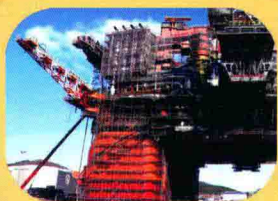


2017年湖北省精品出版省级重点出版物
著作出版基金资助项目

丛书主编 朱伟林 谢玉洪
执行主编 王振峰 张道军

南海西科1井 碳酸盐岩生物礁储层沉积学 层序地层与沉积演化

解习农 谢玉洪 李绪深 陆永潮 编著



NANHAI XIKEYIJING TANSUANYANYAN SHENGWUJIAO CHUCENG CHENJIXUE
CENGXU DICENG YU CHENJI YANHUA



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

南海西科 1 井碳酸盐岩 生物礁储层沉积学

层序地层与沉积演化

解习农 谢玉洪 李绪深 陆永潮 编著

内容提要

本书以西科 1 井全井段高分辨率岩芯扫描和薄片微相的精细岩石学分析为基础,结合测井及相关分析测试资料以及区域资料,划分西科 1 井高频层序地层单元,揭示生物礁高频生长单元构成,分析碳酸盐岩-生物礁滩沉积微相类型及其特征,建立西科 1 井生物礁滩垂向动态沉积模式及其演化模式。

图书在版编目(CIP)数据

南海西科 1 井碳酸盐岩生物礁储层沉积学·层序地层与沉积演化/朱伟林,谢玉洪主编;解习农,谢玉洪,李绪深,陆永潮编著. —武汉:中国地质大学出版社,2016. 12

ISBN 978-7-5625-3974-2

- I. ①南…
- II. ①朱… ②谢… ③解… ④李… ⑤陆…
- III. ①南海-生物礁-碳酸盐岩-储集层-沉积学 ②南海-生物礁-地层层序
- IV. ①P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 327093 号

南海西科 1 井碳酸盐岩生物礁储层沉积学·层序地层与沉积演化			解习农 谢玉洪 李绪深 陆永潮	编著
责任编辑:王凤林 舒立霞		选题策划:毕克成 王凤林		责任校对:徐蕾蕾
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)			邮编:430074	
电 话:(027)67883511		传 真:(027)67883580		E-mail:cbb@cug.edu.cn
经 销:全国新华书店			Http://cugp.cug.edu.cn	
开本:880 毫米×1230 毫米 1/16			字数:290 千字 印张:9.5 插页:1	
版次:2016 年 12 月第 1 版			印次:2016 年 12 月第 1 次印刷	
印刷:武汉市籍缘印刷厂			印数:1—1000 册	
ISBN 978-7-5625-3974-2			定价:168.00 元	

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

《南海西科 1 井碳酸盐岩生物礁储层沉积学》

编 辑 委 员 会

丛书主编:朱伟林 谢玉洪

执行主编:王振峰 张道军

委 员(按拼音顺序排序):

邓成龙 高阳东 郭书生 姜 平 李绪深

廖 晋 刘 立 刘新宇 陆永潮 罗 威

米立军 裴健翔 邵 磊 时志强 孙志鹏

童传新 肖安涛 解习农 杨红君 杨计海

杨希冰 易 亮 尤 丽 翟世奎 张迎朝

祝幼华

序

随着全球油气勘探开发的发展,海域和海相已成为当前我国油气勘探的两大重要领域,其中碳酸盐岩储层无疑成为科学研究和油气勘探的热点。生物礁滩体系是南海最具诱惑力、最具价值的勘探领域。尽管国土资源部等单位先后在西沙岛礁已钻探了4口井,但这些钻孔由于取芯率低及受当时研究技术手段的局限而缺乏系统的分析,研究未能取得理想的成果。中国海洋石油总公司在南海西沙群岛生物礁上组织实施了1口全取芯的科学探索井——“南海西科1井”,并由中海石油(中国)有限公司湛江分公司牵头,汇聚了中国地质大学(武汉)、同济大学、中国海洋大学、成都理工大学、吉林大学、中国科学院南京地质古生物研究所及地质与地球物理研究所等多家科研院所,联合组成多学科的研究团队,经过3年联合攻关形成了一系列的研究成果。

西科1井为南海区域揭示生物礁地层最全、取芯最为完整的钻井,高密度的采样分析、多学科的综合研究使之成为我国生物礁滩体系研究的经典范例。该书取得如下重要进展:①系统开展了西科1井6个门类生物化石的鉴定及多门类高精度的生物地层、沉积环境与古生态演变综合研究;②系统开展了生物礁的岩石磁学研究,首次获取了南海西沙岛礁中新世以来的磁极性倒转序列和高分辨率环境磁学序列;③首次采用有机分子化合物分析并结合无机地球化学方法恢复了西沙地区中新世以来的海平面变化过程;④综合运用古生物、古地磁、岩石学、元素地球化学、同位素测年等多种方法,首次全面系统地建立了早中新世以来的南海碳酸盐岩-生物礁地层标准剖面;⑤首次利用高分辨率X射线岩芯扫描资料建立了西科1井高频旋回单元划分方案及生物礁滩垂向动态沉积模式和演化模式;⑥应用古流体恢复技术阐明了西科1井储层特征、成岩演化特征及岛礁潟湖环境下的白云岩化模式。

本专著汇集了该科研团队对南海生物礁滩体系的综合研究成果,通过西沙地区科学探索1号井的精细解剖,全面揭示了南海西沙海域新生代生物礁滩体系发育演化及古海洋演变历程,查明了碳酸盐岩储层非均质性及其特点。研究成果为南海生物礁滩体系研究提供一个极佳的范例,对广大油气勘探工作者具有很大参考价值和实用价值,也是高等院校师生一部很好的参考书。相信本书的出版会进一步深化生物礁滩体系理论研究,对我国海域碳酸盐岩油气勘探将起到重要的推动作用。

中国工程院院士: 马永生

2016年12月17日

丛书前言

碳酸盐岩油气藏是近年来油气勘探最重要的领域之一。纵观世界油气勘探历史,新近发现中大型油气藏的 2/3 为碳酸盐岩油气藏,碳酸盐岩储层虽然只占沉积岩的 20%,油气探明储量却占 50%以上,油气产量约占世界油气总产量的 60%(Michael,2011)。2006 年巴西在 BM-S-11 区块发现的碳酸盐岩油气藏,最大水深 2126m,油田面积 900km²,可采储量 65×10^8 bbl(1bbl=159L),是巴西近几年的最大油气突破(吴时国,2011);中东地区石油产量约占全世界产量的 2/3,其中 80%的含油层产于碳酸盐岩(Klaas Verwer,2011),沙特阿拉伯的石油储量占世界总储量的 26%,而其储层均属碳酸盐岩储层;北美的碳酸盐岩中油气产量约占北美整个石油产量的一半(Wilson,1980;Mazzullo,2009);鉴于碳酸盐岩储层的地位和重要性,碳酸盐岩油气藏成为各大石油公司多年来主要的勘探目标(Roehl & Choquette, 1985;Andrel et al,2003;Klett,2010)。

生物礁是碳酸盐岩储层中的核心部分(Paola Ronchi,2010)。世界上一些礁相大气田的总储量达到了 4×10^8 t,在碳酸盐岩大油气田中占据着重要的地位。加拿大的油气产量约有 60%产自生物礁油气藏;墨西哥全国石油产量的 70%产自生物礁油气藏(卫平生,2006);哈萨克斯坦的最大油田卡沙甘油田就是生物礁相的优质碳酸盐岩储层(Paola Ronchi et al,2002,2010;Zempolich,2005);此外,美国二叠盆地的石炭纪—二叠纪马蹄形礁油田(Vest E L,1970;Arthur H Saller,2007),伊拉克基尔库克古近纪到新近纪生物礁油田(Majid A H,1986;Sadooni,2003),阿联酋布哈萨生物礁油田(Alsharhan A S,1987)等均为大型生物礁油田;我国陆地勘探近年来在塔里木盆地(塔中奥陶系)、川东盆地(普光及龙岗)等也发现多个大型碳酸盐岩生物礁油气藏。

近年来,生物礁滩体系沉积机制及储层条件的研究有赖于与现代环境的比较沉积学分析,国际上最为系统的研究实例就是巴哈马滩,以迈阿密大学比较沉积学实验室的 Robert N Ginsburg 教授为代表的团队,坚持了数十年的专门研究,已建立了多种背景下的沉积相模式,包括台地内部、碳酸盐砂、生物礁、潮坪以及边缘斜坡沉积(Eberli & Ginsburg,1987;Grammer et al,1993;Grammer et al,2004)。这些研究成果不仅加深了对“孤立”碳酸盐岩台地内部结构及其空间分布的认识,而且大大深化了碳酸盐岩成岩作用及其机理的理解,为碳酸盐岩储层侧向非均质性类比提供了极佳的范例。

生物礁滩体系是南海最具诱惑力、最具价值的勘探领域。然而,到目前为止,南海生物礁的研究总体还基于地震资料和为数不多的钻孔,尽管 20 世纪 70 年代石油部和国土资源部先后在西沙群岛针对生物礁钻探了西永 1 井和西琛 1 井,但这些钻孔由于取芯率低及受当时技术手段的局限而缺乏系统的分析,研究未能取得理想的成果。为了强化生物礁的研究,并为南海北部深水区及南海中南部勘探潜力评价与生物礁储层研究等提供依据,中国海洋石油总公司在南海西沙群岛生物礁上组织实施了 1 口全取芯的科学探索井——“南海西科 1 井”。因此,本次研究聚焦于“南海西科 1 井碳酸盐岩生物礁储层沉积学”,由中海石油(中国)有限公司湛江分公司、中国地质大学(武汉)、同济大学、中国海洋大学、成都理工大学、吉林大学、中国科学院南京地质古生物研究所及地质与地球物理研究所联合组成多学科的研究团队,开展了多学科的综合研究,经过 3 年联合攻关取得了如下重要进展。

1. 古生物地层

以西科 1 井的岩芯为研究材料,通过岩芯宏观标本观察与鉴定、样品分析与鉴定、薄片分析与鉴定

等多种方法,开展了该井古生物化石的系统研究与描述,取得的主要进展如下。

(1)通过有孔虫、钙藻、珊瑚、钙质超微、腹足、双壳共 6 个门类化石的系统研究与鉴定,明确了西科 1 井生物礁主要造礁生物与附礁生物的属种类型,并进行了系统描述。

(2)通过主要生物门类生物带或化石组合的划分及与其他地区的对比,划分了该井年代地层单元,在此基础上通过对周边已钻井生物地层的厘定与系统总结,建立了该井所在区域的生物地层与年代地层格架。

(3)通过组成生物礁的生物种类、数量、分布规律和生态特征的分析,揭示了西沙地区中新世以来的沉积环境及古生态演变过程,明确该井揭示了礁前滩、礁骨架、礁后滩及潟湖等多种沉积环境类型。

2. 年代地层与古海洋环境

通过西科 1 井岩芯样品的岩石磁学、沉积学、沉积地球化学、古生态学、同位素年代学及稳定同位素地层学等方法的系统性分析,开展了该井年代地层的精细研究,恢复了西沙地区海平面变化过程,取得的主要成果如下。

(1)首次在南海地区开展了生物礁的岩石磁学研究,确定了从海水中捕获的磁铁矿为西沙生物礁中的磁性矿物,阐明了生物礁的剩磁获得机制;结合生物年代地层学研究成果,建立了 20.44Ma 以来的南海地区中新世磁性地层时间序列。

(2)首次采用碳同位素地层学方法对西科 1 井上部 50m 进行了精细的地层学划分,并采用珊瑚 U-Th 定年方法进行了准确标定。

(3)首次采用有机分子化合物及无机地球化学方法对西沙地区珊瑚礁发育生长环境进行了系统分析,建立了中新世以来的西沙地区海平面变化曲线,揭示了生物礁生长发育具有高海平面以潟湖相为主、低海平面以礁相为主的演变规律。

(4)应用反映陆源的 Si、K、Ti 等与反映海源的 Na、P、B 等元素指标的比值进行了全井段古海洋环境的分析,揭示了南极冰盖扩大及北极冰盖形成等古海洋学事件在西沙碳酸盐岩台地中的记录,恢复了中新世以来的相对温度变化曲线。

3. 层序地层与沉积演化

基于西科 1 井岩芯及岩石薄片宏观与微观特征的定性和定量分析、全井段岩芯高分辨率 X 射线扫描(Itrax)成像及岩样的高精度测试,精细划分了西科 1 井高频层序地层单元,揭示了生物礁高频生长单元的构成、沉积微相的类型特征,建立了西科 1 井生物礁、滩垂向动态沉积演化模式。主要进展包括以下几方面。

(1)基于详细岩芯观察和薄片鉴定,将礁岩和粒屑岩两大类岩性划分为 16 种宏观岩性相类型及 21 种微观岩性相类型。在此基础上查明了生物礁滩体系中生物礁、生屑滩和潟湖相沉积的特征,进而总结了相应的沉积模式。

(2)首次利用高分辨率 X 射线岩芯扫描仪(Itrax 多功能扫描仪)对西科 1 井全井段(1268m)岩芯进行了扫描,获得了 26 种元素含量计数点,组成了 325 个元素比值,通过观察各元素比值随深度的变化趋势,从层序和成岩角度对其进行了规律性总结及高频单元的划分。基于受控层序和成岩两者共同作用元素的变化规律,很好地进行了五级层序单元甚至六级层序单元的划分。

(3)阐明了西沙地区生物礁主要生长单元样式和动态演化模式。以海泛面和暴露面为标志,将礁体归纳为淹没型生长单元和暴露型生长单元两大类。暴露型又进一步细分为硬基底和软基底两类,淹没型可细分为快速淹没和缓慢淹没两类。垂向上形成了极具特色的礁体组合,即慢步礁(或淹没礁)、同步礁(加积礁)、快步礁(暴露礁),进而总结了生物礁滩体系的动态演化模式。

4. 储层特征与成岩演化

运用储层物性测试资料、岩石薄片鉴定成果以及扫描电镜、阴极发光、碳氧同位素、微量元素、稀土元素、包裹体均一温度等多种测试资料,详细总结了西科1井储层特征、成岩演化特征,特别是白云岩化机理。对西沙地区礁滩相碳酸盐岩储层研究取得了如下进展。

(1)西科1井钻遇的碳酸盐岩主要为原地石灰岩、异地石灰岩、碳酸盐砂、白云岩化灰岩和混积岩。碳酸盐岩的成岩作用主要受成岩环境和成岩阶段制约。其中,大气水成岩环境的影响深度范围为0~169m,见新月形、悬垂状、等厚栉状或粒间晶簇状胶结物;海水成岩环境的影响深度范围为169~579m,含泥晶套、纤维状—针状文石胶结物,具偏重的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。埋藏成岩环境的影响深度范围为579~1257.52m,以粗晶镶嵌状方解石及相对偏轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值为识别标志。乐东组、莺歌海组和黄流组处于同生成岩阶段,梅山组和三亚组处于早成岩阶段。

(2)在白云岩层段,白云石的形成晚于海水成岩作用。白云岩中白云石多呈粉晶—中晶结构,随深度的增加较大晶粒白云石在岩石中的比例增加,在三亚组碳酸盐岩中鞍形白云石含量显著增加。白云岩样品的碳、氧同位素则完全缺乏相关性,反映了大气水、岩浆来源流体、有机酸等流体等成岩流体并没有参与白云石化过程,白云石形成流体的盐度稍高于正常海水。中等盐度渗透回流模式适用于西沙地区大部分白云岩的形成解释。

(3)西科1井碳酸盐岩总体较为疏松,孔隙发育。钻遇地层的所有岩石类型中均发育铸模孔隙和溶解孔隙等次生孔隙。其粒内孔隙分布于几乎所有的岩石类型,粒间孔隙主要发育于颗粒支撑的岩石类型,格架孔隙主要发育于骨架灰岩、黏结灰岩以及原岩为原地灰岩的白云质灰岩和灰质白云岩中,晶间孔隙分布于白云岩中。孔隙度和储集质量明显受岩性制约,孔隙度随埋深变化呈分段式。白云岩、灰质白云岩和白云质灰岩的储集条件优于泥粒灰岩和粒泥灰岩。孔隙演化的主控因素为成岩环境、机械压实作用和白云化作用。

编写这套《南海西科1井碳酸盐岩生物礁储层沉积学》专著的目的,不仅是要全面展示南海西科1井精细的研究成果,更重要的是为南海生物礁研究提供一个经典的“铁柱子”,可作为油气勘探生产的不同生物礁微相标准化及示范化规范的宏观、微观特征图版和数据库。客观地总结我国近年来在生物礁研究领域的成果经验,为广大海洋地质工作者及油气勘探专家提供一部实用的参考书。

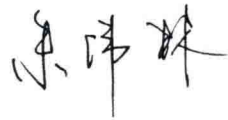
本专著共分4册。第一册为《古生物地层》,系统介绍了西科1井主要造礁生物及附礁生物的类型和组合特征,明确了该井地质年代及地层单元的划分,建立了西科1井及西沙地区的生物地层格架,分析了早中新世以来的沉积环境及古生态演变过程。第二册为《年代地层与古海洋环境》,介绍了年代地层格架的建立及古海洋学的研究成果,确立了20.44Ma以来的南海地区中新世磁性地层时间序列,建立了中新世以来的西沙地区海平面变化曲线及相对温度变化曲线,揭示了南极冰盖扩大及北极冰盖形成等古海洋学事件在西沙碳酸盐岩台地中的记录。第三册为《层序地层与沉积演化》,介绍了西科1井岩石学特征,完成西科1井岩性相类型识别与沉积相分析,建立了以三级层序为单元的西科1井层序地层格架;分析了西科1井生物礁发育过程及阶段,并建立了相关的沉积模式。第四册为《储层特征与成岩演化》,介绍了西科1井礁滩相碳酸盐岩储层岩性、成岩演化及物性特征,深刻认识了碳酸盐岩储层岩石组构与岩石类型,描述了储集空间和孔隙演化特征,综合评价了储层的储集性,总结了孔隙发育的影响因素及白云岩化机理。

本专著是“南海西科1井”课题组全体科技人员集体劳动成果的结晶。中国海洋石油总公司朱伟林和谢玉洪对全书进行了统编与审定。前言由朱伟林执笔。各册主要执笔人员分别是:《古生物地层》由中国科学院南京地质古生物研究所祝幼华、中国海洋石油总公司朱伟林,中海石油(中国)有限公司湛江分公司王振峰、罗威、刘新宇执笔;《年代地层与古海洋环境》由同济大学邵磊、中国海洋石油总公司朱伟林、中国科学院地质与地球物理研究所邓成龙、中海石油(中国)有限公司湛江分公司张迎朝、中国海洋大学翟世奎执笔;《层序地层与沉积演化》由中国地质大学(武汉)解习农、中国海洋石油总公司谢玉洪、

中海石油(中国)有限公司湛江分公司李绪深、中国地质大学(武汉)陆永潮执笔;《储层特征与成岩演化》由成都理工大学时志强,中国海洋石油总公司谢玉洪,吉林大学刘立和中海石油(中国)有限公司湛江分公司张道军、尤丽执笔。

这些成果的取得得到了国内一系列单位及领导、专家和学者的大力支持,主要包括中国海洋石油总公司科技发展部,中海石油(中国)有限公司勘探部、湛江分公司,中海油服油技事业部,海油发展工程技术分公司湛江实验中心,中国地质大学(武汉),同济大学,成都理工大学,中国海洋大学,吉林大学,中国科学院南京古生物研究所、地质与地球物理研究所,国土资源部青岛海洋地质研究所,海南省地质基础工程院。

汪品先院士、龚再升教授参加了多次讨论会,并提出了宝贵的修改意见。马永生院士参与了成果交流讨论并为本书作序,在此一并表示衷心感谢!鉴于本专著涉及多个方向领域,难免有不足或错误之处,敬请广大读者批评与指正。



2016 年 12 月 18 日

前 言

生物礁在碳酸盐岩大油气田中占据着重要的地位,尤其是在南海油气勘探中起着非常重要的作用。到目前为止,南海生物礁研究总体还基于地震资料和少量为数不多的钻孔,尽管 20 世纪 70 年代中国石油总公司和国土资源部在西沙地区针对生物礁钻探了西琛 1 井、西永 1 井等钻孔,但这些钻孔由于取芯率低且研究技术手段局限,缺乏系统的分析,研究成果未能取得理想的成果。为此,中国海洋石油总公司实施了针对生物礁的科学钻探井,在南海南沙永兴岛钻探了一口全取芯的钻井——“南海西科 1 井”,是目前我国取芯最全、钻探最深的生物礁探井。该井为南海北部陆缘生物礁滩体系研究提供了有利的条件。

在中国海洋石油总公司课题“南海西沙隆起区生物礁沉积与古海洋学研究及其在南海深水区油气储层预测中的应用”和国家自然科学基金“南海深海过程演变”重大研究计划集成项目(91528301)的共同资助下,对西科 1 井生物礁层序地层及沉积演化开展了深入细致的研究。基于密集的岩芯薄片鉴定(各类薄片 3248 片)和大量地球化学分析测试(主微量元素、电子探针、X 射线衍射、阴极发光、扫描电镜、锆石测年)以及全井段高分辨率 X 射线岩芯扫描资料,揭示了生物礁滩体系岩性相类型及其成因相特征,提出了淹没型、淹没暴露交互型和暴露型 3 种生物礁生长单元样式,建立了孤立台地区生物礁滩体系沉积模式及动态演化模式,首次构建了最为完整的中新世以来生物礁滩体系高频单元沉积演化序列,为南海北部陆缘甚至整个南海生物礁滩体系发育演化对比提供了可用于精细对比的范例。

本专著是中国海洋石油总公司与中国地质大学(武汉)研究团队合作完成的成果,主要执笔人为解习农、谢玉洪、李绪深、陆永潮。中海石油(中国)有限公司湛江分公司张道军、尤丽、刘新宇、刘景环、罗威,中国地质大学(武汉)王永标、杜学斌、何云龙、陈慧以及同期的研究生商志垒、吴峰、郭来源、黄莉、焦祥艳、冯琳、朱昀等参加了本研究工作。中国地质大学(武汉)黄俊华、周炼为样品测试提供了帮助。作者在此一并致以最诚挚的感谢。由于作者水平所限,书中不妥之处在所难免,恳请各位专家批评指正。

目 录

1 西沙地区区域地质 (1)

1.1 南海碳酸盐岩发育背景 (1)

1.2 西沙地区生物礁概况 (11)

1.3 西沙地区已有钻井层序地层格架特征 (13)

2 生物礁滩体系岩石类型及特征 (17)

2.1 岩石定名依据及划分 (17)

2.2 宏观岩性类型及特征 (20)

2.3 微观岩性类型及特征 (26)

3 生物礁滩体系成因相类型及其组合特征 (33)

3.1 生物礁滩体系成因相带概述 (33)

3.2 生物礁成因相沉积特征 (34)

3.3 生屑滩成因相沉积特征 (37)

3.4 潟湖成因相沉积特征 (38)

3.5 成因相组合序列特征 (40)

3.6 生物礁滩体系静态沉积模式 (42)

4 生物礁滩体系高频层序地层划分及特征 (45)

4.1 三级层序单元划分及基本特征 (45)

4.2 四级层序划分 (56)

4.3 高频层序单元识别及类型划分 (57)

5 基于岩芯扫描的地球化学特征及高频单元划分 (63)

5.1 基于岩芯扫描的地球化学特征 (65)

5.2 基于地球化学特征的高频层序单元划分 (68)

5.3 不同类型生长单元的地化特征差异 (85)

6 生物礁滩体系沉积演化及动态沉积模式 (93)

6.1 西沙隆起生物礁滩体系发育演化阶段 (93)

6.2 生物礁滩体系沉积演化控制因素 (94)

6.3 西科1井礁滩体系演化区域对比 (104)

6.4 生物礁滩体系沉积演化动态模式 (107)

7 主要结论 (109)

参考文献 (112)

图版 (116)

1 西沙地区区域地质

南海海域是中国油气勘探的重点地区之一,也是生物礁和碳酸盐岩广泛发育的区域。目前已发现为数不少的生物礁油气藏,如南海北部的流花 11-1、流花 4-1、陆丰 15-1 等油田;西南部万安盆地的万安滩,曾母盆地 L、F6、F23 等 18 个大中型气田;东南部巴拉望盆地的尼多礁、盖洛克、奎拉等 8 个油气田,以及马来西亚在南康台地开发的生物礁型油气田群(大约 200 个碳酸盐岩建造,天然气探明储量约 $1.1\times 10^{12}\text{ m}^3$)(金庆焕, 1989; Kusumastuti et al, 2002; Zampetti et al, 2004; Heldt et al, 2010; Harris, 2010)。

1.1 南海碳酸盐岩发育背景

晚渐新世—中新世,南海海域因其特定的古构造、古地理、古气候和古海平面变化条件营造出了良好的生物礁形成的背景条件,其陆缘盆地广泛发育碳酸盐岩和生物礁(图 1-1)。

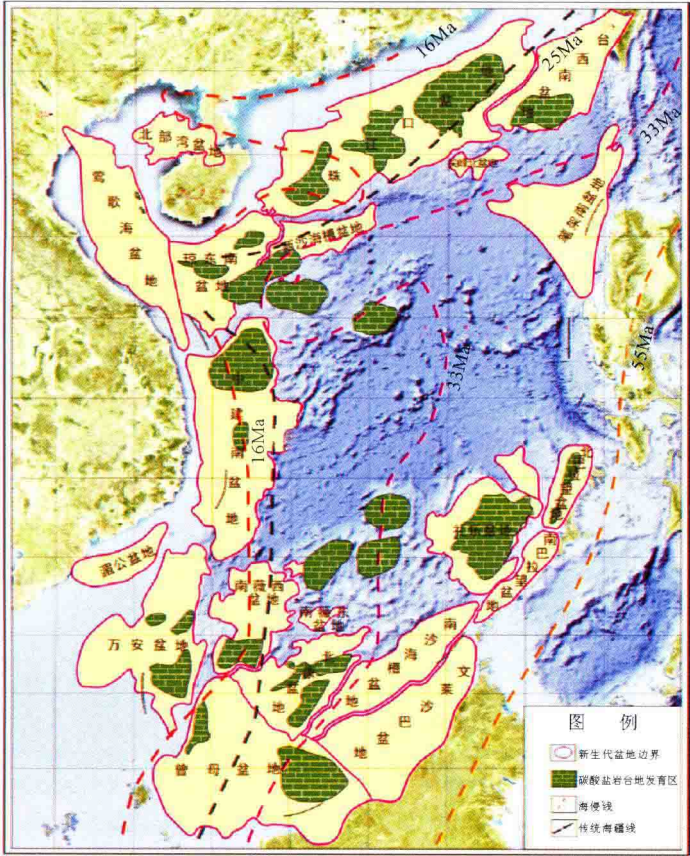
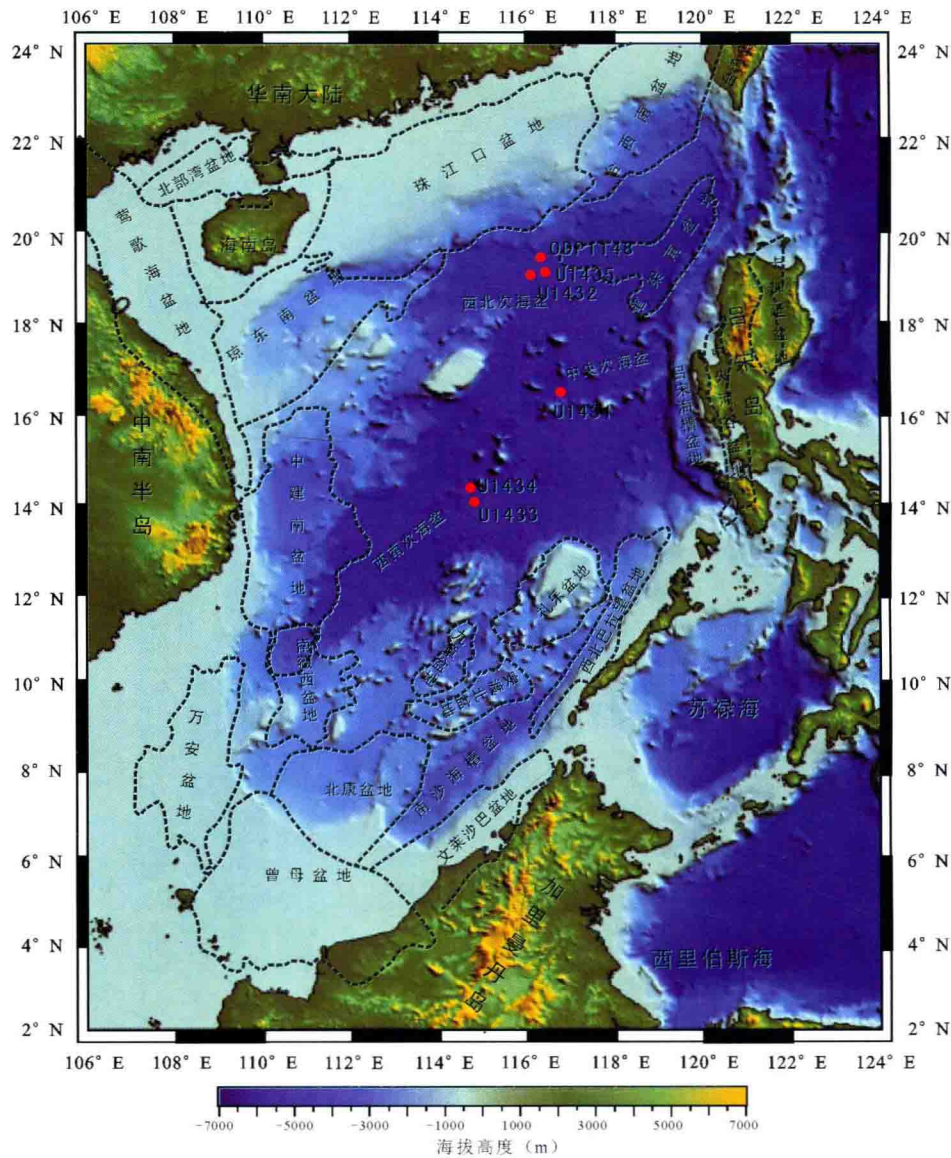


图 1-1 南海陆缘盆地生物礁及碳酸盐岩分布示意图(许红,2014)

1.1.1 古构造特征

南海是东南亚陆缘最大的边缘海之一,也是中国大陆边缘唯一发育了洋壳的海盆(汪品先,2012)。它位于特提斯洋和环太平洋两大超级汇聚带的交会处,具有极其独特的大地构造背景,受欧亚、印澳和太平洋三大板块相互作用的控制(Hall, 2002; Hutchison, 2004)。其构造演化特点是前新生代各陆块或地块由冈瓦纳古陆向北漂移过程中拼合、增生构成东南亚主陆,新生代以来在邻近板块作用下碎裂、滑移并重新组合,从而形成现今的南海构造面貌,并发育了 10 多个大型含油气大陆边缘盆地(金庆焕, 1989; 朱伟林,2007)。根据南海大陆边缘构造性质及断裂特征可分成 4 种不同大陆边缘,即北部离散型边缘、南部伸展-挠曲复合型边缘、西部走滑-伸展型边缘、东部俯冲边缘(李家彪,2008;解习农等, 2011)(图 1-2)。南海边缘海发育两大陆壳地块和海盆,即靠近南部边缘的南沙地块和靠近西北缘的西沙地块,海盆由中央次海盆、西北次海盆和西南次海盆组成(图 1-2、图 1-3)。南海西科 1 井所处的西沙群岛正好位于西沙地块的北翼、琼东南盆地的南翼。



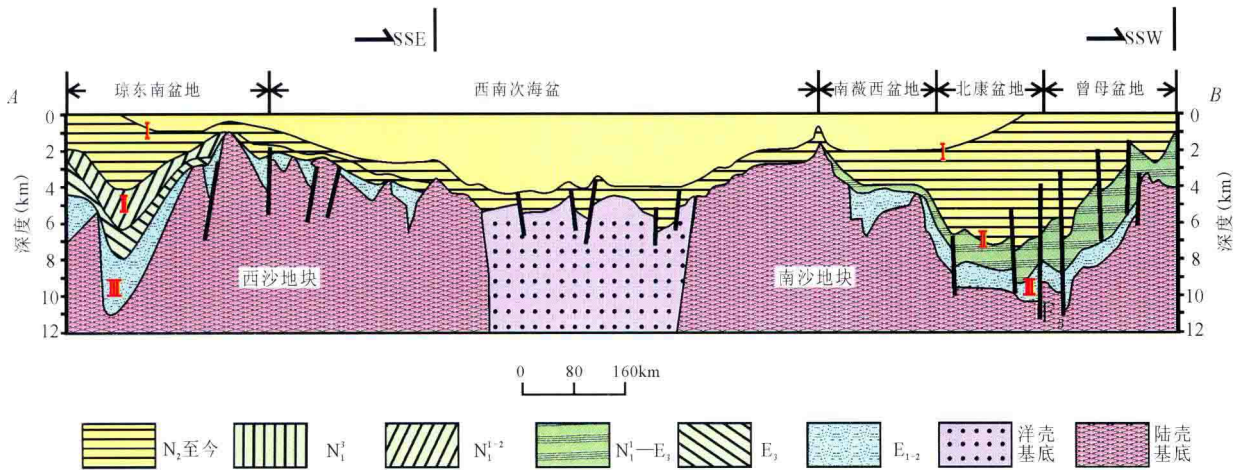


图 1-3 跨越南沙和西沙陆壳地块构造剖面图(张光学等,2002)

南海北部陆缘以隆拗相间的 NE 向构造带为特征。隆起带主要有珠江口盆地的北部断阶带和贯穿琼东南盆地与珠江口盆地的中央隆起带等正向构造带;坳陷带由大中型陆缘伸展型沉积盆地所组成,如珠江口盆地、琼东南盆地等。这些 NE 向构造带是中生代—新生代初期太平洋板块的 NW 向俯冲和印度板块北移并与欧亚板块碰撞,导致华南陆块东南缘形成一系列张性断裂带演化而成的。晚渐新世以来受南海海盆近 SN 向扩张的影响,该边缘逐渐形成 NEE 向构造,并叠加在早期 NE 向构造格局之上(夏斌等,2004;解习农等,2015)。

南海东部边缘主要是岛弧区,并以洋壳的俯冲活动为特征。菲律宾岛弧两侧均受到大洋板块的俯冲作用,岛弧以西发育 SN 走向的马尼拉海沟和吕宋-巴拉望海槽,岛弧以东发育菲律宾海沟。

南海南部陆缘系指加里曼丹与南沙群岛一带的区域,推测该区新生代以前存在古洋盆。由于南海扩张所引起的南沙地块等块体的南移和其他块体的逆时针旋转,导致这些块体在南缘聚敛、碰撞,造成古洋盆消亡、地壳抬升、地层高度变形,形成曾母、文莱-沙巴等周缘前陆盆地。蛇绿岩和混杂岩的存在证实了该边缘俯冲碰撞等构造事件。南沙地块上的巴拉望盆地、北康盆地是随着块体的南移而逐渐成为南海南部的沉积盆地。

南海西部陆缘毗邻印支块体,发育有 SN 向的深大断裂——南海西缘断裂。本区磁异常特征表明断裂带两侧发生过走滑活动。中新世时期,印度洋的扩张和印-亚板块的碰撞导致印支块体旋转南移,印支块体与华南块体相互作用产生走滑拉张运动,使南海西部边缘形成一系列走滑盆地。位于西缘的莺歌海、万安等盆地的形成演化均受南海西缘 SN 向断裂的走滑、拉分、扭动等作用的影响(周蒂等,2002;任建业等,2011)。

南海盆地的形成整体上处于岩石圈伸展减薄的构造背景之下,经历了古新世—中始新世岩石圈伸展断陷、晚始新世—早渐新世断拗、晚渐新世—中中新世洋壳扩张和晚中新世—全新世区域热沉降等演化过程,其中中新世为裂后三大板块活动的相对稳定期,为生物礁持续生长提供了稳定的构造背景。

1.1.2 古海洋特征

古海温及海平面变化是控制生物礁发育演化的重要因素。Zachos(2001)综合了全球 40 多口 DSDP 和 ODP 航站深水底栖有孔虫的 ^{18}O 指标,构成了新生代完整的 ^{18}O 变化曲线,恢复了 65Ma 以来全球变暖、变冷过程和冰盖增长、消亡过程(图 1-4)。新生代以来最显著的变暖过程发生在中古新世(59Ma)—早始新世(52Ma);之后,连续出现了长达 17Ma(50~33Ma)的逐渐变冷过程;大约在 34Ma,

氧同位素出现了快速升高,反映了南极冰盖大规模开始增长(Stott et al, 1990; Barron et al, 1991; Ditchfield et al, 1994; Dingle et al, 1998)。在此之后,全球一直保持较低温度,据估计,当时的冰盖面积大约是现今的 50%(Kennett et al, 1993)。显然,全球古气候变化也制约着区域海平面变化。

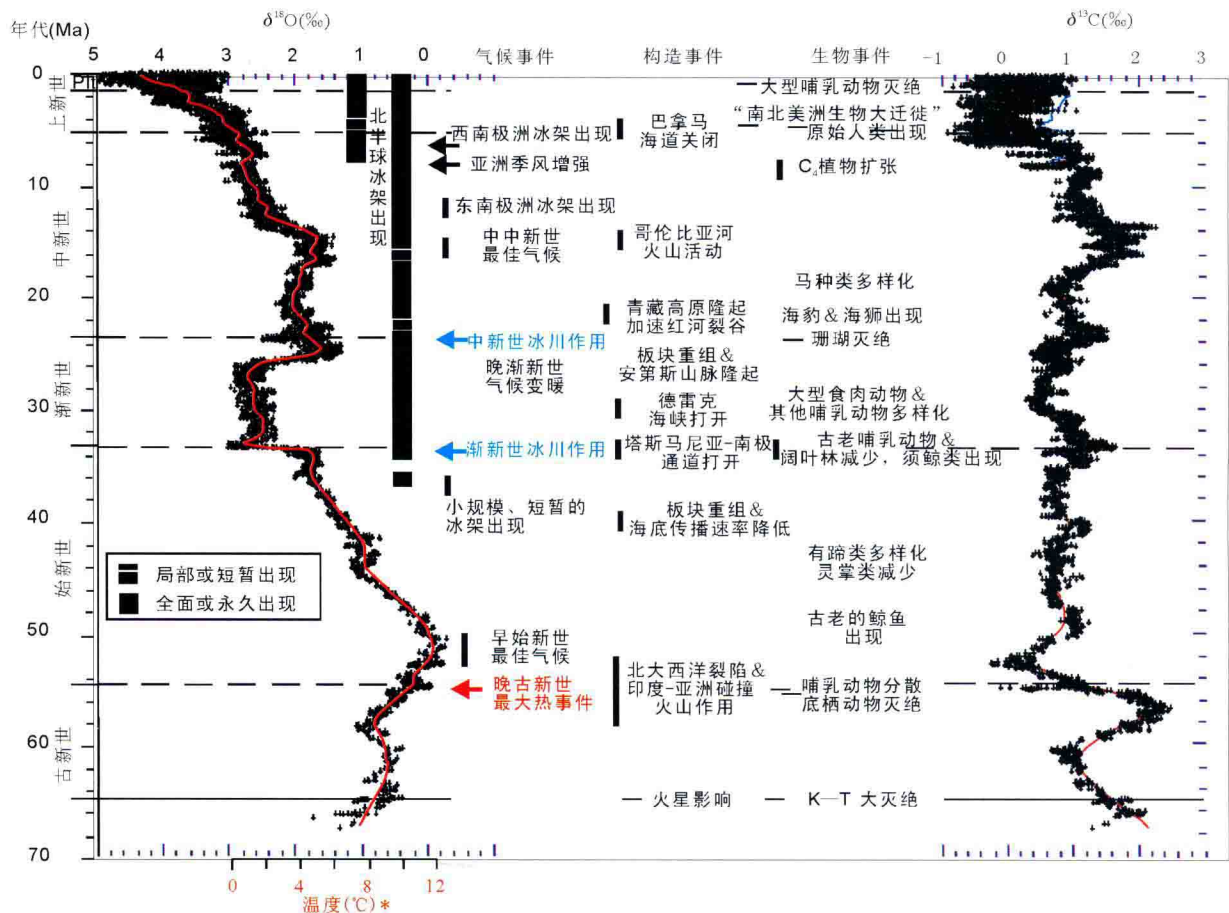


图 1-4 新生代以来全球氧碳同位素的变化趋势及重要构造事件对比(引自 Zachoes et al, 2001)

汪品先等(2009)依托 ODP184 航次资料对南海古海洋特征及古气候演变作了详尽的描述。许多学者也从浮游有孔虫含量计算、氧碳同位素变化、古植物-古地理变迁以及钻井沉积序列等方面对南海 40Ma 以来的海平面变化进行了恢复(李杰等, 1999; 郝诒纯等, 2000; 庞雄等, 2005)。总体而言,自 40Ma 以来,南海相对海平面变化经历了 4 个二级旋回变化(图 1-5)。

大多数学者的研究表明,南海海平面自始新世(40Ma)以来整体呈现出上升的趋势,与 Haq(1987, 1988)和 Miller(2005)提出的全球海平面整体下降趋势相反,体现出区域构造运动差异性导致了相对海平面变化。南海上述 4 个二级海平面变化旋回与 Haq 提出的全球海平面变化曲线吻合较好。秦国权(1996, 2002)、庞雄(2005, 2008)利用浮游有孔虫分异度和百分含量识别出最大海泛面、层序界面,进而恢复了珠江口盆地 30Ma 以来的相对海平面变化。划分结果显示,除了中中新世一晚中新世阶段,珠江口盆地三级海平面变化与全球海平面变化均较为同步。将 IODP1148 氧同位素曲线与 Zachos(2001)整理的全球氧同位素曲线对比可发现,南海北部的气候变化与全球气候变化具有较好的可对比性。南海海平面上升与晚渐新世气候变暖期(Late Oligocene Warming, 27~25Ma)和中中新世气候适宜期(Middle Miocene Climatic Optimum, 17~15Ma)有关(Zachos, 2001)(图 1-5)。南海晚中新世以来海平面上升幕可能与南海新构造运动密切相关。

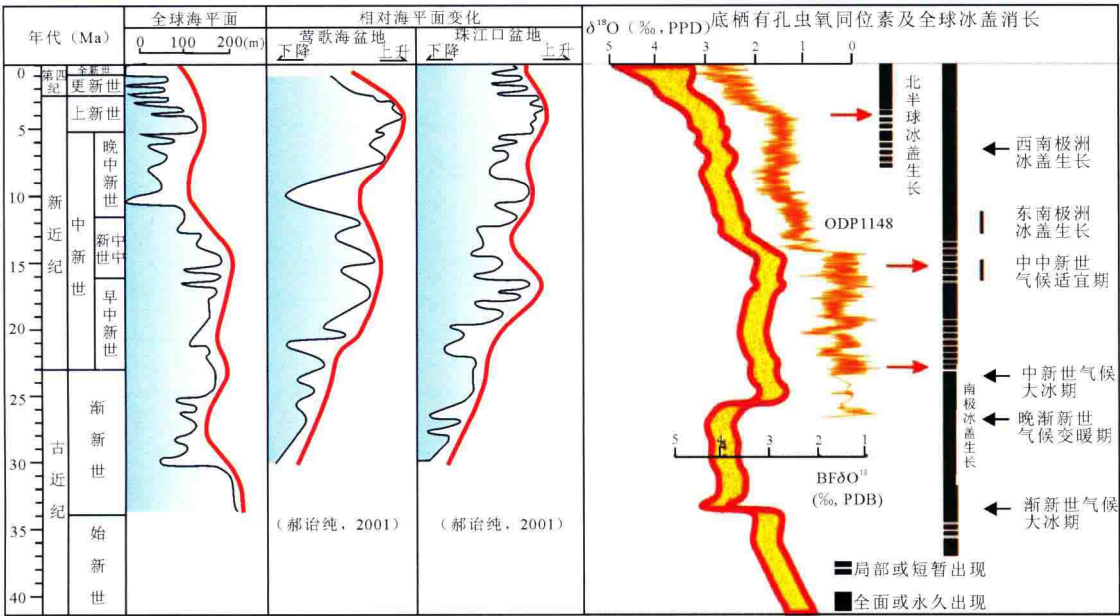


图 1-5 南海相对海平面变化与全球综合氧同位素变化、ODP1148 站氧同位素变化、冰盖生长阶段对比

1.1.3 古气候特征

生物礁是造礁生物体在生长过程中不断堆积而成的。南海边缘海的形成演化过程深刻影响了生物生长环境,从而制约了生物礁碳酸盐岩的形成、发育和演化过程。影响生物生长的因素主要包括以下几点。

(1)海水温度、盐度和透明度。西沙海域地处热带,年平均气温为 26.5℃,表层海水年平均温度也在 26℃左右,全年平均海水盐度为 33.69‰,海水剪明度高,非常适合造礁珊瑚的生长。

(2)海水深度。只有在适宜的深度之下,造礁生物才能获得足够多的阳光和养分,满足生物生长需求,同时适宜的深度有利于产生足够的水动力条件,冲刷生物周围的水体,改善生物生长环境,使得生物茂盛生长,而西沙海域大部分台地区域都遭受了不同程度的淹没,只有处于构造高部位的西沙群岛附近少数区域得以幸免。

(3)成礁区的风力、风向、海流、潮汐和太阳辐射等。研究区海域属于热带季风气候,每年 10 月至次年 3 月盛行频率高、风力大的东北风,每年 5~8 月盛行频率低、风力小的西南风,海域海浪的周期性交替和盛行期基本上与季风交替的周期相同,且风浪较多;潮汐主要来源于太平洋潮波,以不正规的日潮为主;表层海流以风生海流为主,流向、流速随季风而变;此外,西沙群岛海域在夏季还盛行风暴潮。

据许红等(1992)研究,南海海域在晚渐新世一中中新世期间具有良好的成礁的古气候和古海洋环境,其古盐度条件属于正常的海水含盐度,是生物礁生长的正常范围;渐新世一中中新世期间的全球气候处于冰期—间冰期之间(图 1-6),古海洋演化中动物群—植物群的气候证据表明(表 1-1),在早中新世,古气候经历了温暖—寒冷两次旋回变化,中中新世古气候则由寒冷变为温暖气候,在末期又变为寒冷气候,但整个中新世,西沙仍以生物礁灰岩和生物礁白云岩沉积为主,浮游动物群丰富,说明气候的变化造成了礁生长期次的变化,整体环境对生物礁的生长仍然比较有利。对于西琛 1 井的研究发现,西琛 1 井礁灰岩碳酸盐岩含量为 99.68%~99.88%,这说明南海海域当时的古海水中酸不溶物的含量很低,整体为碳酸盐岩沉积环境。

