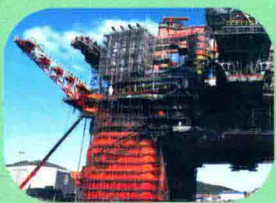


出版省级重点出版物
著作出版基金资助项目

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 储层特征与成岩演化

时志强 谢玉洪 刘立 张道军 尤丽 编著



NANHAI XIKEYIJING TANSUANYANYAN SHENGWUJIAO CHUCENG CHENJIXUE
CHUCENG TEZHENG YU CHENGYAN 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

储层特征与成岩演化

时志强 谢玉洪 刘 立 编著
张道军 尤 丽



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

内 容 提 要

本书以西科 1 井岩芯为资料,通过碳酸盐岩生物礁储层系统的岩石学、地球化学和储层地质学研究,阐明了西沙地区碳酸盐岩生物礁岩石组构与储集空间特征、成岩作用类型及成岩演化过程,建立西沙地区的白云岩化模式,为深水碳酸盐岩生物礁储层勘探提供重要的地质依据与方法借鉴。

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·储层特征与成岩演化/朱伟林,谢玉洪主编;时志强,谢玉洪,刘立,张道军,尤丽编著. —武汉:中国地质大学出版社,2016. 12

ISBN 978-7-5625-3975-9

- I. ①南…
- II. ①朱… ②谢… ③时… ④刘… ⑤张… ⑥尤…
- III. ①南海-生物礁-碳酸盐岩-储集层-沉积学
- IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 327107 号



南海西科 1 井碳酸盐岩生物礁储层沉积学·储层特征与成岩演化			时志强 谢玉洪 刘 立 编著 张道军 尤 丽
责任编辑:王凤林 舒立霞	选题策划:毕克成 王凤林	责任校对:周 旭	
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://www.cugp.cug.edu.cn	
开本:880 毫米×1230 毫米 1/16	字数:376 千字	印 张:12	
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 978-7-5625-3975-9			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 65×10⁸bbl(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 4×10⁸t,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

由中海石油(中国)有限公司资助,近年来开展了西科1井新生界取芯全层段系统的岩石学、地球化学和储层地质学研究。在充分消化和吸收已有资料及成果的基础上,认知地层、沉积相、构造演化等总体特征,观察了西科1井岩芯并采集样品进行碳酸盐岩的岩石学、矿物学、地球化学特征研究,查明西沙地区礁滩相碳酸盐岩岩石组构,揭示生物礁碳酸盐岩成岩作用、成岩演化与白云岩化机理,阐明孔隙演化及孔隙发育影响因素,开展了礁滩相碳酸盐岩储集性综合评价,为深水区生物礁储层勘探提供了重要的地质依据。

本次研究主要以薄片观察和各种测试分析为主,涉及的测试项目及研究手段有:薄片观察及岩石组构定量分析,阴极发光分析,白云石及涉及的其他矿物的流体包裹体分析,X射线衍射分析,常量与微量元素地球化学研究,岩石中方解石和白云石相对含量的计算,碳、氧同位素地球化学研究,成岩环境综合研究。

通过系统的碳酸盐组分和岩石类型的鉴定和定量分析,查明了西科1井岩性的纵向分布特征,建立了高分辨率礁滩相碳酸盐岩综合岩性柱。根据系统的岩石学和关键层段的地球化学研究,查明了成岩环境的纵向演替规律、转换界面标志和各成岩环境的岩石学、地球化学特征,建立了不同成岩环境下的成岩演化模式。钻遇碳酸盐岩由原地石灰岩、异地石灰岩、碳酸盐砂、白云岩化石灰岩和混积岩组成。在西科1井,大气水成岩环境的影响深度范围为0~169m,具有偏轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值;海水成岩环境的影响深度范围为169~579m,见泥晶套、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,胶结物的橘色环带阴极发光性和相对偏轻的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值为识别标志。

西科1井白云岩主要分布于上新统莺歌海组二段的顶部、上中新统黄流组及中中新统梅山组下部,下中新统三亚组一段,白云岩累计厚度大于380m,主要的白云岩层段一般发育在褐色铁质矿物浸染的不整合面或古暴露面之下。从288m开始,随深度的增加较大晶粒白云石在岩石中的比例增加。总体看,西科1井白云岩与西琛1井白云岩具有相似的层位分布特征和碳、氧同位素特征,可能反映着相同或相似的成因。中等盐度渗透回流模式可能适用于西沙地区大部分白云岩的形成,是西沙地区环礁(孤立台地)白云岩形成的基础;受中等埋深条件下压实改造(压实驱动机制)及与深部断层有关的热对流作用(热对流机制)共同作用的埋藏白云化模式,使已经存在的白云岩得以改造。

采用显微岩相学观察和图像分析相结合的方法,精细刻画和评估了礁滩相碳酸盐岩储层的孔隙类型、孔隙尺度及其随埋深变化规律,认为西科1井原生孔隙类型取决于岩性,次生孔隙分布于整个井段。

根据孔隙度、渗透率、排驱压力、孔隙喉道半径平均值和孔隙结构类型参数建立了碳酸盐岩储层分类标准,确定了孔隙演化的主控因素为成岩环境,建立了不同成岩环境下的孔隙演化模式,为南海礁滩相碳酸盐岩储层研究提供了参照和参考信息。认为西科1井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变化,白云岩是这一趋势的主要贡献者,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及粒泥灰岩。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。

目 录

0 绪 论	(1)
0.1 南海及西沙地区概况	(1)
0.1.1 中国南海	(1)
0.1.2 西沙群岛	(2)
0.1.3 石岛	(3)
0.2 国内外礁滩相碳酸盐岩储层研究进展	(4)
0.2.1 国内外礁滩相灰岩储层研究	(4)
0.2.2 国内外白云岩储层研究	(8)
1 地质背景	(11)
1.1 中国南海及西沙地区构造特征	(11)
1.1.1 南海扩张过程	(11)
1.1.2 南海陆缘沉积盆地	(13)
1.1.3 西沙地区构造特征	(14)
1.2 西沙群岛新生代地层特征	(17)
1.2.1 西沙地区钻井	(17)
1.2.2 西科1井地层特征	(17)
1.2.3 西琛1井地层特征	(18)
1.2.4 钻井地层分组命名	(20)
1.2.5 西沙地区生物礁特征	(21)
1.3 西沙地区新生代沉积环境	(22)
1.3.1 西沙岛礁钻井沉积相	(22)
1.3.2 西沙地区沉积模式	(25)
2 碳酸盐岩储层岩石组构与岩石类型	(28)
2.1 石灰岩储层	(28)
2.1.1 岩石组构	(28)
2.1.2 岩石类型	(32)
2.1.3 微相	(42)
2.1.4 生物礁	(49)
2.2 白云岩储层特征	(52)
2.2.1 白云岩分布及颜色	(52)
2.2.2 白云岩颜色及古暴露面	(54)
2.2.3 白云岩微观特征	(57)
2.2.4 白云岩的先驱岩石	(61)
2.2.5 矿物成分	(63)
3 成岩作用	(71)
3.1 石灰岩储层	(71)

3.1.1	成岩作用方式	(71)
3.1.2	成岩环境	(82)
3.1.3	成岩阶段	(92)
3.2	白云岩储层	(94)
3.2.1	白云岩化学组成	(94)
3.2.2	白云岩化流体	(100)
3.2.3	微生物对白云岩化的可能影响	(107)
3.2.4	白云石重结晶作用	(109)
3.2.5	白云岩化温度	(111)
3.2.6	去云化作用	(112)
3.2.7	白云岩化模式	(112)
4	储集空间与储集性综合评价	(116)
4.1	孔隙类型	(116)
4.1.1	孔隙类型及其特征	(116)
4.1.2	孔隙尺度	(121)
4.1.3	孔隙类型的岩性制约	(122)
4.2	储集物性	(123)
4.2.1	孔隙度随埋深变化	(123)
4.2.2	分组段物性特征	(124)
4.3	储层物性评价及孔隙结构	(136)
4.3.1	储层物性评价	(136)
4.3.2	储层孔隙结构	(140)
4.4	储层综合评价	(144)
4.4.1	评价步骤	(144)
4.4.2	评价参数选取	(144)
4.4.3	评价结果	(145)
5	孔隙发育的影响因素及孔隙演化	(147)
5.1	大气水成岩环境(0~169m)	(147)
5.1.1	孔隙与物性特征	(147)
5.1.2	主控因素	(150)
5.1.3	孔隙演化	(152)
5.2	海水成岩环境(169~579m)	(155)
5.2.1	孔隙与物性特征	(155)
5.2.2	主控因素	(156)
5.2.3	次生孔隙形成与演化机制	(158)
5.3	埋藏成岩环境(579~1257.52m)	(162)
5.3.1	孔隙与物性特征	(162)
5.3.2	主控因素	(165)
6	主要结论	(167)
	主要参考文献	(169)

0 绪 论

0.1 南海及西沙地区概况

0.1.1 中国南海

南海介于 $3^{\circ}30'S-25^{\circ}00'N$ 、 $105^{\circ}10'-121^{\circ}50'E$ 之间,北缘是华南板块,西缘是印支板块,南缘是婆罗洲地块,东缘是菲律宾群岛(图 0-1)。南海是西太平洋最大的边缘海海盆之一,面积约 $350\times 10^4\text{km}^2$ (含纳土纳海和泰国湾)。南海是世界四大海洋含油气区之一。按全国第二轮资源评价结果,整个南海的石油地质储量为 $(230\sim 300)\times 10^8\text{t}$,有“第二个波斯湾”之称(甘玉清等,2009)。

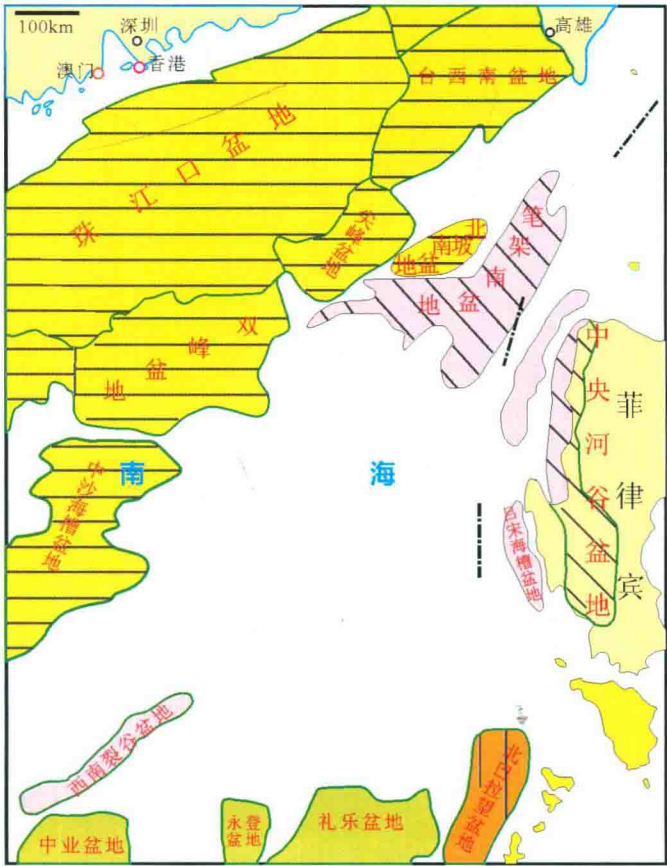


图 0-1 南海海域新生代沉积盆地分布示意图(张功成等,2013)

含油气盆地分布于南海北部大陆边缘、南海西部大陆边缘、南海南部大陆边缘和南沙地块。其中，南海北部大陆边缘发育珠江口盆地、北部湾盆地和琼东南盆地。这些盆地是在华南地块及其边缘活动带基底上发育起来的拉张型新生代断陷-坳陷型含油气盆地。南海西部大陆边缘发育的盆地包括莺歌海盆地、中建南盆地和万安盆地。南海南部大陆边缘发育的盆地包括曾母盆地、文莱-沙巴盆地和巴拉望盆地。南沙地块上发育的盆地包括北康盆地、礼乐盆地和南薇西盆地(张功成等,2013)。

南海发现生物礁的含油气盆地包括莺歌海盆地、琼东南盆地、珠江口盆地、万安盆地、曾母盆地、文莱-沙巴盆地和巴拉望盆地等(邱燕等,2001;甘玉清等,2009)。在莺歌海盆地,生物礁分布于莺东斜坡带,成礁期为中中新世。在琼东南盆地,生物礁分布于崖中凸起、松涛凸起和北部隆起,成礁期为早中新世和中中新世。在珠江口盆地,生物礁分布在神狐暗沙隆起和东沙隆起,成礁期为早-晚中新世。在万安盆地,生物礁分布在南部隆起、西南斜坡的南部、东南坳陷的次级凸起构造带上,成礁期为晚中新世。在曾母盆地,生物礁集中分布在西部台地和南康台地一带,成礁期主要为中-晚中新世。在巴拉望盆地,生物礁分布于北部区块,成礁期为晚渐新世-中中新世(邱燕等,2001)。

0.1.2 西沙群岛

西沙群岛位于17°07′—15°43′N,111°11′—112°54′E,由脱离华南大陆的残余陆块构成(陈以健等,1982;业治铮等,1985;张明书等,1989)。海域超过50×10⁴km²,属海南省管辖。以永兴岛为中心,西沙群岛距三亚市榆林港和文昌县清澜港均约为330km。西沙群岛分布有40多个岛、洲、礁和滩,主体由永乐环礁、宣德环礁、东岛环礁、华光环礁、浪花环礁、玉琢环礁、北礁环礁和盘石屿环礁组成,大致以112°E为界,以东为宣德群岛,以西为永乐群岛(图0-2)。陆地总面积约10km²。西沙群岛终年皆夏,属于热带季风气候。

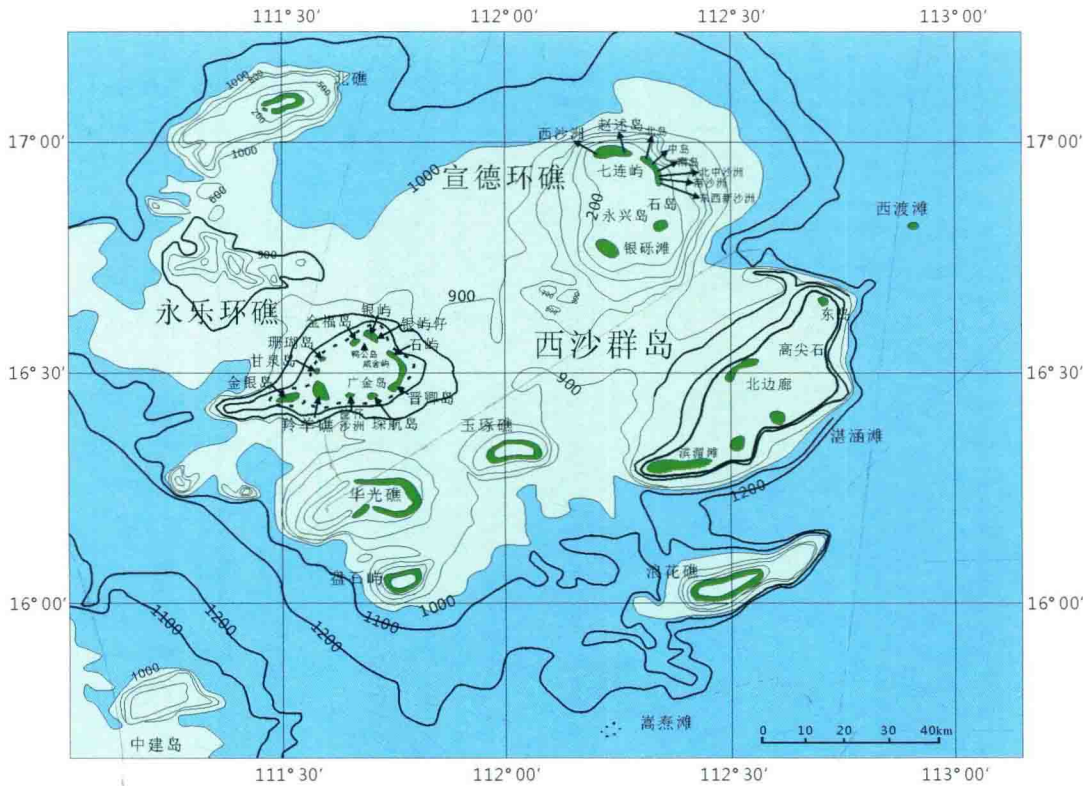


图0-2 西沙群岛环礁及岛屿分布示意图(张明书,1989;赵强,2010)

西沙海域于生物礁岛屿上已施工 5 口钻井,即西永 1 井、西永 2 井、西琛 1 井、西石 1 井和西科 1 井。其中,西永 1 井位于宣德环礁上的永兴岛东南缘(16°50'N,112°20'E),完钻井深为 1384.68m。西永 2 井位于永兴岛西南缘(16°51'N,112°20'E),完钻井深 600.02m。西琛 1 井位于永乐环礁琛航岛(16°25'24"N,111°40'E),完钻井深为 802.17m;西石 1 井(16°50'45"N,112°20'E)位于宣德环礁上的石岛东南侧,完钻井深为 200.63m。西科 1 井亦位于中国南海西沙群岛中的石岛,完钻井深为 1268.02m。

0.1.3 石岛

西沙群岛绝大多数岛屿都是砂砾碎屑生物在珊瑚礁盘上堆积起来的砂岛,可称之为灰砂岛。这些灰砂岛的面积多在 1km² 左右,海拔高度一般在 5~10m 之间。石岛面积虽小,却是西沙群岛中最高的岛屿(吕炳全等,1986)。石岛的地质地貌特征与西沙群岛的其他灰砂岛有显著的不同。一般灰砂岛四周有高起的砂堤环绕,中部是低地或潟湖,除部分海滩、砂堤与潟湖沉积已为碳酸盐或磷酸盐胶结外,其余均为松散的生物砂砾沉积。石岛则不然,它四周低,中间高,呈不甚典型的角锥形(最高点稍向西偏),雄踞于南海之上(图 0-3)。由于长年经受风浪,特别是东北季风的风浪的袭击,石岛四周均受到强烈的海蚀作用,尤以北岸为甚,海蚀崖、海蚀洞、海蚀壁龛与海蚀柱等海蚀地形极为发育,而且十分典型(吕炳全等,1986)。

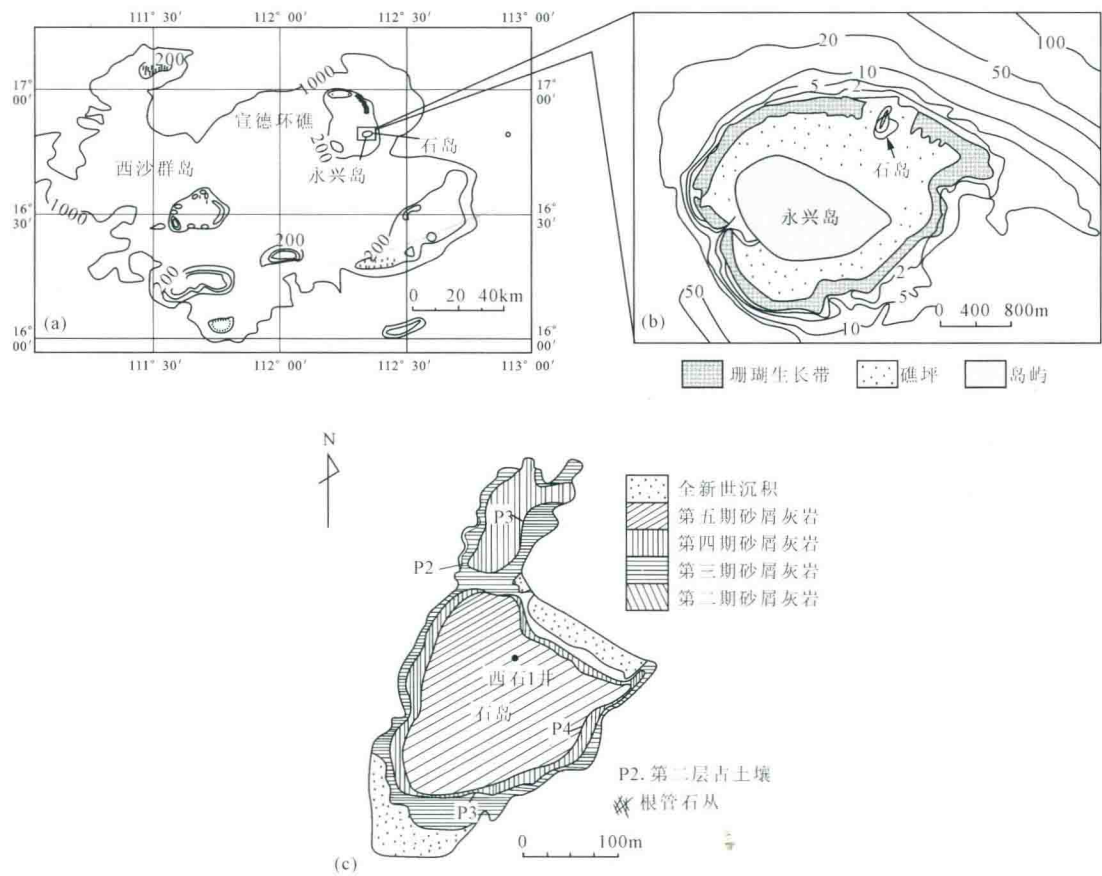


图 0-3 西沙石岛地理分布与生物砂屑灰岩分布(赵强,2010)

石岛是西沙海域唯一由生物砂屑灰岩构成的侵蚀型岛屿(吕炳全等,1986)。近年来的研究表明,该生物砂屑灰岩为典型的风成砂屑灰岩(沙丘岩)。在物质组成上,砂屑灰岩由珊瑚藻、珊瑚、软体动物、棘皮动物和有孔虫等生物碎屑组成(张明书等,1989),总体上以珊瑚藻和珊瑚碎屑为主(赵强等,2013),粒

级主要为中砂级,其次为含细砂和粗砂级(赵强等,2013),并以磨圆度高、分选中等至好、具有风成的粒度分布为特征(赵强等,2013)。在露头尺度上,砂屑灰岩中发育各种大型风成层理,沙丘上常发育高角度的进积层理和穹形层理,丘间则以相对低角度的交错层理为主。风成砂屑灰岩的物源为岛屿周围的生物礁。来自生物礁的大量的生物碎屑被波浪搬运到岸边形成海滩或环岛砂堤,然后再在风力作用下继续向高处搬运并形成海岸沙丘(赵强等,2013)。在石岛地表露头,风成砂屑灰岩由4层可连续追踪的古土壤层所分隔。西沙群岛地表上的古土壤层最早由业治铮等(1984)报道。在石岛地表,古土壤层出露的海拔标高为1~10m,按照产状和分布可为上、下两层,厚度为20~40cm(业治铮等,1984)。在最近的研究中,赵强等(2013)确认古土壤层分布于风成砂屑灰岩层中,并识别出4层可连续追踪的古土壤层,其最大厚度<1.6m,大多数的厚度<0.5m。古土壤层的主要特征(业治铮等,1984)包括:①顶部发育钙结层;②主体呈疏松球粒状结构;③间夹1至数层硬盘(hardpan);④下伏层为发育交错层理的生物碎屑砂岩。根据业治铮等(1984)的描述,土壤层中的疏松球粒直径为1~5mm;在硬盘中隐约见植物根痕,并见有原地陆生腹足类蜗牛化石和生长在潮间带的蝶螺。

生物砂屑灰岩属于形成于末次冰期期间的风成碳酸盐岩(赵强等,2013,2014),其直接下伏地层(未出露)由珊瑚礁灰岩(王建华,1997)构成。近30年来,人们对地表出露的砂屑灰岩极为关注,先后开展了沉积学(业治铮等,1985;王建华,1997)、古土壤与古气候(业治铮等,1984;魏喜等,2008;赵强等,2013,2014)、年代学(业渝光等,1987;业渝光等,1990;徐启浩等,1992)、陆生生物(冯伟民等,1991)、岩石学(朱袁智等,1984)和成岩作用(赵强等,2013,2014)等方面的研究,并取得了许多的重要认识与成果。

随着西石1井(张明书等,1989)的钻探,石岛研究开启了新的篇章。然而,由于西石1井完钻井深浅(200.63m),且102.65~200.63m钻探质量差(张明书等,1989),因而获得的资料有限。最近完钻的西科1井(1268.02m),无论是钻遇地层还是取芯(全取芯)都创西沙群岛钻探之最。最近发表的系列研究成果,从沉积及其与海平面变化之间的关系(朱伟林等,2015;王振峰等,2015;商志奎等,2015)、古生物(刘新宇等,2015;马兆亮等,2015)、地球化学(翟世奎等,2015;乔培军等,2015;修淳等,2015)、岩石学(孙志鹏等,2015)、储层特征与成岩作用(张道军等,2015;尤丽等,2015;赵爽等,2015)、白云岩化(王振峰等,2015;张建勇等,2013)等方面揭示了石岛基底上覆地层上部(0~1257.52m)的地质特征,为深水区的油气勘探提供了极为重要的地质信息。

0.2 国内外礁滩相碳酸盐岩储层研究进展

0.2.1 国内外礁滩相灰岩储层研究

0.2.1.1 礁(滩)定义

关于礁的定义 Riding(2002)提出了一个清晰而又准确的论述。他把礁定义为是由固着生物所形成的本质上为原地沉积的碳酸盐岩建造。这种广义的定义旨在包括各种类型的礁(不论规模大小)以及基本是底栖固着生物在底质拓殖和控制的产物的各种构造。Kiessling et al(2002)在书中略有修改:“礁是由底栖固着生物生长和活动而形成的侧向受限的生物成因构造,具有地貌突起及(推测的)刚性构造。”礁的发育取决于固着底栖生物的生长或生命活动,广义上的礁包括骨架礁、礁丘、泥丘和层状生物礁。只有这些广义的定义才能对礁的形成和样式在空间及时间上的分布型式进行比较分析。

Lowen Stan(1950)将礁与滩对比,提出滩由不能形成抗浪构造的生物组成,并指出由于它缺乏联结生物,因此该构造没有固定的形状,一般表现为低缓的坡角,滩内生长的生物仅能产生沉积物,但不具

有抗浪性。Lowen Stan(1950)生动而形象地称之为“被动”作用,而生物礁内存在的生物的“主动”习性有本质的区别。滩内存在大量生物骨屑时可称为生物滩。

其中与生物礁有关的词汇主要如下所列。

生物岩丘:生物成因的丘状构造或其他圆形构造(Cummings,1931);专指那些原地的生物堆积形成的生物丘(Nelson et al,1962)。

层状生物礁:非沉积成因层状礁体,每层岩性的组成相似。生物礁骨架生物密集、向周围拓殖,骨架硬度范围大。

生态礁:由生物建造的古代骨架礁,抗浪(Dunham,1970),海底地貌高。

骨架礁:坚硬钙质骨架生物建隆。

地层礁:横向受限制的由纯的或基本上纯的碳酸盐岩组成的原型块体(Dunham,1970)。

骨骼礁:和发育生物骨架礁相似,由坚硬钙质骨架生物形成。

岩隆:主要代表基本上由骨骼衍生的碳酸盐沉积物的原地聚集,在生长中高出海底的地形隆起显示(Stanton,1967);具有原始地形隆起的骨架生物丘(Wilson,1975;Lees,1988)。

丘:圆形的丘状构造,在礁研究中常指与骨架礁相似的丘隆,参见微生物丘、骨架丘、生物礁丘、泥丘(James & Bourque,1992;Wilson,1975;Cumings & Shrock,1928)。

微生物丘:生物成因隆丘,由引起碳酸盐岩沉淀且黏结、捕集沉积物的微生物作用形成(James & Bourque,1992)。

泥丘:同沉积丘隆,以泥质为主的碳酸盐岩建隆(Wilson,1975),生物为次要组成部分。

生物丘:具有穹隆状、透镜状或其他周围受限制的形状,全部或主要由固着生物建造的并且被不同岩性的正常岩石包围的块体(Cummings & Shrock,1928);透镜状碳酸盐岩体,为同沉积凸起,由生物泥和少量有机黏结物组成(James,1932)。

骨架丘:生物成因丘,由细小易碎的骨架生物或结壳生物组成。这些生物能阻挡、捕集、黏结和固着灰泥(James & Bourque,1992)。

0.2.1.2 礁(滩)的形成条件及分布环境

从20世纪50年代开始,礁的种类主要分为“生物礁”和“灰泥丘”,这两类主要类型的概念的分化很普遍。

生物礁(也叫做生态礁、真礁)是由原核和真核的有骨骼或无骨骼的生物在原地形成的水生生物沉积物。这个类别也包含了常常称为骨架礁的构造,这些骨架可以由一些在原地生长的大骨骼与一些原位小型骨骼(微骨架或碎屑骨架)相联结而构成,或者是由这些大骨骼与无骨骼的微生物的联结而构成,这些无骨骼的微生物是自生泥晶灰岩的主要制造者(Weidlich & Fluegel,1995)。

狭义的生物礁或生态礁强调生物作用,主要由造架生物和联结生物组成。造架生物呈原地生长状态,没有经过搬运作用,此类礁在地貌上呈明显的隆起(吴亚生,2003)。在广义的生物礁内,只要是属于碳酸盐隆起即可,而忽略其是否为生物成因或其他成因。这样就从单一的生物成因,扩大为造架、障积、水动力等多种成因。

生物礁形成需要合适的生态条件。造礁生物所需要的生活环境和条件,包括光照、水温、水深、浊度、营养水平、底质及水流等。生物礁的发育受大地构造、海平面变化及古地理环境控制,同时也受造礁生物兴衰演化的控制。不同地史时期的造礁生物及其附礁生物组合各有特色,形成的礁体在类型、规模和结构等方面也具有不同的特征。

现代礁主要发育于浅海环境,但也可在陆坡甚至盆内深水环境发育。通常认为礁的碳酸盐岩产率是碳酸盐岩台地形成的基本控制因素(Bosscher & Schlager,1993;Kleypas,1997),但这一看法最近受到质疑(Kiessling et al,2000)。目前,传统观点(礁不同程度地依赖于低纬度热带亚热带暖水环境)和新观点(现代礁和古代礁亦可在中高纬温带冷水环境中形成)之间的分歧日益增大。