

深水油气勘探开发·丛书

SHENSHUIYOUQIKANTANKAIFA CONGSHU

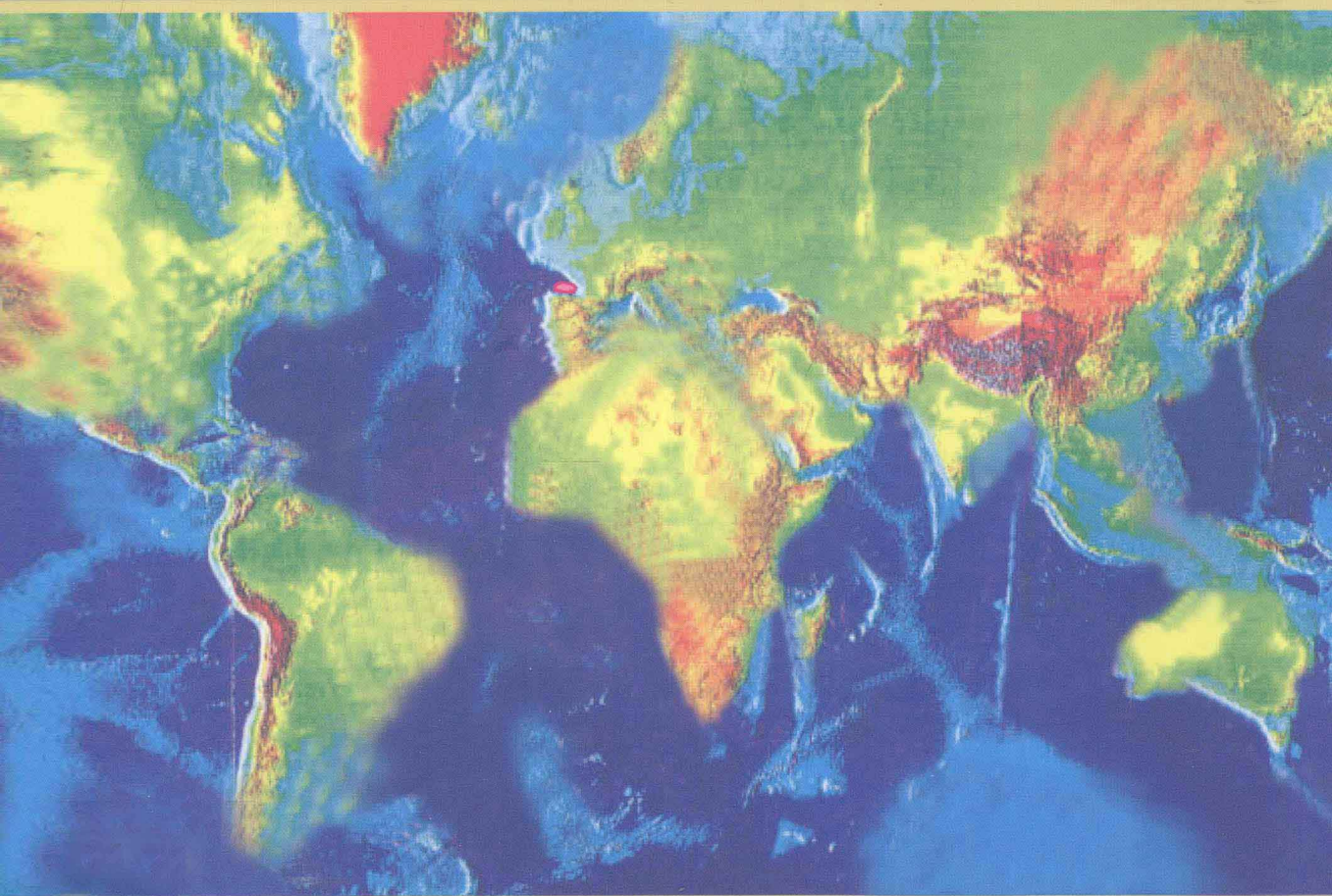


中国石油勘探开发研究院出版物

深水油气地质导论

Paul Weimer Roger M. Slatt 著

姚根顺 吕福亮 范国章 吴时国 等译



石油工业出版社

深水油气地质导论

Paul Weimer Roger M. Slatt 著

姚根顺 吕福亮 范国章 吴时国 等译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书论述了深水油气勘探的基本地质知识,包括深水沉积的性质、沉积背景、沉积过程及发育机理,并介绍了深水储层圈闭特征及含油气系统等,对我国深水油气勘探有重要的指导意义。

本书可供从事油气勘探、开发的地质人员、工程人员及石油院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

深水油气地质导论/(美)韦默(Weimer,P.)著;姚根顺等译.

北京:石油工业出版社,2012.4

书名原文:Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Settings

ISBN 978-7-5021-8417-9

I. 深…

II. ①韦…②姚…

III. 海上油气田-石油地质学

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 078871 号

版权登记号:图字 01-2010-6957

Copyright©2007, American Association of Petroleum Geologists(AAPG)

本书经 AAPG 授权翻译出版,中文版权归石油工业出版社所有,侵权必究。

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www.petropub.com.cn

编辑部:(010)64523544

发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2012 年 4 月第 1 版 2012 年 4 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:41

字数:994 千字

定价:290.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

中文版序

20 世纪 90 年代以来,随着石油资源需求日益增加和石油技术快速发展,全球深水油气勘探开发业务蓬勃发展,深水油气储量和产量增长显著,与此相得益彰的是对深水沉积和深水油气地质的研究引起高度重视。进入 21 世纪以来,深水油气勘探开发投资已成为石油工业上游年度预算的重要组成部分。专家预测,未来全球油气总储量增量的 44% 将来自深水区。可见深水油气是全球油气勘探开发的重要发展方向,具有广阔的发展前景。

“深水”一词在石油工业界有两种不同含义。一种是工程意义上的深水,通常是指现代水深大于 500 ~ 3000m 海域,这个水深作业是常规钻井船所不能实现的。另一种是指沉积于深水中的沉积物,也就是那些在重力流作用下,沉积于风暴浪基面以下的陆坡中上部到盆地底部某处的沉积物。

深水沉积体系是现代沉积中不易触及、难于观测和研究的沉积体系类型。因此,尽管深水沉积体系的研究已有数十年时间,但相对于其他更易观测和记录的沉积体系而言,人们对深水沉积体系的研究和理解要落后许多。特别是在我国长期的陆相含油气盆地勘探过程中,很少涉及真正意义上的深水沉积,由于缺乏深水油气田实例,深水沉积或者浊流沉积的概念虽然传入我国已有 20 余年时间,但国内鲜有深入研究者,深水沉积和深水油气的研究与国际上的差距是十分明显的。

应该指出,从全球范围看,深水油气勘探和生产活动目前主要集中在美国墨西哥湾和南大西洋深水区域,世界上其他许多深水沉积盆地(包括我国的南海深水区)的勘探尚处于未成熟勘探阶段。我国的深水油气勘探尚处于起步阶段,深水沉积和深水油气地质研究理论、方法和技术等方面与国外均存在较大的差距。

为加强海洋深水油气地质学科建设,中国石油勘探开发研究院组织有关专家翻译了美国石油地质家协会编辑出版的《深水油气地质导论》一书,较详细地介绍了国外在深水沉积体系,深水沉积层序地层,深水沉积重力流作用,深水沉积储层结构单元,深水储层特性,油藏模拟,深水沉积圈闭类型和油气系统等方面的最新研究进展,同时介绍了深水油气地质的分析研究方法,特别是用较多的笔墨对深水沉积有利储集单元作了详尽的描述,为我们提供了内容广泛的深水背景下的石油地质知识。

相信本书中文版的发行,必将对我国深水沉积研究、海洋油气勘探和日益国际化背景下的深水油气勘探起到积极的促进作用。

中国科学院院士
2011 年 10 月



译者前言

我国能源十分短缺，每年需进口石油 2 亿多吨，并呈逐年上升趋势。石油资源是一种战略资源，直接关系到我国经济的持续发展和国家安全，因此，寻找我国油气资源的后备战场是国家当务之急。陆地上，油气剩余可采资源越来越少，而占地球面积约 70% 的海洋蕴藏着丰富的油气。据国际能源组织发布的资料显示，世界油气资源新探明储量的绝大部分来自海洋，特别是深水区发现的油气资源储量正在快速增长，深水油气勘探已成为各国政府、石油公司以及国际学术界关注的焦点。随着深水油气勘探成功率率的增加，全球各大石油公司制定了研究深水油气勘探理论和技术的发展规划，争相挑战深水油气勘探的极限。因此，加强对深水油气地质学的研究，是我国经济发展的战略需求。

我国各大石油公司、国土资源部和中国科学院等部门正在积极投身于深水油气的研究与勘探开发工作中。2006 年，Husky 和中国海洋石油总公司在南海深水区发现了 LW3 - 1 大型油气田，自此拉开了我国深水油气勘探的序幕。然而，深水油气资源的含油气系统和储层评价都面临着与陆地和浅海地区不同的科学技术问题，特别是深水环境下盆地储层系统及其演化面临着更多的科学难题。为了更好地规避世界能源紧缺和原油价格高涨对国家经济建设造成的风险，迫切需要开展与深水油气储层相关的理论、方法和勘探实例的研究。

在中国石油勘探开发研究院组织下，由中国石油杭州地质研究院和中国科学院海洋研究所翻译的《深水油气地质导论》，正好满足了目前深水油气勘探开发的迫切需要，可以及时指导我国深水油气的勘探与开发工作。中国石油杭州地质研究院的姚根顺、吕福亮、范国章、徐志诚、邵大力、鲁慧丽、王彬、张勇刚、杨涛涛、孙辉、许小勇、马宏霞、王红平、王霞、鲁银涛等同志分别翻译了有关章节，中国科学院海洋研究所吴时国研究员及吕彩丽、赵学燕、秦志亮、孙启良、张广旭等博士研究生参与了翻译整理工作。姚根顺、吕福亮、吴时国对本书作了统一校对整理。

最后，我们要感谢本书的作者，他们把我们带到一个令人欢欣激动的深度——深水，给我们展现了深水油气的巨大远景和挑战。感谢 AAPG 允许出版中文译本。感谢我国从事深水研究的同行们，文中很多术语的最终厘定与同他们的讨论和他们的真知灼见是分不开的。特别感谢中国石油勘探开发研究院顾家裕教授，中国石油大学(北京)朱筱敏教授、王英民教授，中国地质大学(北京)林畅松教授对全书专业术语进行的审校。

英文版前言

过去 25 年来,全球深水油气勘探开发储量有了很大的增长。现在,已投产深水油气田中业已积累相当数量的资料,这些资料将有助于这些深水油气藏未来的开发,特别是在石油工业进入超深水领域时。

本书旨在为广地质工作者提供内容广泛的有关深水沉积的石油地质学知识,书中还涉及地质工作者日常研究中遇到的重点问题。由于有关深水沉积的出版物不断增加,我们认为本书仅体现了 70% ~ 75% 的信息量。本书所有章节都参考了大量的重要文献,书尾列出了所有重要参考文献目录。本书主要涉及与深水油气地质应用相关的内容,一些纯理论或学术性的问题并未涉及。由于所有权或专利的原因,许多涉及当前技术工艺的问题没有展开讨论。

本书有一个特别之处,即本书前 10 章中有几章是 2004 年 SEG/EAGE 著名培训教材的一部分。SEG/EAGE 与 AAPG 达成协议,同意 AAPG 在增加 7 个章节的基础上以该书第二版的形式出版。我们感谢 SEG/EAGE 和 AAPG 科学家对出版本书所做的合作。

本书的完成体现了许多杰出学者和组织机构的努力、贡献和合作。特别感谢所有允许我们使用其图件的组织机构、专业协会、出版商和个人。

这些组织机构、专业协会、出版商有美国石油地质学家协会(AAPG),美国地球物理联合会(AGU),Chapman 和 Hall 公司,欧洲地质和工程学会(EAGE),勘探顾问有限公司(ECL),Elsevier,海湾地质学会(GCAGS),伦敦地质学会(Geologic Society of London),GeoMark,休斯敦地质学会(HGS),IES,印度尼西亚地质学会(IGA),石油技术杂志(JPT),新奥尔良地质学会(NOGS),新西兰地质与核科学研究院(New Zealand Institute of Geological and Nuclear Sciences),挪威理工学院(Norwegian Institute of Technology),海洋技术委员会(OTC),石油天然气杂志(Oil and Gas Journal),沉积学会太平洋分会,澳大利亚石油勘探学会(PESA),大不列颠石油勘探学会(PESGB),勘探地球物理学会(SEG),沉积学会(SEPM),Sovereign 油气公司,斯伦贝谢公司,石油工程师协会(SPE),测井分析学会(SPWLA),Springer-Verlag 公司,西方地球物理公司,伍德赛德石油公司。

个人包括:Marco J. J., Arreguin(Pemex), Carlos Bruhn, Gary Cole, Geoff Dorn, Doug Evans, Jim Fox, Brad Field, Miki Gardosh, Alfredo Guzman, Mads Huuse, Nick Holmes, Tom Homza, David Jennette, Robert Jones, T. A. Jones, Neil Kenyon, Todd Lapinski, Gunn Mangerud, Ole Martinsen, Mike Mayall, Brian O'Neill, Simon Payne, Kevin Pickering, Henry Posamentier, Dorrik Stow, John Zumberge。

特别感谢 Norman Rosen 博士(沉积学会海湾分会执行主席),本书引用他在 1994, 2000, 2001, 2002 和 2003 年 Bob F. Perkins 研究年会上的大量图件;此外, Ken Abdulah 允许我们在第 7 章中使用 Falcon 油田的图件; Andrew Hurst 允许我们在第 10 章中使用其未发表的材料和图件; Gabor Tari, Jim Molnar 和 Vanco Energy 为我们提供了第 12 章和第 15 章的有关图件;

Henry Pettingill 提供了第 16 章的有关图件;Joe Studlick 为我们提供了第 7 章和第 9 章有关野外露头的资料。在此一并表示感谢。

我们邀请了 5 位富有实践经验的同事为我们编写了本书的 4 章。Henry Pettingill 撰写了第 2 章, Richard Fillon 撰写了第 12 章, Matthew Pranter 撰写了第 14 章, Renaud Bouroullec 和 Gabor Tari 撰写了第 15 章。这些使本书在质量上和内容上增色不少,我们对他们的帮助表示由衷的感谢。

我们感谢以下同事为本书所做的及时、深入和全面的审阅工作,他们是 David Bowen (Montana State University), Frank Brown (BEG – Austin), Bret Dixon (ExxonMobil), Eric Esslinger (Eric Geosciences), Jim Fox (consultant), Tim Garfield (ExxonMobil), Mitch Harris (ChevronTexaco), Andrew Hurst (University of Aberdeen), Roy Kligfield (consultant), Laurie Lamar (consultant), Robert Loucks (Bureau of Economic Geology), Robert Mitchum, Jr. (consultant), Hans Nelson (consultant), Jory Pacht (consultant), Ed Picou (consultant), David Pyles (Colorado School of Mines), Mike Sweet (ExxonMobil), Anne Tomas (consultant), Alex van den Berg (retired – Shell), Berend van Hoorn (retired – Shell), Craig Shipp (Shell International)。

此外,我们对以下人员给予的技术上的帮助表示感谢:Minarou Aziwa (MCX), Ken Abdullah (Pioneer), Ed Colling (Chevron), Steve Crews (Anadarko), Erik Bartsch (Shell), Rick Beaubouef (ExxonMobil), Jim Booth (Shell), Kevin Bohacs (ExxonMobil), Greg Browne (New Zealand Survey), Bob Bruce (BHP – Billiton), Mike Clarke (Chevron), John Clayburn (Petrobras), Steve Cossey (consultant), Paul Crevello (consultant), Herman Darman (Royal Dutch), Jed Damuth (University of Texas – Arlington), Bret Dixon (ExxonMobil), Aziz Effat (Agiba Petroleum), Jim Fox (consultant), Brad Field (New Zealand Institute for Geophysics), Jose Frey (BG), Tim Garfield (ExxonMobil), Miki Gardosh (IGG), Phil Hirst (bp), Bo Henk (consultant), David Jennette (BEG – Austin), Marek Kacewicz (Unocal – now Chevron), John Kendrick (Shell), Rob Kirk (consultant), Jay and China Leonard (Platte River), Lidia Lonergan (Imperial College), Ole Martinsen (Norsk Hydro), Veit Matt (Platte River), Mike Mayall (bp), Trey Meckel (Shell), Webster Mohriak (Petrobrás), Paul Nadeau (Statoil), M. Nashaat (Egyptian General Petroleum), Hans Nelson (consultant), Carlos Pirmez (Shell), Henry Posamentier (Anadarko), David Pyles (Colorado School of Mines), Mike Roberts (ChevronTexaco), Art Saller (Unocal), Kevin Schofield (BHP – Billiton), Jerry Siok (bp), John Snedden (ExxonMobil), Joe Studlick (Maersch), Scott Thornton (Shell), Marshal Titus (Platte River), Peter Varnai (ExxonMobil), Bruno Vendeville (University of Lille), Pedro Zalan (Petrobrás), John Zumberge (GeoMark)。

本书每一章的定稿都经过 Anne Thomas, Laurie Lamar 和 M. S. Wacker 的详细核对和仔细推敲,我们永远感谢他们的帮助。

我们永远感谢以下人员为本书电子版所做出的巨大努力:Rick Couture, John Roesink, Jay Austin 和 Andrew Slatt。

特别感谢 Gail Bergan 为本书数字化出版所做的工作，她真是了不起的好编辑。

更重要的是，我们要感谢我们的家人在本书编写期间对我们的支持，他们是 Rudy, Lou, Laurie 和 Linda Gay。另外 Paul Weimer 感谢 Bruce Benson 为本书创作所捐赠的资金，感谢科罗拉多大学在本书编写过程中的支持。Roger Slatt 衷心感谢 Robert Stephenson (Potts 勘探公司) 提供俄克拉荷马大学住宿上的帮助，并感谢他、Lew 和 Myra Ward (Ward 石油公司) 在资金方面的支持。

最后，本书作者对 Huck Finn 未能亲睹此书出版深表遗憾。

Paul Weimer, Boulder, 科罗拉多州

Roger M. Slatt, Norman, 俄克拉荷马州

目 录

1 绪论	(1)
1.1 深水的定义	(2)
1.2 深水沉积体系结构单元和术语	(2)
1.3 关键界面和层段的层序地层表述	(5)
1.4 深水沉积体系的区域控制因素	(6)
1.5 深水沉积体系研究中存在的问题:现代和古代数据体之间的尺度差异	(7)
1.6 深水沉积体系概念的演变及其技术影响	(8)
参考文献	(11)
2 全球深水油气勘探与生产概况	(14)
2.1 深水、超深水油气勘探生产趋势	(14)
2.2 深水盆地的石油地质	(20)
2.3 未来深水勘探领域和勘探趋势	(33)
2.4 深水勘探的商业和技术趋势:主要知识和挑战	(37)
2.5 深水勘探工作流程	(42)
2.6 小结	(44)
参考文献	(44)
3 深水沉积体系的层序地层背景	(48)
3.1 概述	(48)
3.2 层序地层学和深水体系的奠基性论文	(49)
3.3 沉积物粒度和供给体系对深水体系的影响	(56)
3.4 构造对深水体系叠置模式的影响	(61)
3.5 陆坡盆地充填—溢出模式	(62)
3.6 旋回性的不同级别与深水体系的发育	(66)
3.7 湖盆中的深水体系	(71)
3.8 碳酸盐岩深水体系	(78)
3.9 小结	(81)
参考文献	(82)
4 沉积物重力流及其沉积过程	(87)
4.1 沉积物重力流的定义	(87)
4.2 沉积物重力流的成因和发生频率	(88)
4.3 沉积物支撑机理和沉积物重力流的类型	(88)
4.4 沉积物重力流过程和沉积物	(90)
4.5 沉积物重力流沉积后的再作用	(114)

4.6	自旋回与异旋回过程以及垂向叠置模式	(114)
4.7	小结	(117)
	参考文献	(118)
5	深水储层概论	(123)
5.1	储层单元及术语	(123)
5.2	沉积物粒度及搬运机制	(124)
5.3	结构单元内非均质性的级别和尺度	(131)
5.4	数据体的整合	(132)
5.5	储层单元及产量	(137)
5.6	本书中的生产储层实例	(137)
	参考文献	(137)
6	水道及水道沉积充填	(140)
6.1	概述	(140)
6.2	区域尺度特征	(146)
6.3	开发尺度特征	(163)
6.4	水道充填储层实例	(195)
6.5	小结	(209)
	参考文献	(210)
7	天然堤—漫溢沉积及其薄层	(218)
7.1	概述	(218)
7.2	区域尺度特征	(218)
7.3	开发尺度特征	(237)
7.4	薄层天然堤储层实例	(252)
7.5	小结	(262)
	参考文献	(263)
8	席状砂	(269)
8.1	概述	(269)
8.2	区域尺度特征	(269)
8.3	开发尺度特征	(282)
8.4	席状砂储层实例	(295)
8.5	小结	(318)
	参考文献	(318)
9	块体搬运沉积体系和海底滑坡	(325)
9.1	概述	(325)
9.2	区域尺度特征	(327)
9.3	开发尺度特征	(341)
9.4	块体搬运沉积和滑动体作为储层、盖层和烃源岩的实例	(347)
9.5	块体搬运沉积和滑动体在钻井灾害评估和地质工艺研究中的作用	(350)

9.6	块体搬运沉积和滑动体的成因	(351)
9.7	块体搬运沉积和滑动体的层序地层特征	(352)
9.8	小结	(352)
	参考文献	(353)
10	深水混合型储层	(357)
10.1	概述	(357)
10.2	再改造砂岩储层	(357)
10.3	区域尺度特征	(360)
10.4	开发尺度特征	(367)
10.5	再沉积的白垩储层	(376)
10.6	碳酸盐岩碎屑裙储层	(379)
10.7	小结	(382)
	参考文献	(382)
11	深水沉积解释中的误区	(387)
11.1	二维地震解释中的假象	(387)
11.2	三维地震解释中的假象	(391)
11.3	常规测井解释中的假象	(391)
11.4	成像测井和岩心分析中的假象	(392)
11.5	小结	(393)
	参考文献	(393)
12	深水环境中的生物地层学和凝缩段	(394)
12.1	生物地层资料的获取及工作流程	(397)
12.2	深水环境中的生物地层学概念	(400)
12.3	区域和开发尺度的凝缩段表述	(405)
12.4	生物地层学和层序地层学	(421)
12.5	油气勘探中的生物地层学	(423)
12.6	开发地质中的生物地层学	(437)
12.7	小结	(452)
	参考文献	(453)
13	深水沉积储层性质	(460)
13.1	孔隙度和渗透率测量方法	(460)
13.2	粒度和储层性质的关系	(465)
13.3	生物扰动对储层性质的影响	(471)
13.4	埋藏作用对储层性质的影响	(472)
13.5	毛细管性质对储层性质的影响	(475)
13.6	地层段的储层性质	(477)
13.7	储层的地质控制因素	(481)
13.8	流动单元与储层粗化	(486)

13.9 小结	(493)
参考文献	(494)
14 深水油藏建模	(497)
14.1 建模的工作流程	(498)
14.2 数据来源	(499)
14.3 深水沉积结构单元建模	(503)
14.4 深水地质建模的不确定性	(530)
14.5 小结	(537)
参考文献	(538)
15 深水环境中的石油圈闭	(543)
15.1 具活动塑性层的盆地	(545)
15.2 无塑性层的盆地	(579)
15.3 地层圈闭与非限制性环境	(594)
15.4 深水环境中浅海和陆相储层	(598)
15.5 小结	(599)
附录 A	(599)
附录 B	(600)
参考文献	(601)
16 深水环境中的含油气系统	(613)
16.1 烃源岩	(613)
16.2 盖层和孔隙压力预测	(622)
16.3 深水环境中含油气系统建模:生成,时间确定和运移	(625)
16.4 小结	(638)
参考文献	(638)
词汇表	(642)

1 绪 论

本书旨在为地质和地球物理工作者及石油工程师提供广泛的与深水环境相关的石油地质知识。与其他硅质碎屑岩和碳酸盐岩储集体不同,深水沉积体系是一种现代沉积中不易触及、难于观测和研究的储集体类型。深水沉积体系的研究需要利用许多不同的间接测试技术,每种技术只能反映整个沉积体系的一部分特征。因而相对于那些易于通过现代沉积过程进行观测和记录的储集体而言,人们对深水沉积形成的储集体的研究和理解要落后许多。

正因为如此,地质学家组织多学科研究队伍,利用多种类型资料,开展深水沉积的综合研究(图 1-1)。深水沉积研究中的资料类型包括:野外露头研究资料、二维和三维地震资料、钻井岩心、常规和特殊测井资料、生物地层学资料、试井和生产测试资料等。通常需要将这些资料一起输入储层模拟计算软件以获得储层模拟和预测结果。

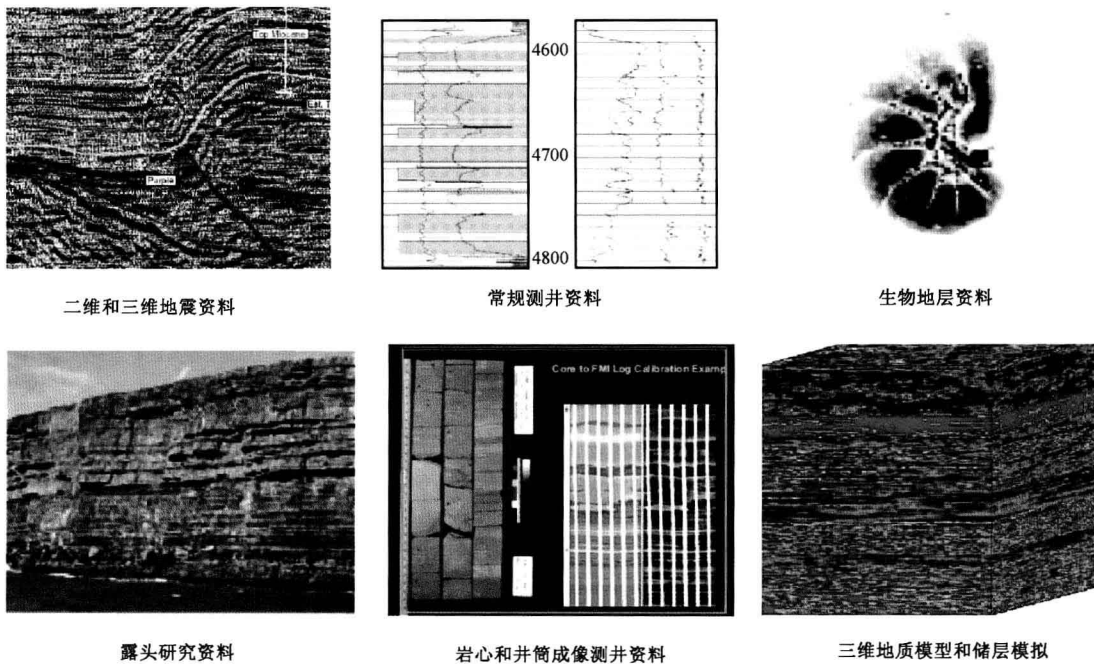


图 1-1 应用于深水沉积体系研究的不同资料类型图

以下章节将综合所有这些不同类型和不同学科资料来描述深水沉积的诸多特征。深水勘探和开发的技术进步很快,本书力图提供即使在技术进步超越了当今水平的将来仍然有用的信息。

为此,本章将介绍一些有关深水沉积的基本概念和术语,并在本书中使用:

- (1) 引入有关深水的定义;
- (2) 定义适用于所有深水沉积体系的结构单元;

- (3) 讨论划分深水沉积结构单元关键层段和界面的层序地层表述;
- (4) 讨论深水沉积物搬运和沉积的区域和局部控制作用;
- (5) 讨论古今深水沉积体系对比的尺度问题;
- (6) 总结人们对深水沉积体系认知过程并讨论技术进步在其中扮演的重要作用。

1.1 深水的定义

地质学家通常使用好几个术语来描述深水沉积特征以及深水沉积过程。为了统一起见,本书定义如下术语:

(1)“深水”一词在工业界有两种不同的用法。一种是指沉积于深水环境中的沉积物,也就是那些在重力流作用下,沉积于风暴浪基面以下的陆坡到盆地部位的沉积物。沉积物的重力流作用在水体相对较浅的湖相和水深小于 300m 的克拉通沉积盆地中也起作用。除非另有说明,本书使用术语“深水沉积体系”是指海洋沉积物的重力流作用、环境和沉积物。也有其他作者用稍有不同的术语来描述这一过程和沉积物,如浊流沉积体系(Mutti 和 Normark, 1987, 1991)、浊流沉积复合体(Stelling 等, 2000)和海底扇(Bouma 等, 1985)。

(2)另一种是工程意义上的深水,是指现代海水深度,特别是指大于 500m 水深。钻井工程师使用这一深水的定义来描述海面到钻井钻具到达海底的水深。这个水深是常规钻井船所不能实现的。在本书中,当涉及具体的水深时,“深水”是指水深位于 500 ~ 2000m 的海洋水域,超深水是指水深大于 2000m 的水域。

1.2 深水沉积体系结构单元和术语

1982 年 8 月,一些深水研究领域的著名专家在宾夕法尼亚州的匹兹堡举行了“第一届海底扇会议”(COMFan I)。会上大家一致认为将基于现今海底研究的现代海底扇与基于露头研究的古代海底扇进行对比是极其困难的(Bouma 等, 1985)。因此,有必要形成一套不同领域工作者都能使用的通用术语。尽管人们基于不同的观察提出了许多不同的深水沉积体系的分类方法,但仅有三种分类对现在常用的术语有较大的影响:① Mutti 和 Normark 分类(1987, 1991);② Chapin 和 Mahaffie 分类(1994);③ Reading 和 Richards(1994), Richards 等(1998), Richards 和 Bowman(1998)分类。他们的分类都着眼于储集单元的种类、结构和形态及相关沉积物。

第一届海底扇会议之后,经过几年的研究,Emiliano Mutti 和 William Normark 一起试图识别出现代和古代浊积体系都具备的共同结构单元。他们发表了两篇开创性的论文,这两篇论文对地质学家对浊积体系的理解和描述有非常重要的影响(Mutti 和 Normark, 1987, 1991)。他们识别出了现代和古代浊积体系共有的 5 种结构单元:水道(channel)、漫溢沉积(overbank)、朵体(或者席状砂)(lobe/sheet)、水道—朵体过渡带(channel-lobe transition)和侵蚀界面(erosional features)(表 1-1)。应该注意,水道—朵体过渡带指的是一个区带,而侵蚀界面也不是沉积特征。自从这两篇论文发表后,研究人员对深水沉积体系结构单元进行了更详细的细分和定义,关于这些将在随后的章节中论述。

表 1-1 本书中所采用的深水沉积体系结构单元定义表

结构单元	提出者	定 义
水道 (Channel)	Mutti 和 Normark (1991)	水道是由浊流形成的长条形的负地形单元,是一定时期内沉积物的输送通道。浊积体系中的水道形状和发育位置受沉积作用或下切侵蚀作用控制。水道特征可以以侵蚀作用为主,也可以以沉积作用为主,或是二者共同作用的结果
凝缩段 (Condensed section)	Loutit 等 (1988)	凝缩段指在极低沉积速率下形成的由远洋一半远洋沉积物组成的薄层地层单元,大范围地形成于最大海侵期
沉积朵体 (Depositional lobe)	Mutti 和 Normark (1987, 1991)	现代沉积体系中,朵体是指紧临于主水道的下倾斜坡处的砂岩沉积区。在古代沉积体系中,它们由近似乎板状的、单层厚 3~15m、非水道化的沉积体构成,单个朵体由相对较厚的粗粒砂岩层组成,两侧边界大致平行
块体搬运沉积 (Mass-transport deposit)	Weimer(1989)	块体搬运沉积是再沉积产物。它们通常上覆在扇根的侵蚀面之上,部分覆盖扇端,侧向尖灭。地震上表现为平行状、逆冲状、辐射状、杂乱状或丘状,连续性差—中等,振幅变化大。这一术语最初用于地震相描述,Weimer(1989)用“块体搬运复合体(mass transport complexes)”这一术语来描述那些位于沉积层序底部的,被水道或天然堤沉积物所覆盖或上超的沉积物特征
漫溢沉积物 (Overbank)	Mutti 和 Normark (1991)	漫溢沉积物通常是指浊积沉积体系中邻近主水道、横向分布范围较广的细粒的、薄层的浊积沉积物,它通常由两部分组成:①沿活动主水道边缘分布,具天然堤地形的漫溢沉积物;②没有大的地形起伏的远端漫溢沉积物
席状砂 (Sheet)	Mahaffie(1994)	席状砂与朵体非常相似,野外露头以薄层状,侧向连续的几何形态为特征。根据其内部结构的不同可以进一步细分为叠合席状砂和层状席状砂。叠合席状砂由多个缺失顶层的鲍马序列堆积组合而成,具有高的砂地比。层状席状砂则由完整的或缺失底部 A 层的鲍马序列组成,具有低的砂地比
滑动体 (Slide)	Jackson(1997)	滑动体是指沉积物或岩石在不同剪应力作用下沿破裂面的块体运动或崩塌,运动的块体可能发生或不发生强烈变形,有时可能是旋转或平移
薄层 (Thin bed)	Shew 等 (1994)	薄层沉积物包括天然堤、水道间沉积、扇端或扇体边缘沉积,由极细砂岩或粉砂岩组成,发育大量的波纹层理、尖灭与丘隆构造,包卷层理,偶见生物扰动构造,常见递变层理

1994 年, Chapin 和 Mahaffie 等发表了一个由壳牌石油公司提出的储层分类方案,这一方案是根据他们在墨西哥湾北部深水勘探中对主要储层结构单元的描述作出的。

他们强调了 3 种主要的含砂储层单元:席状砂(层状的或叠合的)、水道(单个的或多个叠置的)和由天然堤组成的薄砂层(图 1-2、表 1-1)。这一分类着重描述了储集体几何特征,同时也包括了测井、岩心和地震描述特征。因此,石油行业员工常用这一分类,它很大程度上是以 Mutti(1985)浊积单元分类为基础的,这一点将在第 3 章中详细讨论。

1998 年, Richards 等识别出了 5 种在所有浊积体系中的共同结构单元:楔状体、水道(包括冲槽水道、辫状水道和有堤水道)、朵体、席状砂和滑塌沉积(图 1-3、表 1-1)。它们指出这些结构单元的产状主要受沉积物粒度和供给体系类型的控制(这一点将在第 5 章论述)。

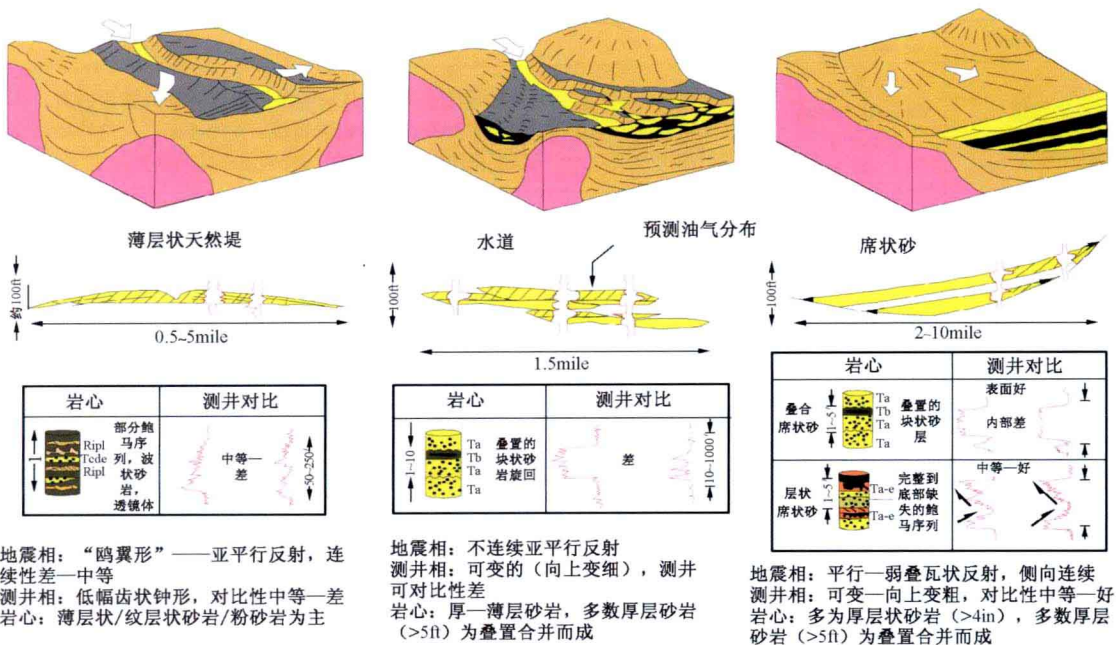


图 1-2 深水沉积储集体分类图，以墨西哥湾北部为例（据 Chapin 等，1994）

体系类型	楔状体	水道	朵体	席状砂	杂乱堆积
富砾体系		冲槽水道 			
富砂体系		辫状水道 	水道化朵体 		
富砂/泥体系		水道—天然堤 	沉积朵体 		滑塌和滑动体
富泥体系		水道—天然堤 	沉积朵体 		滑塌和滑动体

图 1-3 深水碎屑岩沉积体系的主要结构单元（据 Reading 和 Richards，1994）

1998 年，Elliott 提出了在现代和古代深水沉积体系中另外 3 种结构单元：块体搬运沉积、滑塌沉积和凝缩段。表 1-1 包括了本书采用的结构单元划分术语，每种深水沉积结构单元的重要特征将在第 5 章至第 10 章进行论述，并运用海底图像资料、二维和三维地震资料、露头资料、岩心资料、测井及成像资料对各结构单元特征进行总结。

1.3 关键界面和层段的层序地层表述

对深水沉积体系及相关结构单元的关键层段或界面的理解非常重要。前人利用二维和三维地震资料、测井资料、生物地层资料、储层压力资料及露头资料对现代和古代浊积体系进行了综合研究,给出了这些层段或界面的定义。

深水沉积体系中存在两类关键层段或界面:凝缩段和层序界面。通过识别这些界面和层段,可以将深水沉积体系置于层序地层格架中,有利于对比、编图和描述(第3章)。

凝缩段是相对较薄的沉积地层单元,反映了极低的沉积速率(Loutit等,1988)。在深水沉积体系中,它们可以形成于以下时期:①海侵及高位体系域沉积期,②浅海沉积中心位置发生大的变化时,③区域沉降使得沉积速率变小时。

在地震剖面上,凝缩段表现为侧向连续反射,披覆在下伏层序之上(图1-4)。根据其厚度的不同及地震资料精度的差异,凝缩段的地震反射特征有所不同。在同一盆地内或不同盆地之间,凝缩段的岩性组成变化也非常大,这些差异反映了凝缩段形成时不同的沉积环境。

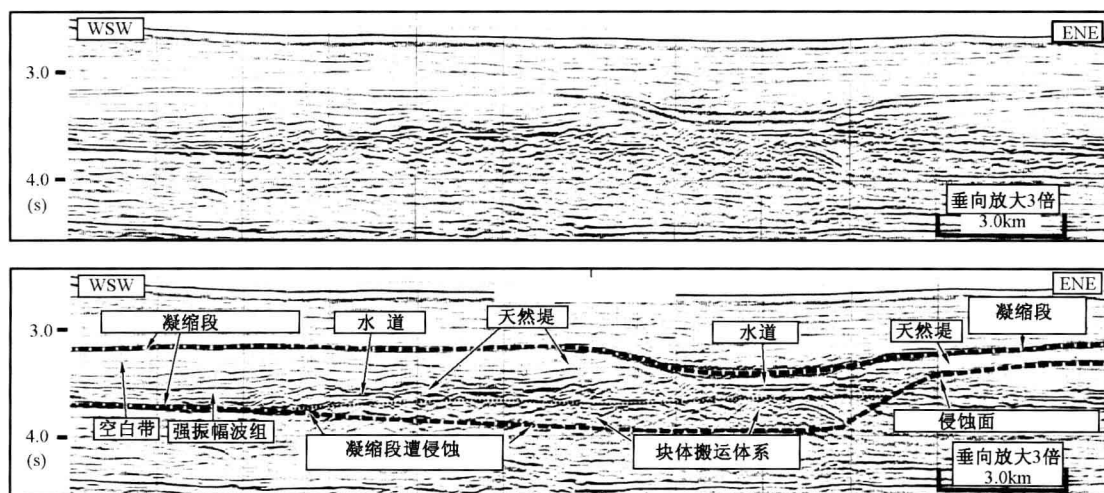


图1-4 穿过墨西哥湾北部深水区上更新统沉积层序的地震剖面(据 Weimer, 1990)

在深水环境下,层序界面可以是侵蚀面,也可以是整合面。当层序界面为侵蚀面时,其下伏层序中的凝缩段及相关沉积物被剥蚀。深水沉积体系中,不同部位(如陆坡与坡脚相比)沿层序界面的剥蚀量变化很大。一般来说,剥蚀量最大的地方位于陆坡上部或外大陆架的海底峡谷,被侵蚀搬运的沉积物最多。陆坡或陆坡内盆地的剥蚀量变化很大。侵蚀面往往沿陆坡下倾方向成线状发育。在某些深水沉积体系中,当陆坡角度变小时,来源于陆坡的大量滑塌体也会在坡脚形成广泛的侵蚀区(图1-4)。

在大部分地区,侵蚀层序界面可以向盆内追踪到某个点,在该点处侵蚀面变化成沉积层序界面直接覆盖在凝缩段之上,该层序界面就是 Vail 等(1977)所说的“与侵蚀面对应的整合面”。再往盆内去,垂向剖面上可见页岩和砂岩互层,层序间没有侵蚀面。在陆坡内盆地中,尽管没有侵蚀,也可以形成明显上超面作为层序界面。