



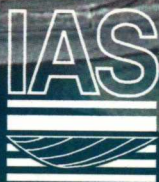
沉积体系与 沉积序列

挪威大陆架边缘

[挪] A. W. Martinius R. Ravnås
J. A. Howell R. J. Steel ©主编
J. P. Wonham

吴因业 方 向 王 越 ©译
张天舒 张 琴 翟秀芬

From Depositional Systems to
Sedimentary Successions
on the Norwegian Continental
Margin



石油工业出版社

WILEY Blackwell

沉积体系与沉积序列： 挪威大陆架边缘

[挪] A. W. Martinius R. Ravnås J. A. Howell

R. J. Steel J. P. Wonham 主编

吴因业 方 向 王 越 张天舒 张 琴 翟秀芬 译

石油工业出版社

内 容 提 要

本书在分析挪威大陆架边缘沉积体系与沉积序列的基础上,反映了对含油气单元的沉积学和地层学以及烃源岩、储层和盖层的细节研究最新进展。包括从干旱、潮湿到冰川的所有气候类型以及从山间挤压/挤压过渡类型到拉张/拉张过渡类型盆地和被动边缘的构造背景。阐述了海平面变化作为沉积结构的关键控制因素,由从源到汇的控制作用演变成围绕构造、气候和地貌对沉积物供给和保存地层结构的科学问题。

本书可作为沉积学与层序地层学、石油地质学研究者、地质与地球物理勘探工作者、油藏工程师以及相关高等院校师生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

沉积体系与沉积序列:挪威大陆架边缘/(挪)

A. W. 马蒂纳斯(A. W. Martinius)等主编;吴因业等译.

—北京:石油工业出版社,2018.1

书名原文:From Depositional Systems to
Sedimentary Successions on the Norwegian
Continental Margin

ISBN 978-7-5183-1509-3

I. ①沉… II. ①A… ②吴… III. ①大陆架-沉积体
系-研究-挪威 ②大陆架-沉积序列-研究-挪威 IV.
①P588.2②P539.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 206302 号

From Depositional Systems to Sedimentary Successions on the Norwegian Continental Margin
by A. W. Martinius, R. Ravnås, J. A. Howell, R. J. Steel and J. P. Wonham

ISBN 978-1-118-92046-6

Copyright © 2014 by International Association of Sedimentologists

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Petroleum Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of John Wiley & Sons Limited.

本书经 John Wiley & Sons Limited 授权翻译出版,简体中文版权归石油工业出版社有限公司所有,侵权必究。

北京市版权局著作权合同登记号:01-2016-0262

Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

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

编辑部:(010) 64523544

图书营销中心:(010) 64523633

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷

787×1092毫米 开本:1/16 印张:43.75

字数:1120千字

定价:400.00元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

译者的话

油气是产生和聚集在沉积单元内的，改善地质上对沉积单元的成因和特性方面的理解，对油气勘探十分重要。挪威大陆架是一个富饶的油气区，时至今日勘探与生产活动依然保持活跃。本书除了常规石油地质勘探应用之外，对非常规资源勘探也可以提供参考，在国民经济的能源建设中发挥重要作用。

本书的学术价值在于：(1) 含油气系统研究方面，论述了工业界和学术界对构造背景、含油气单元的沉积学和地层学以及烃源岩和盖层的细节理解。(2) 沉积体系和油气储层研究方面，从北海到巴伦支海，包含了泥盆系到更新统的不同油气产层。储层类型从冲积扇到深水扇，几乎包括从干旱、潮湿到冰川的所有气候类型，并包含了从山间挤压/挤压过渡类型到拉张/拉张过渡类型盆地和被动边缘的构造背景。(3) 层序地层学研究方面，气候和构造对沉积物从源到汇的控制作用及对地层结构和挪威海上石油勘探的影响方面作了预测。水槽实验中测定了三角洲顶部可控条件下的自旋回沉积过程，实验了外力驱动下的河流自旋回特征变化和河流沉积模式。

本书对“十三五”及未来国家科技攻关项目研究、石油公司海相油气研究、岩性地层油气藏研究和页岩气等非常规油气资源勘探研究有重要参考价值。

本书的翻译工作主要由中国石油勘探开发研究院（中国石油集团科学技术研究院）、国土资源部油气中心和中国石油大学（北京）等单位多名科技工作者合作完成。主译者名单和翻译任务分工如下：吴因业翻译前言、第1章至第2章、第20章至第22章，校对初稿5篇。方向翻译第4章至第5章、第13章，校对初稿3篇。王越翻译第6章至第7章、第12章，校对初稿3篇。张琴翻译第15章至第16章、第19章，校对初稿3篇。张天舒翻译第8章至第9章、第17章，校对初稿3篇。黄士鹏、方向和吴因业等翻译第3章和第14章，校对初稿2篇。翟秀芬翻译第10章至第11章、第18章，校对初稿3篇。中国石油勘探开发研究院研究生部王玥、姚子修、汪梦诗、任洪佳、王天宇、何苗、王琳和张春宇参加了第2章和第14章的翻译。本书最后由吴因业负责进行最终的审稿与统稿。

本译著的完成，得到了中国工程院院士胡见义及中国石油天然气集团公司、中国石油勘探开发研究院（中国石油集团科学技术研究院）有关领导和专家的大力支持，在此一并致谢！

由于本书内容丰富、涉及面广，不当之处，敬请读者批评指正。

前言

吴因业 译

挪威大陆架（Norwegian Continental Shelf, NCS, 图 1）是一个富饶的油气区，时至今日勘探与生产活动依然保持活跃。从 1963 年开始勘探以来，该区历经半个世纪的勘探开发，积累了大量资料。勘探活动高峰在第一个 20 年左右，那时挪威大陆架的主体资源量被探明。即使在最近的 10 年，勘探上依然有新的油气大发现，产生了令人兴奋的结果。此外，作业者将油田生产采收率推向新的高值，某些情况下延长油田原始评估生命时间 10~20 年。挪威石油公司董事会对产量前景（挪威大陆架石油资源，NOD，2013）持积极态度，但在其他因素影响下需要依赖持续的技术发展。重要的是，这包括了改善地质上对沉积单元的成因和特性方面的理解，油气是产生和聚集在沉积单元内的。

今日和未来的关键因素是技术的发展要与特定地质条件的理解相匹配。本书的主题“挪威大陆架边缘沉积体系与沉积序列”，反映了工业界人士和 NCS 学术界在构造背景、含油气单元的沉积学和地层学以及烃源岩和盖层的细节理解方面所做的巨大努力。这也证明工业界和学术界相互依存，共同促进人类向更高水平迈进。

NCS 从南部北海到北部巴伦支海，岸线延伸约 2500km（图 1），包括泥盆系—更新统油

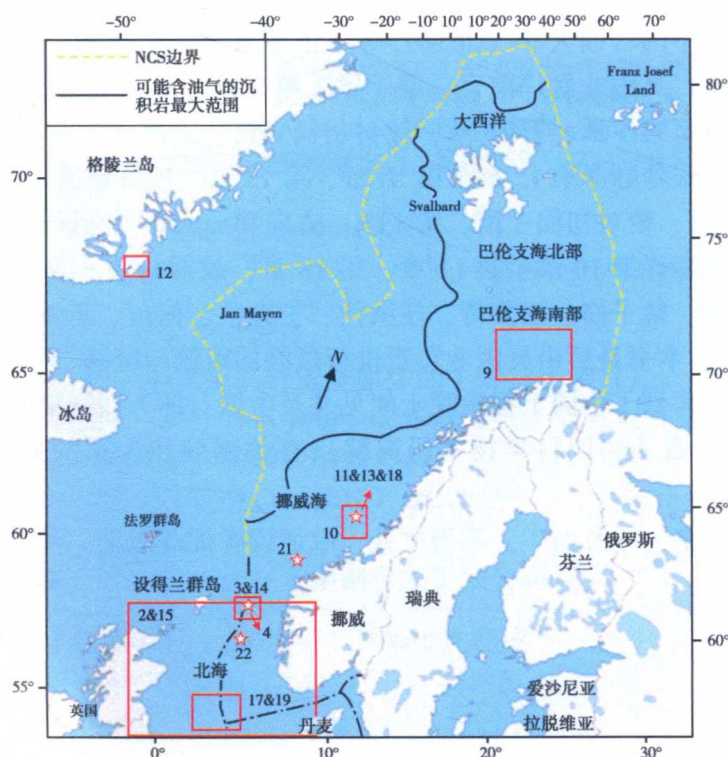


图 1 挪威大陆架（NCS）（据挪威石油公司董事会报告，2013）

标注的方框和星代表相关论文的研究区，本书涉及的所有论文并非全部包括在本图中

气产层。储层类型从冲积扇到深水扇，几乎包括从干旱、潮湿到冰川的所有气候类型，并包含了从山间挤压/挤压过渡类型到拉张/拉张过渡类型盆地和被动边缘的构造背景。广泛的沉积体系和构造背景对石油地质家了解和预测地层与岩石性质来说是令人兴奋的挑战。层序地层学关于海平面变化作为沉积结构的关键控制因素这一初始聚焦，已经演变成围绕构造、气候和地貌对沉积物供给和保存地层结构等问题。

本书论文在 NCS 层序地层学的三天会议中宣读过，会议由挪威石油学会（NPF）于 2010 年 5 月在 Stavanger 市组织召开。书中所列的专题和对 NCS 的影响是会议的焦点。特别引人注目的是类比研究和基于过程的模式综合，具有来自高质量的钻井资料和地震资料包的解释结果和可视化及其相关案例研究。会议遵循以往 NPF 成功的经验，在了解气候和构造对沉积物从源到汇的控制作用及对地层结构和挪威海上石油勘探的影响方面作了进展预测。会议的目标是沉积学家和地层学家共同研讨 NCS 沉积的方方面面，提出最新进展并展望未来。70 多个口头宣讲和展板的展示，包括了三叠系旱地（dryland）河流体系和储层，到上白垩统深海体系，而且开展了岩心和计算机虚拟的地质专题研讨，以及地层和沉积作用的水槽模拟。

组织本文的重要贡献在于选择沉积剖面的位置是从上倾方向河流环境，经过近海直到下倾方向的深海环境。Postma 的贡献是论述了河流体系中普通自旋回特征及其景观规模实验研究的前景。陡坡带、中坡带和缓坡带体系显示了不同的自旋回特征，结果是直接的加积速率及其变化比间接的海平面、气候或构造力更加富有逻辑性，从而易于预测自旋回特征。这一论述得到了 Martinius 等的支持，在其挪威海 Statfjord 油田 Eiriksson 组河流体系层序地层分析中有所论述（图 1）。他们提出了河流基准面的实际定义，用于井资料包中识别加积速率的变化，进行储层分带。McKie 分析了北海中部三叠系的沉积序列（图 1；Skagerrak 组），资料显示 Tethys 地区构造活动盆地具有干旱和多雨沉积条件交替，气候温暖和寒冷也交替的特征。挪威海三叠系—侏罗系界面附近 Lunde 组、Raude 组和 Eiriksson 组河流体系，经 Nystuen 等观测河流类型的变化受控于更加干旱—更加潮湿的气候低频变化。异地层单元的形成推测是高频气候旋回（或基准面变化）的响应。Kim 等在水槽实验中测定了三角洲顶部可控条件下的自旋回沉积过程，实验了外力驱动下河流自旋回特征变化、沉积物定量存储和释放的过程来观察河流模式的变化。Muto 和 Steel 评述了河流三角洲自旋回地层的主要概念，指出稳定的动力学外力往往产生不稳定的地层响应；而稳定的地层特征归因于不稳定的动力学外力。三角洲的自旋回过程也是 Olariu 论文的主题，他总结了无处不在的快速过程变化常常出现在古代三角洲，尤其是在三角洲前缘。他认为空间上延伸的以洪泛面为界的主要地层段，是连续的三角洲复合体，反映了异旋回响应。大的内部变化则反映了穿越大陆架的自旋回朵叶体展布。

三角洲前缘波浪力对地貌动力学和随时间变化的地层学方面的贡献由 Hillen 等开展了研究，他应用了高分辨率基于物理学的数值模拟。模拟地层学进一步用于标准的储层模拟工作流程，来计算岩石性质。巴伦支海三叠系—侏罗系附近的河控三角洲平原沉积，Ryseth 研究认为其主要受控于气候变化，类似于 Nystuen 等在挪威海同一地质时代的研究结论（图 1）。挪威海 Halten 阶地中—下侏罗统也是这三个研究主题。Ravnås 等认识到三个巨层序，即 Tilje、Tofte-Ile 和 Garn 巨层序，具有常见的结构模式和地层构造。这被解释为裂谷边缘和内陆隆起的沉积响应，决定了优质席状储集体的分布。Thrana 等提出了一个修正过的 Åre 组河流三角洲整个海侵期的沉积模式（下伏 Tilje 巨层序），这成为 Heidrun 油田建立新地层格

架和修改储层带的基础。地层界面的性质证实了 Olariu 在空间展布的以洪泛面为界的连续三角洲复合体的发现，其中显示了有意义的内部变化。相似的结论也在 Ichaso 和 Dalrymple 研究 Smørbukk 油田 Tilje 组时得出，通过详细的地层和相分析识别出两个主要层序（都在 Tilje 巨层序内部），具有两个主要构造阶段。隐蔽正断层的延伸和孤立同沉积浅部上盘沉降中心的产生巧妙控制了 Tilje 层序的相分布模式。同时期的中—下侏罗统 Halten 阶地沉积序列，沿原始的挪威海—格陵兰海西侧 400km 宽，沉积了 Neill Klintner 群。Ahokas 等建议开展 Tilje 和 Tofte-Ile 巨层序的露头类比，尤其是沉积环境、沉积结构的外部 and 内部控制因素，以及砂体结构和岩石性质的三维非均质性研究。

本书中的一些学者研究了构造发育对浅海沉积样式和地层结构的影响。Folkestad 等对北海北部 Gullfaks-Kvitebjørn 地区中侏罗统开展了研究（图 1），显示形成局部沉积中心的旋转断块的漏斗形上盘地区，具有典型的潮汐流特征。Jarsve 等作了更加广泛的远景预测，在源与汇关系一文中评述了北海中—新生代构造格局，以便了解盆地伸展类型、几何形态和沉积充填动力学。四种主要的盆地格局被识别，主要与不对称隆起和盆地侧翼剥蚀有关。一种更好了解和预测区域规模地层结构控制因素的替代性方法是使用三维地层正演模拟，如 Granjeon 展示的那样。数值模拟技术可以应用于工业减少地下的不确定性。在北海中央地堑上侏罗统的案例研究中，Wonham 等开发了三种构造—沉积模型，用于盆地沉积、侵蚀和再沉积的解释和预测。每种模型的性质依赖于裂谷的几何形态演化、裂谷的位置和下伏盐层替代的时间。

Messina 等研究了构造上受限制并在沉降的盆地中重复旋回的潮汐沙脊沉积，并且定量研究了储层结构、岩石性质分布和各向异性。

对 Ekofisk 油田及其邻近地区马斯特里赫特阶 Tor 组的白垩沉积模式开展了研究（北海；Gennaro 和 Wonham）。广泛分布的河道，主要沿构造等深线方向被识别出来，被解释为底流形成的产物，底流起源于邻近地堑的最深部位。

在沉积剖面的下倾端，Basani 等应用确定性过程模拟软件建造了三维模型，模拟了浊流，目的是填补浊积岩结构小比例尺和大比例尺模拟之间的鸿沟。模拟结果显示与实验的砂质浊流动力学十分接近。Ravnås 等分析了上马斯特里赫特阶—丹麦阶 Ormen Lange 的浊积体系大比例尺结构。多期重复的内陆隆起、盆地边缘翘倾和砂质扇体发育，浊积体系在斜坡带阶地通过充填—溢出的过程演化，也或者在小盆地群倒退充填和上斜坡带上超发育。相似的是，北海晚古新世—早始新世 Hermod 浊积扇中部—外部扇体的结构，经 Bryn 和 Ackers 分析了解到了三维结构特征。使用先进的地球物理技术编制了网络路径图。原始沉积模式和外延的沉积后砂体重建相结合产生了复杂的三维结构，可以看到大量厚砂体单元的分布。

我们得益于作者们对本专著的贡献，感谢审稿人提出了有益的建议和观点，从而大大地改善了论文的质量和出版格式。一如往常，没有专家的意见，没有审稿人的奉献和努力（除了匿名审稿人，其他在每篇论文中有致谢），本专辑就不会出版。最后，衷心感谢 Thomas Stevens，国际沉积学家协会（IAS）的专刊编辑，感谢他高标准的编辑工作，以及不屈不挠的精神和耐心，这是本书得以高质量出版的保证。我们也非常感谢 IAS 专刊编辑助理 Adam Corres 的工作。

审稿人名单如下（不包括三位匿名审稿人）：

Jennifer Aschoff	Bryan Bracken	Massimo Dall'Asta	Rory Dalman
Josh Dixon	Trevor Elliott	Michael Engkilde	Anjali Fernandes

Atle Folkestad	Lars-Magnus Fält	Rob Gawthorpe	Liviu Giosan
Gary Hampson	William	Helland-Hansen	David Hodgson
Chris Jackson	Howard Johnson	Ian Kane	Wonsuck Kim
Kjell Sigve Lervik	Ian Lunt	James MacEachern	Tom McKie
Donatella Mellere	Andrea Moscariello	Cornel Olariu	Snorre Olaussen
Henrik Olsen	Chris Paola	Per Pedersen	Piret Plink-Björklund
George Postma	David Pyles	Erik Rasmussen	Rodmar Ravnås
Manasij Santra	Ron Steel	Esther Stouthamer	Kyle Straub
Finn Surlyk	David Uličný	Allard van der Molen	David Waltham
Brian Willis	Mike Young		

谨以此书献给 John Gjelberg, Michael Talbot 和 Trevor Elliott

吴因业 译

怀着极为悲痛的心情将此挪威沉积地质著作献给过世的三位同事。

John Gjelberg, 1982 年获卑尔根大学博士学位, 刚开始在 Norsk Hydro 工作并在此度过了大部分职业生涯, 除了在挪威国家石油公司有短期经历并在 North Energy 工作了最后几年。John 一生研究并发表沉积学和石油地质学方面的论文, 涉及挪威大陆架以及刚果盆地的构造—地层发育, 安哥拉海上和法国、西班牙的露头地质学研究。John 最为突出的研究包括石炭系冲积扇、Bear 岛和 Svalbard 的海相地层, 巴伦支大陆架早期勘探的储层模式, 挪威中部边缘的构造—地层发育, 以及 Ainsa 浊积体系的地震模型。在学术前沿领域, John 以 1994 年论文 (与 W. Helland-Hansen 合作) 关于早期层序地层学争议中的体系域变化研究而知名, 近年来地层学界对这一思想有了新的发展。John 也在卑尔根大学讲课并指导研究生。John Gjelberg 去世了, 但人们会因其对挪威地质学的贡献记得他。

Mike Talbot, 1968 年获得布里斯托尔大学地质学博士学位, 1972—1978 年在英国丹地大学从事 NERC 博士后研究, 主攻 Seychelles 珊瑚礁和相关沉积物, 同时受雇于 Ghana 大学地球科学系作讲师。1978—1981 年在 Leeds 大学地球科学系担任讲师, 后在挪威卑尔根地质学院担任高级讲师, 1984 年在地质学院被任命为教授 (现在是地球科学系)。Mike 研究兴趣较广, 主要是湖沼地质学、现代和古代裂谷沉积、碳酸盐岩沉积学和成岩作用。他的大半职业生涯集中于东非大型湖泊研究。在最后 10 年, Mike 又回归碳酸盐岩, 开展与 Spitsbergen 中部上古生界碳酸盐岩和蒸发岩有关的崩塌角砾岩沉积和成岩作用研究。Mike 在 1990—1994 年担任沉积学杂志主编, 工作效率高, 同时也是国际大陆科学钻探项目科学顾问组湖泊钻探分组欧洲代表。2007 年, Mike 因其在星球研究事业和湖沼地质学界的巨大贡献荣获国际湖沼地质学会 W. H. Bradley 奖。Mike 还指导了大约 74 个硕士和博士研究生, 人们会因其杰出工作和对卑尔根大学的贡献而久久不忘。

Trevor Elliott, 当代最有影响力的地质学家之一, 在 Harold Reading 教授指导下获得牛津大学博士学位。在 Leiden and Reading 完成博士后研究后, 去斯万席大学 (1976) 担任沉积学讲师, 后在利物浦大学作地质系教授, 一直干了 20 年。Trevor 长期且高产的教学和研究产生了大量的本科生、研究生和博士后论文及研究项目。其中有实力的遗产是他的学生在世界各大公司和地质专业的影响力。Trevor 出版了开创性的关于三角洲和岸线方面的著作《沉

积环境和相》，第一版于 1978 年出版，后来经过更新和修正。Trevor 的研究兴趣广泛，涉及河流到深水沉积学、地层学和盆地分析。他曾经获得伦敦地质学会 Bigsby 奖，还是 AAPG 杰出演讲人。20 世纪 80 年代，Trevor 研究了浅海砂岩露头，用于挪威边缘受波浪和潮汐控制的储层分析。挪威工业合作组织进一步支持 Trevor 的博士生们，开展挪威领域的岩心沉积学研究。Trevor 与石油工业界有许多愉快的合作，他长期研究爱尔兰 Clare 盆地，梦想在 Clare 悬崖后钻探几口井，用于发展三维模型，最终在 Statoil 和 Dublin 大学合作支持下得以实现。2006 年起，Trevor 开始进行工业教学，主讲沉积学和地层学，建立了庞大的地质科学和工程师团队。Trevor 最大的优点是他的科学方法和教学方式。他敏锐的洞察力，严密的分析头脑和从事不同工作的能力永远鼓励着学生和地球科学界的同行们。

目 录

- 1 河流体系中常见的自旋回特征：来自实验研究经验 (1)
George Postma 著
吴因业 译
- 2 气候和构造对北海中部三叠系旱地末端河流体系构型的控制作用 (20)
Tom Mckie 著
吴因业 王 玥 姚子修 汪梦诗 等译
- 3 北海北部晚三叠世—早侏罗世气候变化对冲积结构、古土壤和黏土矿物的影响 ... (61)
Johan P. Nystuen Audun V. Kjemperud Reidar Müller Victoria Adestål Edwin R. Schomacker 著
黄士鹏 方 向 吴因业 周永胜 译
- 4 应用可容空间与沉积物供给比值概念进行河流沉积体系层序分析和储层划分 (105)
Allard W. Martinus Carsten Elfenbein Kevin J. Keogh 著
方 向 译
- 5 异动力作用下的自旋回沉积作用响应观察：实验地貌学和地层学 (130)
Wonsuck Kim Andrew Petter Kyle Straub David Mohrig 著
方 向 译
- 6 从自旋回的角度认识外力对河流三角洲的作用：概念的回顾 (143)
Tetsuji Muto Ronald J. Steel 著
王 越 译
- 7 现代三角洲的自生沉积过程演变：将今论古 (154)
Cornel Olariu 著
王 越 译
- 8 受波浪改造的河流三角洲动态地貌模型及其在标准储层建模中的应用 (175)
Marten M. Hillen Nathanaël Geleynse Joep E. A. Storms Dirk Jan R. Walstra
Remco M. Groenenberg 著
张天舒 译
- 9 西南巴伦支海侏罗系—三叠系界面上的沉积作用：指示环境变化 (195)
Alf Ryseth 著
张天舒 译

10 Halten 阶地下一中侏罗统裂谷内巨层序：巨层序的构造、沉积组构和控制因素 … (225)
Rodmar Ravnås Kari Berge Heather Campbell Craig Harvey Mike J. Norton 著
翟秀芬 译

11 挪威 Heidrun 油气田下侏罗统 Åre 组最新沉积与地层模式 …… (258)
Camilla Thrana Arve Næss Simon Leary Stuart Gowland Mali Brekken Andrew Taylor 著
翟秀芬 译

12 潮汐作用影响下边缘海相盆地的沉积动力学特征和层序地层序列
——以东格陵兰 Jameson Land 盆地下侏罗统 Neill Klintner 群为例 …… (292)
Juha M. Ahokas Johan P. Nystuen Allard W. Martinus 著
王 越 译

13 海平面升降、构造和气候对同裂谷期 Tilje 组混合动力三角洲沉积的控制作用 … (344)
Aitor A. Ichaso Robert W. Dalrymple 著
方 向 译

14 构造对北海北部侏罗系 Brent 群沉积构型的影响 …… (394)
Atle Folkestad Tore Odinsen Haakon Fossen Martin A. Pearce 著
吴因业 方 向 王 越 翟秀芬 等译

15 北海中生代和新生代盆地结构 …… (424)
Erlend Morisbak Jarsve Jan Inge Faleide Roy Helge Gabrielsen Johan Petter Nystuen 著
张 琴 译

16 大陆边缘和下切河谷的沉积物搬运与基准面旋回对三维正演模拟的影响 …… (463)
Didier Granjeon 著
张 琴 译

17 构造控制下北海中央地堑上侏罗统砂岩的沉积作用、侵蚀作用和再沉积作用 … (487)
Jonathan P. Wonham Ian Rodwell Tore Lein-Mathisen Michel Thomas 著
张天舒 译

18 Halten 台地 Kristin 油气田 Garn 组（巴柔阶—巴通阶）成因、相体系以及原始非
均质性模型 …… (525)
Carlo Messina Wojciech Nemec Allard W. Martinus Carsten Elfenbein 著
翟秀芬 译

19 北海 Tor 组白垩沉积中沟道的发育：底流活动的证据 …… (565)
Matteo Gennaro Jonathan P. Wonham 著
张 琴 译

20	浊流的模拟工具 MassFLOW-3D™：一些初步结果	(602)
	Riccardo Basani Michal Janocko Matthieu J. B. Cartigny	
	Ernst W. M. Hansen Joris T. Eggenhuisen 著	
	吴因业 译	
21	Ormen Lange 浊积体系：沉积饥饿盆地砂质斜坡扇的沉积结构与层序构成	(622)
	Rodmar Ravnås Andrew Cook Kristoffer Engenes Harry Germs Martin Grecula	
	Jostein Haga Craig Harvey James A. Maceachern 著	
	吴因业 译	
22	挪威北海 Hermod 扇体的地震地貌学与沉积相：揭示深海砂岩的性质	(659)
	Bjørn Kåre Lotsberg Bryn Mark Andrew Ackers 著	
	吴因业 译	

1 河流体系中常见的自旋回特征： 来自实验研究经验

George Postma 著
吴因业 译

摘要：河流体系常见自旋回特征的实质性认识进展，来自最近的景观规模实验研究，这里地层结构特征可以沿已知的输入和边界条件进行判定。结合实验工作，数值模拟和油田资料会显示不同的自旋回特征，这是因为存在以高坡度溪流为主的冲积扇型体系、中坡度的辫状河型体系和低坡度的单曲流河与网状河体系。冲积扇表面的自旋回特征表现为席状和河道化的旋回性交替，辫状河带表现为迁移的中部河道坝体周围出现小分叉河流的决口，单线河流情况下表现为一个河道分裂为两个河道。实验研究显示，加积速率直接与自旋回频率有关，绝对频率值依赖于河道中后退充填速率和得到的堆积空间。由于加积速率是所有异旋回控制因素相互作用的直接结果，那么从加积速率直接预测自旋回表现特征比间接从海平面变化、气候或构造力预测会更加符合逻辑。结果显示，如果异旋回力的变化相对河流需要改变等级（平衡时间）的时间要快，那么加积速率的变化和自旋回表现频率是最高的。如果异旋回力变化相对河流平衡时间要慢，那么自旋回表现频率也几乎不变。

关键词：自旋回；决口；加积；冲积扇；辫状河；单线河流；后退充填

冲积体系中常见自旋回表现特征，归因于冲积体系中河流迁移及侧向决口和分叉的内在性质（Beerbower, 1964；Allen, 1965；Slingerland 和 Smith, 2004）。因此，河流沉积物会在地表均一负载并沉积，直到到达最低势能带和最稳定地带（Paola 等, 2009）。这种内在特征在自然界到处可以观察到。沉积物分布通常在高坡度和中坡度河流体系更加均一，几乎没有携带细粒悬浮载荷，经历高卸载（冲积扇、冲积平原、辫状河体系），而在低坡度河流会携带丰富的悬浮载荷。第一种情况下，河岸稳定性低；第二种情况下，河岸稳定性高，河流更好地保持在原位置。如果所有冲积堆积空间被充填，河流到达一定等级（基准面），沿河道带就不出现侵蚀或沉积作用，沉积物展布和河流的决口就会中断，所有供给的沉积物就在该区过路不留（bypass）。

在自然界，定义基准面持续波动的边界条件是卸载的变化、沉积物载荷、颗粒大小等，它们影响河流斜坡和其支撑面 [河流剖面平衡点，例如岸线，见 Holbrook 等（2006）]。因此，河流体系很少在某一等级，如果保持加积，常常在侧向上分布的沉积物之间变化；如果发生侵蚀，就会沿斜坡下切，形成沉积物漏斗。展布程度取决于上坡和下坡的边界条件，随海平面、气候和构造的变化其连续性发生变化。

本文的目的是评述最近几十年对以溪流为主的冲积扇和河流体系自旋回特征的研究，尤其是基于基础原理建立新假说来预测自旋回变化频率过程中涉及的新实验结果、理论和数值研究（Kleinhans 等, 2010）。假说的使用会在几个自然研究实例中讨论。

1.1 自旋回过程

河流的变化进程由侧向迁移、决口和分叉引起 (Jones 和 Schumm, 1999)。Kleinhans (2010) 从几个曲流河的弯曲波长来研究河流进程的变化, 简单识别出分叉和决口。在分叉带, 水体和沉积物可以划分两个下游分支。决口可以是瞬间的或渐进的, 决口位置至少会临时在一个分叉上, 因为新河道发育时老河道也会活动。为了在地层重建时发挥作用, 也作为¹⁴C 定年时限定分解权限的结果, Stouthamer 和 Berendsen (2000) 定义瞬间决口作为一个决口时, 两个相邻的河道带共存要小于 200 年, 并将决口定义为渐进的 (Törnqvist, 1994)。

下面讨论的过程定向研究揭示了不同的自旋回过程: (1) 高坡度冲积扇 (具有大于 2° 的斜坡); (2) 中等坡度辫状河 (坡度大约 0.4°); (3) 低坡度曲流河或网状河。

1.1.1 高坡度冲积扇

以高坡度溪流为主的冲积扇自旋回过程从小型冲积扇模型的模拟实验得来, 这种高坡度河流体系的坡度通过席和河道化的水流变化构建而成 (Schumm 等, 1987; Bryant 等, 1995; Whipple 等, 1998)。Utrecht 大学的 Van Dijk 等 (2009, 2011) 详细分析了自旋回特征。冲积扇和扇三角洲 [后者由 Nemec 和 Steel (1988) 定义, 指冲积扇前积进入安静水体的部分] 的形成通过一个狭窄的管道 (4.5cm 宽), 注入水和沉积物。从管道中喷出的水柱在一个大沉积板 (2.5m 宽, 2.7m 下倾) 上自由扩散。观察到的地貌动力学受席状流和河道化水流的旋回性变化控制。席状流建立一个凸形扇顶, 急速下降进入中扇地区 (图 1.1)。当扇体顶部坡度到达临界值时, 水流下切扇体产生前积散布的河道化流动, 向头部侵蚀。因此, 产生在扇体顶部的沟使沉积物沿扇体产生漏斗, 形成叠缩的扇朵体, 在冲积扇坡折处和在扇三角洲岸线处出现分叉河道, 而沉积作用因溪流梯度的减少而产生。沟的后退充填开始于中部河道坝形成时, 最终把体系带回到席状流阶段和其斜坡临界点; 然后扇体下切过程和河道形成过程又开始。在 Van Dijk 等 (2009, 2012) 的实验中, 每个河道下切会堆积在前一个的顶部, 这认为是上部边界条件的现象: 一个固定的 4.5cm 宽管道, 水流流出进入扇体顶部 (Van Dijk 等, 2009)。当使用较宽的管道时, 坝会发育在扇体左右水流决口附近, 产生补偿性旋回和新的扇体即 “成扇作用” (Bryant 等, 1995; Whipple 等, 1998)。

1.1.2 中坡度辫状河体系

Ashworth 等 (2004, 2007) 通过变形后的 Froude 尺度模型对辫状河的自旋回过程作了详细研究 (Peakall 等, 1996), 主要研究了具有特征河道和中部河道坝体的辫状河平原。不同于 Bryant 等 (1995) 和 Van Dijk 等 (2009, 2011) 的模型, 本文建立的辫状河平原盆地中供给河道是上隆的, 且产生一个堆积空间 (术语参见 Blum 和 Törnqvist, 2000)。Ashworth 和其同事在数个中部河道坝体任意定义了河流的决口, 一个河道最小 30cm 的突然侧向变化, 而这个新的河道位置至少要保持 15 分钟时间。每个决口从分叉处开始, 中部河道坝体分裂出活动的河道流体, 出现两个分支, 情况同图 1.1 (D) 和 (E) 的过程相似。Sheets 等 (2002) 和 Hickson 等 (2005) 的实验在 Saint Anthony Falls 实验室进行, 完成了多次纪录, 都会产生辫状河平原, 显示自旋回过程可能与出现以溪流为主的合并冲积扇更加相似, 每个都会有特征的河道化流与席状流过程相互交替。席状流确实出现在辫状河体系, 尤其在

洪水期，但本文提及的实验研究中并不涉及其对辫状河平原本身决口过程的可能贡献。

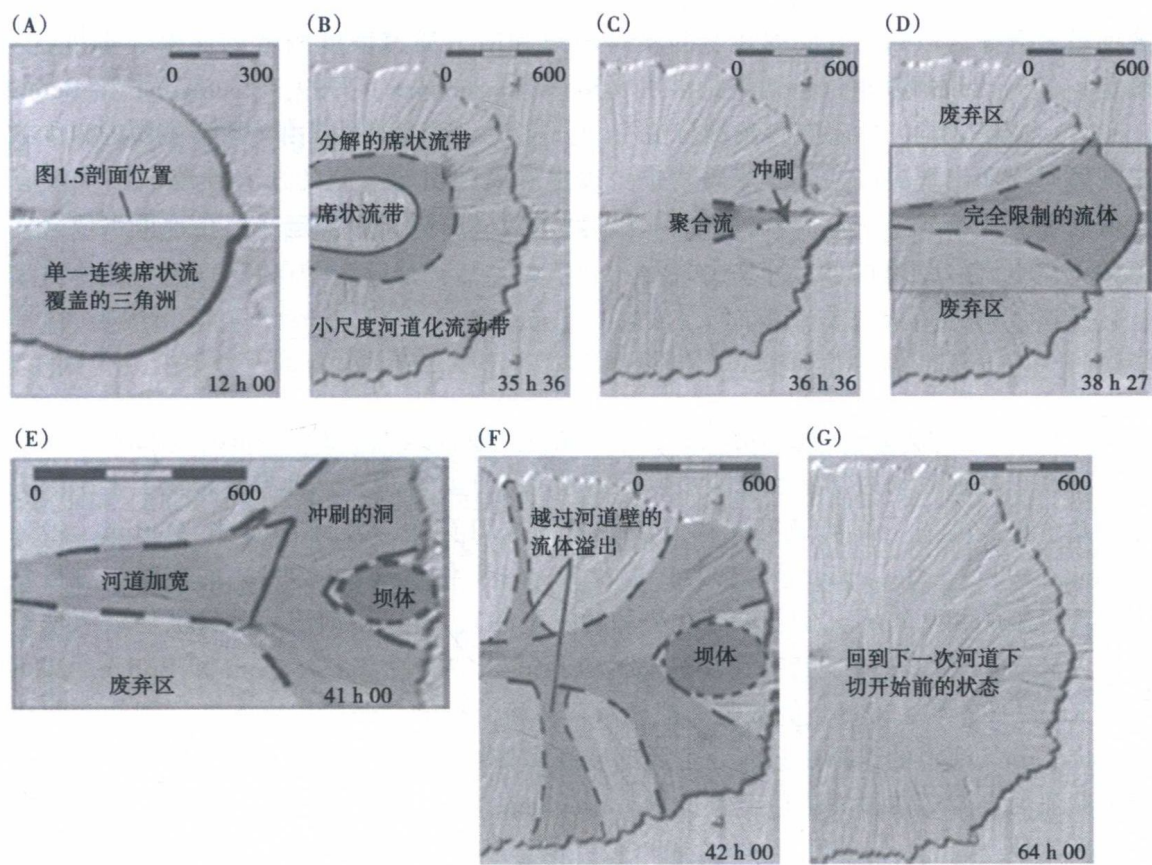


图 1.1 自旋回的阴影展示图

运行时间显示在右下角。(E) 的平面位置在 (D) 中。(A) 初始的注入转化为扩展的席状流。单一席状流产生平滑的三角洲平原地貌；(B) 随着三角洲平原席状流分解，引起小尺度河道化流体出现在岸线附近；(C) 顶部进一步加积增加了三角洲平原的坡度，到达一定点时冲刷洞开始出现在扇三角洲中心线；(D) 冲刷洞快速发育成为尼克点，上游移动且与供给河道冲刷点连接；(E) 后退充填开始出现河道河口沉积或者中部河道坝体沉积；(F) 当流体逐渐开始越过限制的河道壁并在后退充填过程中增加溢出时，发生进积的后退充填；(G) 当整个河道被充填时，分解的席状流和顶部的进积又恢复（据 Van Dijk 等，2009）

1.1.3 低坡度河流

低坡度河流类型的自旋回特征包含了所有单一线状堤岸网状河和曲流河河道体系。这种类型的实验研究聚焦于有效的加积速率和流体占有率，这几乎是不存在的，但 Hoyal 和 Sheets (2009) 创新性的黏性三角洲实验除外。在这种黏性三角洲平原实验基础上，他们发现河道（和其朵体）的决口以三个步骤发生：第一步在初始地貌影响流体的点围绕坝体加积，这会导致流体加宽，流体分叉出现“V”形，坝体表面露出陆上部分，结束坝体旋回。第二步是消极回复，包括地貌动力学上的中部回水效应，这由中部河道坝体产生。当坝体生长时，水力回水效应慢慢扩大到三角洲分流的上游，随后立即出现河床加积的波浪。当朵体继续生长，河床加积增加，在越岸流驱动下加速了陆上堤岸的生长。这就到了第三步，河床加积效应和不断前进的上游堤岸生长相结合，导致形成超高的河道，最终发现到岸线更有利的路径，即发生决口。

低坡度河流自旋回特征的另一一些研究主要基于历史的和沉积学的重建,以及数值模拟。这些重建有了一些常见的认识,关于单线河流的决口驱动力在于:(1)局部超高的河道部位或河道复合体,以高出其周围环境的横跨河道和向下河道坡度两者的比率(坡度优势)来确定;(2)出现触发事件,通常是洪水(Jones 和 Schumm, 1999; Stouthamer 和 Berendsen, 2007)或暴风雨,后者在三角洲分流中十分重要。河流洪水会由于河道容量的减少或局部出现障碍物而出现决口。流体障碍物也可以由暴风雨引起河流的迁移导致(回水效应)。对于低坡度、亚临界($Froude < 1$)的河流,回水效应由距离 L 来定义,在这里水位会适应于上游正常水流深度的 67%,评估公式为:

$$L = \frac{h}{3s}$$

式中, h 为水流深度, m; s 为河道坡度 (Van Rijn, 1994)。Hoyal 和 Sheets (2009) 在实验中发现,真正地貌动力学回水效应可以轻易地双倍于计算值,这会导致理论上上游的决口节点。几个重要的用不同河道障碍物方法触发的决口实例,来自 King 和 Martini (1984), Schumann (1989), McCarthy 等 (1992) 以及 Harwood 和 Brown (1993) 的实验。对自旋回变化驱动机制的相互作用(例如坡度优势和触发事件),可以用河流表现特征的数值模拟进行测试(Mackey 和 Bridge, 1995; Törnqvist 和 Bridge, 2002; Karssenbergh 和 Bridge, 2008)。近年来 Kleinhans 等 (2008) 的数值模拟显示,在河流初始分叉阶段,水和沉积物在两个分支上溢出,分叉河道的选择比只有一个局部坡度优势的多参数测定更加重要。其他参数是指相对于曲流河上游弯曲段的决口节点位置(Kleinhans 等, 2008),分叉河道或缺口的河道宽度—深度比值(Slingerland 和 Smith, 1998),粒度分选和局部障碍物的存在(坝体和堤岸不规则程度, Kleinhans 等, 2008)。这些参数结合在一起,可以解释为什么有些分叉几十年内就不稳定,而另一些则可以在莱茵河—默兹河河流体系中存在几个世纪(Kleinhans, 2010)。

虽然决口驱动单线河流把沉积物均匀分布在海岸低地,但是堤岸稳定性和细粒、泥炭洪泛平原与粉砂质砂质河道带的差异压实率,会使这些体系地表高度不规则,即使在高决口速率情况下(Stouthamer 和 Berendsen, 2001)。泥炭地层由于抑制侧向迁移和增加河道带的加积而影响决口。洪泛盆地的泥炭压实和氧化作用也导致河道带的放大作用减少和超高海拔(Van Asselen 等, 2009)。

黄河三角洲旋回性的决口过程由三角洲快速进积引起,又在加积作用下河流调整其河道带剖面(Kriele 等, 1998)。在某些点,加积导致横向坡度增加,引起河道在另一个方向决口。这里值得注意的是,这一过程与实验研究测定的以冲积扇溪流为主的决口初始情况进行对比,席状流增加整个顶部坡度到达不稳定水平,新的河道下切。在辫状河平原,分叉中的坡度优势不起相似的作用,而出现在更小的时间和空间尺度。

总之,冲积扇和辫状河体系的自旋回特征不同于中坡度和低坡度河流体系,最大的不同在于河道带加积的回水效应。回水作用在中等和陡坡体系实际上是缺乏的,河道的水流接近于超临界(Sheets 等, 2002; CGER, 1996; Hoyal 和 Sheets, 2009),因此应用这些体系的实验结果到低坡度河流时,要十分小心。可是,在所有案例中河道的后退充填都是决口的先决条件,因为后退充填会增加河道相对于周围环境的高度。在冲积扇体系案例中,决口触发显然与席状流引起的顶部变陡有关,如果后退充填完成就只有开始决口。在辫状河体系案例中,触发是由于一个分叉对另一个分叉增加了优势。因此辫状河的决口过程相似于单一河