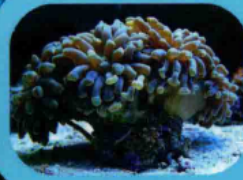
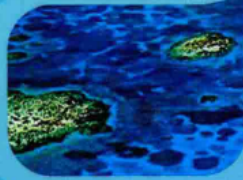


2017年湖北省精品出版省级重点出版物
著作出版基金资助项目

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 年代地层与古海洋环境

邵磊 朱伟林 邓成龙 张迎朝 翟世奎 编著



NANHAI XIKEYIJING TANSUANYANYAN SHENGWUJIAO CHUCENG CHENJIXUE
NIANDAI DICENG YU GUHAIYANG HUANJING



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

年代地层与古海洋环境

邵 磊 朱伟林 邓成龙 编著
张迎朝 翟世奎

内容提要

本书依托西科 1 井全取芯岩芯,采用古生态学、岩石矿物学、沉积地质学、沉积地球化学等方法,结合层序地层学和地球物理学的手段,对西沙海域西科 1 井进行了古海洋学、沉积环境以及沉积作用过程的综合研究。在精细的年代地层格架下,恢复了该地区中新世以来古海洋学变化过程。在研究过程中所建立的 BIT 等海平面变化示踪参数,为建立西沙地区乃至整个南海的更高精度的海平面变化曲线打下良好基础。

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·年代地层与古海洋环境/朱伟林,谢玉洪主编;邵磊,朱伟林,邓成龙,张迎朝,翟世奎编著. —武汉:中国地质大学出版社,2016. 12
ISBN 978 - 7 - 5625 - 3983 - 4

- I. ①南…
- II. ①朱…②谢…③邵…④邓…⑤张…⑥翟…
- III. ①南海-古海洋学②南海-地层学
- IV. ①P136. 22②P53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 327113 号

南海西科 1 井碳酸盐岩生物礁储层沉积学·年代地层与古海洋环境			邵磊 朱伟林 邓成龙 张迎朝 翟世奎 编著	
责任编辑:王凤林 王敏		选题策划:毕克成 王凤林		责任校对:张咏梅
出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)			邮政编码:430074	
电 话:(027)67883511		传 真: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:289 千字 印张:9 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:武汉籍缘印刷厂		印数:1—1000 册		
ISBN 978-7-5625-3983-4			定价:128.00 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

自序

自 20 世纪中叶以后,生物礁碳酸盐岩研究如雨后春笋激增,凸显于地学界,其源皆出于碳酸盐岩油气藏之重大发现,继而多有学者深研其义。与此同时,“气候异常”概念受到全球学术界的重视,“气候变迁”遂成 21 世纪学者关注之焦点问题。众多学者利用多种地质记录,溯流穷源,借以探讨古环境、古气候演变是否有规可循,以期窥测未来气候变化之趋势。生物礁碳酸盐岩对气候变化反应灵敏且分辨率高,宜作良材以研讨气候环境演变及海平面变化。

出版本专著之目的,即综合沉积学、地磁学、古生物学、元素及生物地球化学等方法,由单独一点至空间整体辐散,复由空间整体归于独立一点,由矿物组分至岩石组构之演化,由微相特征至沉积模式之变迁,由沉积物形成至成岩演化之过程,去伪存真,纵横对比,归纳演绎,触类旁通,以冀真正反映碳酸盐岩生物礁发育史与西沙地区古海洋演变史。

书稿撰写期间,编者以如下三点为重中之重:①南海西沙区域地质之故事,多有研究者各执其辞,汪洋自恣,稍显繁重,且观念认知恐略有过时谬误之势,即值此著书之时遍观切究、精修订正,以助地学界人士对其有新的认识。②环境演变之技术手段学者钻研甚深,虽不乏篇法可求,但篇各一方,故慎择其精,且余等著书更主于方法上推陈出新,着重古今结合,横向对比,刊而广布,另生物标志 BIT 应用于海平面变化研究亦属首次,其效用则有待商榷。③“定量”之理念应用于古海洋领域虽久已有之,然因本研究区材料的限定,长期难有突破,故撰稿者于“定性”基础之上深化“定量”之宗旨,在“同位素地球化学”“磁性地层学”两章尝鲜小试,以起抛砖引玉之作用。

编者曾与各专家多次切磋,推敲文例,研讨体裁,确定此书为七章分叙式,后分工执笔,即除摘要结语外。第一章系区域地质背景,由朱伟林、邵磊执笔;第二章第一节系岩性地层,由解习农执笔,第二节系生物地层,由祝幼华、李前裕执笔,第三节系元素地层,由翟世魁执笔;第三章系磁性地层学,由邓成龙执笔;第四章系同位素地层学,由朱伟林、邵磊执笔;第五章系西沙地区古海洋学,由翟世魁执笔;第六、七章分属西科 1 井沉积环境及珊瑚礁演化与海平面变化,由朱伟林、邵磊、崔宇驰及李前裕执笔;文献杂缀附于末。全书各章既独成一体,明其一端,又互相佐证,合而为一,且图文并茂,脉络清晰。全卷经邵磊、朱伟林、邓成龙、张迎朝、翟世奎统一整理及定稿。

余等学识有限,时间仓促,狂瞽之见,错讹疏漏之处仍在所难免,唯盼专家学者及其他热心审阅者共同斟酌、勘正与续修之,以期日臻完善。

敬以此文,是以为序。



2016 年 12 月于上海

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

迄今为止,西科1井是西沙地区取芯率最高、地层揭示最完整的科学探井,该井的成功钻探为南海生物礁演化、古海洋学研究提供了不可多得的素材。资料显示,碳酸盐岩台地沉积发育较为特殊,受重结晶及白云岩化作用颇为严重,另外在间冰期—冰期转换阶段,海平面快速下降造成台地普遍发育沉积间断甚至风化剥蚀现象,其包含的古海洋、古环境信息也随之遭受不同程度的破坏。因此,采用常规氧同位素地层学方法对地层年龄进行标定,是该井碳酸盐岩研究中面临的一个重大难题。然而,在攻关团队的不懈努力下,通过古生物学、沉积学、沉积地球化学、生物地球化学、古生态学、同位素年代学、稳定同位素地层学等多种手段的综合应用,西科1井的研究最终打破原有桎梏的束缚,取得一系列突出成果。

1. 地层年龄框架成果

锆石 U-Pb 定年结果证实,西沙碳酸盐岩台地基底由晚中生代片麻岩及白垩纪花岗岩组成,其中最年轻的变质锆石年龄为 $137 \pm 1\text{Ma}$,最年轻的岩浆锆石年龄为 $85.1 \pm 3\text{Ma}$ 。结合古生物鉴定结果,即 1182~1187.92m 段发现大型底栖有孔虫 *Spiroclypeus* 属,结合其他生物组合,判定时代属早中新世时期;828.63m 处发现浮游有孔虫 *Praeorbulina* 和 *Globigerinoides obliquus*,属中中新世早期,揭示该地区生物礁为一套发育在中生代基底之上的中新世碳酸盐岩沉积。

因受大气淡水淋滤作用的强烈影响,西科1井于地表埋深 0.03m 处便开始发生矿化重结晶作用,且这种成岩作用随埋深深度增加而增加。同时,该套碳酸盐岩中暴露淋滤面及滩相沉积白云岩化作用极为普遍。鉴于以上原因,西科1井柱状样中保存的原始氧同位素记录基本被破坏殆尽,采用传统同位素地层学手段确定地层年龄框架十分困难。然而,研究发现 0~50m 层段 $\delta^{13}\text{C}$ 变化曲线与南海及全球主要大洋的碳同位素曲线基本相同,对应氧同位素 1~7 期,因此可用来精确标定 200ka 以来的地层年龄。其中,5m、11.7m、13.9m、16.8m、23.8m 及 35.65m 处分别为氧同位素第 1~6 期底界,地层年龄则分别为 14ka、29ka、57ka、71ka、129ka 及 191ka,与同层段珊瑚 U-Th 定年结果一致。另外,该井 0m 处地层年龄约为 5ka,说明石岛表层存在 5ka 以来的沉积间断。

由于碳酸盐岩所含磁性物质极低,一般很难采用该方法进行地层划分。本书结合生物地层学及放射性定年结果,采用磁性地层学方法对碳酸盐岩进行地层划分也属新的尝试。

2. 西沙地区古气候记录研究成果

研究发现, $\delta^{13}\text{C}$ 呈现出冰期低而间冰期高的特征:11.7m、16.8m 和 35.65m 处对应间冰期向冰期转换时期,全球海平面下降, $\delta^{13}\text{C}$ 呈现阶段性最高值;相反,4.15m、13.9m 和 23.8m 处恰好对应冰期向间冰期转换时期,全球海平面上升, $\delta^{13}\text{C}$ 突然变轻。因此,全球气候周期的转换不仅控制了 $\delta^{13}\text{C}$ 的突变,还控制了生物礁台地重要沉积界面的形成,即间冰期—冰期转换时期,海平面骤然降低造成大量碳酸盐岩台地遭受暴露、淋滤、风化及剥蚀,部分地层缺失。同时,书中还对西沙地区不同时期海水温度及酸碱度进行了尝试性探讨。

3. 岩相及沉积相成果

西科 1 井岩芯柱状样主要由早中新世、中中新世、晚中新世、上新世及更新世碳酸盐岩沉积物组成。其中,早中新世以生物礁灰岩为主,中中新世以生物碎屑灰岩为主,这两段时期西沙地区主要发育滩相-潟湖相沉积;至中中新世中晚期,该地区逐渐转变为礁相-滩相沉积。晚中新世早中期发育生物礁云岩和藻礁云岩,晚期发育生物碎屑云岩,但整体来看,整个晚中新世白云岩化程度较深。上新世又转变为生物碎屑灰岩,且该时期中部层段可见部分生物礁灰岩。这两个时期均以潟湖相沉积为主。第四纪更新世中下段主要为生物碎屑灰岩,上段主要为生物礁灰岩,主要发育滩相-礁滩互层沉积。靠近地表的部分是生物碎屑砂,尚未经历较深程度的成岩作用。

4. 元素地球化学成果

地化元素指标不仅较好地揭示了西沙地区海水深度、氧化还原环境转换及海水温度等变化规律,全岩元素分析结果中 Mg/Ca 比值、Li、P 等元素含量变化曲线大致可以反映西沙地区海平面自南海扩张以来曾经历数次升降,即自早中新世水深逐步加深,至中中新世之后逐步变浅,并于中中新世晚期达到最浅;继而水深再次加深,于上新世持续加深,直到更新世水深才二次变浅。

5. 有机地球化学成果

研究发现,西科 1 井支链和类异戊二烯指标——BIT 指数随井深由下至上呈现低—高一低—高的规律性变化,将西科 1 井以 180m、560m 和 1044m 为界分为 4 个阶段,恰好与第四纪—上新世(分界深度 216m)、晚中新世—中中新世(分界深度 577m)及中中新世—早中新世十分接近或完全一致。更重要的是,BIT 所代表的环境意义也能合理地揭示南海生物礁台地的发育过程及海平面变化:在 0~180m 和 560~1044m 岩芯段,岩性特征以生物碎屑砂和珊瑚礁或珊瑚藻构成的生物骨架灰岩互层为主,同时大量暴露溶蚀风化面指示该时期水体动荡,频繁暴露地表;在 180~560m 和 1044~1257.52m 岩芯段,岩性特征以生屑泥晶灰岩或珊瑚藻构成的生物骨架灰岩为主,指示相对较为平静的水深环境,可能属深水潟湖或中光层(Mesophotic)环境,珊瑚礁生长速率较为缓慢。

6. 生物礁发育演化及海平面变化成果

综合各项研究结果,早中新世以来生物礁发育演化及南海海平面变化呈现如下特征:早-中中新世早期,西沙地区遭受阶段性海侵,珊瑚礁主要发育滩相-潟湖相沉积;中中新世晚期,全球及区域海平面下降,珊瑚礁台地频繁暴露地表并遭受淋滤剥蚀,造成西科 1 井所处位置广泛发育溶蚀淋滤面,呈现礁-滩相互层的沉积特征;晚中新世—上新世,南海进入热沉降阶段,受区域及全球海平面上升的叠加影响,大部分南海浅海区珊瑚礁遭受溺亡,西沙碳酸盐岩台地也处于水深较大的中光层环境,沉积物以泥晶灰岩及藻类为主,堆积速率低、礁体生长缓慢;第四纪时期,全球及区域海平面总体呈下降趋势,西沙碳酸盐岩台地再次频繁暴露地表并遭受淋滤剥蚀,西科 1 井所处位置又出现了礁-滩交互、溶蚀淋滤面广泛发育的沉积相特征。

需要强调的是,对于第四纪早期海平面开始下降的时间,西科 1 井生物地化指标 BIT 所指示的转折点略晚于全球海平面发生变化的时间点,然而与邻区琼东南盆地海平面变化曲线发生转折的界线完全一致,说明西沙地区生物礁台地受区域相对海平面变化影响更大,同时也说明南海海平面变化既受全球海平面变化的影响,也受南海区域构造沉降的控制。

西科 1 井碳酸盐岩沉积包含了大量古海洋及古环境地质信息,其揭示的生物礁沉积特征,为研究南海以及全球中新世以来碳酸盐岩台地的发育演化提供了极为重要的证据。同时,攻关团队首次尝试的新方法、新手段也为碳酸盐岩研究提供了新的研究思路。

目 录

1 区域地质背景	(1)
1.1 南海新生代地质演化	(1)
1.2 南海碳酸盐岩台地研究现状	(6)
1.3 西沙地区地质特征	(14)
2 沉积地层学	(17)
2.1 岩性地层	(17)
2.2 生物地层	(28)
2.3 元素地层	(35)
3 磁性地层学	(44)
3.1 概述	(44)
3.2 岩石磁学	(45)
3.3 古地磁学	(48)
3.4 小结	(50)
4 同位素地层学	(51)
4.1 南海 ODP 站位碳氧同位素及意义	(51)
4.2 西科 1 井碳同位素地层学	(57)
4.3 地层划分	(63)
4.4 珊瑚 U-Th 定年	(65)
4.5 基底锆石定年	(68)
5 西沙地区古海洋学	(73)
5.1 西沙海域生物礁古海洋学研究背景	(73)
5.2 白云岩化记录	(74)
5.3 海水古温度记录	(78)
5.4 古海水酸碱度的记录	(83)
5.5 小结	(85)
6 西科 1 井岩性特征及沉积环境	(86)
6.1 岩性特征	(86)
6.2 沉积相特征	(93)

6.3 古生态探讨..... (95)

7 珊瑚礁生长过程及海平面变化 (97)

7.1 研究方法..... (97)

7.2 西科1井碳酸盐岩台地发育模式..... (99)

7.3 南海碳酸盐岩台地晚中新世衰退的记录 (101)

7.4 晚中新世碳酸盐形成于较深的中光层环境 (105)

7.5 晚中新世盆地下沉和海水变冷的耦合效应 (107)

7.6 西沙周边海平面变化分析对比 (109)

参考文献 (117)

后 记 (128)

1 区域地质背景

1.1 南海新生代地质演化

中国南海位于欧亚板块东南部,是新生代东亚大陆边缘形成的一系列边缘海盆地之一,它大致位于西太平洋从赤道至北纬约 20°之间,北侧是我国的华南大陆和台湾岛,西侧为中南半岛和马来半岛,南侧为苏门答腊岛和加里曼丹岛,东侧为菲律宾群岛,外形大致呈椭圆形,长轴呈 NE 向,约 3140km,短轴呈 NW 向,约 1250km,总面积大约 $3.5\times10^6\text{km}^2$ (图 1-1)。南海海底地形构成三级阶梯:大陆架水深超过 150m,面积达 $168.5\times10^4\text{km}^2$;大陆坡水深 150~3800m,面积达 $126.4\times10^4\text{km}^2$;图 1-1 深海平原水深 3800~4200m,面积达 $5.51\times10^6\text{km}^2$ 。其中,陆坡坡度较大,大陆架和深海盆地地势平坦。海底平

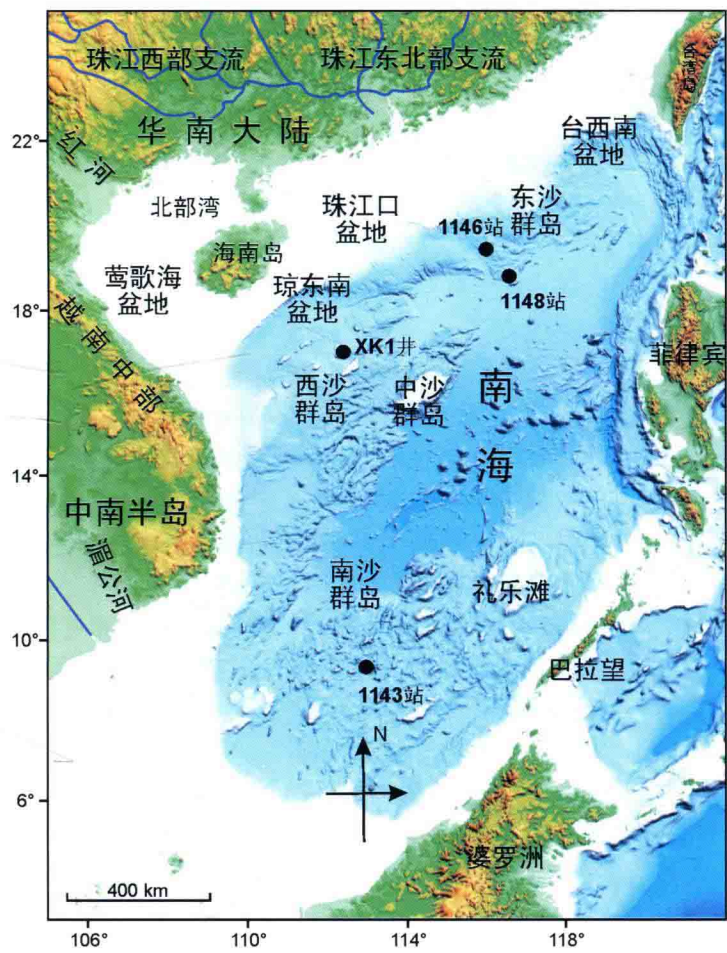


图 1-1 南海地形及重要站位略图(底图据杨胜雄,2015)

原分布有海岭和海山,东部发育有马尼拉海沟,深度达5377m。整体来看,大陆架、大陆坡以及深海盆地组合成缺口向东的马蹄形海底地形(刘昭蜀等,2002)。

边缘海,亦称陆缘海,是位于陆地与大洋之间的过渡地带。南海是西太平洋最重要的边缘海之一,形成演化过程十分复杂,备受国内外地质学家的关注。20世纪70年代以来,研究者对南海的形成发展提出了多种假设。例如,Briaies(1993)、Tapponnier(1986,1982)认为南海的形成与印度-欧亚板块碰撞引起的印支地块挤出逃逸有关;Fukao(1994)、Tamaki(1995)、邓晋福等(1996)和 Flower(1998)等学者认为南海的形成与青藏高原软流圈物质向东南方向流动,从而引起的深部过程有关;Karig(1973)、Ben-Avraham(1973)和郭令智等(1983)认为南海的形成与太平洋板块俯冲导致的弧后扩张有关;Holloway(1982)、Taylor(1980,1983)和 Hall(1995,2008)等学者认为南海的形成与古南海板片向南俯冲拖曳作用有关;张训华等(1997)认为南海的形成主要由单向拉张作用所致;周蒂等(2002)认为南海的形成主要受右行拉分作用影响;姚伯初等(1996)认为南海主要经历了大西洋型海底扩张的演化历史。上述观点不仅仅从不同侧面探讨了南海的形成及演变过程,而且充分说明了南海盆地的研究在全球构造演化史研究上具有举足轻重的地位。

1.1.1 南海盆地基底及盖层

整体上看,新生代以前,南海地区的演化和发育特征属古南海的一部分,除南海新生代中央海盆外,陆架区都可能存在古南海陆架基底地层和中生代海相及局部陆缘河湖相沉积地层。大陆架和大陆坡的基底地层可能包括:元古宙变质岩,为前寒武纪和晋宁期褶皱基底;早古生代变质海相碎屑岩和碳酸盐岩,为加里东期褶皱基底;晚古生代浅变质碎屑岩和碳酸盐岩,为海西期—印支期褶皱基底;中生代三叠系、侏罗系和白垩系等地层是燕山期褶皱带基底(刘光鼎等,1992)。新生代南海经历了一个新的地层演化和发育过程,沉积序列自古近纪中期以来都表现为一个巨大的海侵序列。古近系中下部是陆相沉积,上部的渐新统为海陆交互相,新近系以上为海相沉积。因此,新生界整体上表现为陆相—海相的演化序列。由于南海不同部位的构造环境存在一定差别,因此不同地区地层特征也有一定的差别。

南海北部地区目前所知最老的地层为元古宇,在西部和北部陆架、西沙群岛都有发现,是我国华南大陆和印支地块向海延伸的部分,由一套浅至深的变质岩组成。西沙群岛永兴岛的西永1井1251m处钻遇花岗片麻岩基底,Rb-Sr同位素年龄为637Ma(刘光鼎等,1992)。但是,西科1井钻遇的片麻岩基底经锆石U-Pb定年分析发现属于白垩系,故该基底应为晚中生代变质岩,而非长期以来认为的晚前寒武纪地层;莺歌海盆地的莺1井钻遇下古生界变质岩;北部湾东北部广泛分布上古生界。中生界受地壳变形和南海盆地扩张改造明显,目前主要分布于大陆架和大陆坡上的小型地堑盆地中,北部湾盆地和珠江口盆地钻遇上白垩统,为山前洪积扇和海相潟湖沉积。进入新生代,南海地区普遍缺失古新统海相地层,从东到西表现为明显的海相至陆相的演化序列。礼乐巴拉望、台湾地区及台西南盆地发育有始新世海相沉积,珠江口盆地及以西地区到晚始新世才开始发生海相沉积(张浩,2015)。莺歌海盆地,在前新生界基底上发育有渐新统河湖相泥岩、砂岩及砾岩;中新世之后沉积海相砂岩、页岩和灰岩沉积。万安-中建南盆地基底为变质岩,上面直接覆盖了渐新统浅海相—三角洲相砂岩和泥岩;中新世开始海水加深,此过程持续至上新世,依次沉积滨海—浅海环境的泥岩、砂岩和礁灰岩,浅海—深海相砂岩、泥岩和礁灰岩以及深海相泥岩、细砂岩。珠江口盆地也发育相似的沉积序列,前新生代为黑云母花岗岩及变质岩,古近系神狐组是否存在尚有疑问;文昌组为深灰色砂岩、泥岩互层,夹杂薄煤层,为湖沼相沉积的产物;恩平组为深灰色泥岩夹杂灰色、褐黄色砂岩,属河泛平原相沉积;珠海组下部为棕灰色砂岩夹杂深灰色泥岩,为河流相沉积,上部为灰黄色砂岩和灰色泥岩互层,属海陆过渡相沉积。新近系珠江组为灰色泥岩夹杂砂岩、钙质砂岩,中下部夹杂灰岩,为滨浅海相—三角洲相沉积;韩江组为灰绿色泥岩夹灰色中—细砂岩或粉砂岩,为浅海—三角洲相沉积;粤海组为灰绿色泥岩夹中—细砂岩,万山组为灰绿色—绿灰色泥岩夹中—细砂岩,富含生物碎屑,均为浅海相沉积,第四纪为浅海相泥岩夹砂岩。孢粉分析发现,

西沙群岛西永1井靠近礁体底部地层的以中新世热带植物花粉占主要优势,没有发现任何古近纪的孢粉类型,地层年代为中新世。位于东沙隆起南部大陆坡的ODP184航次1148站(水深3294m,井深850.85m),井底地层为早渐新世(32.8Ma);位于其南侧洋陆过渡带的IODP349航次U1435站(水深3252.5m,井深300m),揭示的最老地层则为始新世海陆过渡相砂岩夹粉砂质泥岩沉积。

位于南海中央海盆-西南次海盆以南的海区,前新生界的钻井资料极少,根据磁场、地震等特征推断基底最老的地层可能是元古宇。钻探方面,菲律宾在我国南沙群岛礼乐滩完成桑帕吉塔1井的钻探工作,井深4125m,钻遇下白垩统滨海、浅海相巨厚的砂岩、砾岩和集块岩,砂质页岩、粉砂岩夹煤层,2160m以上为下渐新统一第四系礁灰岩地层。德国“太阳号”科考船在南沙海域进行海底岩石拖网,在礼乐滩和美济礁以东发现三叠系硅质页岩,棕灰色薄层含植物化石碎片的粉砂岩。另外,泰国湾的多口钻井中发现石炭纪—二叠系和中生界变质岩及沉积岩以及白垩系花岗岩。南海南部新生界目前认识较多,在曾母盆地新生界自下而上为拉让群浅海相—深海相浊积岩,曾母群河流、港湾相沉积,海宁组滨海相沉积,南康组和北康组为浅海、河口及海岸平原沉积。万安盆地在新生界基底之上,直接覆盖渐新统之后的沉积层,其中,渐新统为河流相—湖相沉积,下中新统及以上地层为海相沉积。我国“实验3号”科考船在南沙海域进行海底岩石拖网采样过程中,分别在曾母盆地北缘200m水深处、南威岛西北方的康泰滩1370m水深和永暑礁东北55km海山2000m水深处,获得铁褐色含泥钙质结核生物礁灰岩、溶蚀白垩状灰岩、含磷生屑灰岩以及钙质磷块岩等岩样,样品分别为中始新世晚期—渐新世的半深海环境下的沉积产物。另外,ODP1143站在南沙群岛永暑礁附近水深2772m,获取岩芯472.18m,揭示了中中新世以来的深海沉积。

中央海盆区沉积基底即海洋洋壳,下部为壳幔过渡层和火山岩,总厚度达3~7km。基底之上是正常沉积地层,总厚度达0.5~3km,北部最厚可达3km,南部最厚仅仅为1.2km。其中,中央海盆在洋壳基底之上覆盖了渐新世以来的深海沉积,中央海盆边缘在洋壳基底之上覆盖晚渐新世的浅海碳酸盐岩沉积,西南次海盆则在洋壳基底之上覆盖了中新世以来的海相沉积层。

1.1.2 南海新生代构造演化

朱伟林等(2007)认为南海是非常典型的复合—叠加盆地,自中生代晚期以来,该区域经历了起始时期不同的旋回过程,分别是古南海张裂—萎缩、新南海张裂造洋—末期萎缩两大边缘海旋回阶段。这些演化进程在时间上具有一定的同期性,在空间上具有相邻性,在动力学上具有一定相连性。中生代晚期,南海地区各个地块仍拼合在一起,其中包括华南板块和其他微陆块,如东沙、西沙—中沙、南沙—巴拉望等,以及印支板块和婆罗洲地块(姚伯初等,2004)。由于古太平洋的持续俯冲作用,古南海陆块开始肢解,裂谷带开始沿着夹在华南地块与婆罗洲地块之间的薄弱区域伸展,随后经历陆内裂谷与陆间裂谷等阶段。总体来看,此时期南海地区南部为婆罗洲大陆及其北侧的被动大陆边缘,中部为古南海,北部是泛华南大陆及其南部的被动大陆边缘。南沙陆块位于古南海北侧,内部曾发生区域性裂陷,在白垩纪—始新世沉积海相地层。该时期西沙—中沙一带存在大型古隆起,古隆起与华南大陆之间发育陆缘断陷带,断陷带北侧沿北部湾—珠江口盆地北部坳陷带分布,南侧沿琼东南—珠二坳陷带—台西南盆地分布。位于古南海南部的婆罗洲地区广泛发育古新世—始新世海相地层。钻井及露头资料显示,婆罗洲地块由南至北逐渐变新,南部为白垩纪沉积,中部为古新世沉积,而北部为始新世沉积,沉积环境均为深海相。因此,从两侧盆地发育的地层特征来看,古南海向南俯冲的时间大致在古新世—渐新世。

始新世之后,随着印度板块与欧亚板块相互碰撞的加剧,板块之间深层软流圈物质向东南方向蠕动,并受到太平洋板块的阻挡,形成地幔柱上升流,新南海开始形成(Fukao,1994)。南沙陆块从华南大陆分离并向南漂移,古南海在南沙陆块推挤作用下,洋壳收缩并向婆罗洲之下俯冲消减,如今已消减殆尽。古南海南部陆缘从早期伸展大陆边缘转变为活动大陆边缘,经历俯冲和碰撞两个过程,在婆罗洲北侧形成前陆盆地。婆罗洲持续隆升,在强烈剥蚀搬运作用下在沙巴河、拉让河等下游发育巨型三角洲盆