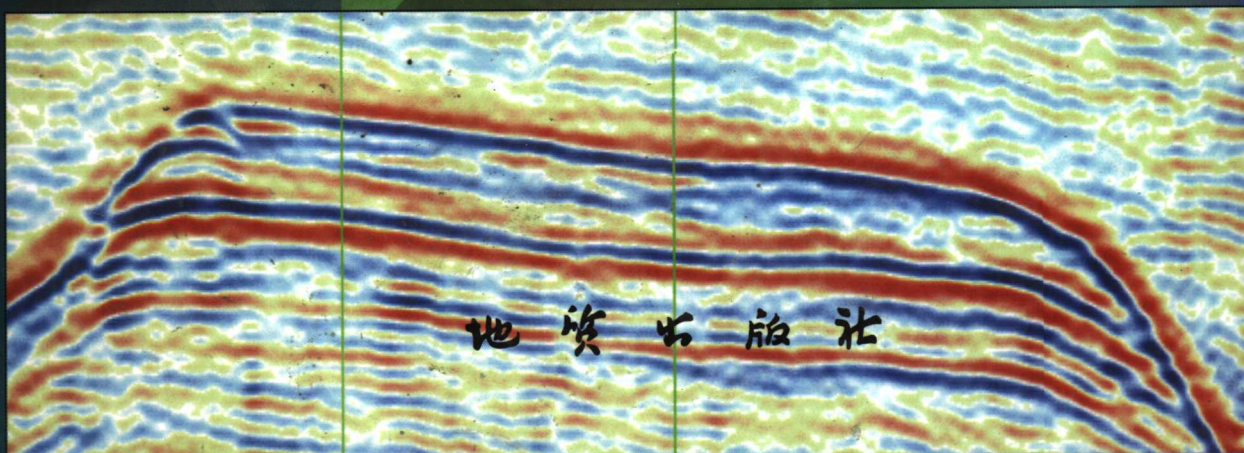
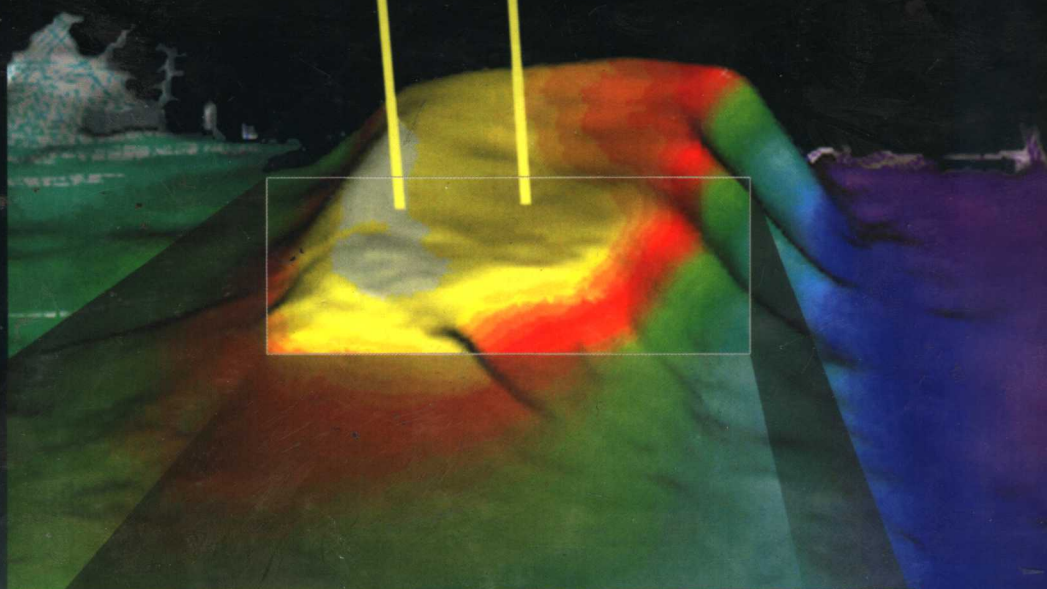
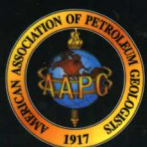


AAPG论文集 81

碳酸盐岩储层 和沉积体系的地震成像

Gregor P. Eberli Jose Luis Masaferro
J. F. "Rick" Sarg 编

蔡希源 李思田 郑和荣 马永生 等 译



地质出版社

碳酸盐岩储层和沉积体系的地震成像

Gregor P. Eberli Jose Luis Masaferro J. F. "Rick" Sarg 编

蔡希源 李思田 郑和荣 马永生 等 译

AAPG 论文集 81

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

Copyright © 2004

By the American Association of Petroleum Geologists

All Rights Reserved

Printed in Canada

ISBN: 0-89181-362-4

AAPG 同意个人使用本书中单篇文章的影印文件。对于额外复印本书中的文章个人或内部使用,需得到 AAPG 的授权许可,并且直接向版权批准中心支付版权使用费,基本收费标准每篇 3.5 美元,每页 0.5 美元。版权批准中心位于马萨诸塞州丹弗斯镇 Rosewood Drive 222 号,01923 (电话: 978/750-8400)。根据具体情况,费用会有所浮动。

AAPG 编辑: John C. Lorenz

地质科学负责: J. B. "Jack" Thomas

图书在版编目(CIP)数据

碳酸盐岩储层和沉积体系的地震成像 / (美) 埃伯利等编; 蔡希源、李思田、郑和荣、马永生等译. —北京: 地质出版社, 2007.11

ISBN 978-7-116-05374-8

I. 碳... II. ①埃...②蔡...③李...④郑...⑤马... III. ①碳酸盐岩—储层—地震勘探—成像 ②碳酸盐岩: 沉积岩—地震勘探—成像
IV. P618.130.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 094149 号

TANSUANYANYAN CHUCENG HE CHENJI TIXI DE DIZHEN CHENGXIANG

责任编辑: 祁向雷 郁秀荣

责任校对: 郑淑艳 田建茹

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

咨询电话: (010)82324508(邮购部); (010)82324577(编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010)82310759

印 刷: 北京地大彩印厂

开 本: 889mm × 1194mm 1/16

印 张: 22

字 数: 696 千字

印 数: 1—1000 册

版 次: 2007 年 11 月北京第 1 版·第 1 次印刷

图 字: 01—2006—3424 号

定 价: 108.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-05374-8

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

Seismic Imaging of Carbonate Reservoirs and Systems

Edited by
Gregor P. Eberli
Jose Luis Masaferro
J. F. "Rick" Sarg

AAPG Memoir 81

Co-Published by
The American Association of Petroleum Geologists
Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
and
Shell International Exploration & Production B.V.
The Netherlands

致 谢

美国石油地质学家协会 (AAPG) 对为《碳酸盐岩储层和沉积体系的地震成像》一书的出版给予大力支持的下列公司表示感谢。

壳牌国际勘探和开发公司

译 者 的 话

当前,从世界范围到我国,由于油气勘探的需求,出现了沉积体系和储层研究的新高潮,其中碳酸盐岩和深水扇沉积体系是最为集中的热点,陆上和海域新发现的大油气田许多与之相关。勘探领域的需求推动了技术上的创新和革命,现今地震探测的分辨能力,特别是高精度三维地震提供的影像已经能够相当准确地揭示沉积体的三维几何形态及其内部结构。然而,新技术手段的使用又必须有基于精细研究所建立的沉积模式为指导。因此在实践中产生了“地震沉积学”的思路与方法,即根据现代沉积和露头大断面进行沉积环境建模,作为地震处理解释的指导,并以高精度地震资料为基础,对沉积体系和储层进行研究,所获得的地震影像又能对地质模式修改和完善。此种地质与地球物理方法联合反馈的方法可以识别沉积体系和储层的几何形态、内部构成并定量地预测储集性。地震沉积学所形成的一整套思路和方法体系已被证明是油气勘探中非常有效的工具,是地震地层学和层序地层学的进一步延伸和发展。AAPG近年来出版了一系列专著对此领域的研究进行了介绍,其中特别是 G. P. Eberli 教授等主编的《碳酸盐岩储层和沉积体系的地震成像》(AAPG M81, 2004)和 G. M. Grammer 教授等主编的《储层模拟中露头和现代沉积类比的综合研究》(AAPG M80, 2004)为其中的典型代表。这些著作通过大量典型实例的研究介绍了地震沉积学的概念、方法技术和实践效果。对我国当前油气勘探,特别是海相领域和隐蔽油气藏领域的勘探和研究具有重要参考价值,并将开辟一个新的技术领域。

为此,在中国石油化工集团公司的组织和支持下,由中国石油化工股份有

限公司石油勘探开发研究院、中国地质大学、中国石油化工股份有限公司勘探南方分公司研究院合作，全文翻译了上述两部著作，中国地质大学有6名教授、副教授及多名博士生，中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院和勘探南方分公司研究院各有多位研究人员参与了翻译和审校工作，朱起煌、白振瑞、马金钰等以及地质出版社进行了出版前的细校。蔡希源、李思田、郑和荣组织、指导了全部编译工作，并分工进行了全文审阅。

由于需要快速完成庞大的翻译工作，以便早日提供给广大读者特别是一线勘探和研究人员参阅，书中可能会有翻译和审校不周之处，敬希批评指正。

最后，感谢原著的各位主编和AAPG出版部门正式支持和同意本书在中国出版为中文版本。

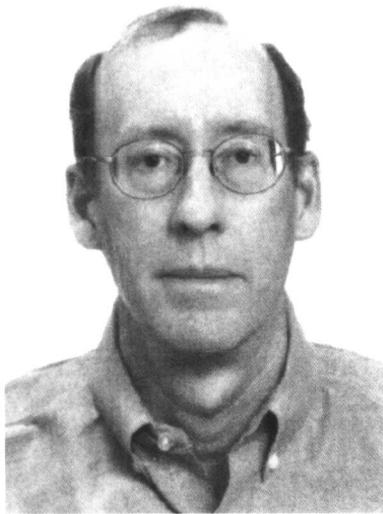
编者简介



Gregor P. Eberli 迈阿密大学海洋地质与地球物理学部教授。1985年获得瑞士苏黎世科技研究所（ETH）硕士和博士学位。1985~1987年就读博士后期间，他开始在迈阿密大学比较沉积学实验室从事地震解释工作。回到苏黎世科技研究所之后，他开始将地震层序地层的概念与自己的研究领域相结合，并且建立了露头的合成地震模型。1991年，他正式进入迈阿密大学工作。他对大巴哈马滩地震地层的分析两次点燃了该处科学钻探的火花；在1990年进行的巴哈马钻探项目和1996年大洋钻探计划166项的钻探中，他均担当了联合首席科学家的职务。在实验室，他曾多次进行了岩石物理学实验。现在，他主要对碳酸盐岩的声波速度谱进行解释，以便更好地理解碳酸盐岩的测井和地震特征。2000年，他在荷兰利兹维克壳牌公司的碳酸盐岩梯队中工作了一年，在此期间他熟悉了最新的地震可视化技术，并且认识到了地震影像在揭示碳酸盐岩体系结构中的强大作用。Gregor P. Eberli现在是迈阿密大学海洋地质与地球物理学部的主席，同时也是比较沉积学实验室的负责人。

Jose Luis Masferro 作为一个地质学家和地震解释者，自1998年以来，一直在荷兰的壳牌技术应用和研究中心（碳酸盐岩开发团队）工作。1997年，他获得了迈阿密大学的博士学位。他论文的主题是研究巴哈马及古巴前陆盆地地区的构造和碳酸盐岩沉积之间的相互作用。在迈阿密大学学习期间，他还是一名富尔布赖特奖学金获得者。1989~1991年，他曾在阿根廷的德士古石油公司担任地质学家的工作。到壳牌公司后，他同时参与了多个不同的项目，涉及领域包括三维地震体的解释、高精度层序地层和压性构造的动力模型等。Masferro的研究兴趣是综合运用三维地震和钻孔资料来解释碳酸盐岩沉积体系，并把它们转化成地下的储层模型。





J.F. “Rick” Sarg 目前是埃克森美孚石油勘探公司的地层学研究员。他分别于1969年和1971年在宾夕法尼亚州匹兹堡大学获得了学士和硕士学位，并于1976年获得了麦迪逊威斯康星大学的博士学位。Sarg从事石油勘探和开采工作26年，在科研、生产、监督、运营操作方面都有很丰富的经验；1976年他就职于美孚公司，1976~1990年效力于埃克森公司，1990~1992年担任个人顾问，1992~1999年在美孚科技公司担任研究员，2000年至今一直在埃克森美孚石油勘探公司工作。他是埃克森公司勘探研究小组中研究层序地层学的成员之一，并重点强调了碳酸盐岩层序的概念。他参加了大量的项目，这使他在综合地震、钻井、测井及露头资料和进行碳酸盐岩层序研究方面积累了广泛而全面的经验。到目前为止，Sarg本人或与他人合作，已撰写了28篇有关碳酸盐岩沉积学和地层学方面的论文。

目次

致 谢	V
译者的话	VII
编者简介	IX

前 言

碳酸盐岩储层与沉积体系的地震成像技术进展	1
<i>Gregor P. Eberli, Jose Luis Masferro, and J. F. "Rick" Sarg</i>	

第 1 章

碳酸盐岩储层与构造的三维地震体可视化成像	11
<i>Jose Luis Masferro, Ruth Bourne, and Jean Claude Jauffred</i>	

第 2 章

三维地震属性分析有助于储层开发的精细控制：以 Williston 盆地中的红河组研究为例	39
<i>R. A. Pearson and B.S.Hart</i>	

第 3 章

美国新墨西哥州 Vacuum 油田二叠系 San Andres 组陆架边缘储层的层序地层、 岩石物理相及多分量地震分析	53
<i>Matthew J. Pranter, Neil F. Hurley, and Thomas L. Davis</i>	

第 4 章

新墨西哥州 South Dagger Draw 油田碳酸盐岩缓坡油藏储层特征综合研究： 地震资料仅是过程的一部分	81
<i>Scott W. Tinker, Donald H.Caldwell, Denise M. Cox, Laura C. Zahm, and Lisë Brinton</i>	

第 5 章

美国西得克萨斯赖纳克油田晚古生代礁式建隆的三维地震成像和储层模拟	95
<i>Arthur H. Saller, Skip Walden, Steve Robertson, Robert Nims, Joe Schwab, Hiroshi Hagiwara, and Shigeharu Mizohata</i>	

第 6 章

阿拉伯联合酋长国阿布扎比海岸巨型碳酸盐岩油田的三维地震分析	111
<i>Peter Melville, Omar Al Jeelani, Saeed Al Menhali, and Jürgen Grötsch</i>	

第7章

- 高分辨率三维地震数据体在流花 11-1 油田储层综合研究中的应用 137
Christoph Heubeck, Kenneth Story, Pat Peng, Claire Sullivan, and Stuart Duff

第8章

- 菲律宾 Malampaya 油田渐新统一中新统碳酸盐建隆定量地震储层描述 155
*Dietmar Neuhaus, Jean Borgomano, Jean-Claude Jauffred,
Christophe Mercadier, Sam Olotu, and Jürgen Grötsch*

第9章

- 台地碳酸盐岩地层形态和格架：阿曼的白垩纪地层 169
Henk Droste, and Mia Van Steenwinkel

第10章

- 向盆地过渡的碳酸盐岩台地的地震资料和露头：
大巴哈马滩和意大利马耶拉台地边缘 189
*Gregor P. Eberli, Flavio S. Anselmetti, Christian Betzler,
Jan-Henk Van Konijnenburg, and Daniel Bernoulli*

第11章

- 阿曼南部沙拉拉盆地第三系珊瑚礁、碳酸盐岩台地及其周围沉积物的露头 and 地震响应 229
Jean R. F. Borgomano and Jeroen M. Peters

第12章

- 印度洋马尔代夫中中新统进积碳酸盐岩滩边缘的地震响应 243
Andrei V. Belopolsky and André W. Droxler

第13章

- 一个新近纪受海平面变化和洋流改造的碳酸盐岩台地、斜坡及陆棚体系——
Marion 台地（澳大利亚东北部） 265
Alexandra R. Isern, Flavio S. Anselmetti, and Peter Blum

第 14 章

印度尼西亚东纳土纳海中新统一上新统瑟吉蒂加台地的地震地层演化：

孤立碳酸盐岩台地的起源、生长和消亡 281

Steven L. Bachtel, Randal D. Kissling, Dwi Martono,

Setya P. Rahardjanto, Paul A. Dunn, and Bruce A. MacDonald

第 15 章

沙捞越海域琼台礁地区中新统碳酸盐岩台地的发育结构、断裂作用和岩溶化 299

Volker C. Vahrenkamp, Frank David, Peter Duijndam, Mark Newall, and Paul Crevello

第 16 章

沙捞越海域中新世碳酸盐岩台地边界的地震响应 321

Guido L. Bracco Gartner, Wolfgang Schlager, and Erwin W. Adams

碳酸盐岩储层与沉积体系的地震成像技术进展

Gregor P. Eberli

University of Miami, Miami, Florida, U. S. A.

Jose Luis Masafarro

Shell E & P Technology Applications and Research (SEPTAR), Rijswijk, The Netherlands

J. F. “Rick” Sarg

ExxonMobil Exploration Co., Houston, Texas

近年来,随着地震资料采集、处理和可视化等技术的进步,碳酸盐岩储层结构的成像技术达到了前所未有的分辨率。尤其是三维地震资料采集力度的增加和处理技术的进步,促进了这些新技术的发展和对沉积体高精度成像技术的产生。另外,发展中的地震属性分析方法是定量研究沉积体的岩性、体积的一个有力工具(Masafarro等,2004)。沉积体可视化研究的进展,已经可以对古老碳酸盐岩体系的地貌形态进行成像,其清晰度可与卫星对现代环境的成像相媲美(图1)。地震资料的另一个优势是可以对不同等级的沉积地层单元进行成像,以阐明沉积环境随时间的演化。由于一些古老的造礁生物多已灭绝,因此很难在现代环境中找到这些古老碳酸盐岩体系的相似体。现代地震对这些体系古地貌精确成像技术的出现,为分析不同环境下各种礁体的生长模式,研究古老碳酸盐岩储层的不均一性,提供了前所未有的手段。另外,发展中的地震属性分析技术还可实现对沉积体体积、岩性的定量研究。对于以往仅局限于研究二维剖面或现代沉积环境平面展布的地质学家来说,地层格架形成过程的信息对其是极有价值的。这种依据现代沉积、地震数据和古老露头等资料综合研究,对沉积过程进行解释的方法,被命名为地震沉积学(Schlager,2000)。

本卷收录的16篇论文从不同角度阐述了如何将地质和地球物理资料相结合,作为分析碳酸盐岩沉积体系的结构、研究碳酸盐岩沉积体系的不均一性等的有力工具。它们是地震沉积学的实际应用,同时也提供了

对碳酸盐岩沉积体系在勘探级别和储层级别上进行动力学研究的实例。其中,还有几个章节展示了地震沉积学直接应用于三维精细储层建模方面的例子。

加强地震数据的应用

沉积体的几何形状,是地震数据经初步处理后,所能直接提供的最重要的信息。对各种类型的地震反射、反射终止,以及它们的相互关系进行分析,是地震地层学和层序地层学相模式研究中的基本概念。其应用初期使得大规模勘探的预测能力得到了提高,并已普遍应用于油藏描述中(Vail等,1977;Sarg,1988;Stoudt and Harris,1995;Kerans and Tinker,1997;Homewood等,2000)。现在利用三维地震资料揭示出的地下沉积体的几何特征,是以以前的二维地震数据很难做到的(Weimer and Davis,1996)。因此,基于岩心和测井资料推断的具有水平层状结构的地下地层,在高质量的地震资料采集以后,还需要进行重新解释。例如,Droste和Van Steenwinkel(2004)的研究发现,阿曼白垩系的碳酸盐岩台地具有很复杂的内部结构,并不是简单的“夹层蛋糕”分布模式。尤其是位于阿曼中心的阿拉伯台地边缘(The Habshan Formation)是由一系列斜坡沉积组成,其侧向接触关系受控于海平面的相对变化。他们进一步研究发现,位于陆架内部的Natih组碳酸盐岩地层由一系列独立的台地组成,这些

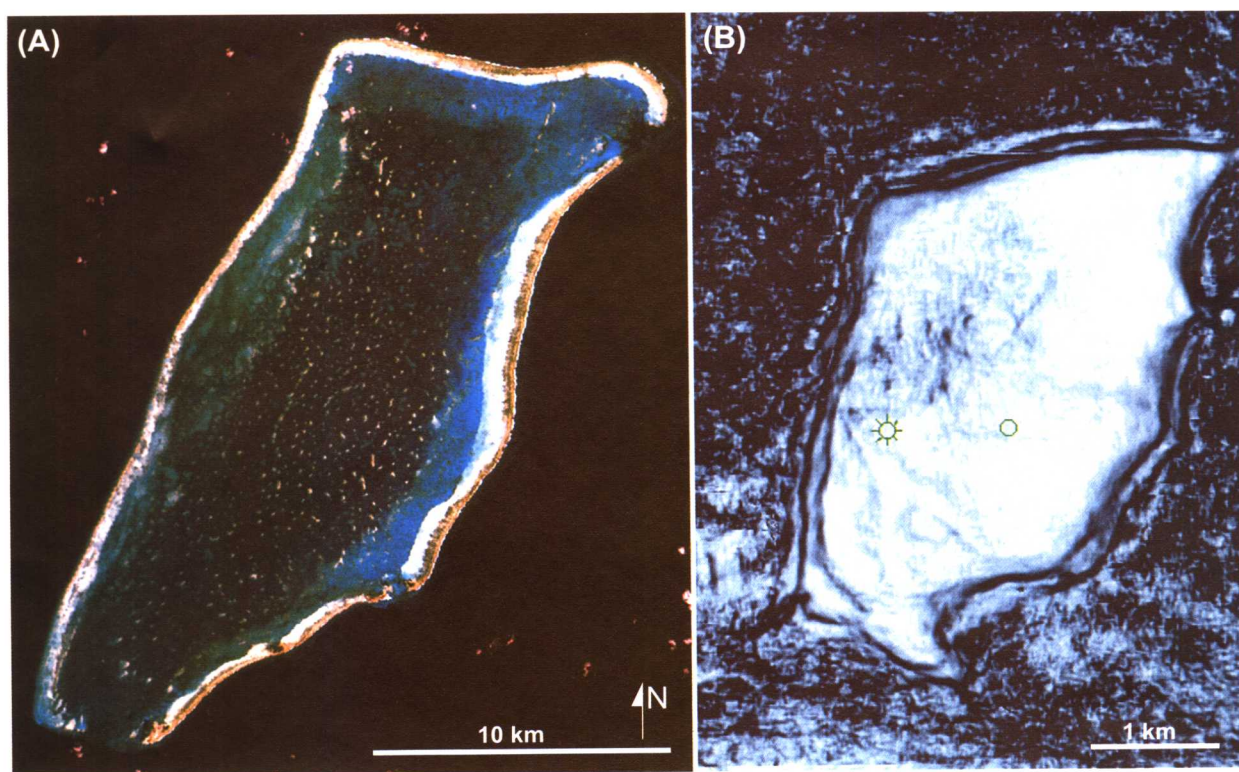


图1 地震切片和卫星影像的比较。(A) Belize近海Glovers礁体的卫星影像，清晰地显示出了礁缘、白色的礁后碳酸盐岩砂，以及含有大量点礁的潟湖（图片由 Gene Rankey 提供）。(B) 位于 Luconian 的一个中新世中期碳酸盐建隆的三维地震相似体 (semblance volume)，与卫星影像相比，两者对礁相的反映相似程度较高，对礁后沉积的相似程度中等，对潟湖相的相似程度较低。注：地震成像还记录到了礁缘的不连续性。另外，还显示出礁相分三期发育，记录了礁体边缘随时间逐期向后推进（图片来自 Masaferrro 等，2003）。

台地又通过之间的侧向增生连接起来。Melville 等 (2004) 通过对 Bab (Aptian 阶) 和 Asab (晚侏罗) 两个层位的研究，指出即使在钻井密度很高的情况下，通过三维地震对沉积体几何形态和沉积模式的研究，依然可提供更为重要的古地理信息。Masaferrro 等 (2004) 对阿曼二叠系 Khuff 组和白垩系 Natih 组油藏进行了研究，通过对地震体倾角和方位的计算，识别出了以前未被注意到的微细地层特征；如低角度的进积单元和浅滩型的堤坝地震相。

在综合钻井、测井和 3D 地震的波阻抗资料 (3D acoustic impedance cubes) 建立可靠的储层模型的过程中，沉积体系的几何形状对于刻画相分布和层序的内部结构是至关重要的参数。例如，Tinker 等 (2004) 的研究把根据钻井、露头得出的相模式和由地震资料得出的几何外形相结合，用来确定层序格架中主要储层发育的位置。类似地，对于得克萨斯西部上晚古生代马蹄形环礁上的碳酸盐建隆，三维地震精细地展示了其地貌特征，这在仅依靠钻井控制的情况下则是不可能

实现的 (Saller 等，2004)。三维地震不但显示了该建隆层序的层状结构，而且还显示了这些层状地层单元孔渗性的连续特征。在被断层错断的储层中，综合分析地震相、地震属性以及反射终止类型通常是区分构造和地层特征的关键 (Masaferrro 等，2004)。

岩溶特征

碳酸盐岩台地在经历重复暴露以及与成岩作用有关的变化后，对孔隙度的演化、储层质量都会产生很大的影响 (Budd 等，1995；Neuhaus 等，2004；Vahrenkamp 等，2004)。热带地的喀斯特地区常形成一系列显著的正地貌特征，如岩溶孤峰、岩溶锥、多边形体及塔礁等。虽然这些特征能达到 300m 显著的地形起伏，但在地震剖面上还是很难观察到的 (Purdy and Waltham, 1999)。此外，大规模岩溶作用形成的负地貌特征，如落水洞、溶洞及岩溶塌陷等在碳酸盐岩环境中也很常见。这些地貌的不规则外形和它们的

无规律分布在地震上常显示为杂乱反射,这使得对它们进行精确成像变得相当困难,尤其在依靠二维地震资料的情况下更是如此。在二维地震资料上,地表暴露以及负地形的喀斯特特征通常是通过与之相关的不整合、侵蚀削截或杂乱地震相进行推断得出的(Sarg, 1988; Handford and Loucks, 1993; Moldovanyi 等, 1995)。上凹的落水洞反射或不规则的乱岗状反射结构则是负喀斯特地形特征的直接反映(Moldovanyi 等, 1995; Macurda, 1997)。三维地震,尤其是可视化技术的应用则在很大程度上克服了地震信号在喀斯特化地带反射不理想的问题。

在本论文集的若干实例中,通过高精度的三维地震,不仅识别出了喀斯特特征,而且还展示了它们在平面上的展布。例如, Isern 等(2004)的研究描述了 Northern Marion 台地的正喀斯特地形特征。位于亚洲东南部的中新世—上新世碳酸盐岩台地体系在中新世经历了多期喀斯特化,具有丰富的喀斯特特征。位于沙捞越近海的 Jintan 台地上,喀斯特化叠加在若干个沉积旋回之上(Vahrenkamp 等, 2004)。岩溶作用的表现形式多样,或为普遍分布的大溶洞,或是局部分布的树枝

状,还有的呈水道状分布(图 2A; Vahrenkamp 等, 2004)。Heubeck 等(2004)对珠江口盆地的研究,发现了广泛分布的与地震分辨率相当或更低的初始塌落和众多大型的落水洞,从而推测出存在一个经过多期重复暴露的中新世河岸。

低海平面时期,迁回流向陆架坡折的河流会对其流经的碳酸盐岩斜坡和陆棚产生下切作用(Esker 等, 1998)。Droste 和 Van Steenwinkel (2004)展示的一个 Natih 组顶部的时间切片,提供了一个浅平暴露台地上此类下切河道的例子(图 2B),识别出了一个多期的高度迂回的河道,其对下伏碳酸盐岩的下切作用在某些地方深达 150 余米,宽几百米;其摆动方式非常类似于曲流河道。

构造、断层和裂隙

精确地再现断层、构造在三维空间的分布是地下地质研究的一个主要挑战。准确地确定构造的运动学和几何学特征是至关重要的,这是估算储层体积的前提,同时也是预测裂隙的排列、分布及密度的基础。

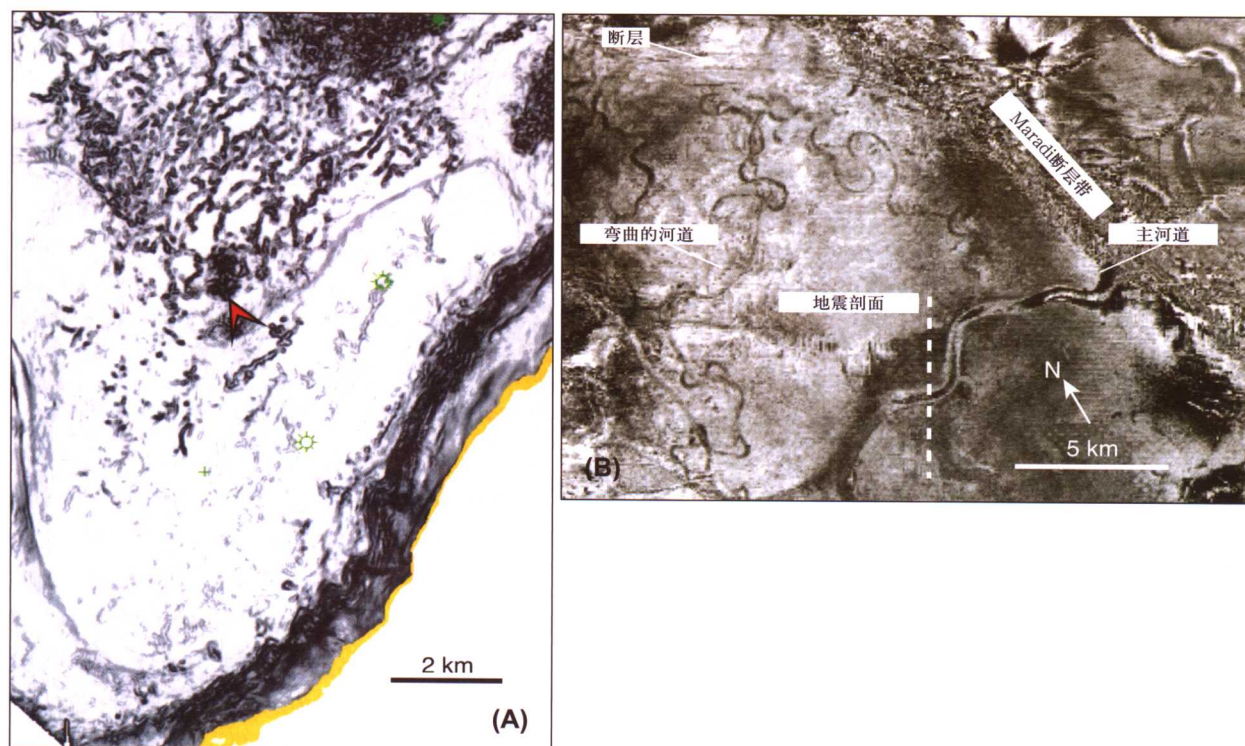


图 2 地震资料显示的喀斯特特征。(A) Jintan 台地 Z2 的喀斯特化,显示了其树枝状及有些地方似河网状的特征。箭头所示的黑色区被解释为断层交叉形成的塌落(据 Vahrenkamp 等, 2004)。(B) 阿曼北部 Natih 组顶部 44ms 处的振幅切片,显示了河道复杂的展布情况(据 Droste 和 Van Steenwinkel, 2004)。

因为这些低于地震分辨率的裂隙都是在特定的构造格架中形成的。三维地震之所以成为完成这一任务的首选工具,是因为解释人员可以在地震体中对断层和褶皱进行追踪。Melville等(2004)在阿布扎比一个近海油田的研究是该项工作的一个实例,在经过仔细处理提高地震资料质量的基础上,他们得到了背斜及相关断层的精确影像。Masferro等(2004)的研究还指出,现代的滤波技术应该在三维地震构造分析方面发挥更充分的作用。通过三维地震体及相似体计,可对地质体的倾角和方位角数据进行计算,从而可更明确地显示出各地震反射终止的类型和特征,这就是可视化技术。

断层和相关的裂缝都可以作为流体运移的通道,这在碳酸盐岩中是尤为重要的,同时,岩石与流体发生的交代作用又会影响到岩石的孔隙度、矿物学特征以及储层的质量。Vahrenkamp等(2004)的研究是一个很好的例子,岩溶作用在断层交叉的地方集中发育(图2A)。同样,断层作为热液上升的通道,围岩也明显与侵入的热液发生交代。本论文集中有两篇文章专门研究了沿断层运移的流体及其与围岩的相互作用,以及这种作用对储层质量和储层非均质性的影响。Pearson和Hart(2004)通过地震属性分析对Williston盆地红河组(Red River Formation)地层的孔隙度分布进行了预测。他们发现沿断层和挠曲(flexures)有孔隙度增大的现象,并将其归因于裂缝的发育;这些裂缝在局部也是白云石化流体(dolomitizing fluids)的优势通道。在新墨西哥的South Dagger Draw油田,原生油气藏发育在多孔的、藻类成因的生物层和生物礁上。孔洞由酸溶形成,热液沿解理向上运移,在受到页岩阻挡时,可形成局部溶解带(Tinker等,2004)。虽然裂隙低于地震的分辨能力,但由裂隙造成的孔隙特征还是可能借助地震数据进行识别的。Pranter等(2004)利用三维多分量地震技术和电缆测井技术描述了裂缝和基岩的孔隙度的特征。他们通过横波的各向异性推断了裂隙的密度和方位,进而校正了开放性裂缝区域的渗透率模型。

古代造礁生物的形态

珊瑚虫是新近纪、更新世及全新世生物礁最主要的造礁生物。现代的珊瑚礁是研究水深、水流方向、风向等因素与相带内生成物展布关系的唯一场所。因此,古代礁体的各种模型都大多依赖于对现代珊瑚礁的观

察。然而,随着时间的迁移,形成礁体的生物群落以及它们与碳酸盐岩环境的相互关系都已发生了变化(James, 1983),很多主要建隆礁体的生物现今都已绝灭。在采用三维地震成像技术之前,礁体的内部结构和侧向分布都只是局限于二维露头的推断。现代的三维地震已能够提供这些古代礁体的影像,这为我们精确刻画古老碳酸盐岩的相模式提供了条件。例如,藻类形成的生物层和生物礁是组成上石炭统地层的主要成分,通常呈10~20m厚的薄层状展布,表面常具有低平的瘤状突起;这与现代的生物礁有很大的不同(Eberli等, 2000; Saller等, 2004; Tinker等, 2004)。

沉积体几何特征的控制因素

台地的生长主要受构造运动、海平面变化、沉积作用及气候过程的联合控制。构造沉降和全球海平面变化共同决定了相对海平面的变化,同时也控制着可容空间的变化。海洋和气候条件则决定着沉积物的数量和类型,其中光线、温度及营养状况是最主要的因素(Schlager, 1992)。热带和亚热带的碳酸盐岩主要由透光带(0~15m)中有机体分泌的碳酸盐生成,透光带中合适的温度和光照条件是生成碳酸盐岩的最有利环境,该带碳酸盐岩的产率最高,往下随水深增加呈指数递减(Boscher and Schlager, 1992, 1993)。透光带一系列的碳酸盐岩斜坡、陆架及台地等都是大面积浅水区域的主要沉积产物(Read, 1985)。通常情况下,碳酸盐岩的沉积产率是相当高的,但台地或陆架的大部分可容空间都不可能完全填满,沉积总达不到平均海平面的高度。这主要是由于波浪、风暴、潮汐等水动力条件会使位于顶部的沉积物悬浮起来,并同时将一部分沉积物带入或带出浅水区域(Osleger, 1991)。水动力将过剩的沉积物带到邻近的斜坡,导致了陆架和台地的向海进积(Wilson, 1975; Hine and Neumann, 1977; Bosellini, 1984; Sarg, 1988; Eberli and Ginsburg, 1989; Wilson and Roberts, 1995)。

不同周期的海平面变化是控制碳酸盐岩沉积的主要因素(Kendall and Schlager, 1981; Sarg, 1988; Handford and Loucks, 1993)。短周期海平面变化的记录常保存于台地顶部和盆地区域的沉积旋回中(Droxler等, 1983; Goldhammer等, 1987; Read, 1995; Kerans and Tinker, 1997; Williams等, 2002)。而长周期的海平面变化常通过露头或地震上识别出的沉积层序反映出来(Sarg, 1988; Handford and Loucks, 1993;

Eberli 等, 2001)。通常高海平面时期, 由于陆架(棚)的淹没面积及台地的伸展范围都是最大的, 此时碳酸盐岩的产率是最高的。该时期, 在垂向上表现为台地和陆棚的加积并伴有浅滩化趋势; 同时, 最大程度的进积也常出现在这一时期。低海平面时期, 局部台地暴露, 部分地层遭受剥蚀, 暴露区域常发生与大气有关的成岩作用 (Meteoritic diagenesis)。另外, 根据陆架坡度的不同, 海平面下降会不同程度地造成沉积物生成量和覆盖面积的减小。在海平面低位期, 斜坡上沉积物减少, 促进了早期成岩作用和斜坡上部坚硬稳定基底的形成 (Grammer 等, 1993; Malone 等, 2001)。此外, 这一时期发生的各种地质作用通常会破坏台地边缘和斜坡的进一步发育。再有, 由于碳酸盐岩生成带的向下迁移, 在先前的陆坡上会生成低位的海底阶地和台地。例如, 沿 Northern Marion 台地发育的低位阶地, 就是在晚中新世中期低海平面时期形成的。该阶地可被用来计算晚中新世中期海平面的下降幅度 (约 $86\text{m} \pm 30\text{m}$) (Isern 等, 2002, 2004)。相反地, 在海平面上升期间, 根据碳酸盐岩产生和可容空间增长的相对速率, 常形成相带的退积或加积现象。

大规模的碳酸盐岩台地和陆棚的地层格架是在相对海平面升降和碳酸盐岩生长速率的联合控制下形成的 (图 3; Tucker and Wright, 1990)。其中相对海平面升降又是全球海平面变化和构造沉降的综合结果。台地的生长速率则取决于碳酸盐岩的产率和所产生沉积物的分布。同时, 台地在垂向上的生长速率也和相对海平面的升高有关。短期内碳酸盐岩的产率可以很高, 甚至赶上或超过冰川性海平面上升的速度, 但整个台地的沉积和生长速率总体上会随时间演化越来越慢 (Schlager, 1981, 1999)。如 Schlager (1999) 的研究发现, 初期 $10^4\text{mm}/\text{年}$ 的增长率可以持续约 1000 年; 但 10^7 年之后, 平均生长率降至 $10^3\text{mm}/\text{年}$ (Schlager, 1999)。

生长速率的降低或相对海平面的快速大幅上升都会导致台地的后退以及最终消亡 (drown) (图 3)。这两种引起台地消亡的因素通过地震或岩心数据是很难区分的。在本文集中, 众多学者分别对不同的台地做了研究, 并提出了各种不同的成因解释。其中, Bachtel 等 (2004), Borgomano and Peters (2004) 的研究都有力的说明; 区域沉降速率增大以及局部断层发育的共同作用, 造成了 Segitiga 台地后退和 Salalah 碳酸盐岩边滩 (carbonate margin) 的最终消亡。同时研究还发现, 主台地消亡期间, 在更靠近边缘的位置上发育了两个更

小的台地, 这同时也说明在其消亡期间, 海洋环境一直保持了适合碳酸盐岩生长的有利条件 (Bachtel 等, 2004)。另外还有两项研究都对 Luconia 省沙捞越近海中新世中期巨型台地的消亡原因进行了阐述 (Vahrenkamp 等, 2004)。其一认为构造沉降和全球海平面的升高是台地消亡的原因, 而另一项研究则将其归因于长期暴露。相反地, Bracco Gartner 等 (2004) 将该台地的消亡归因于碳酸盐岩产率的降低。另外, Saller 等 (2004) 对 Reinecke Reef, Vahrenkamp 等 (2004) 对 Mega Platform, Neuhaus 等 (2004) 对 Malampaya buildup 的研究都发现台地消亡之前经历了暴露, 并观察到浅水碳酸盐岩与消亡后其上形成的深水沉积之间存在着长时间的沉积间断。也就是说, 暴露的台地再次沉降至透光带时, 碳酸盐岩并未重新开始生长, 同时又由于水流对其表面“深海沉积物”的不断冲刷, 即形成了最终所观察到的间断。澳大利亚近海的 Southern Marion 台地, 暴露带之上被一硬基底和一个不连续的深海沉积薄层所覆盖, 这里的潮流冲刷作用至今仍在发生 (Isern 等, 2002, 2004)。

大多数的碳酸盐岩环境都会生成过剩的沉积物, 其中未能在台地顶部堆积下来的一部分被搬运到台地之外 (offbank) 沉积。这部分岸外沉积的数量决定着台地或陆棚侧向生长的潜力。风向是一个重要因素, 在很大程度上影响着搬运到盆地区域的沉积物数量 (Hine and Neumann, 1977)。台地在单向信风的影响下, 会沿背风的方向伸展, 而迎风的一面岸外搬运量很小, 多以垂直的加积方式生长 (Eberli and Ginsburg, 1989)。而在 Maldives, 中新世台地边缘的进积是双向的, 这主要是由于该时期印度洋季风已经形成, 影响台地生长的风向季节性转换的结果 (Purdy and Bertram, 1993; Aubert and Droxler, 1996; Belopolsky and Droxler, 2004)。因此, 一个台地在不同方向上的侧向生长潜力有很大的变化, 台地的不对称生长现象是很常见的。类似的, 洋流的作用亦可造成一个台地的不对称生长。以 Southern Marion 台地为例, 向南的洋流重复作用于岸外的沉积物, 从而造成台地生长向下降流 (down-current) 的方向延伸 (Isern 等, 2004)。事实上, 一个台地的生长过程中, 风和洋流的作用方式以及台地的延伸方向都是不断变化的, 这通常使台地的结构变得相当复杂。位于印度尼西亚 East Natuna Sea 的 Segitiga 台地, 在晚中新世时进积方向发生倒转, 由原来的向北生长变为向南增长; 而到了上新世, 在其消亡阶段, 生长方向又发生了变化。Bachtel 等 (2004) 在其文章中