing. 2017. The style and hydrocarbon prospects of reefs in the Beikang Basin, southern South China Sea[J]. Geology in China, 44(3): 428-438(in Chinese with English abstract).

## 南海南部北康盆地生物礁的类型及油气勘探前景

杨振 张光学 张莉 鄢伟 林珍 骆帅兵 钱星

(广州海洋地质调查局, 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 中国地质调查局海洋石油天然气地质研究中心,  
广东 广州 510075)

**摘要:**南海南部北康盆地发育大量的生物礁, 蕴藏丰富的油气资源。文章基于北康盆地高精度地震数据及钻井数据的研究表明, 北康盆地的生物礁成像较好、类型齐全, 有点礁、台地边缘礁、块状礁、层状礁、塔礁、环礁共 6 类型。其发育演化可以分为 4 个阶段, 分别为早中新世的初始发育阶段、中中新世早期的繁盛阶段、中中新世晚期的衰退阶段和晚中新世的淹没阶段。古近纪及早中新世的断裂活动产生了大量的构造高点, 为生物礁的初始发育创造了条件, 而中中新世以来基底快速沉降导致的相对海平面的快速上升决定了生物礁主要发育于中中新世时期, 而晚中新世以来相对海平面持续上升, 致使生物礁退积到隆起顶部, 从而进入淹没阶段。北康盆地的生物礁数量多、规模大, 而且很少受后期成岩作用的二次改造, 具备优质储层形成的前提。同时, 区域烃源岩、疏导体系、盖层及生物礁的分布等油气地质条件, 决定了中部隆起西部和东部隆起东部是北康盆地今后生物礁油气勘探的重点区域。

**关键词:**南海南部; 北康盆地; 生物礁; 发育演化; 油气勘探

**中图分类号:**P744.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2017)03-0428-11

## The style and hydrocarbon prospects of reefs in the Beikang Basin, southern South China Sea

YANG Zhen, ZHANG Guangxue, ZHANG Li, YAN Wei,  
LIN Zhen, LUO Shuaibin, QIAN Xing

(MLR Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Guangzhou Marine Geological Survey, Marine Petroleum and Gas geological Research Center, China Geological Survey, Guangzhou 510075, Guangdong, China)

**Abstract:** During the Miocene, there were a number of reefs developed in the Beikang Basin, which constitute potential for hydrocarbon exploration. The high-resolution seismic data and numerous well drilling data have provided an opportunity to understand the evolution of reefs in the study area. Six types of reefs were identified, i.e., point reef, platform-edge reef, block reef, bedded reef, pinnacle reef, and atoll reef, and their development could be divided into four stages. In early Miocene, a few point

收稿日期: 2017-06-03; 改回日期: 2017-06-14

基金项目: 国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMR-2017-A-14)和中国地质调查局项目(DD20160155)联合资助。

作者简介: 杨振, 男, 1984年生, 博士后, 主要从事海洋碳酸盐台地发育演化、含油气性及古季风气候研究; E-mail: yangzhen011043@163.com。

通讯作者: 张光学, 男, 1965年生, 教授级高级工程师, 主要从事海域油气和天然气水合物资源调查与研究工作; E-mail: zhguangxue@gmgs.cn。

reefs small in size initiated in this basin and they flourished in the early middle Miocene and mainly developed around the Central Uplift and Eastern Uplift. However, the reefs began to wither in the late middle Miocene in response to a rapid relative sea level rise which was caused by the loading subsidence. Since late Miocene, with the continuous rising of the relative sea level, many reefs formerly developed around the Central Uplift and Eastern Uplift have been submerged and only some atoll reefs have survived around the islands on the Eastern Uplift. Additionally, the numerous reefs which are little influenced by later diagenesis are favorable reservoirs for hydrocarbon exploration. The match relation of regional hydrocarbon rock, dredged system and the distribution of reefs indicates that the west of Central Uplift and the east of Eastern Uplift seem to be the favorable exploration zones for the hydrocarbon exploration of reefs in the Beikang Basin.

**Key words:** southern South China Sea; Beikang Basin; Reef; Development; Hydrocarbon exploration

**About the first author:** YANG Zhen, male, born in 1984, post-doctor researcher, engages in the study of evolution and hydrocarbon of marine carbonate platform and paleoclimatology; E-mail: yangzhen011043@163.com.

**About the corresponding author:** ZHANG Guangxue, male, born in 1965, professor, engages in the study of geology of deep water oil gas and gas hydrate; E-mail: zhguangxue@gmgs.cn.

**Fund support:** Supported by the Key Laboratory of Marine Mineral Resources (KLMMR-2017-A-14) and Geological Investigation of China Geological Survey (No. DD20160155).

## 1 引言

通常说的生物礁是指固着底栖生物原地生长而形成的一种特殊的碳酸盐建造(Riding, 2002),其生长对环境变化的响应较为敏感,水深、温度、波浪、盐度、溶解氧、底质、营养盐等任何一个因素的变化都可能改变生物礁的生长形态或者内部结构,甚至导致其淹没死亡(Belopolsky and Droxler, 2003; Wilson et al., 2008; Betzler et al., 2009)。同时,因其物性好、产能高、采收率高及勘探开发成本低,在油气勘探工作中占有重要的地位(Zampetti et al., 2004; 周刚等, 2013; 米立军等, 2013; Wu et al., 2014; 杨振等, 2014, 2016a, 2017; 王文之等, 2016)。基于生物礁对环境变化的敏感性和含油气性,在国内外得到了广泛的关注和研究。南海自形成以来,一直处于热带和亚热带地区,尤其在晚渐新世之后,发育了大量的生物礁。受南海构造演化的影响,南海南部的生物礁不仅发育早于北部,而且规模和数量也都远远超过了北部(Tyrrell and Christian, 1992; 邱燕和王英民, 2001; Zampetti et al., 2004; Ding et al., 2015)。油气勘探结果表明,南海南部的生物礁较北部具有更为广阔的勘探潜力。目前,南海周边国家已在南沙海域发现了万安盆地的兰龙油田、红兰花气田,曾母盆地的L气田、F6和F23气田以及巴拉望盆地的尼多油田等30多个生物礁油气田(张光学和白志琳, 1998; Fournier

et al., 2004, 2005; 杨振等, 2016b),这些油气田大多位于中国传统疆域之内。

南海南部北康盆地于中中新世也发育大量的生物礁,具有巨大的勘探潜力。受地震数据品质和区域构造演化复杂的限制,国内外对该区域生物礁的研究都明显滞后,尚未取得实质性进展。本文基于北康盆地约20000 km高分辨率的地震数据,结合区域的钻井信息,依据生物礁的生长特性及其地震反射特征,系统识别区域内的生物礁,明确北康盆地生物礁的类型及各类礁体的地震反射特征,建立其发育模式,分析了勘探前景。以上工作的开展,对下一步开展南海南部北康盆地生物礁储层预测具有重要的指导意义。

## 2 区域地质背景

北康盆地位于南沙海域的中部地区(图1),水深跨度较大,从盆地南部浅水逐渐过渡至盆地的北部深水区,水深超过2000 m。其地处南沙地块之上,盆地南部与曾母盆地以廷贾断裂为界(王嘹亮等, 2002)。中始新世时期,印度洋发生第三次扩张并与欧亚板块发生碰撞,并向东南亚大角度斜向俯冲,加速了东南亚大陆东南向挤出,推动了南沙块体的向南移动(Madon et al., 2013),导致区域不整合面的形成,该运动被称之为西卫运动,该运动导致了北康盆地发育大量北向断裂,切割始新统和古新统湖相地层。而至渐新世中期(32 Ma),南海海

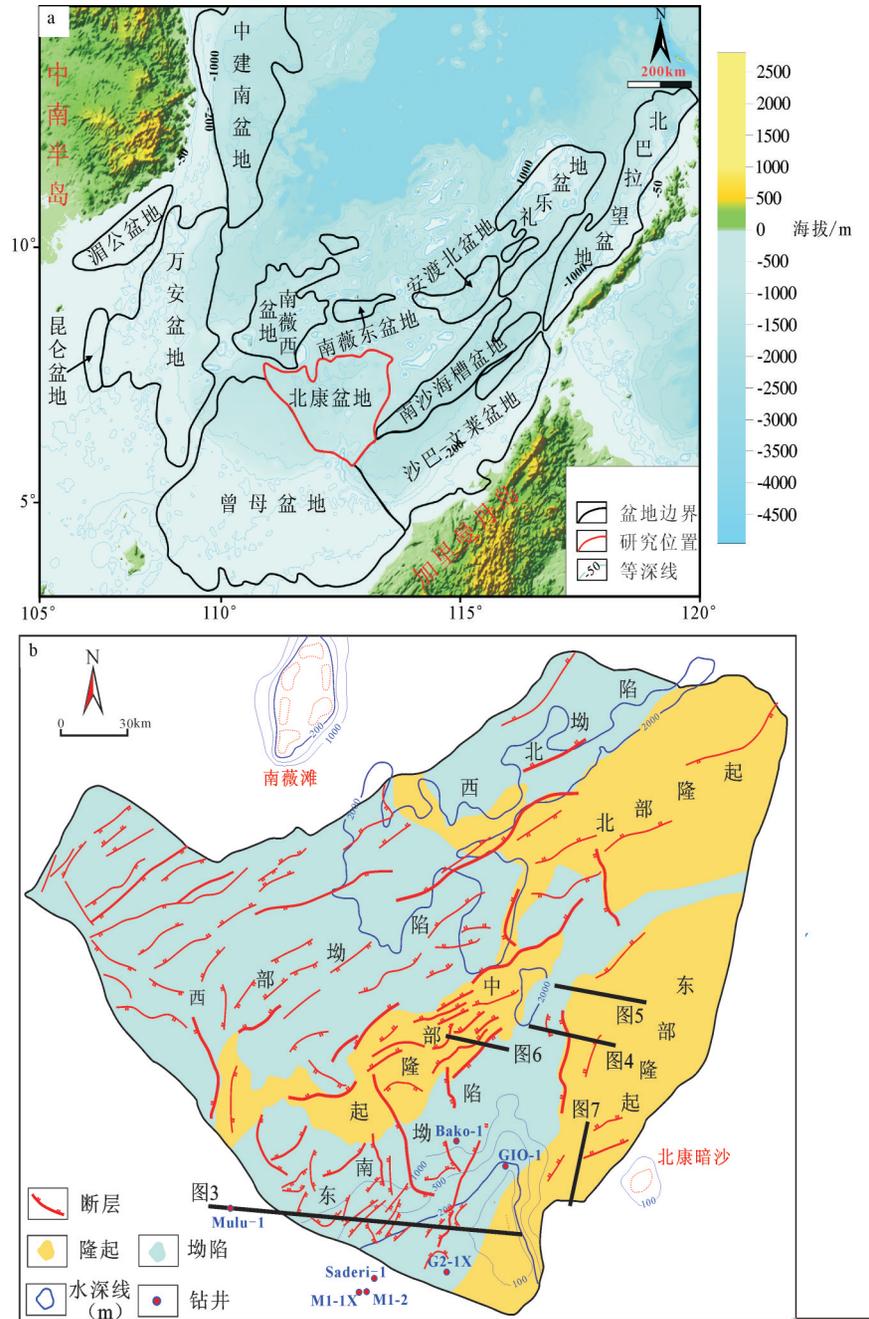


图1 南海南部沉积盆地分布及研究区位置图(A)及研究区的构造区划及地震测线分布、钻井位置图(B)  
(据王宏斌等,2001修改)

Fig.1 The distribution of sedimentary basins and the study area in southern South China Sea (A) and tectonic divisions of study area and the locations of seismic lines and wells mentioned in the text (B) (modified after Wang et al., 2001)

底开始扩张,南沙地块开始整体向南漂移,在漂移过程中,前期北东向的断裂继续活跃从而形成南海运动。古南海俯冲于婆罗洲地块之下,俯冲作用由西南向东北方向逐渐关闭,最终持续至早中新世末期 (Madon et al., 2007, 2013; Ismail and Tucker,

1999; Hutchison, 2004)。俯冲作用的终止可能是由于古南海洋壳俯冲殆尽,南沙地块到达现今的位置并与婆罗洲板块发生碰撞。该次碰撞事件导致南沙海域早期沉积的地层大规模的抬升而遭受侵蚀,从而形成南沙运动 (金庆焕等, 2001; Madon et al.,

2013)。IODP349航次钻井结果揭示,南沙运动可能也是造成南海西南次海盆停止扩张的主要原因(Hall, 2002; Li et al., 2015),该构造运动是南海海域最为重要的构造运动之一。中中新世以来,北康盆地进入快速沉降阶段,其沉降的主要驱动力可能为沉积负载所导致(刘振湖和郭丽华, 2003; Madon et al., 2013)。在此进程中,北康盆地发育大量的北东、北西向断裂(张莉等, 2003),形成了西北拗陷、西部拗陷、中部隆起、北部隆起、东南拗陷和东部隆起6个二级构造单元(图1b)。

北康盆地的基底以前新生代变质岩和酸性—基性火成岩为主,其中火成岩主要分布于盆地东部地区。盆地沉积盖层以新生代地层为主,重磁反演结果表明西部拗陷沉积最厚,超过11000 m。井震标定结果显示,全区的沉积地层自下而上可以识别出Tg、T5、T4、T3、T2、T1共6个地震反射界面(图2),其中Tg、T5、T4、T3分别对应礼乐运动、西卫运动、南海运动和南沙运动。渐新世之前的地层以湖相沉积为主,而钻Mulu-1和Bako-1井揭示,北康盆地于渐新世时期,多为半深海—深海沉积。早中新世末期,随着区域的整体抬升,并遭受海底侵蚀之后,北康盆地整体处于滨浅海环境,这为生物礁的发育创造了条件。而晚中新世以来,随着沉降的加速,全区由滨浅海环境逐渐演变为半深海—深海的沉积,不利于生物礁的生长。因此,与生物礁发

育相关的地层主要为早中新统至第四系,自下而上依次为日积组、海宁组、南康组和北康组(图3)。

### 3 生物礁的地震识别

生物礁的地震识别主要是依据礁体的外形、顶底界面的反射特征、内部反射结构以及与周缘地层的接触关系等特点进行识别(Ma et al., 2011; 杨振等, 2016a, 2016b)。不同的生物礁具有不同的生长形态,各自对应的反射结构也不尽相同,同时因分类依据和研究目的的不同导致了生物礁分类的多样性(Riding, 2002; Wilson, 2008)。本文根据生物礁发育的位置和生长形态对其进行分类。通过对南沙海域北康盆地地震数据精细的解释及与曾母盆地和万安盆地等邻区对比,在研究区识别出点礁、台地边缘礁、块状礁、层状礁、塔礁、环礁等6种类型的礁体。

#### 3.1 点礁

外形呈丘形,两翼近对称,顶部为连续的强反射,内部反射较弱或呈空白反射,底部与下伏地层界限不明显(图4)。这类礁体较小,空间展布为1~2.5 km,主要发育于台地之上,该类礁体的数量在北康盆地相对较少,集中分布于中部隆起之上和东部隆起的西部。

#### 3.2 台地边缘礁

整体呈丘形,顶部为连续的强反射,内部为杂乱反射,有时可见1~2个同向轴,强反射的外形易区

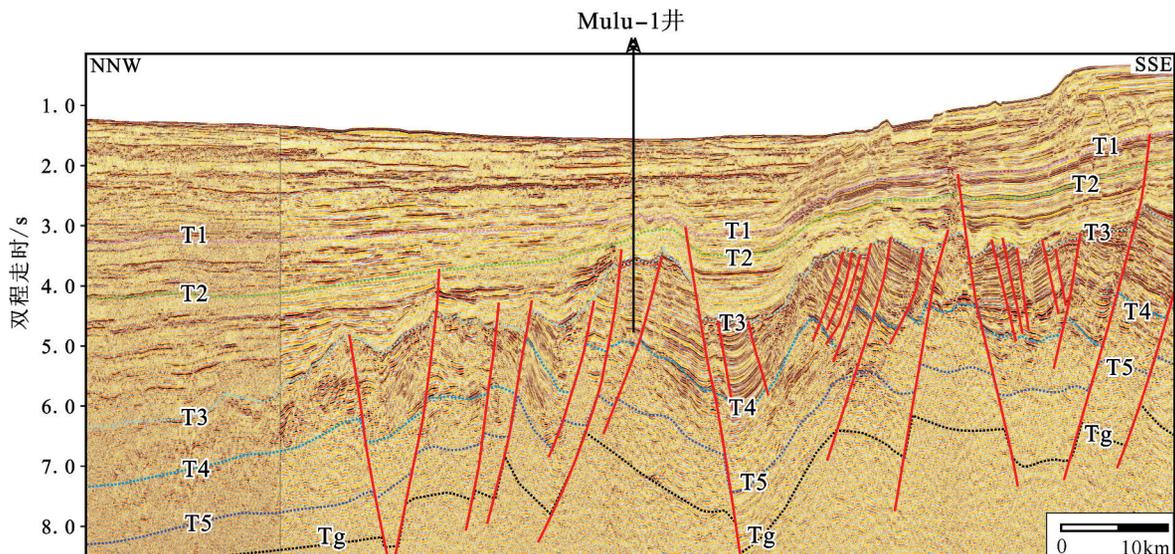


图2 北康盆地过Mulu-1井的地震剖面  
Fig.2 Seismic profile across the well Mulu-1 of Beikang Basin

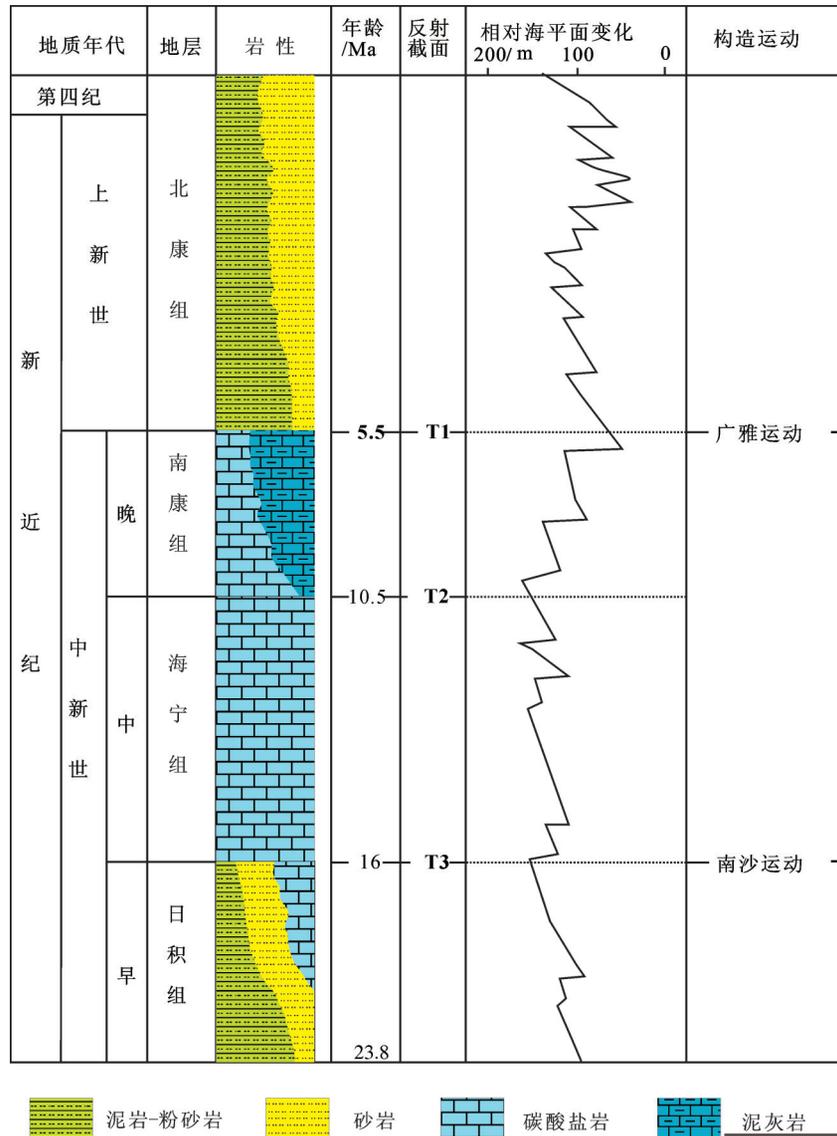


图3 北康盆地综合地层柱状图  
Fig.3 The stratigraphic column of the Beikang Basin

分于周缘弱反射的地层(图5),北康盆地的台地边缘礁与曾母盆地西部斜坡区发育的台地边缘礁具有相似的地震相(杨楚鹏等,2013)。台地边缘礁主要发育于台地边缘,其规模因台地边缘地形特点差异而不同,横向上展布为2~5 km不等。在其生长过程中,部分礁体碎屑受重力作用滑塌而沉积于坡脚,形成反射杂乱的礁前滑塌。该类礁体广泛分布于东部隆起的西部。

### 3.3 块状礁

外形呈块状,主要发育于台地边缘陡坡的顶部,顶部为连续的强反射,底部发射也为连续的强

反射,与上覆或下伏呈中-弱反射地层的界限明显(图5,图6)。内部多为可见1~2个呈连续强反射的同相轴,礁体的整体厚度多在50~150 m。这类礁体的规模多受早期碳酸盐台地的地貌所限(杨振等,2016c),在不同的区域其规模有一定的差异:在东部隆起的南部区域,横向展布可以达10 km以上,并随着台地的退积而向地势高部位迁移,同时部分台缘斜坡堆积了大量的生物礁碎屑,而在中部隆起之上,相对较窄,台前斜坡的礁体碎屑也相对较少,这与万安盆地中中新世发育于相对狭窄的台地顶部的块状礁极为相似(杨振等,2016b)。需要指出的

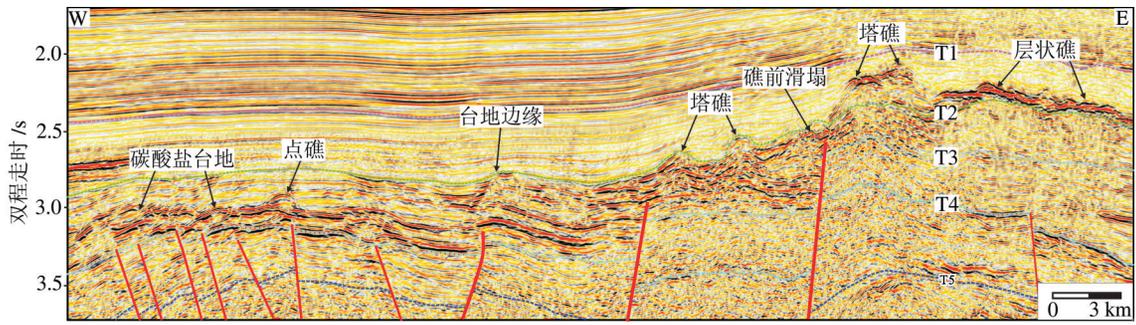


图4 北康盆地点礁及塔礁的地震反射特征  
 Fig. 4 Typical seismic reflection of patch reef and pinnacle reef in the Beikang Basin

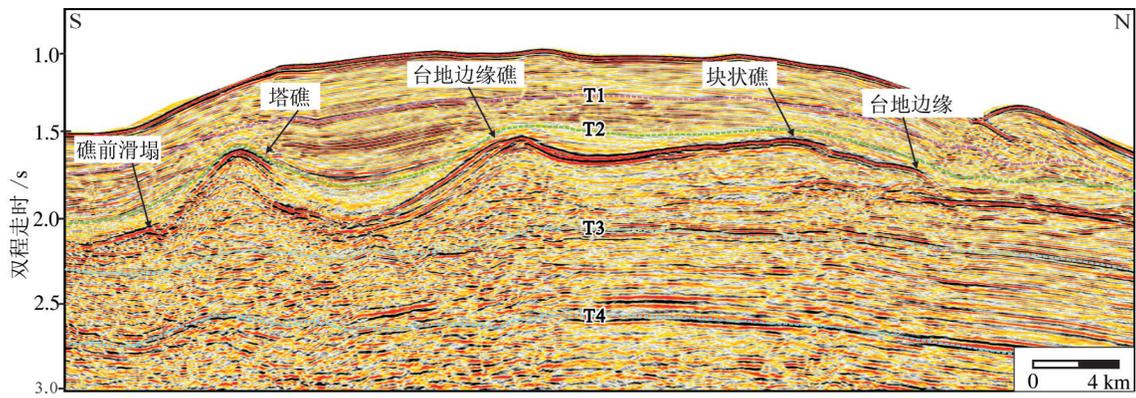


图5 北康盆地块状礁及台地边缘礁的地震反射特征  
 Fig. 5 Typical seismic reflection of block reef and platform-edge reef in the Beikang Basin

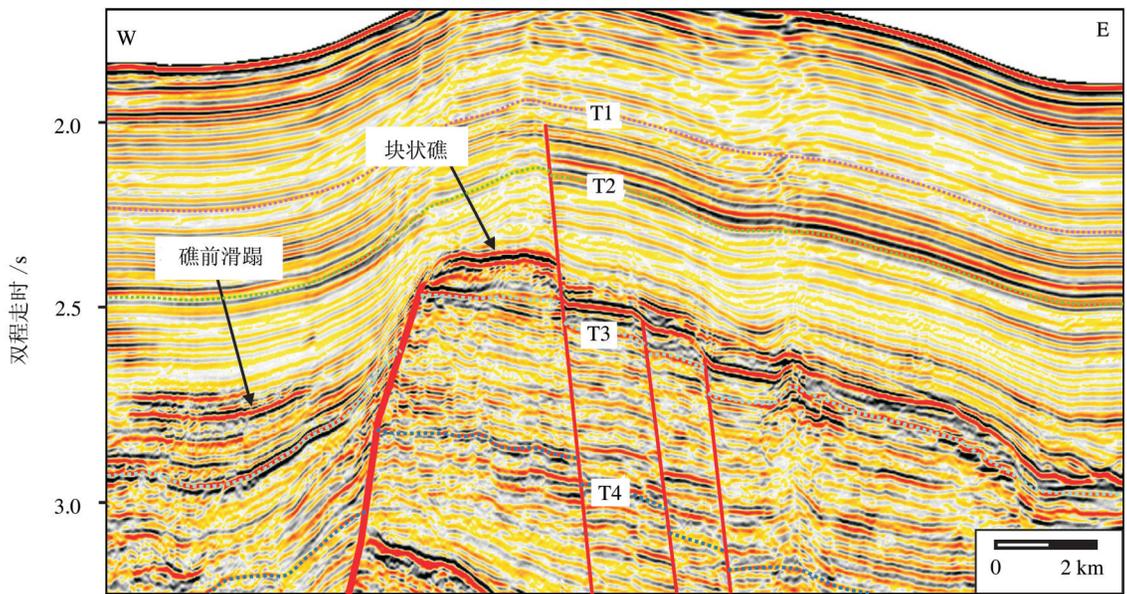


图6 北康盆地块状礁的地震反射特征  
 Fig. 6 Typical seismic reflection of block reef in the Beikang Basin

是,这类礁体不仅多受台地顶部的地貌所限,而且其持续发育时间也相对较短,随着相对海平面的上升,生物礁快速淹没,南海北部东沙海域的块状礁横向展布极为壮观,但其厚度普遍不超过200 m,就很好地反映了这一特点(米立军等,2013)。

### 3.4 层状礁

层状礁实质上是块状礁在同一位置连续的垂向发育而形成,这类生物礁整体上以层状连续的强反射为主,顶部与上覆地层的界面明显,而下部直接发育于早期的块状礁体之上,界面不明显,内部可见多个连续反射的强轴,礁体的厚度多在100~200 m,部分可达300 m(图4)。该类礁体主要分布于东部隆起之上,数量相对较少,但规模可达10 km左右。

### 3.5 塔礁

整体呈现塔形,地震剖面上表现为连续丘形强反射的垂向叠加。单个丘体内部为杂乱的弱反射,底部近空白反射,顶部反射较强与上覆地层的界面明显。塔礁横向展布1~3 km,而垂向高度可达1000 m,表明其具有多期持续生长的特点,同时也反映其生长速度与相对海平面的上升速度一致(图4,图5,图7)。一般情况下,塔礁周缘都有较强的水动力环境,导致其侧翼通常会有水道伴随发育,这种现象在北康盆地东部隆起的东南部近北康暗沙区域较为常见,这与西沙海域的塔礁周缘常发育“U”下切的水道较为相似(杨振等,2017)。同时,在塔礁发育的过程中,常呈现出向地势高部位迁移的特征,表明在其发育时期,海平面是在持续上升的。塔礁在北康盆地最为常见,数量众多,是北康盆地最为重要的一类礁体,广泛发育于东部隆起和中部隆起之上,这类礁

体与曾母盆地南康台地之上塔礁的地震相和发育时代都可以很好地对比(杨楚鹏等,2013)。

### 3.6 环礁

环礁为碳酸盐台地淹没阶段生物礁的主要类型,多具有垂向快速生长的特点。整体呈丘形,礁体顶部为连续的强反射,而内部为杂乱的弱反射。其横向规模2~4 km不等(图7),部分环礁的生长高度超过1000 m,主要发育于地势高部位的台地顶部,主要分布于东部隆起的东南部区域。

总之,北康盆地的生物礁数量众多、类型齐全,以台地边缘礁和塔礁为代表,广泛分布于中部隆起之上和东部隆起的西部及东南部区域。这些生物礁主要发育于中中新世,虽然持续发育时间较短,仅部分塔礁和环礁发育至晚中新世时期,但是礁体成像较好、易于识别,并且可以和邻区曾母盆地和万安盆地以及南海北部东沙海域的生物礁很好地对比,这也是南海南部北康盆地生物礁的一个特色。

## 4 北康盆地生物礁的发育模式

精细的地震解释结果表明,北康盆地类型齐全,主要发育于中中新世,这也是该时期碳酸盐岩沉积主要形成时期,这与邻区万安盆地晚中新世生物礁发育形式较为相似(Lü et al., 2013; 杨振等, 2016b)。同时,结合北康盆地生物礁的时空分布特点,以及该区的区域地质背景、层序地层格架、相对海平面变化(图3)等信息,本文将北康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:早中新世的初始发育阶段、早中新世早期的繁盛阶段、中中新世晚期的衰退阶段及晚中新世的淹没阶段,并依据各类生物礁的分布和北康盆地早中新世

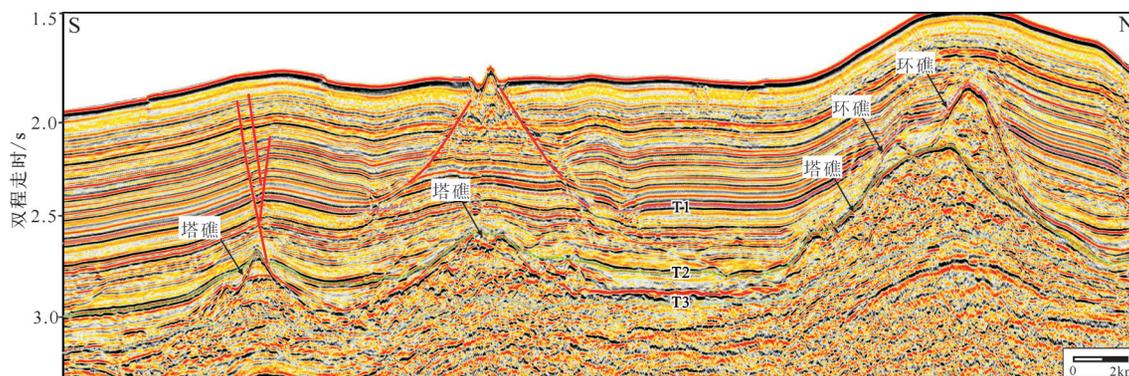


图7 北康盆地塔礁和环礁的地震反射特征

Fig. 7 Typical seismic reflection of pinnacle reef and atoll reef in the Beikang Basin

晚期的地貌特点,建立了生物礁的发育模式(图8)。

#### 4.1 初始发育阶段

早中新世时期,随着南沙运动的开始,南沙地块开始整体抬升,致使渐新世处于半深海—深海环境以泥岩、砂泥岩沉积为主的北康盆地逐渐过渡到早中新世晚期的滨浅海环境,并遭受巨大的剥蚀,隆起之上的剥蚀厚度超过2600 m,而坳陷处的剥蚀厚度也接近500 m(Madon et al., 2013),形成强烈的剥蚀不整合面(图8)。在盆地的整体抬升过程中,隆起周缘的斜坡等区域也发育了少量的生物礁,以点礁为主,G2-1X井在早中新世地层中钻遇部分碳酸盐岩就很好证实了这一点(Madon and Abdul, 2007),但后期多被抬升而遭受剥蚀,导致地震剖面上不易识别。尽管该时期的生物礁数量少、类型单一,但对北康盆地生物礁的发育演化至关重要,反映了该盆地生物礁初始发育阶段的特点。

#### 4.2 繁盛阶段

早中新世末期南沙运动结束,北康盆地在经历了强烈抬升而遭受剥蚀之后,开始进入构造稳定的环境,并以沉降为主要的表现形式。中中新世早期隆起及其周缘以滨浅海沉积为主,并且陆缘三角洲进积尚未到达东部及东南部等区域,水质清洁,为生物礁的繁盛创造了条件。该时期的生物礁数量众多,出现了多种类型的生物礁,如发育于中部隆起西部斜坡和东部隆起西部斜坡之上广泛发育塔礁(图4,图6,图8),而在隆起边缘以台地边缘礁为主(图5,图8),在台地边缘还发育少量的点礁。这些生物礁不仅数量众多、类型齐全,而且规模巨大,如台地边缘礁横向展布可达10 km,垂向生长厚度

普遍超过200 m(图5)。

#### 4.3 衰退阶段

中中新世早期,随着南沙地块与婆罗洲地块碰撞结束之后,来自婆罗洲的物源开始快速的北西向进积,这种巨大的负载也是南沙地块中中新世以来基底沉降的主要驱动力(Ismail and Tucker, 1999; Madon et al., 1999, 2013)。北康盆地地处南沙地块的南端,是基底沉降最为强烈的区域之一。这一阶段的基底沉降导致了相对海平面的快速上升(图3),至中中新世晚期,隆起周缘斜坡已经处于半深海环境,北康盆地的生物礁已经开始进入衰退阶段。该时期的生物礁主要发育于中部隆起和东部隆起顶部,礁体类型以块状礁和层状礁为主(图4,图8),由于隆起顶部相对平坦且开阔,块状礁和层状礁的规模可达十数千米以上(图5)。

#### 4.4 淹没阶段

晚中新世时期,随着基底的持续沉降(刘振湖和郭丽华, 2003),相对海平面继续上升,北康盆地整体处于深海—半深海环境,仅隆起之上岛礁及其周缘有生物礁的持续发育,这也表明生物礁已经进入淹没阶段。该时期的生物礁已垂向生长的环礁较为常见,在岛礁周缘的斜坡之上也有少量的塔礁持续发育。而上新世以来,北康盆地隆起区也处于半深海环境,盆地内部不再有生物礁的发育。

## 5 北康盆地生物礁的油气勘探前景

碳酸盐岩在南海南部油气勘探中占有重要的地位,且已开发的碳酸盐岩油气田中,绝大部分为生物礁所控制,仅曾母盆地的南康台地之上就有30

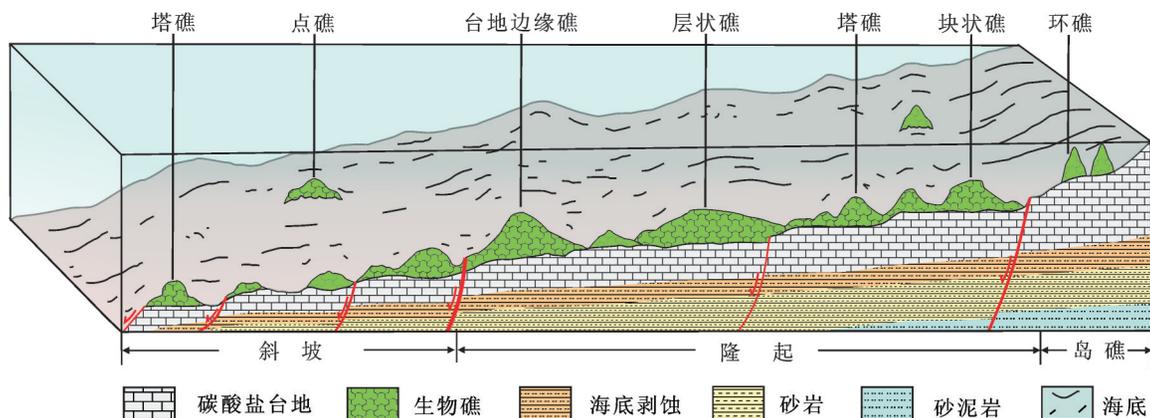


图8 南海南部北康盆地生物礁的发育模式

Fig. 8 The evolutionary model of reef of Beikang Basin in southern South China

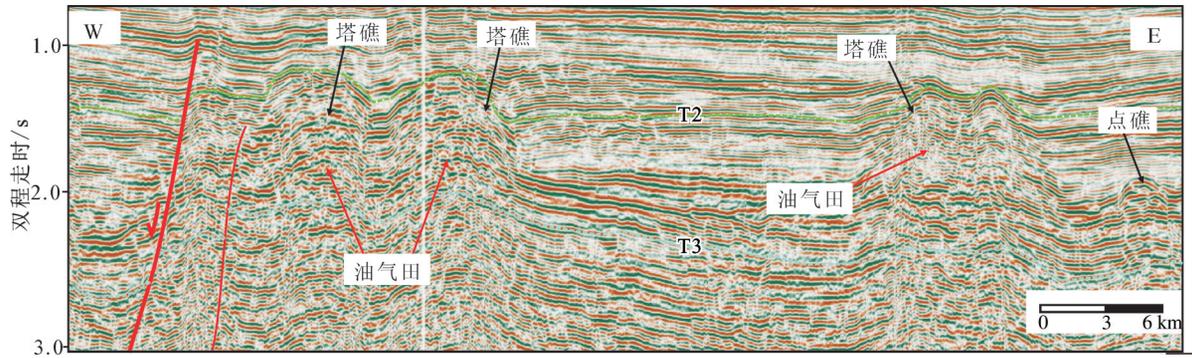


图9 曾母盆地南康台地典型礁性油气田(据杨楚鹏等,2014修改)

Fig. 9 The Typical reef oil-gas fields of Nankang carbonate platform in Zengmu Basin (modified after Yang et al., 2001).

多个礁性油气田(Zampetti et al., 2004)。南康台地之上的生物礁多以塔礁为主,主要发育于中中新世时期(图9),这些礁体类型及发育时间与北康盆地盆地的生物礁东部隆起和中部隆起上塔礁极为相似(图4,图5,图7)。从发育构造位置上来看,广泛分布于西中部隆起和东部隆起及其周缘斜坡的断层上盘(图4,图6),也可与南康台地的生物礁进行很好的对比(杨楚鹏等,2014)。此外,北康盆地的生物礁与南康台地的生物礁另外一个相似的特点就是很少受到成岩作用的二次改造,保留了生物礁本身的孔、渗特点,这使的北康盆地的生物礁具备形成优质储层条件。

前期的调查研究结果显示,北康盆地的主力烃源岩主要来自于渐新统,主要分布于东南坳陷之中(王嘹亮等,2002),而中部隆起的东部和东部隆起的西部刚好成为主力烃源岩生成油气通过断裂运移并聚集的良好场所,而这些区域发育了大量的生物礁,具备了良好的“下生、上储”的成藏组合。此外,中中新世以来,北康盆地以稳定的沉降为主,后期沉积了巨厚的上新统和第四系,为区域良好的盖层。因此,北康盆地中部隆起西部和东部隆起东部发育的生物礁具有良好的勘探潜力,是北康盆地油气勘探的重点区域。

## 6 结 论

(1)南海南部北康盆地生物礁主要有礁、台地边缘礁、块状礁、层状礁、塔礁、环礁6种类型,这些礁体成像较好,易于识别,以塔礁和台地边缘礁最为典型,且部分礁体规模巨大,横向展布可达10 km

以上,广泛分布于北康盆地中部隆起和东部隆起及其周缘斜坡之上。

(2)北康盆地生物礁的发育演化可以分为4个阶段,分别为早中新世时期的初始发育阶段、中中新世早期的繁盛阶段、中中新世晚期的衰退阶段和晚中新世的淹没阶段。南沙运动导致早中新世末期北康盆地的地貌为生物礁初始发育创造了条件,而后期快速基底沉降决定了晚中新世以来生物礁发育的各个阶段。

(3)与曾母盆地南康台地等区域生物礁的对比结果显示,北康盆地生物礁具有良好的油气勘探潜力,且区域烃源岩、疏导体系、盖层及生物礁的分布等油气地质条件,决定了中部隆起西部和东部隆起东部是北康盆地今后生物礁油气勘探的重点区域。

## References

- Belopolsky A, Droxler A. 2003. Imaging Tertiary carbonate system—the Maldives, Indian Ocean: insights into carbonate sequence interpretation[J]. *The Leading Edge*, 22 (7), 646–652.
- Betzler C, Hübscher C, Lindhorst S, Reijmer J, Römer M, Droxler A, Füstenau J, Lümman T. 2009. Monsoon-induced partial carbonate platform drowning (Maldives, Indian Ocean) [J]. *Geology*, 37:867–870.
- Ding Weiwei, Li Jiabiao, Dong Congzhi, Fang Yanxia. 2015. Oligocene–Miocene carbonates in the Reed Bank area, South China Sea, and their tectono-sedimentary evolution[J]. *Marine Geophys Research*, 36:149–165.
- Fournier F, Borgomano J, Montaggioni L. 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) [J]. *Sedimentary*

- Geology, 175: 189–215.
- Fournie F, Montaggioni L, Borgomano J. 2004. Paleoenvironments and high-frequency cyclicality from Cenozoic South–East Asian shallow–water carbonates: A case study from the Oligo–Miocene buildups of Malampaya (Offshore Palawan, Philippines) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 21: 1–21.
- Hall R. 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: Computer–based reconstructions, model and animations[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20: 353–431.
- Hutchison C S. 2004. Marginal basin evolution: the southern South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 21:1129–1148.
- Ismail C M Z, Tucker M E. 1999. An alternative stratigraphic scheme for the Sarawak Basin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17:215–232.
- Jin Qinghuan, Wu Jinming, Xie Yuanqiu. 2001. The Analysis and Oil Resource of Sedimentary Basins in West of Nansha Sea Area[M]. China University of Geosciences Press, 235–238(in Chinese).
- Li Chunfeng, Li Jiabiao, Ding Weiwei, Franke D, Yao Yongjian, Shi Hesheng, Pang Xiong, Cao Ying, Lin Jian, Kulhanek D, Williams T, Bao Rui, Briaes A, Brown A, Chen Yifeng, Clift P D, Frederick S, Colwell F S, Dadd K A, Almeida I H, Huang Xiaolong, Hyun Sangmin, Jiang Tao, Anthony P, Koppers P, Li Qianyu, Liu Chuanlian, Liu Qingsong, Liu Zhifei, Nagai R H, Alampay A P, Su Xin, Sun Zhen, Tejada G, Hai Son Trinh, Yeh C Y, Zhang Chuanlun, Zhang Fan, Zhang Guoliang, Zhao Xixi. 2015. Seismic stratigraphy of the central South China Sea basin and implications for neotectonics[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120:1377–1399.
- Liu Zhenhu, Guo Lihua. 2003. Subsidence and tectonic evolution of the Beikang Basin, the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 23(2): 51–57 (in Chinese with English abstract).
- Lü Caili, Wu Shiguo, Yao Yongjian, Fulthorpe C. 2013. Development and controlling factors of Miocene carbonate platform in the Nam Con Son Basin, southwestern South China Sea [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 45:55–68.
- Ma Yubo, Wu Shiguo, Lü Fuliang, Dong Dongdong, Sun Qiliang, Lu Yintao, Gu Mingfeng. 2011. Seismic characteristics and development of Xisha carbonate platforms, northern South China Sea margin[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 40:770–783.
- Madon M, Abdul H. 2007. Penecontemporaneous deformation in the Nyalau Formation (Oligo–Miocene), Central Sarawak[J]. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 53:67–73.
- Madon M, Ly K C, Wong R. 2013. The structure and stratigraphy of deepwater Sarawak, Malaysia: Implications for tectonic evolution[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 76:312–333.
- Madon M, Redzuan A H. 1999. West Luconia Province[C]//The Petroleum Geology and Resources of Malaysia. PETRONAS, Kuala Lumpur, 427–439.
- Mi Lijun, Zeng Qingbo, Yang Haichang. 2013. Types of organic reef and exploration direction in Zhujiang Formation of Dasha Uplift [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 34(2):24–31(in Chinese with English abstract).
- Qiu Yan, Wang Yinming. 2001. Reefs and paleostructure and paleoenvironment and the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(1): 65–73(in Chinese with English abstract).
- Riding R. 2000. Structure and composition of organic reefs and carbonate mud mounds: concepts and categories[J]. *Earth Science Reviews*, 58: 163–231.
- Tyrrell W, Christian E. 1992. Exploration history of Liuhua 11–1 field, Pearl river Mouth Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 76: 1209–1223.
- Wang Hongbin, Yao Bochu, Liang Jiangqiang, Liu Zhenhu, Wang Liaoliang. 2001. Tectonic characteristics and division of the Beikang Basin[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 21(2): 49–54(in Chinese with English abstract).
- Wang Liaoliang, Wu Nengyou, Zhou Zuyi, Chen Qiang. 2002. History of the Cenozoic sedimentary evolution of the Beikang Basin, southwest South China Sea[J]. *Geology in China*, 29(1): 96–102 (in Chinese with English abstract).
- Wang Wenzhi, Yang Yuemin, Wen Long, Luo Bing, Luo Wenjun, Xia Maolong, Sun Sainan. 2016. A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate: A case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area, Sichuan Basin[J]. *Geology in China*, 43 (1): 306–318 (in Chinese with English abstract).
- Wilson M E J. 2008. Global and regional influences on equatorial shallow–marine carbonates during the Cenozoic[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 265: 262–274.
- Wu Shiguo, Yang Zhen, Wang Dawei, Lü Fuliang, Lüdmann T, Fulthorpe C, Wang Bin. 2014. Architecture, development and geological control of the Xisha carbonate platforms, northwestern South China Sea[J]. *Marine Geology*, 350:71–83.
- Yang Chupeng, Yao Yongjian, Li Xuejie, Chang Xiaohong. 2014. Sequence stratigraphy and sedimentary cycle of Miocene carbonate buildups in Zengmu Basin, the Southern South China Sea[J]. *Earth Science–Journal of China University of Geosciences*, 39(1):91–98 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhen, Wu Shiguo, Lv Fuliang, Wang Dawei, Wang Bin, Lu Yintao. 2014. The evolution model of Later Cenozoic carbonate platform in Xisha Sea area and its geological control[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 34(5):47–54 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhen, Zhang Guangxue, Zhang Li, Xia Bin. 2016a. Development and controlling factors of Neogene reefs in Xisha sea area[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 38(6):787–795 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhen, Zhang Guangxue, Zhang Li. 2016b. The Evolution and Main Controlling Factors of Reef and Carbonate Platform in Wan'an Basin[J]. *Earth Science—Journal of China University of*

- Geosciences, 41(8):1349–1360 (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhen, Zhang Guangxue, Zhang Li, Xia Bin. 2016c. Paleogeomorphology of Early Middle Miocene in the Xisha sea area and its control factors[J]. Marine Geology and Quaternary geology, 36(3):47–57(in Chinese with English abstract).
- Yang Zhen, Zhang Guangxue, Zhang Li, Wu Shiguo, Zhu Youhua, Qiang Kunsheng, Yan Wei. 2017. The spatial and temporal distributions of Miocene carbonate platform in Xisha Sea area and its reservoir model[J]. Acta Petrolei Sinica, 91(6):1360–1373(in Chinese with English abstract).
- Zampetti V, Schlager W, Konijnenburg V, Everts A J. 2004. Architecture and growth history of a Miocene carbonate platform from 3D seismic reflection data: Luconia Province, offshore sarawak, Malaysia[J]. Marine and Petroleum Geology, 21: 517–534.
- Zhang Guangxue, Bai Zhiling. 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[J]. Experimental Petroleum Geology & Experiment, 20(3):210–216 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Li, Wang Liaoliang, Yi Hai. 2003. The Formation and evolution of Beikang Basin[J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 17(4): 245–248(in Chinese with English abstract).
- Zhou Gang, Zhen Rongcai, Chen Haoru, Shi Jiannan, Wen Guohua. 2013. The types of evolution of platform– edge reefs in the Permian Changxing Formation, eastern Sichuan Basin[J]. Geology in China, 40(1): 1140–1149 (in Chinese with English abstract).
- 探方向[J]. 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(1):65–73.
- 王宏斌, 姚伯初, 梁金强, 刘振湖, 王嘹亮. 2001. 北康盆地构造特征及其构造区划[J]. 海洋地质与第四纪地质, 21(2):49–54.
- 王嘹亮, 吴能友, 周祖翼, 陈强. 2002. 南海西南部北康盆地新生代沉积演化史[J]. 中国地质, 29(1): 96–102.
- 王文之, 杨跃明, 文龙, 罗冰, 罗文军, 夏茂龙, 孙赛男. 2016. 微生物碳酸盐岩沉积特征研究——以四川盆地高磨地区灯影组为例[J]. 中国地质, 43(1): 306–318.
- 杨楚鹏, 姚永坚, 李学杰, 常晓红. 2014. 南海南部曾母盆地中新世碳酸盐岩的层序地层[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 39(1): 91–98.
- 杨振, 吴时国, 吕福亮, 王大伟, 鲁银涛. 2014. 西沙海域晚新生代碳酸盐台地的发育模式及控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 34(5):47–54.
- 杨振, 张光学, 张莉, 夏斌. 2016a. 西沙海域新近纪生物礁的发育演化及控制因素[J]. 石油实验地质, 38(6):787–795.
- 杨振, 张光学, 张莉. 2016b. 万安盆地生物礁及碳酸盐台地的发育演化及控制因素[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 41(8):1349–1360.
- 杨振, 张光学, 张莉, 夏斌. 2016c. 西沙海域中新世早期古地貌研究及控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 36(3):47–57.
- 杨振, 张光学, 张莉, 吴时国, 祝幼华, 强昆生, 鄢伟. 2017. 西沙海域中新世碳酸盐台地的时空分布及其油气成藏模式[J]. 地质学报, 91(6):1360–1373.
- 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[J]. 石油实验地质, 20(3):210–216.
- 张莉, 王嘹亮, 易海. 2003. 北康盆地的形成与演化[J]. 中国海上油气(地质), 17(4):245–248.
- 周刚, 郑荣才, 陈浩如, 史建南, 文华国. 2013. 川东地区长兴组台地边缘生物礁类型及其演化特征[J]. 中国地质, 40(1): 1140–1149.

## 附中文参考文献

- 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[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 235–238.
- 刘振湖, 郭丽华. 2003. 北康盆地沉降作用与构造运动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 23(2):51–57.
- 米立军, 曾清波, 杨海长. 2013. 东沙隆起珠江组生物礁类型以及勘