

# 琼东南盆地陆架边缘 演化过程的定量研究

QIONGDONGNAN PENDI LUJIA BIANYUAN YANHUA GUOCHENG DE DINGLIANGHUA YANJIU

王 华 任金锋 刘恩涛 著



中国地质大学 出版社  
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

资助项目 国家自然科学基金面上项目(41472084)  
“十三五”国家油气重大专项子课题(2016ZX05024-006-002)  
“十二五”国家油气重大专项子课题(2011ZX05025-002-02-02)  
青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室开放基金(KC201701)

# 琼东南盆地陆架边缘演化过程 的定量研究

王 华 任金锋 刘恩涛 著



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

内容简介

本书以南海琼东南盆地为研究对象,基于几何参数和形态特征的陆架边缘轨迹、陆架边缘斜坡地形和斜坡沉积单元等定量研究方法,划分了琼东南盆地晚中新世以来陆架边缘斜坡地形的垂向演化过程,总结了陆架边缘不同演化阶段内斜坡沉积单元的内部结构及其对应的地层叠加样式,查明了不同陆架边缘轨迹类型和地层叠加样式与深水沉积富砂程度的关系,阐明了陆架边缘发育演化过程的控制因素,总结了不同因素控制背景下的研究区典型陆架边缘结构类型,并指出了研究区陆架边缘优质储层类型和发育位置。该研究对南海西北部陆架边缘含油气盆地石油及天然气的勘探和开发具有重要的指导意义。

本书侧重于在南海北部深水油气勘探的应用实践和综合分析,是笔者长期在该领域开展科学研究、国际合作与学术交流的结果。本书适用于石油地质、沉积盆地分析等相关专业的师生阅读和学习,同时也适合于从事油气勘探领域的科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

琼东南盆地陆架边缘演化过程的定量化研究/王华,任金锋,刘恩涛著. —武汉:中国地质大学出版社, 2017. 5

ISBN 978-7-5625-4050-2

- I. ①琼…
- II. ①王… ②任… ③刘…
- III. ①海底-构造盆地-石油地质学-研究
- IV. ①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 164162 号

|                                 |                   |                        |      |
|---------------------------------|-------------------|------------------------|------|
| 琼东南盆地陆架边缘演化过程的定量化研究             |                   | 王 华 任金锋 刘恩涛 著          |      |
| 责任编辑:王凤林 周 旭                    |                   | 责任校对:徐蕾蕾               |      |
| 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://cugp.cug.edu.cn |      |
| 开本:880 毫米×1230 毫米 1/16          |                   | 字数:285 千字              | 印张:9 |
| 版次:2017 年 5 月第 1 版              |                   | 印次:2017 年 5 月第 1 次印刷   |      |
| 印刷:武汉珞南印务有限公司                   |                   | 印数:1—500 册             |      |
| ISBN 978-7-5625-4050-2          |                   | 定价:68.00 元             |      |

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

# 《琼东南盆地陆架边缘演化过程的 定量化研究》

## 著作委员会

主编:王 华 任金锋 刘恩涛

编委:王振峰 甘华军 李绪深 严德天 孙志鹏

肖 军 张道军 王家豪 孙 鸣 陈 思

廖计华 林正良 刘小龙 宋广增 何 杰

# 前言

陆架边缘轨迹分析近年来已逐渐成为国际研究热点,其相应的深水砂体预测对陆架边缘深水油气勘探有着重要的指导意义。本书充分利用琼东南盆地陆架边缘现有的地震、钻井、测井及岩芯等资料,借鉴陆架边缘斜坡地形半定量—定量研究的最新进展,提出了基于几何参数和形态特征的陆架边缘轨迹、陆架边缘斜坡地形和斜坡沉积单元等的定量研究方法,划分了琼东南盆地晚中新世以来陆架边缘斜坡地形的垂向演化过程,对比了陆架边缘斜坡地形东西横向差异变化,总结了陆架边缘不同演化阶段内斜坡沉积单元的内部结构及其对应的地层叠加样式,查明了不同的陆架边缘轨迹类型和地层叠加样式与深水沉积富砂程度的关系,定量评估了研究区沉积物供给速率大小和可容纳空间高低变化,结合气候变化条件和洋流活动情况,阐明了陆架边缘发育演化过程的控制因素,总结了不同因素控制的背景下研究区典型陆架边缘的结构类型,并指出了研究区陆架边缘优质储层类型和发育位置。取得如下主要成果:①研究区陆架边缘垂向演化过程可划分为4个阶段, $S_{40}$ — $S_{30}$ 阶段陆架边缘轨迹的角度在 $0^{\circ}\sim 0.5^{\circ}$ 之间,以平缓或轻微上升型为主; $S_{30}$ — $S_{27}$ 阶段陆架边缘轨迹的角度在 $3^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 之间,研究区西部以中高角度上升型为主,东部以超高角度急剧上升型为主; $S_{27}$ — $S_{20}$ 阶段陆架边缘轨迹的角度在 $0.2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 之间,以低角度缓慢上升型为主; $S_{20}$ — $S_0$ 阶段陆架边缘轨迹的角度在 $3^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 之间,以高角度上升型为主。②研究区发育9种典型的斜坡沉积单元内部形态特征,分别是斜交型、斜切型、不规则斜切型、不对称顶厚型、不对称底厚型、对称式S型、发散式S型、不规则S型和复合型。 $S_{40}$ — $S_{30}$ 时期以斜交型、斜切型和不对称底厚型为主; $S_{30}$ — $S_{27}$ 时期研究区西部以复合型为主,东部以不对称顶厚型为主; $S_{27}$ — $S_{20}$ 时期以发散式S型和对称式S型为主; $S_{20}$ — $S_0$ 时期以不规则S型和不对称顶厚型为主。③ $S_{40}$ — $S_{30}$ 时期的斜坡沉积单元以强烈进积型的地层叠加样式为主; $S_{30}$ — $S_{27}$ 时期研究区西部斜坡沉积单元以进积和加积混合型的地层叠加样式为主,而东部以强烈加积型的地层叠加样式为主; $S_{27}$ — $S_{20}$ 时期以进积和加积混合型的地层叠加样式为主; $S_{20}$ — $S_0$ 时期以加积型的地层叠加样式为主。④在平缓或轻微上升型轨迹类型的背景下,深水区主要发育富砂型海底扇、富砂型峡谷水道复合体和富砂型砂泥互层沉积(含砂率 $>30\%$ );在低角度上升型轨迹类型的背景下,深水区主要发育砂泥混合型小规模峡谷水道、天然堤—溢岸沉积和深水朵体沉积(含砂率 $15\%\sim 30\%$ );在高角度上升型轨迹类型的背景下,深水区主要发育富泥型小规模薄层块体流和大规模块体流复合体(含砂率 $<15\%$ )。⑤通过加积速率( $R_a$ )、进积速率( $R_p$ )和横断面的净沉积物通量( $F_c$ )评估了沉积物供给速率的大小,将研究区陆架边缘加积速率在 $0\sim 500\text{m}/\text{Ma}$ 、进积速率在 $0\sim 12.5\text{km}/\text{Ma}$ 、沉积物通量在 $0\sim 5\text{km}^2/\text{Ma}$ 之间的沉积物供给速率定义为低沉积物供给,将加积速率在 $500\sim 800\text{m}/\text{Ma}$ 、进积速率在 $12.5\sim 50\text{km}/\text{Ma}$ 、沉积物通量在 $5\sim 20\text{km}^2/\text{Ma}$ 之间的沉积物供给速率定义为高沉积物供给。通过陆架边缘轨迹角度 $\alpha$ 和斜坡地形坡角 $\beta$ 估算陆架边缘可容纳空间大小,将研究区陆架边缘轨迹角度在 $-1^{\circ}\sim 0.5^{\circ}$ 之间和斜坡地形坡角在 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 之间的陆架边缘定义为低可容纳空间型,陆架边缘轨迹角度在 $0.5^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 之间和斜坡地形坡角在 $2^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 之间的陆架边缘定义

为中可容纳空间型,陆架边缘轨迹角度大于  $3^{\circ}$  和斜坡地形坡角大于  $6^{\circ}$  的陆架边缘定义为高可容纳空间型。⑥研究区西部发育 4 种类型的陆架边缘结构类型:a. 低沉积物供给+低可容纳空间+较小的洋流活动+干旱气候;b. 低沉积物供给+中可容纳空间+较小的洋流活动+多变气候;c. 高沉积物供给+中可容纳空间+较大的洋流活动+多变气候;d. 高沉积物供给+高可容纳空间+较大的洋流活动+多变气候。研究区东部发育两种类型的陆架边缘结构类型:a. 低沉积物供给+中可容纳空间+较小的洋流活动+干旱气候;b. 低沉积物供给+高可容纳空间+较大的洋流活动+多变气候。⑦低  $\delta(x)$  和干旱气候是发育富砂型峡谷水道形成的关键,中  $\delta(x)$  和低  $\beta$  是富砂型深水朵体和斜坡扇形成的关键,高  $\delta(x)$ 、窄陆架与河流输入是发育富砂型透镜状海底扇形成的关键。

本文的创新点主要体现在 3 个方面:①提出了一种研究陆架边缘斜坡地形时空演化过程和内部结构变化的定量表征方法;②总结了不同类型陆架边缘的沉积物堆积机制;③提出了陆架边缘结构变化控制因素的定量估算方法。

本书是中国地质大学(武汉)与中海油湛江分公司长期密切合作、集体智慧的结晶。编写分工是:前言、第一章由王华、任金锋、刘恩涛、王振峰执笔;第二章由任金锋、甘华军、李绪深、肖军、何杰执笔;第三章由刘恩涛、严德天、王家豪、孙志鹏、陈思、孙鸣执笔;第四章由任金锋、王华、廖计华、林正良、刘小龙、宋广增执笔;第五章由王华、甘华军、肖军、刘恩涛、张道军执笔;第六章由任金锋、王华、王振峰、孙鸣执笔;参考文献由廖计华、林正良、刘小龙、何杰、陈思等全体人员综合整理;全书最后由王华、任金锋和刘恩涛进行统稿。

本书在资料准备、编写与出版过程中始终得到了中国海洋石油有限公司执行副总裁谢玉洪,中海油湛江分公司杨计海总地质师,勘探开发部姜平经理、裴健翔经理,科技与信息化部童传新经理,研究院张迎朝院长、周家雄副院长、杨希冰地质总师等多位领导的帮助和关切。在项目执行过程中,总公司黄保家专家、分公司研究院肖安涛经理、陈殿远经理、郝德峰经理、黄安敏副经理、钟泽红副经理、赵小鹏专家给予了热情的帮助与支持,在此表示感谢。

本书的出版得益于国家自然科学基金项目“莺歌海盆地黄流组大型高效储集体-浅海重力流沉积体的堆积机制研究(41472084)”“十三五”国家油气重大专项子课题“北部湾盆地涠西南凹陷、乌石凹陷,珠江口盆地文昌凹陷古近系高精度层序地层解释、沉积相与储集砂体预测研究(2016ZX05024-006-002)”“十二五”国家油气重大专项子课题“南海西北部深水区古近系沉积相及烃源岩识别和储层评价(2011ZX05025-002-02-02)”以及青岛海洋科学与技术国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室开放基金(KC201701)的共同资助。同时,感谢中国地质大学(武汉)的李思田教授、解习农教授、任建业教授、陆永潮教授、姚光庆教授、杨士恭教授等的多次学术交流、协助与指导!中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业的多位博士(秦春雨、姜华、曹海洋、金思丁、李媛、赵淑娥、赵睿)、硕士研究生(赵彦璞、余江浩、王苗、刘杰、任桂媛、李彦丽、潘凯)在文图编排及在出版过程中的图文编辑等方面均付出了辛勤的劳动和汗水。在此,本书的编者向他们一并表示衷心的感谢!

由于著者们的研究水平和工作经验有限,对于琼东南盆地陆架边缘演化方面的认识、分析和总结定会有存在不足和欠妥之处,欢迎读者们予以指正。

# The quantitative evolution of shelf – marginclinoforms in Qiongdongnan Basin, South China Sea

Hua Wang, Jinfeng Ren, Entao Liu

## ABSTRACT

Shelf – edge trajectory analysis has received much attention, and has been the subject of increasingly intense study in recent years. The prediction of deep – water sands that can be tied to specific types of shelf – edge trajectories will help to assist greatly in locating deep – water reservoirs and in developing predictive stratigraphy. This dissertation uses two – dimensional (2 – D) and three – dimensional (3 – D) seismic, core, logging curves and acoustic impedance data in Qiongdongnan Basin to propose quantitative measurement methods for shelf – edge trajectories, shelf – edge clinoforms and clinothem based on their types, shapes and geometric parameters; investigate the vertical migration evolution of shelf – margin clinoforms since late Miocene in Qiongdongnan Basin; document the lateral difference between western and eastern shelf – margin clinoforms; summarize clinothem internal architecture and their stratal stacking patterns; discuss relationships between shelf – edge trajectories and regional stacking patterns with styles of deep – water sedimentation and volumes of coevally deposited deep – water sandstones; estimate semi – quantitatively the magnitude of sediment supply and shelf accommodation; address the controlling factors of the evolution of shelf – margin clinoforms; propose a quaternionic classification system for shelf – margin architecture based on the interplay of sediment supply, accommodation, climate and current – controlled processes; and predict the types and location of sand – prone deep – water depositional systems and coeval deep – water reservoirs. The main achievements made by this dissertation are listed as follows. 1) Four main shelf – edge trajectories are recognized in seismic profiles: the first phase contains shelf edges that are strongly progradational with a flat to slightly rising shelf – edge trajectory ( $0^{\circ} \sim 0.5^{\circ}$ ); the second phase includes shelf edges that moderately progradational with low – angle rising shelf – edge trajectory ( $0.2^{\circ} \sim 3^{\circ}$ ); the third phase contains shelf edges that strongly aggregational with high – angle rising shelf – edge trajectory ( $3^{\circ} \sim 9^{\circ}$ ); the fourth phase includes shelf edges that vertically aggregational with ultra – high – angle rising shelf – edge trajectory ( $10^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ). 2) The nine types of the observed clinothems are identified in the research: Oblique, Tangential oblique, Tangential oblique chaotic, Sigmoidal symmetrical, Sigmoidal divergent, Sigmoidal chaotic, Asymmetrical top – heavy, Asymmetrical bottom – heavy and Complex. Oblique, Tangential oblique and Asymmetrical bottom – heavy are mainly developed during the  $S_{40} - S_{30}$ ; Complex is mainly developed in the western studied area during the  $S_{30} - S_{27}$ , Asymmetrical top – heavy is mainly developed in the eastern studied area during the  $S_{30} - S_{27}$ ; Sigmoidal symmetrical and Sigmoidal divergent are mainly developed during the  $S_{27} - S_{20}$ ; Sigmoidal chaotic and Asymmetrical top – heavy are mainly developed during the  $S_{27} - S_{20}$ . 3) Progradational or slightly downstepping stacking patterns are identified in  $S_{40} - S_{30}$ ; Mixed progradational and aggradational stacking patterns are identified in western  $S_{30} - S_{27}$  and  $S_{27} - S_{20}$ ; Dominantly aggradational stacking patterns are identified in east-

ern  $S_{30}-S_{27}$  and  $S_{20}-S_0$ . 4) Flat to slightly falling shelf - edge trajectories and progradational or slightly downstepping stacking patterns are associated with sand - rich submarine fan, canyon channel sand complex (sand - bearing ratios  $>30\%$ ); slightly rising shelf - edge trajectories and progradational and aggradational stacking patterns are fronted by mixed sand/mud small - scale channel sand, levee - overbank sediments and deep - water lobes ( $15\% < \text{sand - bearing ratios} < 30\%$ ); steeply rising shelf - edge trajectories and dominantly aggradational stacking patterns are linked to a really extensive mass - transport systems (sand - bearing ratios  $<15\%$ ). 5) The approximate magnitude of sediment supply can be evaluated by determining the aggradation rate ( $R_a$ ), the progradation rate ( $R_p$ ), and the cross - sectional net sediment flux ( $F_c$ ). Low supply (low  $Q_s$ ) is measured as  $R_a$  of  $<500\text{m/Ma}$ ,  $R_p$  of  $<12.5\text{km/Ma}$ , and  $F_c$  of  $<5\text{km}^2/\text{Ma}$  and high supply (high  $Q_s$ ) is measured as  $R_a$  of  $>500\text{m/Ma}$ ,  $R_p$  of  $>12.5\text{km/Ma}$ , and  $F_c$  of  $>5\text{km}^2/\text{Ma}$ . Estimates of the magnitude of shelf accommodation can be determined from the magnitude of shelf - edge trajectory angle and contemporaneous overall slope angle. Flat to slightly falling and slightly rising shelf - edge trajectories naturally and low overall slope angle (represented by  $2^\circ < \beta < 6^\circ$ ) reflect a low accommodation; moderately rising trajectories and low overall slope angle (represented by  $2^\circ < \beta < 6^\circ$ ) are symptomatic of medium accommodation; steeply rising trajectories and high overall slope angle (represented by  $\beta > 6^\circ$ ) are suggestive of high accommodation. 6) The effects of variations in the interplay of sediment supply, accommodation, climate and Surface Water mass on architectural styles of shelf - margins have been semi - quantitatively investigated. Four different types of western shelf - margins are recognized during the scenario evolution: a. low  $Q_s$  + low  $\delta(x)$  + weak Surface Water mass + arid climate; b. low  $Q_s$  + medium  $\delta(x)$  + weak Surface Water mass + variable monsoon; c. high  $Q_s$  + medium  $\delta(x)$  + strong Surface Water mass + variable monsoon; d. high  $Q_s$  + high  $\delta(x)$  + strong Surface Water mass + variable monsoon. Two different types of eastern shelf - margins are recognized during the scenario evolution: a. low  $Q_s$  + medium  $\delta(x)$  + weak Surface Water mass + arid climate; b. low  $Q_s$  + high  $\delta(x)$  + strong Surface Water mass + variable monsoon. 7) Low  $\delta(x)$  and arid climate are extremely important for forming sandy submarine fans or canyon channel; medium  $\delta(x)$  and low overall slope angle with moderately rising shelf - edge trajectories tend to foster sand - rich deep - water lobes and high stand slope fans; high  $\delta(x)$ , narrow shelf width and river input from Hainan Island yielded sand - prone lenticular submarine fans.

The highlights of this research indicate that 1) a methodology was developed for the quantitative analysis of clinoform and clinotherm architectures, 2) accumulation mechanisms were built for sand - and sediment - budget partitioning into and across the shelf, and 3) estimation methods were approached the magnitude of sediment supply and shelf accommodation for shelf - margin architecture variability.

This book is crystallization of long term collaboration between China University of Geosciences (Wuhan) and Zhanjiang Branch, National Offshore Oil Corporation (CNOOC). The introduction and Chapter 1 were written by Hua Wang, Jinfeng Ren, Entao Liu and Zhenfeng Wang; Chapter 2 were written by Jinfeng Ren, Huajun Gan, Xushen Li, Jun Xiao and Jie He; Chapter 3 were written by Entao Liu, Detian Yan, Jiahao Wang, Zhipeng Sun, Si Chen and Ming Sun; Chapter 4 were written by Jinfeng Ren, Hua Wang, Jihua Liao, Zhengliang Lin, Xiaolong Liu and Guangzeng Song; Chapter 5 were written by Hua Wang, Huajun Gan, Jun Xiao, Entao Liu and Daojun Zhang; Chapter 6 were written by Jinfeng Ren, Hua Wang, Zhenfeng Wang and Ming Sun; references were edited by Jihua Liao, Zhengliang Lin, Xiaolong Liu, Jie He and Si Chen; the final revision were edited by Hua Wang, Jinfeng Ren and Entao Liu.

We thanks Executive Vice – President Yuhong Xie from CNOOC, General Geologist Jihai Yang, General Manger Ping Jiang, Manger Jianxiang Pei, Manger Chuanxin Tong, Dean Ping Jiang, Deputy Dean Jiaxiong Zhou, General Geologist Xibing Yang and colleagues from Zhanjiang Branch, CNOOC for their great help and supporting during the data preparing, edit and press process of this book. In addition, we extend our heartfelt thanks to the Experts Baojia Huang, Antao Xiao, Dianyuan Chen, Defeng Hao, Anmin Huang, Yihong Zhong and Xiaopeng Zhao from Zhanjiang Branch, CNOOC for their kind assistance and strong support.

This book is benefited from financial support of China National Natural Science Foundation (Grant No. 41472084), National Science and Technology oil and gas project “thirteen five – year plan” (2016ZX05024 – 006 – 002) , National Science and Technology oil and gas project “Twelfth five – year plan” (2011ZX05025 – 002 – 02 – 02) and Open Fund (KC201701) of Evaluation and Detection Technology Laboratory of marine mineral resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology. We are also extremely grateful to Prof. Sitian Li, Prof. Xinong Xie, Prof. Jianye Ren, Prof. Yongchao Lu, Prof. Guangqing Yao, and Prof. Shigong Yang from China University of Geosciences (Wuhan) for their communications and suggestions in sequences stratigraphy. We would like to thank doctoral students (Chunyu Qin, Hua Jiang, Haiyang Cao, Siding Jin, Yuan Li, Shue Zhao, Rui Zhao) and graduated students (Yanpu Zhao, Jianghao Yu, Miao Wang, Jie Liu, Guiyuan Ren, Yanli Li and Kai Pan) from mineral resource prospecting and exploration major of China University of Geosciences (Wuhan) for their hard work and contributions in figures edit and press processes.

Due to the limitation of the knowledge and work experiences of the authors, we must have some defects in the study of shelf – margin clinoforms in Qiongdongnan Basin. Comments and suggestions from our readers, which will help improve this study, are more than welcome.

目 录

第一章 陆架边缘斜坡地形的研究现状 ..... (1)

    第一节 陆架边缘斜坡地形的研究现状 ..... (1)

    第二节 琼东南盆地陆架边缘的研究进展 ..... (11)

第二章 琼东南盆地区域地质概况 ..... (14)

    第一节 区域地质概况 ..... (15)

    第二节 盆地构造特征 ..... (17)

    第三节 盆地沉积充填特征 ..... (20)

    第四节 晚中新世以来层序格架特征 ..... (22)

第三章 琼东南盆地陆架边缘轨迹定量分析 ..... (29)

    第一节 陆架边缘轨迹和斜坡地形的定量化参数 ..... (29)

    第二节 陆架边缘轨迹和斜坡地形的垂向变化 ..... (35)

    第三节 陆架边缘轨迹和斜坡地形的横向差异变化 ..... (43)

    第四节 陆架边缘轨迹和斜坡地形的时空演化规律 ..... (48)

第四章 琼东南盆地斜坡沉积单元定量研究 ..... (55)

    第一节 陆架边缘斜坡沉积单元的几何参数特征 ..... (55)

    第二节 陆架边缘斜坡沉积单元的形态特征 ..... (76)

    第三节 不同演化阶段斜坡沉积单元地层叠加样式 ..... (85)

第五章 琼东南盆地陆架边缘的沉积物堆积机制 ..... (88)

    第一节 不同轨迹类型陆架边缘的沉积物最易堆积位置 ..... (88)

    第二节 陆架边缘轨迹与深水沉积体富砂程度研究 ..... (94)

第六章 琼东南盆地陆架边缘的控制要素及其结构变化 ..... (107)

    第一节 沉积物供给的定量评估 ..... (107)

    第二节 可容纳空间的定量评估 ..... (112)

    第三节 气候变化 ..... (119)

第四节 洋流活动..... (119)

第五节 陆架边缘的结构类型..... (122)

第六节 不同陆架边缘优质储层形成的关键因素..... (126)

后 记 ..... (128)

参考文献 ..... (129)

# 第一章 陆架边缘斜坡地形的研究现状

## 第一节 陆架边缘斜坡地形的研究现状

### 一、陆架边缘斜坡地形的概念

斜坡地形是指沉积地层向深水区进积或前积形成的 S 型倾斜沉积面,由顶积、前积和底积 3 部分组成。在被动大陆边缘,一般发育两种类型的斜坡地形,一是靠近滨岸的斜坡地形,称滨线斜坡地形 (Shoreline clinoform),该斜坡地形的底积部分水深在 5m 到几十米之间,斜坡地形坡角一般小于  $1^{\circ}$ ;二是位于陆架-陆坡-盆底 (Shelf - slope - basin) 的斜坡地形,称作陆架边缘斜坡地形 (Shelf - edge clinoform),该斜坡地形的顶积部分水深一般在 20~200m,顶积层的坡度一般小于  $1^{\circ}$ ,而底积部分水深为几百米至上千米,斜坡地形坡角一般小于  $6^{\circ}$ (图 1-1)。因此陆架边缘斜坡地形是连接深水与浅水沉积的关键部位,也是陆源沉积物被运输到深水区所经路径的关键位置之一。

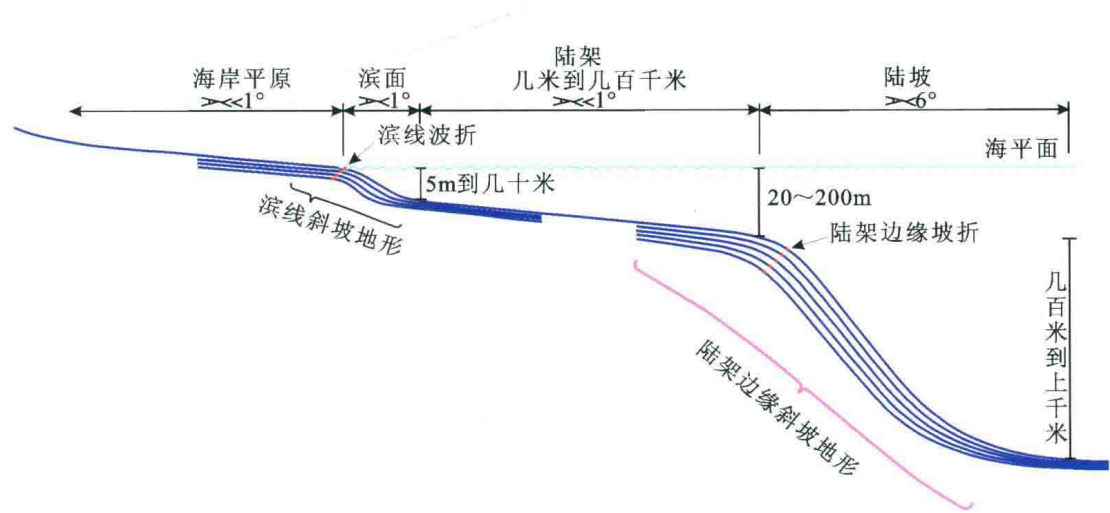


图 1-1 陆架边缘斜坡地形的简易示意图 (Helland - Hansen & Hampson, 2009, 修改)

近年来,大陆尺度级别的陆架边缘斜坡地形由于其全球广泛分布性和对盆地区域背景条件变化的敏感性而被国外众多学者研究,研究内容包括深水沉积体系对相对海平面变化的响应及预测深水沉积的堆积过程(表 1-1,图 1-2)。因此,陆架边缘斜坡地形的研究有利于更进一步认识沉积环境与沉积体的进积、加积和退积之间的关系,同时对沉积物配置、陆架边缘结构与陆架边缘形成影响因素之间的相互关系的研究也有利于理清陆架边缘的源-汇问题。

表 1-1 近年来陆架边缘典型研究实例统计

| 学者和年份                            | 研究区区域                        | 研究时代                    | 数据类型                                 | 研究内容                                  |
|----------------------------------|------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| Helland - Hansen & Hampson, 2009 | Several                      | Several                 | Field outcrop/seismic                | Shelf - edge & shoreline (Conceptual) |
| Olariu & Steel, 2009             | Several                      | Recent                  | Bathymetry, computer simulation      | Shelf - edge/shoreline (Conceptual)   |
| Wild, et al. , 2009              | Karoo Basin, South Africa    | Permian                 | Field outcrops and sedimentary cores | Shelf - edge & Shoreline              |
| Houseknecht, et al. , 2009       | North slope Alaska           | Cretaceous              | Field outcrops, seismic and wells    | Shelf - edge                          |
| Midtkandal & Nystuen, 2009       | Svalbard                     | Cretaceous              | Field outcrops                       | Shelf - edge                          |
| Ryan, et al. , 2009              | Porcupine Basin, Ireland     | Tertiary, Eocene        | Seismic and wells                    | Shelf - edge                          |
| Moller, et al. , 2009            | Southern North Sea           | Miocene                 | Seismic and wells                    | Shelf - edge                          |
| Rasmussen, 2009                  | Denmark                      | Miocene                 | Field outcrop, seismic and wells     | Shelf - edge/shoreline                |
| Kertzus, 2009                    | Ebro Delta                   | Miocene - Recent        | Seismic and wells                    | Shelf - edge & Shoreline              |
| Sanchez, et al. , 2012           | Northwest Shelf of Australia | Miocene to Pliocene     | Seismic                              | Shelf - edge                          |
| Jones, et al. , 2015             | Karoo Basin, Africa          | Permian - Jurassic      | Outcrops                             | Shelf - edge                          |
| Dixon, 2013                      | Santos Basin Brazil          | Eocene                  | Seismic and wells                    | Shelf - edge                          |
| Moscardelli, et al. , 2012       | Eastern offshore Trinidad    | Pleistocene to Holocene | Seismic                              | Shelf - edge                          |
| Patruno, et al. , 2015           | Offshore Norway              | Upper Jurassic          | Seismic and wells                    | Shelf - edge                          |
| Salazar, et al. , 2015           | Taranaki Basin, New Zealand  | Pliocene - Recent       | Seismic and wells                    | Shelf - edge/Cliniform                |
| Anell & Midtkandal, 2015         | Taranaki Basin, New Zealand  | Plio - Pleistocene      | Seismic and wells                    | Shelf - edge/Clinothem                |
| Gong, et al. , 2015              | Northern South China Sea     | Miocene - Recent        | Seismic and wells                    | Shelf - edge trajectory               |

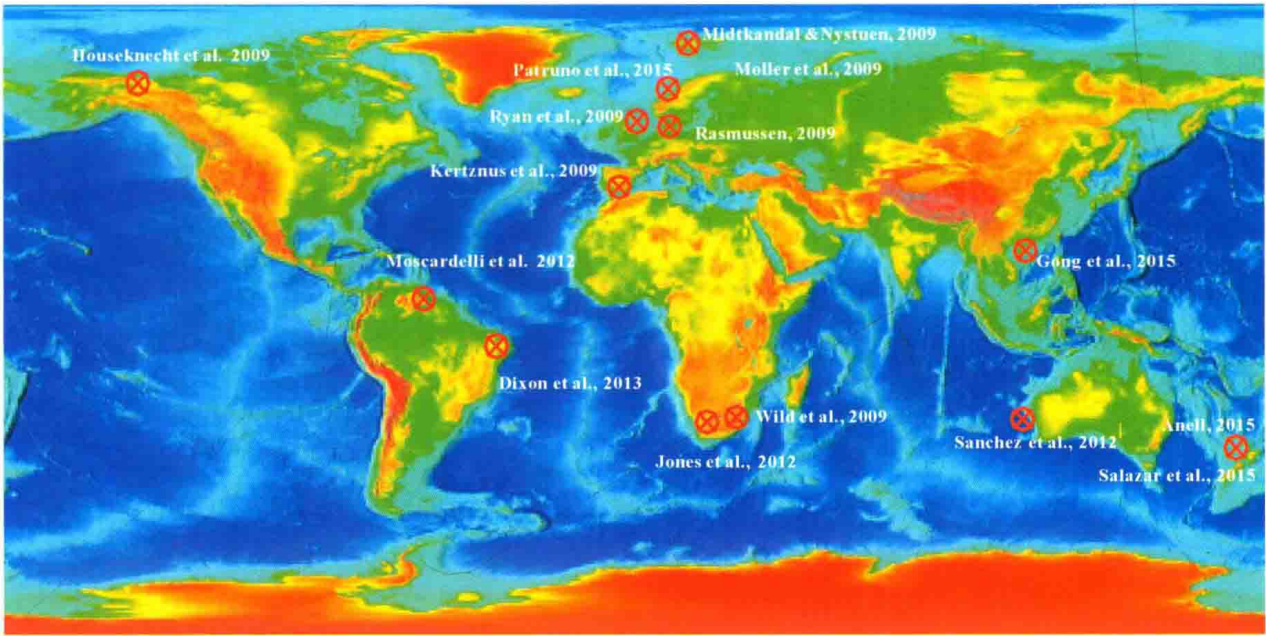


图 1-2 陆架边缘斜坡地形研究实例的分布图

二、陆架边缘的研究进展

1. 陆架边缘轨迹 (Shelf-edge trajectory)

层序地层学已成为一种得到广泛认可的研究岩相序列的分析工具。20 世纪 70 年代到 80 年代中期形成的层序地层学基本原理大都认为层序的形成受到海平面变化过程的控制,并通过具有倾斜沉积的地层结构模型来表达(图 1-3)。这些层序模型的形成基于以下几个假设:①通常以一个陆架-斜坡-盆地底部为特征的古地形为基底;②具有一个相对稳定的沉积物源供应;③符合正弦曲线的海平面升降变化过程;④在海平面下降阶段,所有的沉积物都以过路不沉积的方式通过海岸平原和陆架被递送到盆地底部;⑤盆地底部的沉积序列一般都与下降或低海平面变化有关。

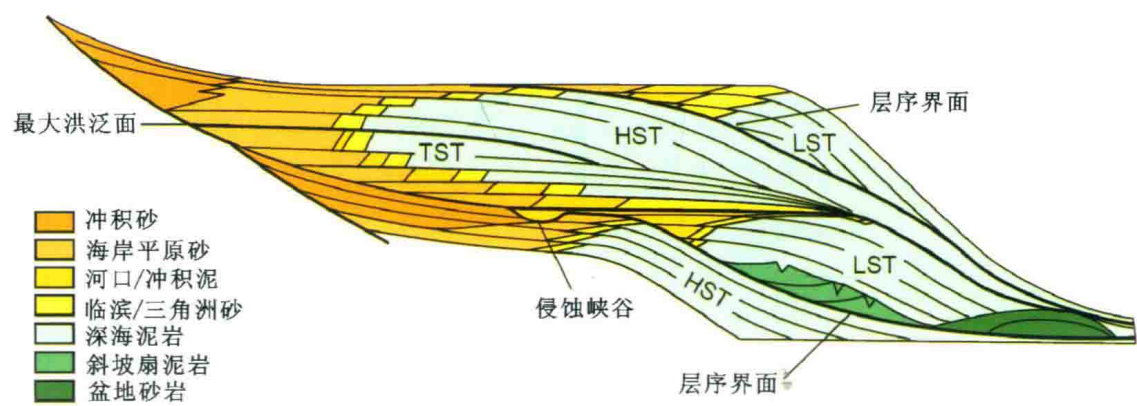


图 1-3 层序模型(Vail,1987)

随着层序地层学概念的成熟,许多假设被认为不具现实性和过于简单化。很多学者对其进行了修正;如 Van Wagoner(1987,1988)等讨论了以倾斜界面为背景的层序发育特征;Galloway(1989)和 Schlager(1993)强调了沉积物供应多少在层序形成过程中的作用;Miall(1986,1992)则重点强调了海平

面变化和相应的海平面升降曲线中海平面升降的驱动机制;Kolla(1988)和 Galloway(1989)重点讨论了相对海平面上升过程中盆底扇沉积的形成;Hunt(1995)和 Posamentier(1992)等则着重介绍了海平面下降过程中滨海沿岸的沉积特征。随着研究的不断深入,相对海平面变化、可容纳空间和强制性海退也逐渐列入层序地层学术语中。随后海平面升降、局部构造沉降和抬升、相对海平面变化、沉积物供应也逐渐被认为是控制层序地层格架中地层叠加样式或层序结构特征变化的主控因素(图 1-4)。

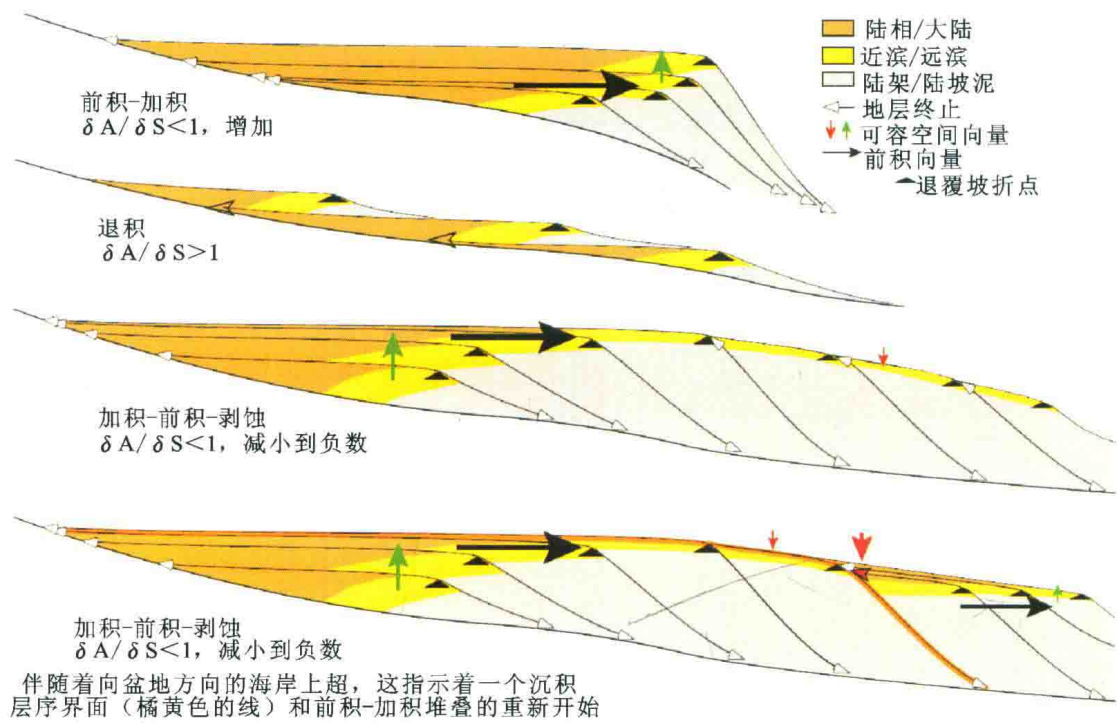


图 1-4 不同可容纳空间增长和沉积充填变化速率下的地层叠加速率(Neal,2009)

陆架边缘层序结构特征的控制因素分析则认为沉积物供应是最大的控制因素,大于海平面升降及构造沉降和抬升的控制作用。而这种沉积物供应的控制可通过沉积体系中滨线轨迹和陆架边缘轨迹的变化来表达。

轨迹分析(Trajectory analysis)是对基于古地貌特征中相应沉积环境的横向和垂向迁移过程的研究,强调的是迁移路径和迁移方向,有利于提升对古环境变化情况和变化过程中岩性分布特征的进一步认识。小到点砂坝的侧向迁移,大到大陆边缘的进积过程,尽管任何尺度范围内的轨迹变化都能够被分析,但目前为止,该术语主要还是被应用于两种时间尺度内倾斜沉积序列的二维研究:①滨线和相应的滨海沉积体系的迁移样式;②陆架边缘和与其相关的陆架、陆坡以及盆底沉积体系的迁移样式。滨线轨迹(Shoreline trajectory)表征的是滨线迁移过程的横截面路径,而陆架边缘轨迹表征的是一系列叠加增长的陆坡地形发育过程中陆架边缘所记录的路径。它们的共同点是:第一,它们的古地理特征都倾向于表达成一个在陆坡上的坡折(A break-in-slope),都可用于勾绘沉积体系的横向和垂向移动。第二,陆架边缘的坡折点分割了陆架和陆坡,陆坡上主要发生块体流等重力流作用,导致沉积物的再沉积、过路不沉积和水道化,而陆架之上则被认为存在来自陆架以外能量的控制,包括潮汐、波浪作用或河流作用。但在轨迹变化尺度上存在明显不同,滨线轨迹明显受控于沉积物供应、高频(四级或更高)的相对海平面变化和盆地古地理特征的相互作用,而陆架边缘轨迹通常反映的是低频(三级)的相对海平面变化和更高级的相对海平面变化和沉积物供应速率的相互作用,因此在大陆边缘陆架棱镜状沉积体的前积通常发生在三级或更低等级的时间尺度上。因此,一个陆架边缘轨迹对长周期和大规模的相对海平面变化和沉积物供应速率联合变化的响应,可能与尺度上重复和垂向上叠加的加积在陆架上的滨线体系(准层序组)相当。通常陆架边缘轨迹可通过地震剖面分辨出来(图 1-5),具体地,单个地震反射一般

对应于单个准层序,多个地震反射组合可代表退覆的陆架边缘斜坡地形,因此,伴随的轨迹经常是离散点标注而不是连续的迁移。陆架边缘的轨迹可划分为上升、平缓 and 下降 3 种类型。平缓 and 下降型轨迹可形成斜交式前积的地震样式而上升型轨迹可形成 S 型的地震样式。

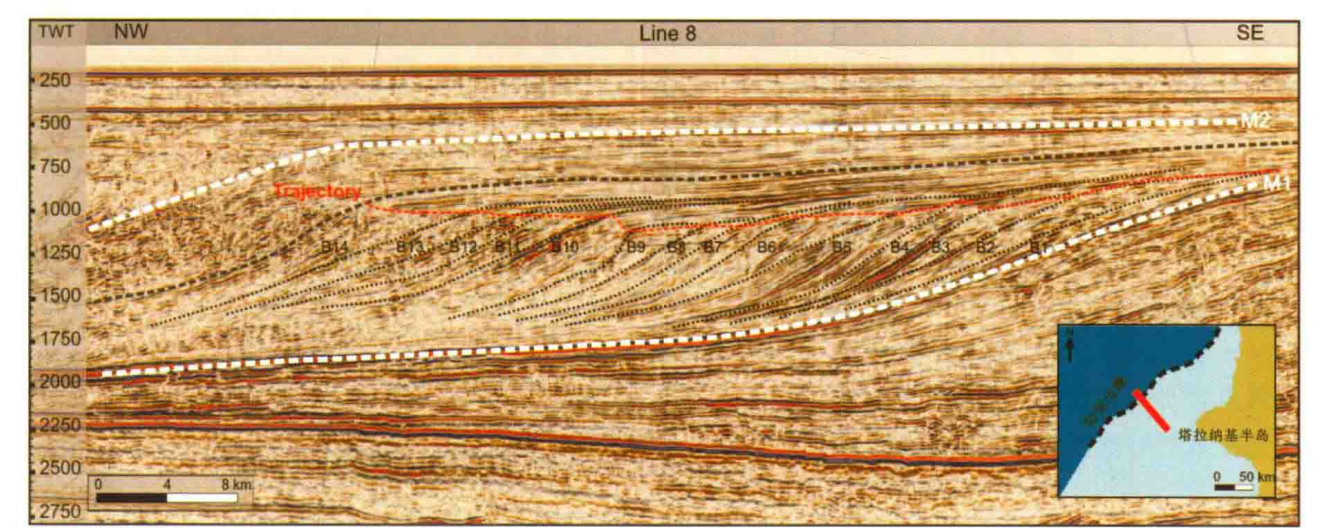


图 1-5 陆架边缘轨迹的地震响应特征(Anell & Midtkandal,2015 修改)

陆架边缘轨迹分析提供了一种客观存在的研究地层序列的方法。该方法同时与很多其他的层序地层学的概念相融合,它可能使相对海平面变化与陆架边缘演化阶段或轨迹变化样式相关联。轨迹分析强调的是观察结果而不是建立以驱动机制为前提条件的术语或方法,因此在使用过程中是务实的,而不是强加在沉积背景上的一个独立的模板。在很多基于层序模式的地层序列解释失败时,轨迹分析却可以很好地揭示其变化,因此轨迹分析为层序地层学分析过程中弊端的改善提供了强有力的保障。轨迹分析可以观测到一个不断演化的过程中沉积体系的地层叠加样式,强调了层序地层学是一个地层分析的动态工具。

2. 斜坡地形 (Clinoform)

识别陆架边缘轨迹(陆架边缘坡折点)及它们的迁移样式,首先要识别斜坡地形。该术语最常见的使用是在整个的 S 型(顶积-前积-底积)沉积曲面形态中。原始的斜坡地形概念由 Rich(1951)提出,用于指代 S 型曲面的斜坡部分,而 Steel 提出的斜坡地形则是与地层前积到深水有关联的倾斜沉积表面有关,由 3 个几何要素组成:①顶积面——斜坡中水最浅、角度最低的区域;②前积面——中部地形最陡的区域;③底积面——延伸到盆地的平坦区域。陆架-斜坡-盆地的斜坡地形(Shelf - slope - basin clinoforms)记录了一个陆架边缘的前积过程,斜坡高度高达几百米或更高。斜坡地形的顶积-前积弯折处即为陆架边缘的位置,该点在现代陆架体系的水深一般在 20~200m 之间。而这些陆架通常形成于一段时期内相对海平面下降或三角洲向陆架边缘迁移的过程中。滨线斜坡地形包括由三角洲前积而形成的斜坡地形和障壁岛滨线及海岸平面,一般可达几十米的高度,斜坡地形的顶积-前积翻转处位于滨线附近。包含多个斜坡地形的地层组合(Stratal packages)和陆架边缘坡折通常都是由于沉积剖面的向海迁移而形成的。这主要是因为反映大规模古地理特征的沉积剖面的向盆地方向一般是接近平缓的或倾斜的,在该方向上为沉积物的堆积增长提供了足够的沉积空间。通常向陆方向迁移的沉积剖面一般很难保存下来一个完整的斜坡地形,主要是由于沉积剖面的迁移一般都倾向于古地理斜坡而不是远离,造成向陆方向迁移体系的轨迹比向海方向迁移体系在轨迹上更容易形成大规模的横切沉积剖面的斜坡。

基于不同的陆架边缘轨迹类型,总结出 4 种不同类型的陆架边缘斜坡增长样式(Growth styles of shelf - margin clinoforms):①轻微下降型斜坡地形增长样式——对应于下降型陆架边缘轨迹,由陆架

边缘三角洲为来源形成的斜坡地形和被河流水道冲刷而形成的切割型斜坡地形组成,该河流相水道一般延伸至陆坡上的峡谷中;②强烈进积型斜坡地形增长样式——对应于低角度上升型陆架边缘轨迹,由缺乏下切和峡谷发育的陆架边缘三角洲组成;③加积和进积混合型斜坡地形增长样式——对应于中等角度上升型陆架边缘轨迹,由浪控陆架边缘三角洲组成,在陆坡上形成多期薄层席状砂;④高度加积型斜坡地形增长样式——对应于高角度上升型陆架边缘轨迹,由陆架三角洲组成,该陆架三角洲沉积物并没有被输送到陆架边缘沉积,而只是在陆架上沉积(图 1-6)。

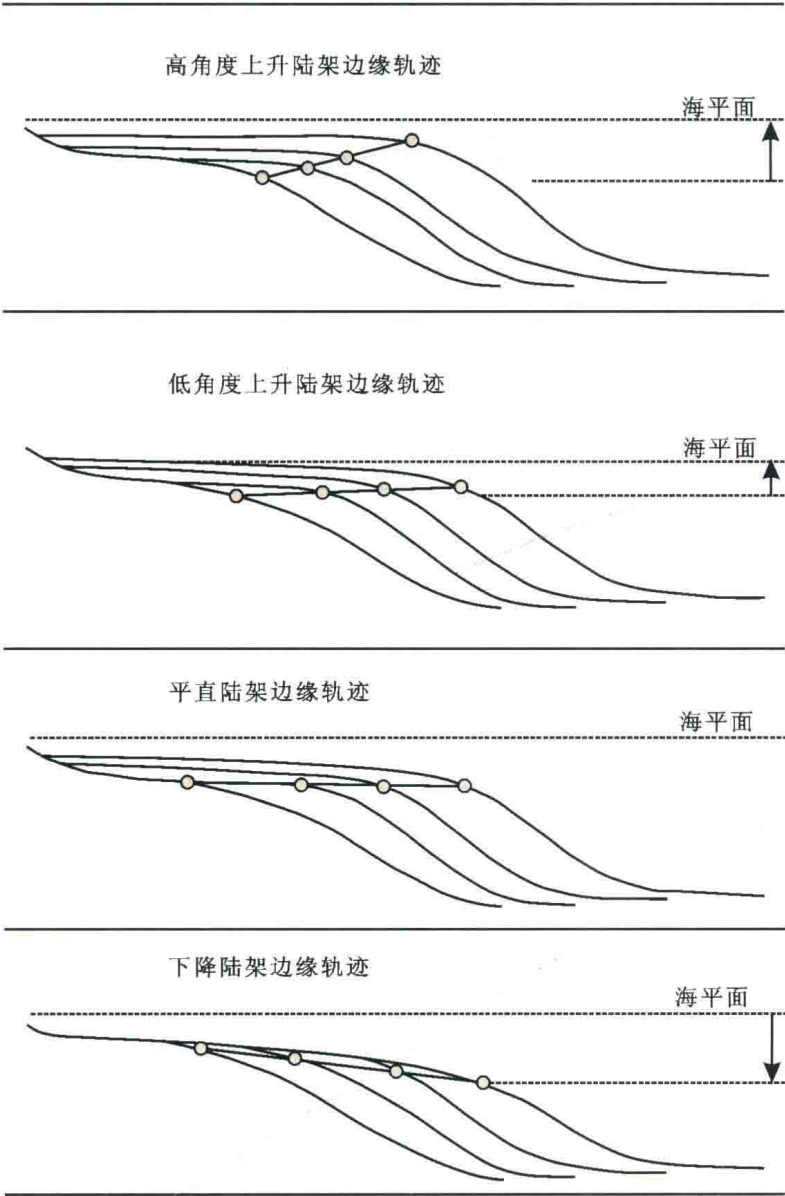


图 1-6 斜坡地形增长样式 (Helland - Hansen & Hampson, 2009)

斜坡地形、斜坡地形组合以及斜坡地形顶积-前积翻转点的轨迹可以通过沉积倾向对应的同相轴在地震剖面上识别出来(图 1-5)。其中由于地震剖面分辨率的原因,滨线坡折一般难以在地震剖面中找到,而陆架边缘坡折的迁移则可以很好地辨识。由陆架边缘迁移而形成的斜坡地形可通过上倾陆架中的平缓和平行的地震发射特征来识别。但陆架边缘轨迹由于尺度较大很难在野外露头上识别。在斯瓦尔巴特群岛古近系 Battfjellet 组的野外露头中, Helland - Hansen(1990)在蔓延 30km 的倾斜沉积的露头中,通过山体一侧的横断面识别出陆架边缘三角洲弯折点的位置。近些年,陆架边缘斜坡地形的研究引起了学者的极大关注,成为了很多研究课题的目标。因为陆架边缘斜坡地形的增长样式 (Growth