

海相深水碎屑岩层序地层学理论进展及关键问题

秦雁群, 计智锋, 万仑坤, 李志, 高霞, 马锋, 梁英波

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:深水环境地质特征复杂, 资料缺乏, 有关海相深水碎屑岩层序地层学理论认识仍没有形成相对统一的观点。基于层序地层样式、层序单元界面、体系域构成及沉积体系分布位置等特征分析, 阐述了经典的层序地层模式、基于深水体系类型划分的层序地层模式、基于深水沉积构型要素叠置样式的层序地层模式、基于四分体系域模型的层序地层模式和基于沉积物理界面的层序地层模式对深水碎屑岩沉积体系的处理方式或思路以及各种模式在深水沉积研究中的优缺点和适用条件。梳理了深水沉积“源-汇”过程与层序地层异源控制因素、深水基准面变化、深水层序地层级次划分和深水自旋回沉积等在深水层序地层学研究过程中一些关键问题, 提倡在深水油气储层级别研究中, 可开展基于资料和物理界面限定下高分辨率层序地层分析。

关键词: 自旋回; 物理界面; 基准面; 海相; 深水; 碎屑岩; 层序地层学

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Theory progress and key issues of deep water marine clastic sequence stratigraphy

Qin Yanqun, Ji Zhifeng, Wan Lunkun, Li Zhi, Gao Xia, Ma Feng, Liang Yingbo

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: Due to the complexity of geological characteristics and lack of available data, there is still no commonly accepted view of theoretical cognition on deep water marine clastic sequence stratigraphy. This article overviews recently well-known sequence stratigraphic models worldwide, including classic sequence stratigraphic model, sequence stratigraphic model built based on deep-water system classification, that built on deep water sediment architectural superimposition style, that built based on quartered system tracts and that built based on physical sedimentary interfaces. It emphasizes on analyzing approaches and ideas of different models, advantages and disadvantages as well as the application condition in the deep water sedimentary research. We also summarize the key issues such as source-to-sink process of deep water sedimentation and allogenic factors of sequence stratigraphy, base level changes of deep water, order division of deep water sequence stratigraphy and auto-cycle of deep water. A high resolution sequence stratigraphic analysis based on available data and limited by physical interfaces is proposed for deep reservoir research.

Key words: auto-cycle, physical interface, base level, marine, deep water, clastic rocks, sequence stratigraphy

早期对深水沉积搬运过程和深水沉积体系认识主要源自露头观察、近海底现代扇体系解剖和二维地震反射数据解释^[1-3]。随着全球深水油气勘探与开发的快速发展, 海域三维地震数据和深水钻测井、岩心数据的不断获取, 特别是近年来与地震地貌学相关的地震时间切片、沿层切片及层间属性提取等技术的应用, 为深水沉积搬运过程认识的深化和深水沉积体系演化模式的建立提供了技术和大量的数据证据支持^[4]。层序地层学是研究年代地层格架内、由不整合面或与之可

对比的整合面限定的、具有成因联系的地层序列组合关系^[5]。层序单元界面如不整合面、海侵面、最大洪(海)泛面等在陆相和浅海相地层中较容易被识别, 但由于从陆架到深海平原沉积搬运过程中, 侵蚀或非沉积作用以及深水沉积相对连续等因素的存在, 深水沉积体系中这些关键层序单元界面很难被识别和追踪, 深水层序地层划分和层序单元对比面临诸多困难^[6-8]。虽然国际上目前仍没有形成被普遍接受的针对深水沉积环境的层序地层模式, 而由陆架边缘至深

收稿日期: 2016-11-14; 修订日期: 2016-12-20。

第一作者简介: 秦雁群(1982—), 男, 博士、工程师, 深水沉积学和海外油气勘探与规划。E-mail: yqqin@petrochina.com.cn。

基金项目: 中国石油天然气集团公司科技项目(2016D-43); 国家油气重大专项(2016ZX05029005)。

海平原的大陆边缘层序地层模式多数是基于陆架边缘沉积与深水沉积是连续的或具有很强的关联性假定前提下建立的,而这种假定也受到部分研究者的质疑^[7-8]。Haq等早期提出的全球海平面变化表是地层层序旋回形成解释最重要的理论依据之一^[9],近年来虽也经过部分修改^[10],同时深时(deep time)背景下全球海平面变化研究也一直受到普遍关注^[11-12],但在实际层序地层解释和应用过程中不匹配的现象频频出现^[13-14]。在逐渐认识到构造变动、古地形等因素对层序发育具有很强的控制作用的背景下,Posamentier等于1988年提出了相对海平面变化概念^[15]。但也有研究者指出当相对海平面发生微弱变化时,不管是海平面变化或是构造变动因素,在深水环境区,由于变化幅度与总水深相比很小,深水区地层沉积样式可能并没有发生明显变化^[8,16],而陆架边缘或滨岸区沉积样式可能变化很大,特别是在大型三角洲发育区或陆架非常狭窄地带^[17-18]。近年来,随着海域深水资料的不断丰富和对深水沉积认识的逐渐深入,国际沉积学者们普遍认为深水层序地层形成除受到相对海平面变化、气候等异源因素控制外,还应受到沉积物搬运方式、流体通量大小、砂泥比、斜坡长度、斜坡坡度等多种因素影响^[8,19-21]。因此,深水沉积过程和深水层序地层形成可能比我们想象的要复杂的多^[8,16]。

文章首先简要地回顾了国际上与海相深水碎屑岩沉积相关的层序地层学理论模式,通过充分的文献调研,梳理了海相深水碎屑岩层序地层学中部分关键问题,并进行讨论,以期引发读者对深水层序地层学领域相关问题思考,同时对国内陆相深水层序地层学研究也有一定的借鉴作用。

1 海相深水碎屑岩层序地层学理论模式

自1977年AAPG第26期关于地震地层学系列论文发表以来^[22],层序地层学界已建立了多种层序地层学理论模式应用于不同沉积环境,由于深水沉积具有自身的特殊性且难观测、可对比性差、资料缺乏等诸多因素,深水层序地层学研究一直比较薄弱。这里选择国际上引用较为广泛且与海相深水碎屑岩沉积相关的层序地层模式,重点介绍不同的层序模式是如何处理深水沉积体系的。

1.1 经典层序地层模式

Exxon公司学者们1988年建立的经典层序地层学模式把一个完整的层序划分为3个体系域,剖面结

构显示深水沉积物主要由低位楔状体、斜坡扇和盆底扇构成的低位体系域和以泥页岩沉积为主的高位体系域组成^[23](图1a)。其中,低位体系域形成背景为相对海平面处于稳定低位或早期缓慢上升期,而高位体系域则是相对海平面位于高位晚期和下降早期形成的。然而,低位体系域中的低位楔状体和斜坡扇却很难在现实中发现,从刚果扇、孟加拉扇等被称作典型的水下扇解剖来看,这些部位往往被水道或相关联的水下峡谷充填所取代^[24-25]。而盆底扇的位置更是受沉积通量和斜坡地形控制明显,墨西哥湾广泛发育的多级次内斜坡盆地(intra-slope basin)沉积样式即是受盐岩塑性流动形成的复杂海底地形控制的典型实例^[26]。另外,在高位体系域形成早期,经历持续海侵后深水区应以深海和半深海泥页岩沉积为主,但是高位体系域形成晚期,相对海平面开始下降,陆架边缘进积三角洲跨越陆架区与内陆架区海水侵蚀作用一起,同样可以搬运粗砾碎屑至斜坡和深海平原区,特别在高速率沉积物供给背景下,这也是为什么高位体系域时期也可见到深水扇沉积的重要原因^[8,17-18]。

经典层序地层学模式经历两次影响较大的修改。Hunt和Tucker认为经典层序地层模式中I型层序边界应位于相对海平面下降期形成的地层(即海底扇浊积岩)顶部而不是底部,如此才能保证可对比整合面为一等时界面且是唯一连续的^[27]。Posamentier和Allen建议I型层序边界仅使用部分陆上不整合,然后沿着相对海平面开始下降的时间界面(即强制性海退面)向深水区延伸,同时建议废除含义模糊的II型层序边界^[28](图1b)。但是由于临滨沉积相对连续特征,精确识别强制海退面几乎是不可能的^[29]。综上所述,经典层序地层模式对深水沉积体系处理总体上为概念模式,实际应用中差别很大。

1.2 基于深水体系类型划分的层序地层模式

Mutti等基于西班牙和意大利等地区前陆和走滑盆地大量的露头资料,建立了大型三角洲物源供给背景下一次海平面升降旋回中水下扇体系发育过程的层序地层模式^[30]。该模式认为当海平面下降时,大量的三角洲前缘和三角洲-斜坡沉积物失稳形成的高动能的沉积重力流被搬运至深盆远处形成广泛的席状砂体,向深盆方向逐渐变为更细的舌状体沉积,交互的厚层席状砂和较细的舌状体叠置形成I型深水体系或高能扇体系。随着重力流沉积物减少或海平面上升早期或沉积物堆积导致的斜坡坡度变缓,深水能量变弱,沉积物在较近岸水道内沉积或形成水道前端的小型朵叶

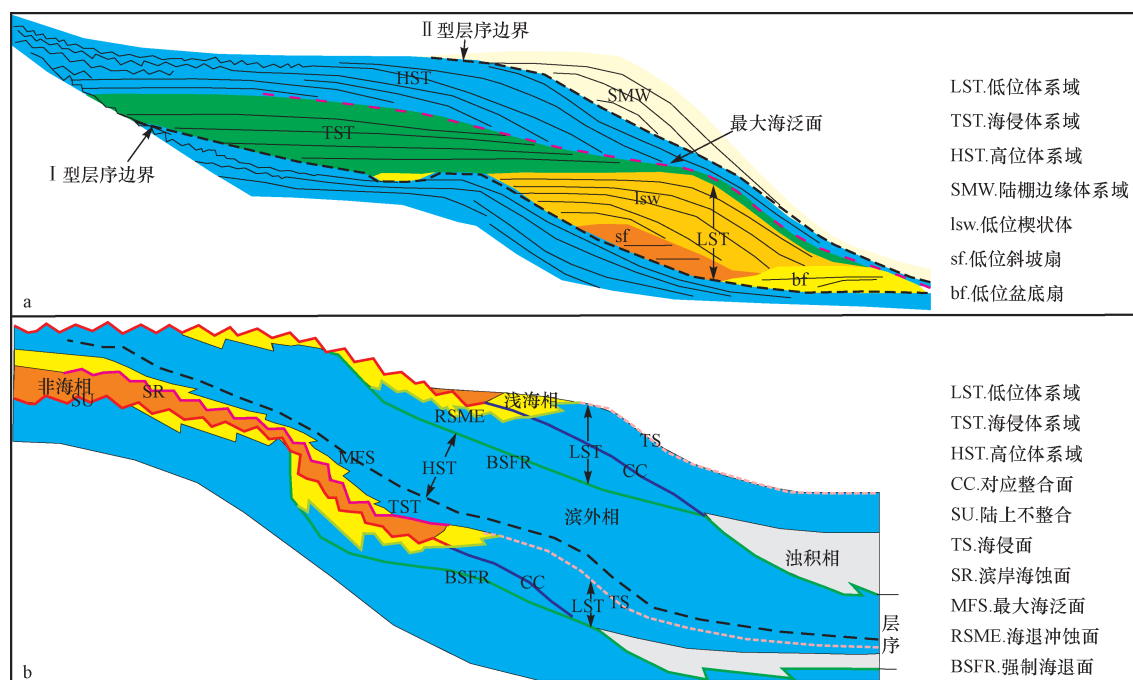


图1 经典层序地层学模式

Fig.1 Classic sequence stratigraphic model

a. Exxon 层序地层模式(据文献[23]); b. 修改的 Exxon 层序地层模式(据文献[29],有修改)

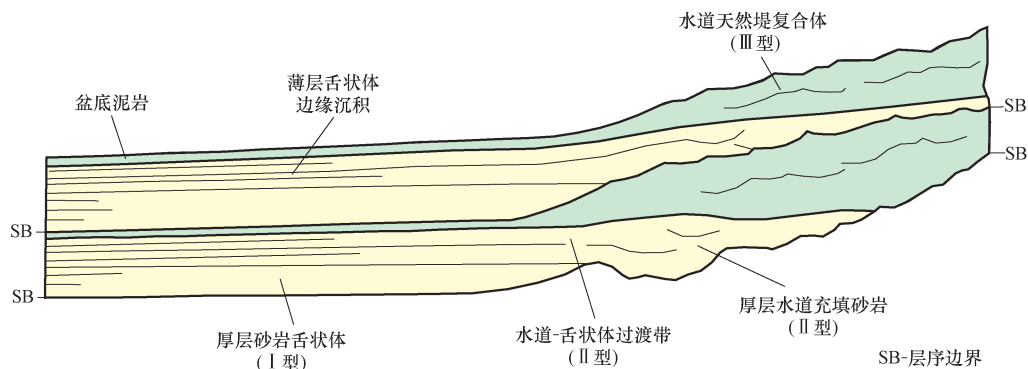


图2 基于深水体系统类型划分的层序地层模式(据文献[30],有修改)

Fig.2 Sequence stratigraphic model built based on deep water system type classification(modified from reference[30])

体,这套沉积物被称作Ⅱ型深水体系或低能扇体系。持续海平面上升形成的泥质沉积物堆积在水下扇体系之上,在大型河流三角洲体系不断进积背景下,近岸仍然可以形成富泥的水道-天然堤复合体,这套以泥质沉积为主的沉积物被称作Ⅲ型深水体系,由于滑动、滑塌等沉积作用导致该体系内发育多种侵蚀不整合。一次海平面升降旋回形成的地层序列称作一套层序,层序内既可能发育Ⅰ型、Ⅱ型和Ⅲ型完整的深水体系,也可能只发育其中的一套或两套深水体系(图2)。

Mutti 的模式再现了层序地层格架内具有成因联系的深水相在横向和垂向上的时空变化,建立了层序内部3种深水体系叠加的退积模式,对于构造活动地区、三角洲供源背景下深水相分析具有较强的指导意

义^[8,31]。而在被动大陆边缘深水扇分析中则受到部分研究者的质疑,如印度扇低位海平面时期沉积物则以Ⅲ型体系为主,并不是以Ⅰ型体系为主^[24]。亚马逊扇中Ⅰ型和Ⅲ型深水体系可以在同时期发育,而且在低位海平面时期可以发育多个厚层的砂岩舌状体^[25]。

1.3 基于深水沉积构型要素叠置样式的层序地层模式

Posementier 和 Kolla 通过运用地震地貌学在对大量的被动大陆边缘深水沉积构型要素识别后的经验总结,结合深水重力流沉积过程认识,建立一套理想的基于构型要素叠置样式的深水层序地层模式^[32]。该模式认为当相对海平面下降时,厚层碎屑流形成的块体搬运沉积叠置在厚的半深海-深海泥质沉积物之上指

示了缓慢沉积作用的突然沉积速率加快,其底部可作为层序边界面。当相对海平面处于低位或上升早期时,深水区以前端朵体和水道-天然堤沉积为主。随着相对海平面快速上升至高位时,依次发育碎屑流和凝缩层沉积,这套沉积旋回构成一个完整的层序(图3)。其中,相对海平面变化主要是通过控制河流供给沉积物入海的沉积中心随陆架边缘的迁移来控制层序序列变化及构型要素发育的完整情况。

这个模式目前被放在 SEPM(国际沉积地质协会)地层学开放网页上,影响较为广泛^[7-8,33]。但是相对海平面作为深水层序形成的唯一控制因素自始至终都受到诸多质疑^[14,34],层序地层学界除早期提出的物源、米兰科维奇旋回气候因素等控制因素外^[28,34],近年来,陆坡坡度和长度、宽缓陆架边缘沿岸流、物源区沉积物形态、海底等深流等相关因素也被认为对深水沉积产生重要影响^[19-21,35-36]。另外,深水沉积构型是否统一地存在该理想模式中的垂向叠置关系,也受到相关学者的质疑^[8]。毋庸置疑,这种源自 Miall 河流体系分析的深水构型要素方法对水下扇分类描述和深水

沉积叠置样式研究具有很好的指导作用^[37],但正如 Middleton 所言,构型要素方法几乎对水下扇相组合类型没有任何限制,很难形成一种唯一的、实用的且具有侧向预测功能的现实深水模式^[8,38]。

1.4 基于四分体系域模型的层序地层模式

Catuneanu 根据基准面旋回变化及从陆架边缘到深海沉积地层的成因联系,识别了一次基准面旋回变化过程中的高位体系域、下降期体系域、低位体系域和海侵体系域(图4)^[19]。其中,基准面处于高位时主要以深海-半深海泥质沉积为主。基准面下降时期在陆架边缘区形成伴随退覆的陆架边缘三角洲,向盆方向则为高密度浊积体和碎屑流沉积的舌状体及决口沉积物。而基准面处于低位时,陆架边缘区发育带有顶积层的进积三角洲,向盆方向则以含低密度浊积的天然堤水道和决口沉积物为主。基准面上升时期形成斜坡海侵沉积物和向盆方向的低密度浊积体。一次基准面旋回变化形成一个完整的层序序列。

该模式与修改的经典层序地层模式具有同样的问

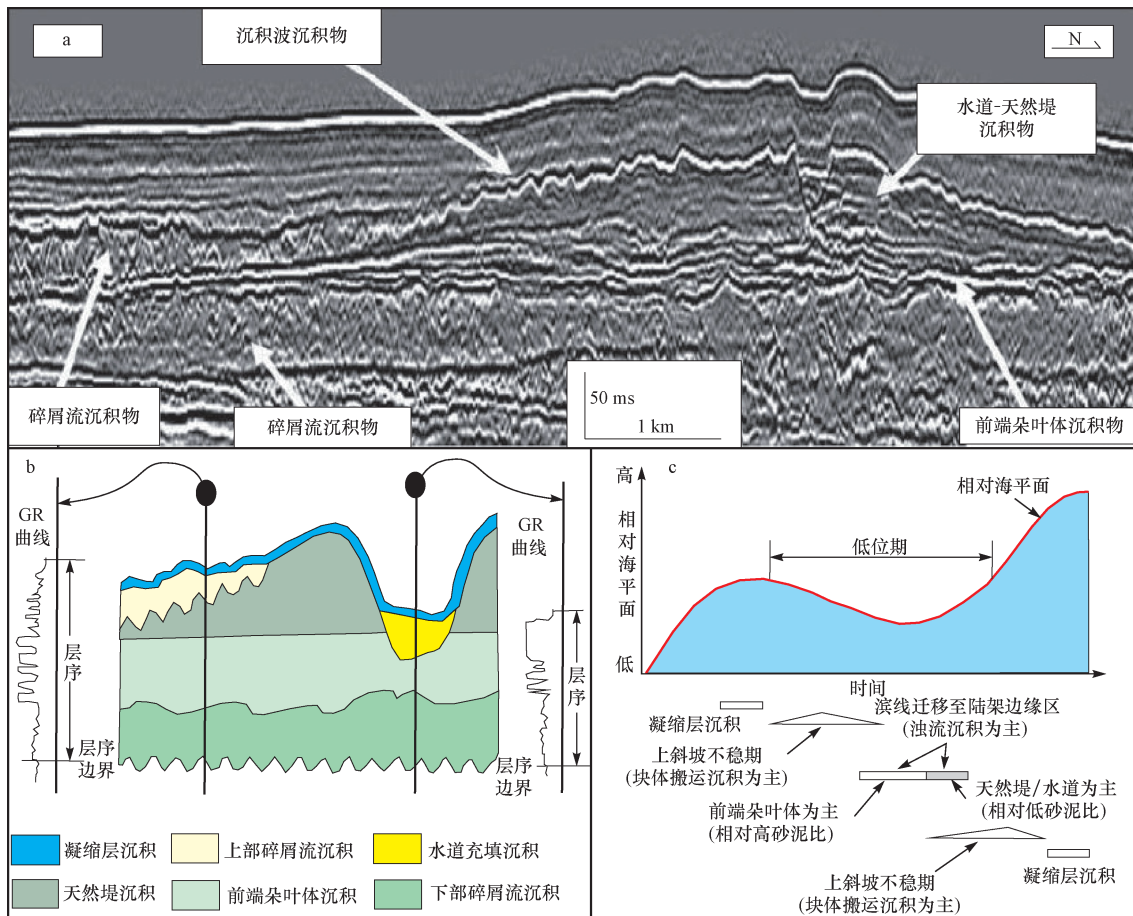


图3 基于深水沉积构型要素叠置样式的层序地层模式(据文献[32],有修改)

Fig. 3 Sequence stratigraphic model built based on architectural superimposition style of deep water deposits(modified from reference[32])

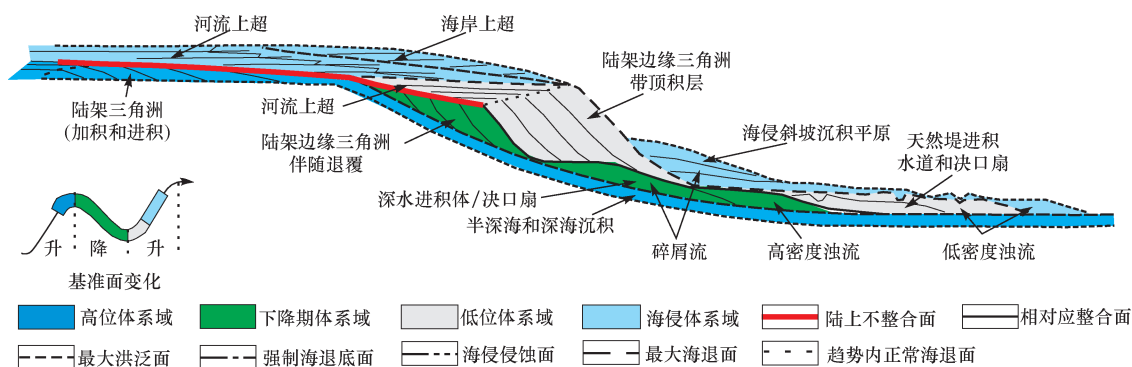


图4 基于四分体系域模型的层序地层模式(据文献[19],有修改)

Fig. 4 Sequence stratigraphic model built based on quartered system tract(modified from reference[19])

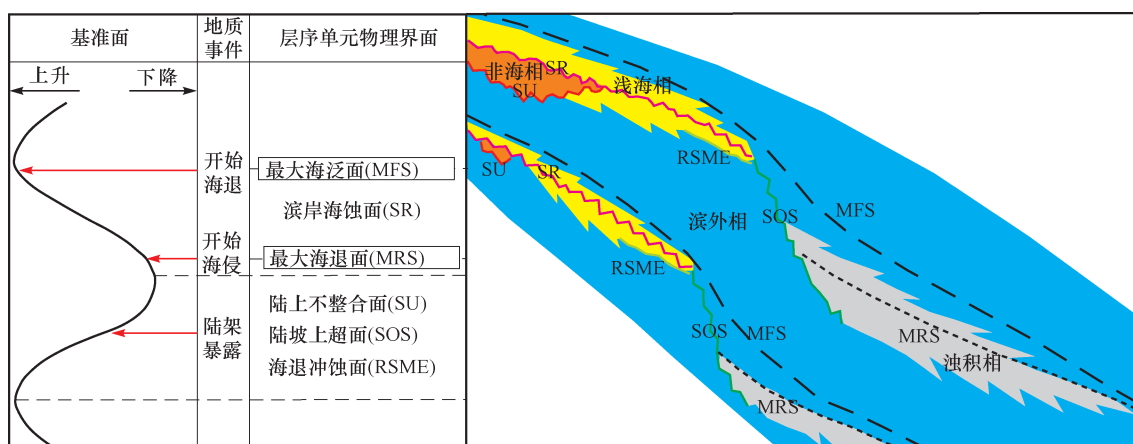


图5 基于沉积物理界面的层序地层模式(据文献[29],有修改)

Fig. 5 Sequence stratigraphic model built based on sediment physical interface(modified from reference[29])

题,即强制海退底界面是很难识别的,受陆上不整合的剥蚀作用破坏,通过地震和钻测井资料通常无法识别一个与陆上不整合面的退覆起点位置相交的斜积层,下降期体系域底部界面确定不可靠程度高(图4)^[29]。但该模式考虑了深水重力流粒度变化及陆架边缘沉积与盆内方向深水沉积的不连续性问题,值得我们借鉴。另外,模式中不仅标出了可对比的整合面、强制性海退面及最大海退面在某些部位是重合的,还认为深水重力流沉积物可以在基准面低位期、下降期和上升期均可能发育等现象。

1.5 基于沉积物理界面的层序地层模式

Embry把层序地层学领域能根据地层可观察到的物理属性定义的界面称为物理界面,包括陆上不整合面、海退冲刷面、滨岸海蚀面、最大海退面、最大海泛面和陆坡上超面(图5)^[29]。这些界面可以根据界面本身或界面上下地层的物理属性来识别,如几何接触关系、沉积趋势变化、跨越界面上下的时间间断或穿时特

征等。该模式建议使用上述六个界面来定义和划分层序地层单元,摒弃如可对比的整合面、强制性海退面等通过与特定地点相联系的事件而诠释出来的、却很难根据资料识别的时间界面。同时建议将体系域的概念修改为由层序地层界面所限定的层序构成或结构单元,从而实现层序单元横向可对比性。

模式中深水沉积相关的物理界面主要为最大海泛面、最大海退面和陆坡上超面,与其他模式最大的区别是该模式把最大海退面放在浊积序列顶部及内部,而不是底部,其原因Embry解释为浊积序列的底面通常是渐变的且沿倾向方向和侧向方向一般都是穿时的^[29]。当浊积沉积向陆坡超覆时,浊积序列底面将和陆坡上超面重合(图5)。很明显,该模式核心是从地震或钻测井等资料中识别出关键物理界面,但是像海退冲刷面、间断型滨岸海蚀面等都是高穿时或发育局限的,不利于层序地层单元横向对比^[29]。同时在深水相处理中旋回级次划分偏粗,如两个最大海泛面之间可能只识别出一个最大海退面层序单元界面,因此在

区域高精度层序地层分析应用中可能受到限制。

2 关键问题讨论

2.1 深水沉积“源-汇”过程与层序地层异源控制因素

自 Reading 和 Richards 提出基于粒度和供给体系的深水体系综合分类以来,越来越多的地质证据显示深水沉积是一复杂的由“源”到“汇”过程^[39]。在深水沉积产生的物源区,不同的供给方式,如河流、三角洲或陆缘下切谷等决定了深水沉积的物源量、砂泥比、搬运能力和可能的扇体类型^[19-20]。而陆架宽窄又可控制陆源物质是直接入海还是驻留后二次搬运入海以及可供存储的物源大小、滨线迁移过程中冲刷强弱等^[19,40-42]。陆架边缘的沿岸流、潮汐和波浪作用等对沉积物最终形态和位置、物源的分散以及沉积通量等都有影响^[8,19,35,40]。在沉积物向深水搬运过程中还受到斜坡坡度、斜坡长度、高塑性流体形成的古地貌变化、重力流侵蚀、水下地形差异较大处的等深流等诸多条件控制^[20,26,34,36]。深盆区的沉积物再搬运、地震、大洋环流、斜压流、内波、等深流侧积、水道迁移与决口、朵叶体摆动等不易探测的深水现象也鲜见报道^[16,36]。另

一方面,随着深水区解剖资料的不断增多,深水沉积物沉积成因研究也受到广泛关注,如超浓度流、块体搬运沉积、碎屑流等一些概念的提出或新的涵义的赋予等^[16,43]。

上述复杂的异源和自源因素综合地质响应再现了深水沉积体系时空分布演化,而层序地层学作为一种实用且有效的分析沉积体系理论方法,不管深水体系与滨岸区或陆架边缘体系是何种关系(图 6a)^[7],理论上总能找到等时的界面对地层进行成因联系划分、对比和可能情况的预测。在这一过程中,如何识别和处理异源控制因素是地层层序研究的关键^[19,34]。当前主流的思路大致可分为 3 大类。一是以相对海平面变化为主因,按照既有的层序地层模式,辅以研究区特殊的控制因素加以深化和应用,如 Pickering 和 Corregidor 通过物源、陆架宽窄、沉积通量、斜坡调整和相对海平面等多种因素综合考虑建立艾萨(Ainsa)盆地深海碎屑岩层序地层模式(图 6b)^[42]。二是把复杂的异源因素归一到海平面变化、构造变动和气候周期性变化这 3 个变量进行大尺度层序地层研究,如经典层序地层学定义的一级至三级层序地层分析^[23]。第三种是把复杂的异源因素归一到沉积物供给和可容纳空间变化

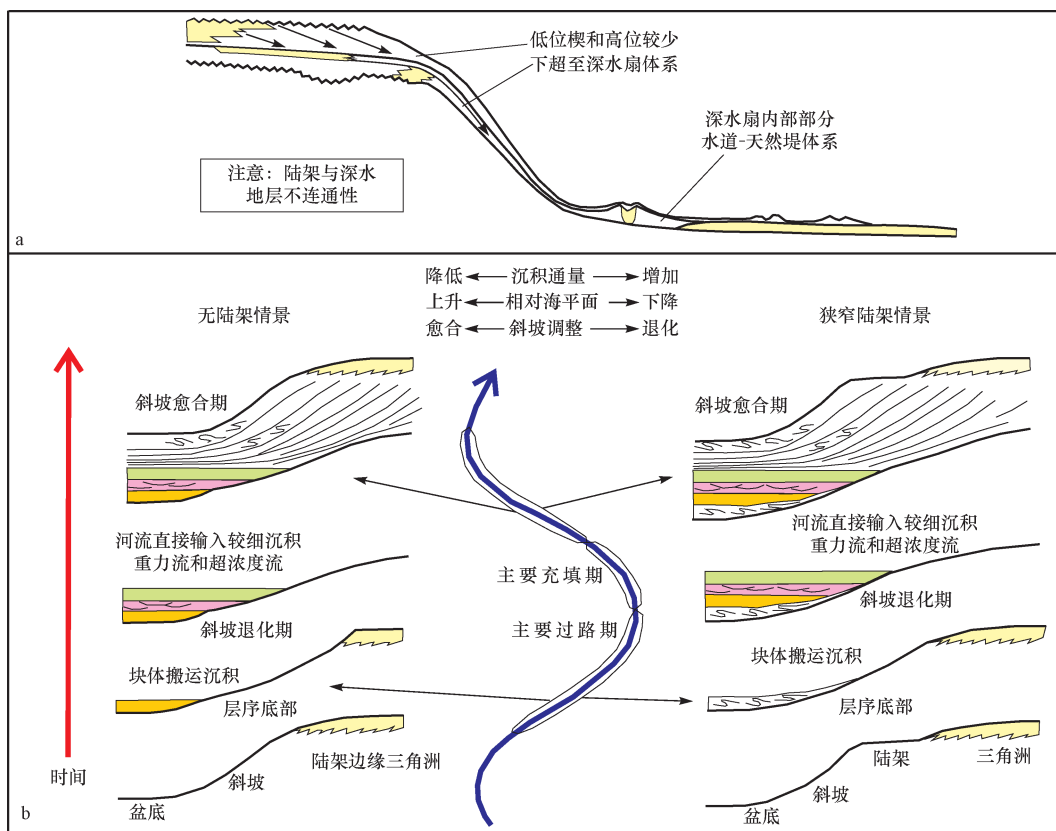


图6 多因素控制下深水沉积源-汇过程

Fig. 6 Source-to-sink process of deep water sedimentary system under the control of multiple factors

a. 陆架与深水地层不连通沉积情形(据文献[7]); b. 多因素控制下深水层序地层演化(据文献[42],有修改)

两个变量,以基准面旋回变化为理论依据进行地层层序研究,如 Hunt 和 Tucker 以及 Cross、邓宏文提出的高分辨率层序地层学等^[27,44-45]。

2.2 深水基准面变化

基准面作为一个动态的势能面,反映了地球表面与力求平衡的地表之间的接收沉积、过路不留及剥蚀或侵蚀的地质过程,基准面之上发生剥蚀或侵蚀,基准面之下发生沉积,直至达到动态平衡^[19,45]。基准面有规模和级次区别,区域基准面变化的主要驱动力是构造变动和海平面变化,而局部基准面变化则以气候等其他局限异源因素为主^[19,46]。对于深水复杂的异源因素来说,何种因素占主导及各因素之间的相互交叉作用程度往往很难区分^[14,29],但是如果使用基准面变化来代替一切异源因素的综合响应,再根据实际资料所反映的沉积物沉积趋势、沉积作用的转换等特征来判断基准面旋回变化,可以有效地避免对诸多因素控制无结果的争论^[29]。

在从陆上到海域区域大剖面中,海域部分基准面可以近似看作为海平面,基准面变化可以用相对海平面旋回变化来近似表征^[19,29]。但是对于深水环境,近海底区域理论上仍然存在局部基准面,即深水基准面。深水基准面是深水环境下动态势能面,其周期性波动反映了局部可容纳空间变化和沉积物供给速率之间相互作用所形成的沉积间断或地层沉积趋势变化等地质现象。

图7是斜坡背景下理想深水基准面变化过程。从上斜坡向下斜坡正弦变化过程中,基准面从非对称的上升半旋回向非对称的下降半旋回转变,这种变化体现了局部可容纳空间和沉积物供给速率比值的变化规律,并伴随沉积作用、斜坡调整、水道宽/深比值及流体速率等均呈现规律性变化^[47],最终导致斜坡向理想深水基准面无限靠近,直至达到动态平衡。

2.3 深水层序地层级次划分

早期基于时间跨度进行层序级次划分已受到众多学者的质疑和否定^[14,19],一定程度上只能作为盆地级别层序地层研究中的参考,而按照基准面旋回变化规模进行盆地级别的层序级次划分似乎更加可信且更具可操作性^[29,45,48]。根据高分辨率层序地层学观点^[44-46],任一短期基准面旋回内地层均是沉积成因联系的,而旋回到底能划到什么程度以及旋回逐级合并往往只能依赖研究区资料的掌握情况和资料可分辨程度,对于多种因素影响下复杂的深水环境来说更是如此。由于深水基准面是一局部基准面,旋回变化受区域基准面限

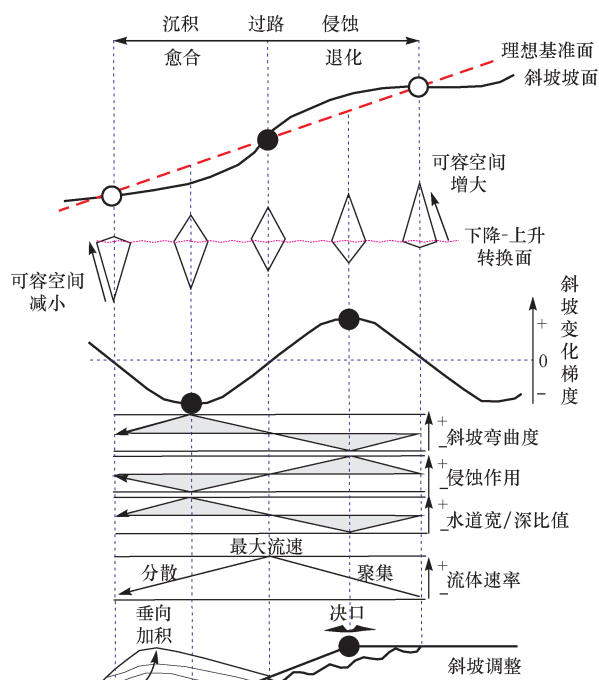


图7 深水基准面变化(据文献[47],有修改)

Fig. 7 Base level changes of deep water
(modified from reference[47])

定和控制,结合第一部分各种海相深水碎屑岩层序地层模式特征,作者认为深水层序地层划分应在沉积物理界面限定下,根据实际资料进行旋回规模判断,进而进行逐级划分和合并。具体操作过程中,还须遵循某一级次旋回内部不能含有同级别或上一级别的旋回边界,且划分的最小旋回必须是具有沉积成因联系等相关的基本准则^[45-46]。这种处理不仅相对客观,而且符合深水油气勘探和开发过程中对储层级别精细研究需求。

图8a中把基于沉积物理界面层序地层模式中间断型滨岸海蚀面和海退冲蚀面两个高穿时且局限发育的界面剔除,形成了以陆上不整合面、不整合型滨岸海蚀面、陆坡上超面和最大海退面为边界的区域层序地层界面,层序内部运用高分辨率层序地层中基准面旋回划分方法^[44-46],如相序和相组合、旋回对称性、堆积样式、几何形态及沉积作用转换等进行中、短期基准面旋回的识别和合并(图8b—f),并以最大海泛面作为层序单元侧向对比最主要的标志层,以沉积作用转换面作为次要对比标志,从而形成物理界面限定下高分辨率深水层序地层模式。当然,这里的“相”主要是目前已识别出的深水沉积构型,如水道、天然堤、朵叶体、碎屑流等(图8b—f)。

2.4 深水自旋回沉积

自旋回沉积是指在相对稳定的外部环境下,沉积

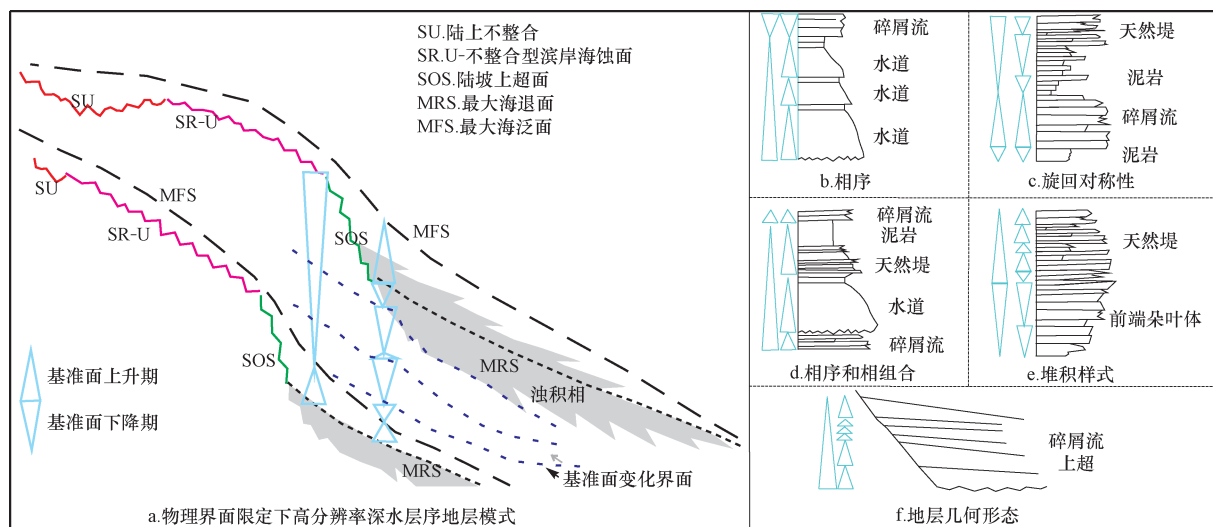


图8 物理界面限定下高分辨率深水层序地层模式及旋回级次划分

Fig. 8 High resolution deep water sequence stratigraphic model under the constraint of physical interfaces and cycle order division

a. 据文献[29],有修改;b—f. 据文献[45],有修改

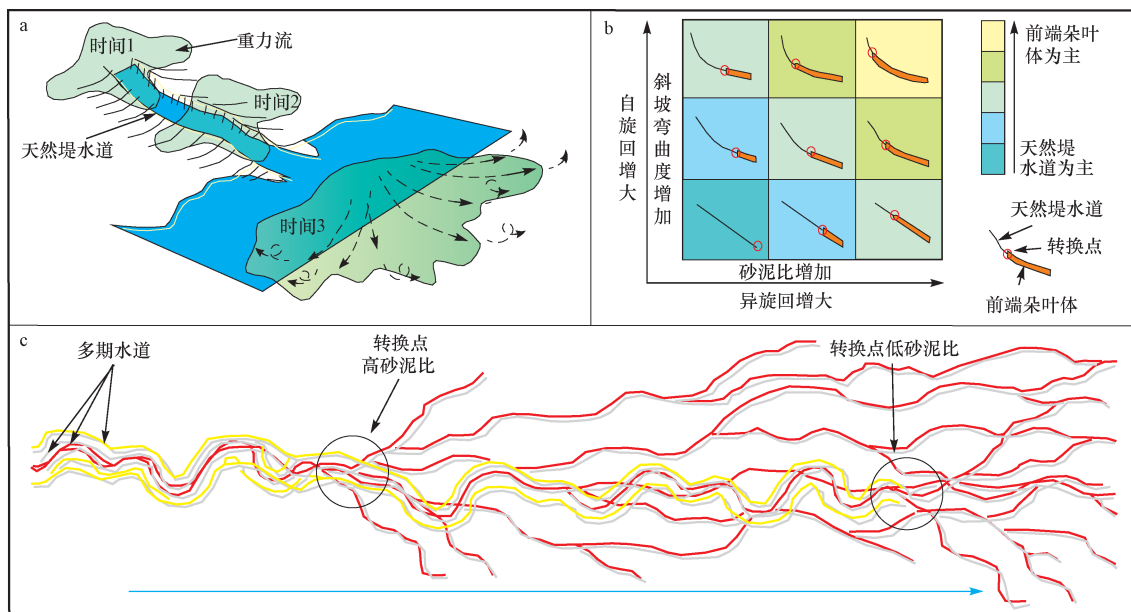


图9 不同砂泥比和斜坡弯曲度对天然堤水道和前端朵叶体变迁的控制(据文献[20],有修改)

Fig. 9 Change of leveed channel and frontal splay under the control of different net-to gross ratios and slope curvatures (modified from reference[20])

a. 重力流在不同地形下时空变化;b. 多因素控制下天然堤水道和前端朵叶体变迁;c. 由上斜坡向深盆方向(示水道迁移、水道决口和前端朵叶体变迁)

物由自源因素引发的再沉积所形成的地层堆积,具有局部的、突发的、规律性差等特征^[7,46,49-50]。相对其他沉积环境来说,深水自旋回现象多、类型复杂。其中,富含盐岩塑性变形的被动陆缘内斜坡盆地“充填和溢出”过程分析和天然堤水道决口及前端朵叶体摆动规律研究成果较多^[20,26],而海域地震、海啸等引发的事件性沉积、等深流侧积及其它洋流流动影响等虽见相关报道^[16],但尚无形成系统认识。

Posamentier 和 Walker 通过深水重力流砂泥比和斜坡弯曲两个变量再现了深水天然堤水道和前端朵叶体的变迁规律^[20]。在重力流从限定性水道向盆内搬运过程中,不同先存地形形成的沉积物形态是不一样的(图9a)。当沉积物砂泥比增加时,沉积物重力增大,搬运距离变小,异旋回沉积增强,水道与前端朵叶体转换点将逐渐偏向物源区(图9b)。当斜坡弯曲度变大时,沉积物势能增大,搬运距离变小,自旋回沉

积增强,水道与前端朵叶体转换点将越偏向物源区(图9c)。因此,在其他因素恒定情况下,同一地区低砂泥比和低弯曲度斜坡将以天然堤水道沉积为主,而高砂泥比和高弯曲度斜坡将以前端朵叶体沉积为主(图9c)。

在深水高分辨率层序地层分析过程中,地层旋回识别的级次越高,自旋回现象将越严重^[46]。自旋回能改变部分异旋回的特征,特别是残留地层中异旋回发育不完整情况下,鉴定难度很大。因此,在实际层序地层应用过程中,加强区域层序单元关键界面约束,从沉积成因联系角度剖析沉积物序列组成是识别深水层序内部自旋回沉积有效手段。

3 结语

丰富的海洋油气资源勘探和开发必然促使深水沉积学研究快速发展。虽然国际上目前已初步形成了深水沉积构型要素分析和多因素控制下深水体系综合分类两套思路方法来解剖复杂的深水体系,但海相深水碎屑岩层序地层学研究一直没有形成相对统一的认识,不同的层序地层模式均具有各自的优缺点。进一步深化复杂的深水“源-汇”过程认识以及量化自源、异源因素对层序形成的控制作用是深水层序地层学研究的重要基础。文中提倡的基于资料的、物理界面限定下高分辨率深水层序地层学模式是对深水储层级别的精细层序研究的一种尝试。随着海域资料的不断丰富和对深水沉积研究不断深入,深水层序地层学认识也将逐渐得到完善,并将为深水油气勘探和开发提供重要的理论技术支持。

致谢:感谢中国地质大学(北京)邓宏文教授对文章提出许多建设性修改意见!

参 考 文 献

- [1] Bouma A. Sedimentology of some Flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 1-168.
- [2] Walker R. Deep water sandstone facies and ancient submarine fans: models for exploration for stratigraphic traps[J]. AAPG Bulletin, 1978, 62(6): 932-966.
- [3] Weimer P. Seismic facies, characteristics and variations in channel evolution, Mississippi fan (Plio-Pleistocene), Gulf of Mexico[C]// Weimer P, Link M. Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems, New York: Springer-Verlag, 1991: 323-348.
- [4] Prather B, Deptuck M, Mohrig D, et al. Application of the principles of seismic geomorphology to continental slope and base-of-slope systems: case studies from seafloor and near-seafloor analogues[M]. Tulsa: SEPM Special Publication No. 99, 2012: 1-383.
- [5] Van Wagoner J, Mitchum R, Campion K, et al. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops: concepts for high-resolution correlation of time and facies[M]. Tulsa: AAPG Methods Exploration Series No. 7, 1990: 1-55.
- [6] Abreu V, Neal J, Bohacs K, et al. Sequence stratigraphy of siliciclastic systems-the Exxon Mobil Methodology: atlas of exercises[M]. Tulsa: SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology No. 9, 2010: 1-266.
- [7] SEPM Strata. Deep water sequence stratigraphy[EB/OL]. <http://www.sepmstrata.org/page.aspx?pageid=41>, 2006-12-1/2016-5-30.
- [8] Pickering K, Hiscott R. Deep marine systems: processes, deposits, environments, tectonics and sedimentation[M]. Oxford: American Geophysical Union and Wiley, 2016: 1-402.
- [9] Haq B, Hardenbol J, Vail P. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic (250 years ago to present)[J]. Science, 1987, 235(4793): 1156-1167.
- [10] Haq B, Schutter S. A chronology of Paleozoic sea-level changes[J]. Science, 2008, 322(5898): 64-68.
- [11] Kominz M, Browning J, Miller K, et al. Late Cretaceous to Miocene sea-level estimates from the New Jersey and Delaware Coastal plain coreholes: an error analysis[J]. Basin Research, 2008, 20(2): 211-266.
- [12] Miller K, Mountain G, Wright J, et al. A 180-million-year record of sea level and ice volume variations from continental margin and deep-sea isotopic records[J]. Oceanography, 2011, 24(2): 40-53.
- [13] Miall A. The Exxon global cycle chart: an event for every occasion?[J]. Geology, 1992, 20(9): 787-790.
- [14] Miall A. The geology of stratigraphic sequences[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 1-466.
- [15] Posamentier H, Jervey M, Vail P. Eustatic controls on classic deposition I-conceptual framework[C]// Wilgus C, Hastings B, Kendall C, et al. Sea level change- an integrated approach, Tulsa: SEPM Special Publication No. 42, 1988: 110-124.
- [16] Shanmugam G. New perspectives on deep-water sandstones: origin, recognition, initiation and reservoir quality[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 1-423.
- [17] Carvajal C, Steel R. Thick turbidite succession from supply-dominated shelves during sea-level highstand[J]. Geology, 2006, 34(8): 665-668.
- [18] Porbski S, Steel R. Deltas and sea-level change[J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(3): 390-403.
- [19] Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006: 1-343.
- [20] Posamentier H, Walker R. Deep-water turbidites and submarine fans[C]// Posamentier H, Walker R. Facies models revisited. Tulsa: SEPM Special Publication No. 84, 2006: 399-520.
- [21] Slatt R, Zavala C. Sediment transfer from shelf to deep water: revisiting the delivery system[M]. Tulsa: AAPG Studies in Geology No. 61, 2011: 1-214.
- [22] Payton C. Seismic stratigraphy: applications to hydrocarbon exploration[M]. Tulsa: AAPG Memoir No. 26, 1977: 1-516.
- [23] Baum G, Vail P. Sequence stratigraphic concepts applied to Paleogene outcrops, Gulf and Atlantic Basins[C]// Wilgus C, Hastings B, Kendall C, et al. Sea level change- an integrated approach. Tulsa:

- SEPM Special Publication No. 42, 1988: 309 – 327.
- [24] Kolla V, Coumes F. Morphology, internal structure, seismic stratigraphy, and sedimentation of Indus Fan [J]. AAPG Bulletin, 1987, 71 (6): 650 – 677.
- [25] Hiscott R, Pirmez C, Flood R. Amazon submarine fan drilling: a big step forward for deep-sea fan models [J]. Geoscience Canada, 1997, 24 (1): 13 – 24.
- [26] Prather B, Booth J, Steffens G, et al. Classification, lithologic calibration, and stratigraphic succession of seismic facies of intraslope basins, deep-water Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1998, 82 (5A): 701 – 728.
- [27] Hunt D, Tucker M. Stranded parasequences and the forced regressive wedge systems tract: deposition during base-level fall [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81 (1–2): 1 – 9.
- [28] Posamentier H, Allen G. Variability of the sequence stratigraphic model: effects of local basin factors [J]. Sedimentary Geology, 1993, 86 (1–2): 91 – 109.
- [29] Embry A. 实用层序地层学 [M]. 邓宏文, 肖毅, 王红亮, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2012: 1 – 121.
Embry A. Practical sequence stratigraphy [M]. Deng Hongwen, Xiao Yi, Wang Hongliang, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012: 1 – 121.
- [30] Mutti E, Remacha E, Sgavetti M, et al. Stratigraphy and facies characteristics of the Eocene Hecho Group turbidite systems, south-central Pyrenees [C] // Mila M, Rosell J. International association of sedimentologists, 6th European regional meeting. Llerida: Excursion Guidebook, 1985: 521 – 576.
- [31] Weimer P, Slatt R. Introduction to the petroleum geology of deepwater settings [M]. Tulsa: AAPG Studies in Geology, NO. 57, 2007: 1 – 816.
- [32] Posamentier H, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73 (3): 367 – 388.
- [33] 王大伟, 吴时国, 王英民, 等. 琼东南盆地深水重力流沉积旋回 [J]. 科学通报, 2015, 60 (10): 933 – 943.
Wang Dawei, Wu Shiguo, Wang Yingmin, et al. Deep-water sediment cycles in the Qiongdongnan Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2015, 60 (10): 933 – 943.
- [34] Kneller B, Martinsen O, McCaffrey B. External controls on deep-water depositional systems [M]. Tulsa: SEPM Special Publication No. 92, 2009: 1 – 396.
- [35] Covault J, Normark W, Romans B, et al. Highstand fans in the California borderland: the overlooked deep-water depositional systems [J]. Geology, 2007, 35 (9): 783 – 786.
- [36] Rebesco M, Camerlenghi A. Contourites [M]. Amsterdam: Elsevier, 2008: 1 – 613.
- [37] Miall A. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22 (4): 261 – 308.
- [38] Middleton G. Sediment deposition from turbidity currents [J]. Annual Reviews in Earth and Planetary Sciences, 1993, 21: 89 – 114.
- [39] Reading H, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. AAPG Bulletin, 1994, 78 (5): 792 – 822.
- [40] Chicci F, Chivas A. Continental shelves of the world [M]. London: Geological Society Memoir No. 41, 2014: 1 – 338.
- [41] 秦雁群, 张光亚, 巴丹, 等. 转换型被动陆缘盆地地质特征与深水油气聚集规律: 以赤道大西洋西非边缘盆地群为例 [J]. 地学前缘, 2016, 23 (1): 229 – 239.
Qin Yanqun, Zhang Guangya, Ba Dan, et al. Geological characteristics and deep water hydrocarbon accumulation patterns of transformed passive continental marginal basins: a case history from basins of West Africa margin in Equatorial Atlantic [J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23 (1): 229 – 239.
- [42] Pickering K, Corregidor J. Mass transport complexes and tectonic control on confined basin floor submarine fans, Middle Eocene, south Spanish Pyrenees [C] // Hodgson D, Flint S. Submarine slope systems: processes and products. London: Geological Society Special Publications No. 244, 2005: 51 – 74.
- [43] Mulder T, Alexander J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J]. Sedimentology, 2001, 48 (2): 269 – 299.
- [44] Cross T. High-resolution stratigraphic correlation from the perspectives of base-level cycles and sediment accommodation [C] // Dolson J. Unconformity related hydrocarbon exploration and accumulation in clastic and carbonate settings. Rocky Mountain Association of Geologists, 1991: 28 – 41.
- [45] 邓宏文, 王红亮, 祝永军. 高分辨率层序地层学 – 原理与应用 [M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1 – 253.
Deng Hongwen, Wang Hongliang, Zhu Yongjun. Theory and application of high resolution sequence stratigraphy [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003: 1 – 253.
- [46] 邓宏文. 高分辨率层序地层学应用中的问题探析 [J]. 古地理学报, 2009, 11 (5): 471 – 480.
Deng Hongwen. Discussion on problems of applying high resolution sequence stratigraphy [J]. Journal of Palaeogeography, 2009, 11 (5): 471 – 480.
- [47] Ferry J, Mulder T, Parize O, et al. Concept of equilibrium profile in deep-water turbidite systems: effects of local physiographic changes on the nature of sedimentary process and the geometries of deposits [C] // Hodgson D, Flint S. Submarine slope systems: processes and products. London: Geological Society Special Publications No. 244, 2005: 181 – 193.
- [48] 郑荣才, 彭军, 吴朝荣, 等. 陆相盆地基准面旋回的级次划分和研究意义 [J]. 沉积学报, 2001, 19 (2): 6 – 8.
Zheng Rongcai, Peng Jun, Wu Chaorong, et al. Grade division of base-level cycles of terrigenous basin and its implications [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19 (2): 6 – 8.
- [49] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 尼日尔三角洲盆地深水油田 A 海底扇储层质量差异 [J]. 石油与天然气地质, 2014, 35 (3): 494 – 502.
Lin Yu, Wu Shenghe, Wang Xing, et al. Reservoir quality differences of submarine fans in deep-water oilfield A in Niger Delta Basin, West Africa [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35 (4): 494 – 502.
- [50] 王琳霖, 王振奇, 肖鹏. 下刚果盆地 A 区块中新统深水沉积体系特征 [J]. 石油与天然气地质, 2015, 36 (6): 963 – 974.
Wang Linlin, Wang Zhenqi, Xiao Peng. Characterization of deep water sedimentary system in the Miocene of Block A in Lower Congo Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36 (6): 963 – 974.