

深水块体搬运沉积体系研究进展

秦雁群, 万仑坤, 计智锋, 李富恒, 徐海龙, 巴 丹

(中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:全球普遍发育的深水块体搬运沉积体系是大陆边缘地层重要的组成部分,系统地认识该类沉积体有助于深化深水搬运过程认识、拓展深水油气勘探领域及控制海域工程设施风险。通过国际上研究成果梳理,深水块体搬运沉积体系是指除浊流外的水下重力流沉积物组合,结构上可分为头部、体部和趾部,可根据搬运过程和沉积物成因进行类型划分。其形成需具备沉积物重力流条件,变形过程符合宾汉塑性体特征,形成的沉积体规模大小不一,内部具有多种运动学指向,一般通过地震、岩心和测井等资料加以识别。深水块体搬运沉积体系可以形成油气的盖层和储层,是深水区潜在勘探目标。综合分析认为,目前仍存在深水块体搬运过程认识需要深化和统一、不同地质背景下深水块体搬运沉积体系的形成条件研究不足、与浊流沉积物的区别、古代与现代深水块体搬运沉积体系共性与差异性研究、岩相类型和岩相组合认识的统一等相关问题。指出未来深水块体搬运沉积体系研究主要集中在多资料、多尺度特征分析,形成条件特别是触发机制深入研究,水下块体搬运机理、沉积物组成及深水重力流沉积物一体化研究,何种环境下可以形成烃源岩、储层或盖层,古代深水块体搬运沉积体系解剖,以及侵蚀能力和地质风险评估。

关键词:重力流;流变学;滑动;滑塌;碎屑流;块体搬运沉积体系;深水

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Progress of research on deep-water mass-transport deposits

Qin Yanqun, Wan Lunkun, Ji Zhifeng, Li Fuheng, Xu Hailong, Ba Dan

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

Abstract: Prevalent deep-water mass-transport deposits (MTDs) are important components of sedimentary formation on continental margins around the world. A systematic study on the depositional system is helpful to deeply understanding deep-water transport process, opening up new deep-water plays and reducing risks of offshore engineering facilities. Based on an literature review, deep-water MTDs refer to assemblage of all underwater gravity flow deposits except for turbidite deposits. They can be structurally segmented into three parts, namely head, body and toe. Besides, they can be divided into different types according to transport processes and sediment origins. Sediment gravity flow conditions are essential for deep-water MTDs to form, and their deformation processes should conform to the characteristics of Bingham Plastics. These depositional systems have different scales and contain various kinematic indicators, which can be generally recognized by using seismic, core and well logging data. Deep-water MTDs can form both seals and reservoirs, thus are potential exploration targets in deep-water area. A comprehensive analysis indicates that many problems still exist in the study of deep-water MTDs. For example, (1) the understanding of deep-water mass-transport process should be further deepened and unified; (2) the study on their forming conditions in different settings should be strengthened; (3) the differences between deep-water MTDs and turbidites should be more thoroughly understood; (4) the differences and commonalities between ancient and modern deep-water MTDs should be clear; and (5) the understanding of lithofacies types and lithofacies associations should be unified. It is proposed that future studies should focus on: (1) multi-scale characterization with data of multiple sources; (2) forming conditions, especially triggering mechanisms; (3) integrated research of underwater mass transport mechanism, deposit composition and deep-water gravity-flow deposits; (4) forming conditions of source, reservoir or cap rocks; (4) fine description of ancient deep-water MTDs; and (5) assessment on erosional ability

收稿日期:2016-11-14;修订日期:2018-01-03。

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);国家科技重大专项(2016ZX05029005)。

and geological risks.

Key words: gravity flow, rheology, slide, slump, debris flow, mass-transport deposits, deep-water

块体搬运沉积体系(Mass-transport Deposits,简称MTDs)是大陆边缘地层充填重要组成,局部地区可达到陆坡和深水区地层沉积总量的70%以上^[1-2]。普遍发育的块体搬运沉积作用不仅对海域相关工业设施具有潜在破坏隐患,而且还可以产生海啸、大洋环流变迁等自然灾害以及甲烷释放等相关环境问题^[3-4]。近年来,有关块体搬运沉积方面的研究受到国际上众多国家、研究团体和高校的普遍关注。挪威、英国、法国及加拿大等国家纷纷成立大陆斜坡稳定性计划(COSTA)专门开展块体搬运沉积和相关的地质灾害研究^[5-6]。2003年以来,由美国国际地球科学联合会发起的水下块体运动及其影响国际研讨会(ISSMMTC)每两年举办一次,目前已在法国、挪威、希腊、日本等国家先后召开了7次^[5]。美国石油地质学家协会(AAPG)2006年年会也专门设立了块体搬运沉积讨论主题,相关成果被收录在2009年出版的《Mass-transport Deposits in Deepwater Setting》论文集内^[7]。加拿大拉瓦尔大学、美国华盛顿大学、挪威特罗姆瑟大学以及中国科学院等高校院所也积极组建了大陆边缘稳定性研究团队^[5,8]。随着高精度海域三维地震、多波束测深及旁侧声纳等探测手段的投入和综合大洋钻探计划(IODP)的实施,全球已在被动大陆边缘、转换大陆边缘、弧后盆地断阶带、前陆盆地前渊带、海底火山边缘、内克拉通盆地和湖相盆地等300多个地区发现了块体搬运沉积体系^[1-2,9]。近期国际上有关MTDs研究热点主要集中在其触发机制与主控因素分析、内部变形研究、不同规模沉积体形态刻画与识别及油气勘探指示意义等方面^[10-15]。

这种巨型且普遍发育的沉积物与油气之间关系是近年来深水油气勘探工作者普遍关注的重要问题之一^[15]。深水油气勘探实践表明,块体搬运沉积体系虽然普遍粒度较粗,但富含粘土,常具有低孔、低渗等特征,一般可作为区域有效盖层,从顶部和侧向对油气进行封堵,形成深水地层圈闭^[4,16]。近年来,在北海、墨西哥湾、尼日尼亚、印度东部海域等地区与块体搬运沉积体系相关油气田的发现说明其在特定地质条件下是可以形成有效储层的,应该是深水油气勘探潜在的目标对象^[15,17-18]。因此,深入研究块体搬运沉积体系不仅可以有效评价其地质风险,还可以进一步深化深水沉积搬运过程认识,并有助于拓展深水油气勘探领域。文章主要梳理了国际文献中主要成果认

识,对深水块体搬运沉积体系内涵、形成条件、特征、识别标志、岩相类型与岩相组合及与油气关系等领域观点进行了系统归纳和总结,指出现阶段存在的主要问题及研究展望,以期引发国内学者对该类沉积现象的关注。

1 深水块体搬运沉积体系内涵

1.1 概念演变

术语“块体搬运沉积”通常是相对于陆上的“滑坡”而言的,在国外文献中与“水下滑坡”(Submarine Landslides)、“斜坡失稳”(Slope Failure)等概念相近,普遍用于综合性地描述水下与块体流相关的重力流沉积搬运过程^[1,19-20]。自1950年Kuenen提出浊流可以形成递变层理观点以来,有关深水沉积搬运过程认识主要有4种主流观点:①根据沉积物浓度和力学机制划分为弹性岩崩、弹性和塑性的滑动与滑塌、塑性碎屑流和黏结性浊流^[21];②根据沉积物支撑机制划分为基质支撑碎屑流、粒间流体向上运动的流化流、颗粒间相互作用颗粒流和紊态浊流^[22];③根据搬运速率划分为快速岩崩、高速滑动、低速碎屑流动及慢速的蠕滑等^[23];④根据沉积过程的连续性划分为再沉积过程、底流和面流等^[24]。然而,在深水沉积研究实践过程中,上述不同类型的深水搬运过程所形成的复杂沉积物组成往往很难根据残余地层记录严格区分开^[1,15]。因此,不同学者给出了不同的深水块体搬运沉积体系定义范围。

Posamentier和Martinsen认为除浊流成因外,一切水下重力流形成的沉积物均为深水块体搬运沉积体系^[1]。而Shanmugam则认为陆坡边缘蠕滑现象很难从现实资料中被识别,且块体搬运沉积的沉积物体积浓度常大于20%,因此深水块体搬运沉积体系应全是砂质的,只包括滑动、滑塌和碎屑流形成的沉积物^[15]。Pickering和Corregidor认为深水块体搬运沉积是描述包括浊流在内的所有水下重力流一次沉积事件,实际重力流沉积物往往是多次、多类型的,所以应该用术语“块体搬运沉积复合体”(Mass Transport Complexes,简称MTC)来描述^[25]。Moscardelli等虽然也沿用了MTC术语,但却剔除了浊流和蠕滑形成的沉积物^[26]。从目前文献趋势来看^[7],第一种观点占据主要地位,即不管深水搬运过程被划分为几种,水下重力流沉积物

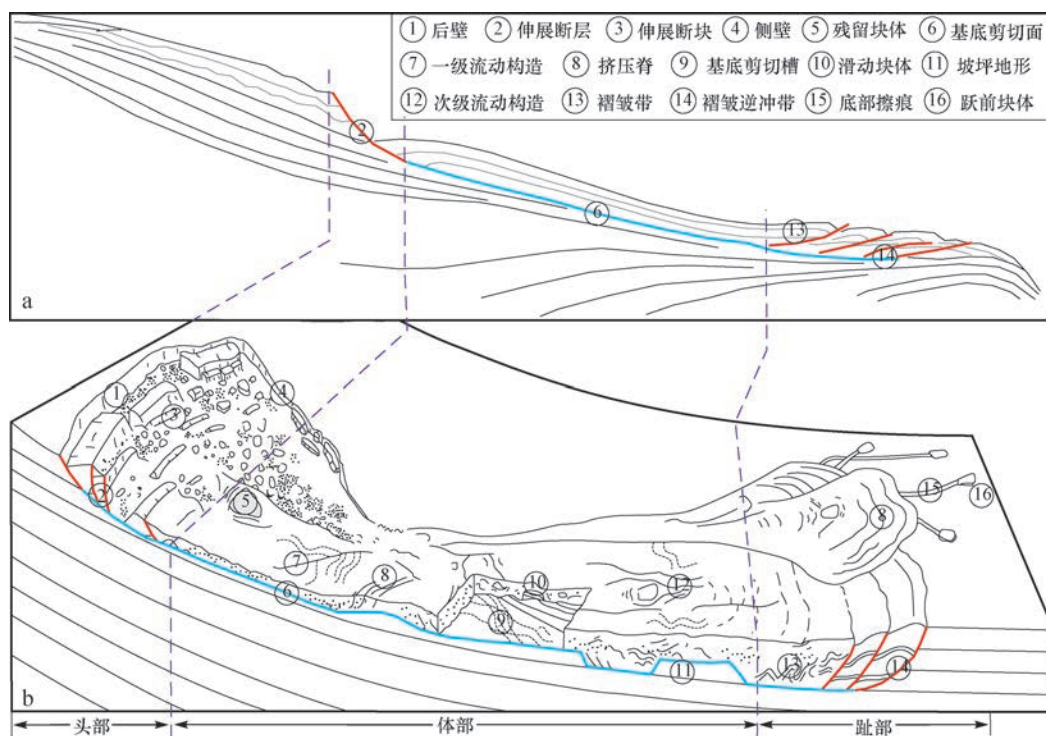


图 1 块体搬运沉积体系内部结构特征

Fig. 1 Internal structure characteristics of MTDs

a. MTDs 简单剖面结构(据文献[27],有修改);b. MTDs 复杂内部结构(据文献[28],有修改)

只分为块体搬运沉积体系和浊流成因的沉积体系两大类。

1.2 结构

受海域资料缺乏和资料精度低等因素限制,早期通常将深水 MTDs 简单地划分为伸展断裂区头部、无变形或弱变形区体部和褶皱冲断带趾部三大部分^[27](图 1a)。随着深海探测手段提高和高精度海底地层资料的获取,这种特殊的沉积体系内部复杂的结构也被逐渐识别。

MTDs 头部属于地质薄弱带,在触发机制作用下,斜坡地质体失稳形成伸展构造和断块体沿断裂面或基底剪切面向下滑移。常见陡崖或断层崖、铲式正断层、侵蚀或冲蚀沟谷及断块等海底结构或地貌单元(图 1b)^[15,28-29]。其中,后壁坡陡、断崖面积大,平面上呈弧形。而侧壁坡缓,断崖面积小,向下坡方向逐渐尖灭。该部分以滑动搬运为主,地质体内部常无变形。整个头部剖面上多呈阶梯状并发育深凹沟谷,平面展布呈明显的下凹形或塌陷状。

MTDs 体部受基底剪切面和侧向古地形联合控制,在地形变化地区可见明显变形构造,如剪切槽、流动构造、挤压脊等现象。该部分沉积物搬运以滑塌和碎屑流为主,内部呈弱变形或中等程度变形,局部可见残留

滑块。地形坡度较头部明显变缓,向下倾方向,沉积物逐渐增厚。在海底先存沉积物固结程度较差地区,受持续的滑塌和碎屑流作用,可能会产生次级 MTDs(图 1b)^[15,21,28-30]。

MTDs 趾部是块体搬运最为主要的沉积物驻留区。多期沉积物叠置推挤,受阻于前缘海底隆起区,形成了从挤压褶皱到叠瓦状褶皱冲断构造格局,前缘可见底部擦痕和跃前块体(图 1b)^[15,28,30]。该部分以碎屑流为主,局部可见浊流沉积物。地形坡度相对平缓,形成的沉积物以连续弧形向下坡方向不断扩展,并逐渐向深海平原区消亡。

1.3 类型

基于深水搬运过程对深水 MTDs 不同阶段沉积物类型进行判别是目前流传最为广泛的一套分类体系^[1,30-31]。该方法主要是综合不同阶段沉积物沉积特征和特定的地质现象,如沉积物分选、颗粒大小与分布、沉积构造、地质体形态、断层及褶皱发育情况等,判断沉积物属于深水 MTDs 哪个阶段的产物(图 2a)。然而,深水块体搬运沉积通常是一种连续重力流沉积过程,具有多期叠置和难区分等特点,而且不同学者对深水搬运过程分类标准及搬运类型认识也有差异,导致 MTDs 不同阶段类型划分多种多样,术语也很难统一^[15,32]。

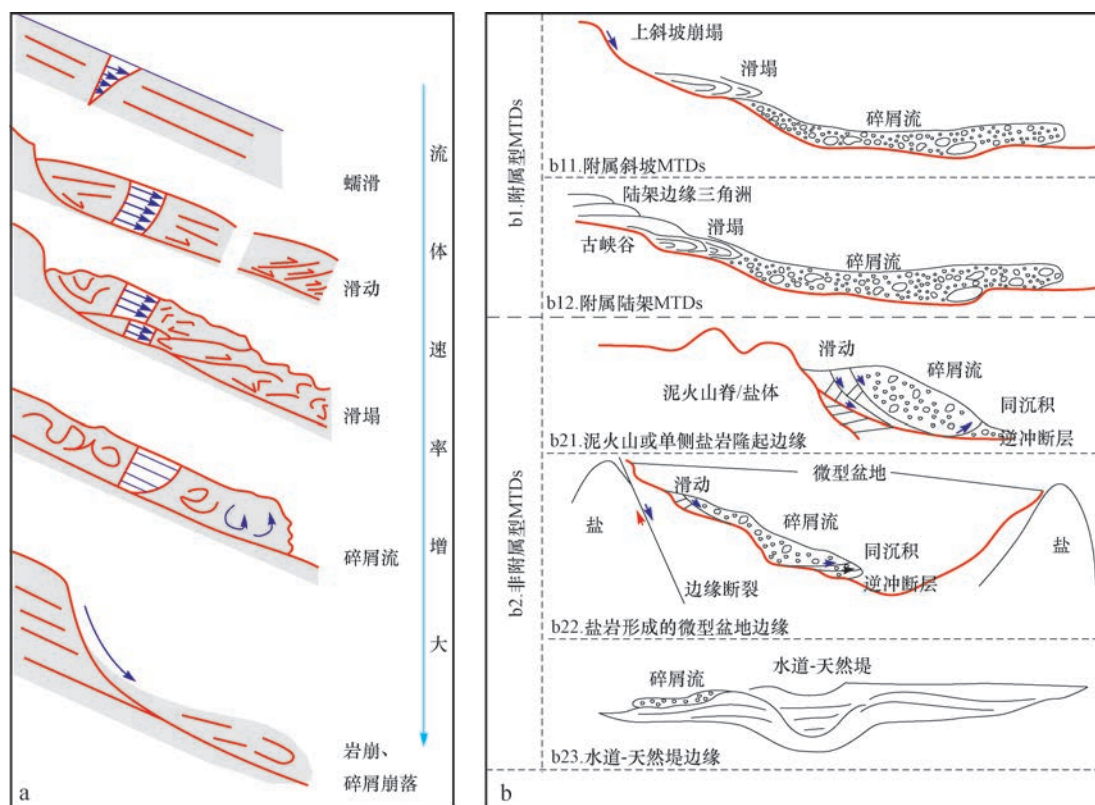


图2 块体搬运沉积体系类型

Fig. 2 Types of MTDs

a. 基于深水搬运过程的 MTDs 分类(据文献[1],有修改);b. 基于沉积物成因的 MTDs 分类(据文献[26])

Moscardelli 和 Wood 根据 MTDs 外部形态、触发机制、沉积物与物源关系及物源位置,把深水 MTDs 从沉积物成因上划分为附属型和非附属型两大类(图 2b)^[26]。附属型主要由区域地质事件触发,形成的 MTDs 规模大。可进一步划分为陆架边缘三角洲体系供给、主要受海平面变化和高沉积物速率等触发机制作用的附属陆架型 MTDs 和上陆坡崩塌、主要受地震、沿岸流、风暴等触发机制作用的附属陆坡型 MTDs 两个亚类。非附属型由局部地质事件触发,形成的 MTDs 规模相对较小。可划分为泥火山或单侧盐岩隆起、盐岩形成的微型盆地边缘和水道-天然堤边缘等亚类。

上述两种分类方法相互补充,各具优缺点。第一种分类方法虽然术语应用相对比较混乱,但直观、易操作,多偏向于单一 MTDs 沉积事件分析。而第二种分类方法更偏向于不同环境下 MTDs 沉积事件分析,注重于 MTDs 形成的地质背景,但是对于其内部特征判断仍然依赖于前一种方法。

2 深水块体搬运沉积体系形成条件

深水 MTDs 属于沉积物重力流范畴,而沉积物重

力流形成通常需要具备较大的水深、足够的坡度或密度差、充沛的物源和一定的触发机制等条件^[33]。然而,上述条件界限模糊、可变性大。如关于深水的水深标准就有多种,包括从 20 m 到超过 200 m 的风暴浪底^[34]、小于 100 m 到超过 200 m 的陆架坡折^[35]等不定值和陆架边缘均值 200 m^[15]、除去上陆坡沉积物后确定的 305 m (1 000 ft) 或 500 m^[25]等定值。而坡度条件从早期认为最小约 2°~3°^[33],到近年来不断发现的小于 1°、小于 0.5°,甚至在 0.15° 情况下也有可能发生^[20,36]。根据 COSTA 计划中报道的 Gebra MTDs 例子^[20],其底部滑脱层坡度最小可为 0°。另外,关于密度差、物源等条件也是没有一个相对精确的衡量标准。根据前述沉积物成因 MTDs 分类标准^[26],物源的充沛程度对于不同规模的 MTDs 来说相互间通常是不具有可对比性的。实际上,目前国际上并没有形成从沉积记录中判断不同的条件和深水沉积搬运过程对应关系的客观标准,更多关注集中在沉积物重力流不同类型的触发机制研究方面^[15,20]。

据文献统计,可以引发深水 MTDs 的触发机制已被发现约 20 多种(表 1)^[15,19-20]。根据不同类型触发机制作用的时间长短,可以划分为短期触发事件(持续

表1 深水MTDs触发机制类型(据文献[15],[20])

Table 1 Triggering mechanisms of deep-water MTDs
(from reference[15],[20])

触发机制	持续时间	触发机制	持续时间
地震	短期事件 (数分钟—数月)	构造变动	中期事件 (数年—数千年)
火山活动		斜坡坡度变化	
海啸		沉积物速率	
气旋或飓风		沉积载荷	
低位潮汐波		盐运动	
风暴		底流	
季节性洪水		生物扰动	
海表面重力波		天然气水合物分解	
陨石撞击		流体渗漏	
人类活动及海底工程		静液压负载	
海平面变化	长期事件 (数千年—百万年)	沉积物侵蚀作用	

时间数分钟—数月)、中期触发事件(持续时间数年—数千年)和长期事件(数千年—百万年)。受观测手段及发育时间不确定等因素控制,现代深水MTDs的形成可观察条件仍然很难,而古代深水MTDs研究多依赖于露头、岩心和地震资料的分析并进行推测^[7,15]。因此,深水MTDs触发机制研究目前仍处于以定性特征描述为主。

3 深水块体搬运沉积体系特征

3.1 流变学特征

根据摩尔—库伦破裂准则,只有当顺坡向下方向的剪应力超过物质内部的剪切强度时,块体才能从原地地质体中分离,并在重力作用下发生块体搬运沉积^[19,37]。这一过程涵盖了弹性、弹/塑性和塑性3种力学机制,分别对应于岩崩、滑动和滑塌、碎屑流^[21]。其中,前3种搬运过程中沉积物主要为黏结状固态块状物,而碎屑流主要为非黏结状颗粒(集)。从沉积物体积浓度角度来看,这些饱和水的固态块状物或颗粒(集)均可看做广义概念上的流体(体积浓度从约20%~100%)^[15],即通常所称的块体流(体)。在流体力学中,块体流体变形符合宾汉塑性体变形特征^[15,21]。

宾汉塑性体内部具有固有强度,通常只有在外界施加的应力超过某一临界值(屈服强度)时,其变形才能呈现线性正相关(图3)。这种变形方式与属于牛顿流体的浊流变形不同^[15,21]。浊流本身不具有固有强度,其变形直接与施加的外界应力呈线性正相关(图3)。

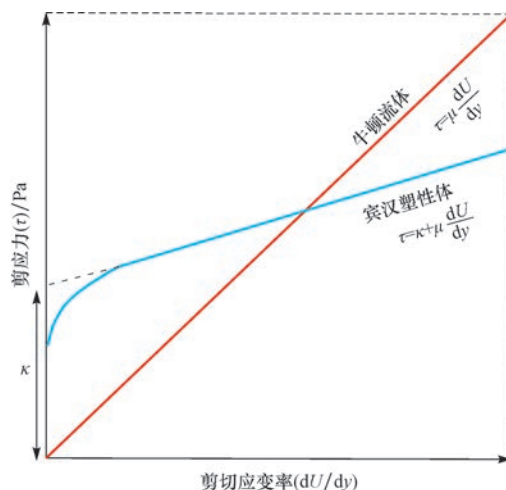


图3 牛顿流体和宾汉塑性体流变学特征(据文献[21],有修改)

Fig. 3 Rheology of Newtonian fluids and Bingham plastics
(modified from reference[21])

由此,可将深水沉积物重力流划分为块体流和浊流两种类型。目前,可以通过沉积物体积浓度、是否呈现整体固结等流动特征、搬运方式、颗粒大小、沉积构造等现象加以区分^[15,38]。

3.2 规模和几何形态

深水MTDs的规模一般用可测量的面积、长度、厚度和体积等定量数据来表征。根据目前已发现的全球300多个深水MTDs数据统计表明^[9],不同背景下MTDs的规模差异非常大。其中,面积最大是位于加拿大盆地被动大陆边缘环境下的新近纪MacKenzie MTDs^[39],约 $13.2 \times 10^4 \text{ km}^2$,最小的是位于美国西部边缘收敛环境下现代Buried MTDs^[40],只有 0.06 km^2 。走向上延伸长度最长的是西非边缘被动大陆边缘环境下古新世Bed 5^[41],约2 000 km,最短的是位于印度边缘收敛环境下的现代Swatch of No Ground MTDs^[42],只有0.3 km。垂向上沉积厚度最厚的是欧洲直布罗陀海峡收敛环境下的中新世Giant Chaotic Body MTDs^[43],达4 000 m,最薄的是位于厄瓜多尔境内收敛环境下现代US1 MTDs^[44],只有2.2 m。沉积物总体积最大是墨西哥湾被动大陆边缘环境下白垩纪Chic-xulub MTDs^[45],约 $259 \times 10^3 \text{ km}^3$,而体积最小的是上述Buried MTDs^[40],只有 $2 \times 10^{-4} \text{ km}^3$ 。

深水MTDs的几何形态是通过上述定量数据所反应的沉积体在三维空间上相互关系来表征。早期通常用垂向上厚度和侧向上的长度、宽度或直径等数据以不同比值的形式反应MTDs几何形态特征,如宽/厚比值、宽/长比值等^[15]。Moscardelli和Wood通过对全球MTDs定量数据统计和数据的回归拟合分析^[9],建立了

附属型和非附属型 MTDs 面积和长度、厚度和体积、面积和体积等相互之间的数学关系式。结果显示,附属型 MTDs 各参数数值通常高于非附属型 MTDs 两个数量级左右(图 4),而运用拟合的定量关系式对资料不全或古代深水 MTDs 的规模特征分析具有很好的预测作用^[9]。

3.3 运动学指向

运动学指向是指深水 MTDs 在搬运过程中所形成的特殊的地质结构形态或变形构造,记录和指示了 MTDs 不同部位常见的地质特征和沉积搬运动力学信息^[23]。虽然现今残留的深水 MTDs 往往存在多期叠置或局限发育不完全等现象,根据前人总结的不同部位可能的运动学指向标志不仅可以判断深水块体搬运的规模形态,还可以深入了解深水块体流启动、发育演化和搬运终止等动力学过程信息^[28,46]。

深水 MTDs 头部区是块体流启动部位,常见断崖、平面呈弧形的破裂面、地堑、断块及断块脊等结构标志(图 1 和图 5 头部)^[19,27-28]。体部侧向边缘断崖沿搬运方向逐渐尖灭,并限制了 MTDs 主体发育范围。沿侧向边缘常见走滑构造变形特征,可见雁列式结构和拖拽力形成的流动带状沉积波,局部发育二次垮塌物[图 1 和图 5 体部(侧向边缘)]^[28]。体部基底剪切面可见断坡、断坪或沉积物下切形成的似沟槽状等先存底部形态,在搬运过程中基底剪切面还可形成沟槽或擦痕等变形构造和外来块体的再次搬运等现象[图 1

和图 5 体部(基底剪切面)]^[1,28,37]。MTDs 块状内部呈较连续性沉积、其他部分多以杂乱性堆积为主,下部发育韧性滑脱层,局部挤压可形成不同形状的褶皱[图 1 和图 5 体部(MTDs 内部)]^[1,28-29]。体部的顶部滑动面多见流体纹层(沉积波),沿走向剪切带发育凹形或平行状等不同形状的条带状结构沉积波^[28,47][图 1 和图 5 体部(顶部滑动面)]。深水 MTDs 趾部区为搬运终止部位,变形最为强烈。前端多呈前展式弧状,内部发育褶皱冲断构造、逆冲体、逆冲断层及冲起断块等,顶面为不整合面,其上多出现另一套沉积物形成的平行/近平行的弧状脊结构(图 1 和图 5 趾部)^[15,28]。

3.4 侵蚀和搬运能力

有关深水 MTDs 具有侵蚀特征已被多个文献所证实,决定其侵蚀能力大小主要因素有^[1,48-49]:块体流自身的固结程度、内部碎屑物在搬运过程中抵挡被分离的能力强度、流体速率大小和流体的规模等。通常情况下,可根据底部基底剪切面上残留的擦痕或沟槽等结构形态规模来判断深水 MTDs 侵蚀能力。目前并没有详细的定量数据统计其具体数值大小,但根据文献中常见 MTDs 实例判断,侵蚀下伏地层深度多数位于数十米到数百米之间,而侵蚀形成槽状形态的宽度延伸最长可达数十公里^[1,9,15]。

深水块体搬运能力巨大,特别是附属型 MTDs,体积规模一般为数百到数千立方千米,最大可达数十万立方千米^[9,50]。不同规模的深水 MTDs 搬运距离差别较大,长距离搬运一般发生在坡度小于 2° 的大陆斜坡区^[15],可达数百千米,如夏威夷海底块体滑动搬运超过 200 km^[19]、挪威陆架边缘现代 Storegga MTDs 搬运距离超过 800 km 以上^[20]。与陆上滑坡不同,深水 MTDs 长距离搬运可以用滑水作用(Hydroplaning)来解释^[15,51]。Mohrig 等通过水槽实验认为^[51],MTDs 前端的碎屑流前缘在薄水层上具有滑动现象,即“滑水”,这种滑水作用导致碎屑流前缘与水之间的层面拖拽力减小,碎屑流前缘搬运速率增大,促使其快速脱离 MTDs 主体,形成独立块体长距离搬运现象。

4 深水块体搬运沉积体系识别方法

受深水地区资料限制,目前在油气工业领域最为常见的深水 MTDs 识别方法仍然以地震资料解释为主,辅以有限的岩心、常规测井和露头数据,通过不同类型资料在几何形态、变形构造、接触关系、沉积组合、粒度等方面的地质特征响应可以识别不同尺度规模的深水 MTDs 整体或局部^[1,15,52]。

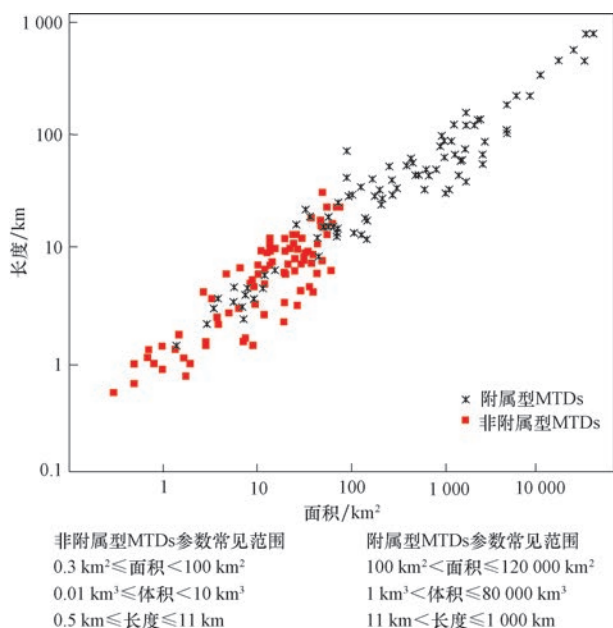


图4 非附属型和附属型 MTDs 面积和长度对数散点图
(据文献[9],有修改)

Fig. 4 Log-log scatter diagram of area vs. length for attached and detached MTDs(modified from reference[9])

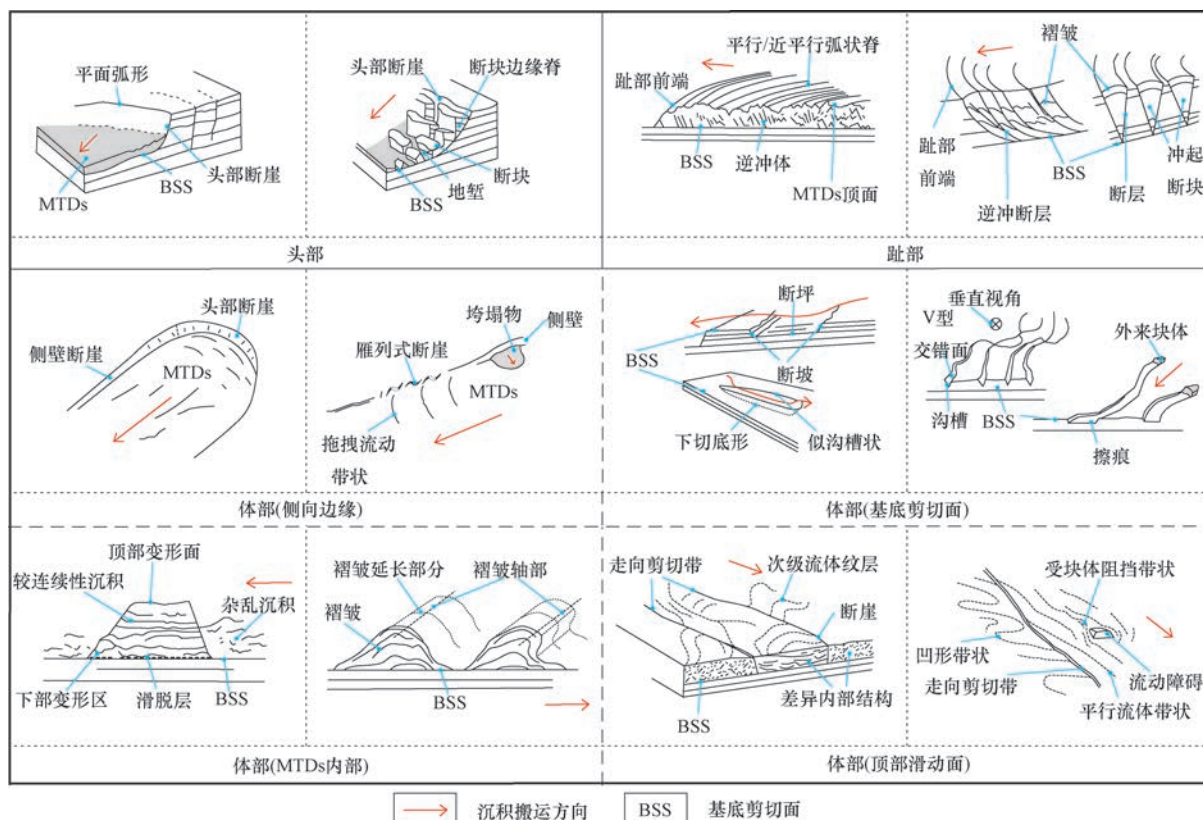


图 5 深水 MTDs 不同部位运动学指向(据文献[28],有修改)

Fig. 5 Kinematic indicators at different locations of deep-water MTDs(modified from reference[28])

4.1 地震资料识别

根据地震资料来识别深水 MTDs 是目前最为主要的方法^[1,52]。其依据是通过地震波对 MTDs 边界及内部运动学指向或地层各向异性特征响应来判别深水 MTDs 的整体形态或搬运过程中的地层展布特征^[1,28,46]。沿 MTDs 走向及倾向方向的横剖面可以根据前述 MTDs 不同部位运动学指向(图 5)^[1,28],如地震上常见的基底剪切面沟槽、后壁及侧壁断崖、内部杂乱反射和散落碎屑块体及趾部褶皱冲断构造等识别标志判断 MTDs 的整体规模、叠置样式及搬运方向等(图 6b—f)。而利用三维地震资料属性特征分析^[1,28,52],如相干体、时间切片、地层倾角、方位角、振幅、叠后属性融合等技术手段(图 6a),可以进一步识别和表征不同层面深水 MTDs 展布、内部结构特征、垂向演化以及不同部位形态与变形构造演变等,进而了解 MTDs 的形成过程信息。

利用地震资料识别的 MTDs 一般需要其自身具有一定的发育规模,受海域常见的厚层高塑性体(盐岩和页岩)及块体内部高含水等因素影响,通过地震资料在对 MTDs 内部特征识别时,通常需辅以岩心观察、测井解释及研究者对研究区沉积整体特征把握等信息进行

综合对比,确保识别结果的可靠性和精度要求。

4.2 岩心和露头资料识别

通过岩心和露头直接对岩石序列进行观察可以分析岩石中厘米级的复杂沉积特征,还可以把 MTDs 形成过程中的滑动、滑塌和碎屑流等搬运过程有效地区分开^[15,47,53]。运用岩心和露头资料对深水 MTDs 观测内容主要包括^[15,25,52]:粒度变化、成分、颜色、变形构造、厚度变化、层间接触关系、生物扰动、不同位置的地层产状等,通过这些地质现象解释界定深水 MTDs 的特定沉积搬运过程和搬运方向。其中,反映深水块体滑动标志有^[15,28,53]:顶底突变接触、块状砂体粒度中等、主滑移面存在及相关剪切带、块状砂体存在内部陡倾层或次滑移面、单一块体规模厚度大、呈席状几何形态等(图 7a)。反映深水块体滑塌标志有^[15,53-55]:顶部不规则接触面或顶底突变接触面、滑塌褶皱、砂岩中泥岩碎屑块体、火焰构造、S 形变形构造、发育侵入体、呈透镜状或席状几何形态(图 7b)。反映碎屑流标志有^[15,49,54-55]:顶部不规则接触面或顶底突变接触面、近顶层富含漂浮碎屑、内部常见泥砾、上部正递变和下部反递变序列、泄水构造、正断层、侵入构造、整体呈块状、席状或透镜状几何形态(图 7c)。

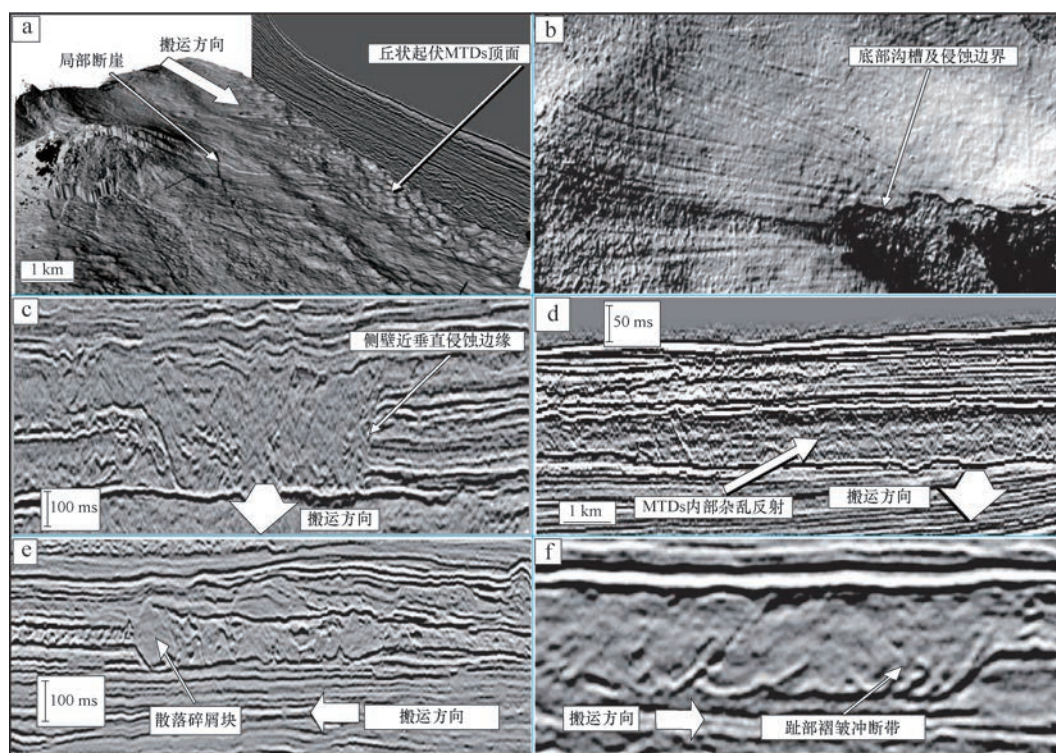


图 6 深水 MTDs 地震资料常见识别标志(据文献[1],重新解释)

Fig. 6 Common seismic identification marks of deep-water MTDs(modified from reference[1])

a. 顶部; b. 基底剪切面; c. 侧壁; d. 内部杂乱反射; e. 内部散落碎屑块; f. 趾部

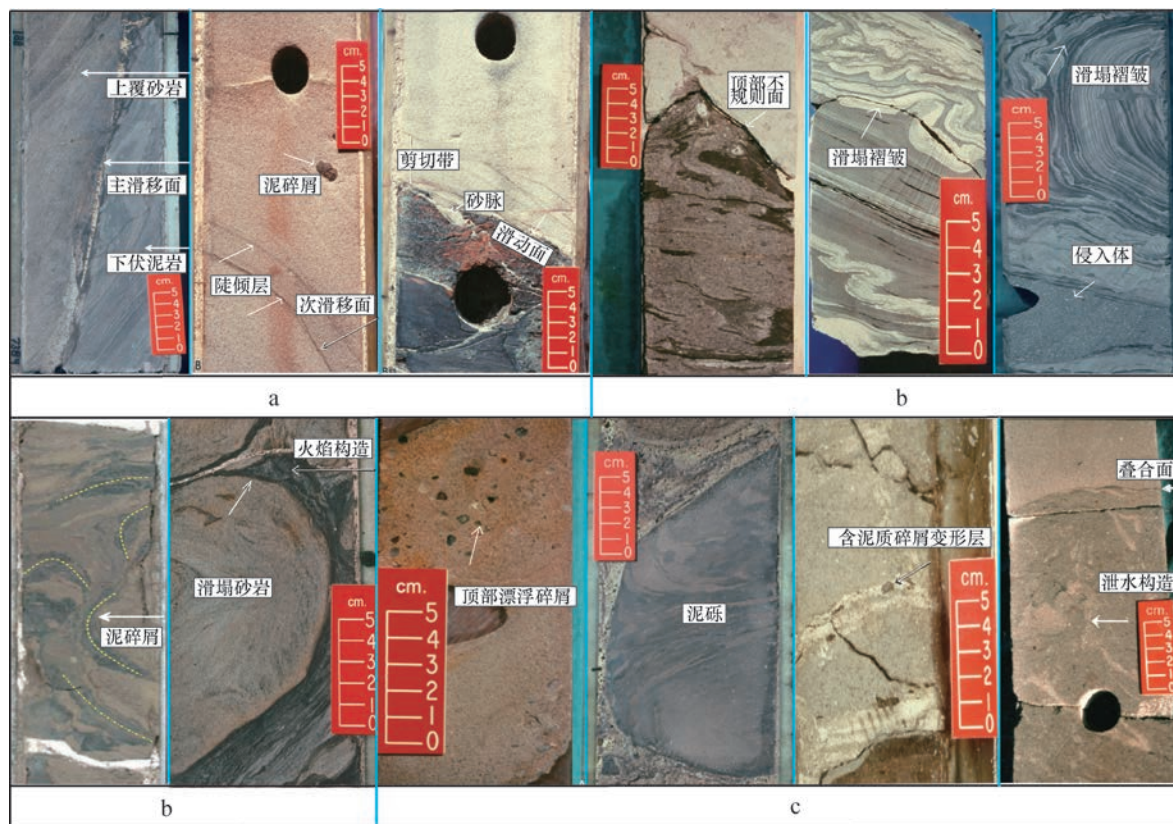


图 7 深水 MTDs 岩心资料常见识别标志(据文献[15],重新解释)

Fig. 7 Common core identification marks of deep-water MTDs(modified from reference[15])

a. 块体滑动; b. 块体滑塌; c. 碎屑流

通过上述不同阶段岩心和露头识别标志区分深水体块搬运沉积过程和叠置期次,可以从更高精度角度建立块体搬运沉积内部特征序列和垂向叠置样式。然而,受深水岩心和露头资料普遍缺乏及局限等实际情况限制,现实研究过程中,往往通过局部岩心和露头资料对相对低精度的地震解释结果进行标定和校正,从而提高解释结果的可靠程度。

4.3 常规测井资料识别

由于深水MTDs与围岩通常以突变或不规则变化接触为主,在常规测井资料上会有很明显的地质响应,根据这些变化特征组合可以进行深水MTDs的识别,主要包括利用测井曲线基值偏移判断沉积物粒度变化及沉积趋势变化、根据垂向曲线变化特征判断MTDs期次及垂向叠置样式等^[1,7]。

单一深水MTDs在常规测井曲线上响应以箱形、上部钟形和下部漏斗形纵向组合为主要特征,内部表现为齿状或弱齿状,底部曲线以突变为主,顶部可以为突变、不规则变化或渐变等^[7]。在利用测井资料判别过程中,多以井-震联合精确标定为前提,在地震识别基础之上判断MTDs界面和多期MTDs的内部样式和垂向叠置关系。如有岩心或露头等其他高精度资料,则效果更好。但是通常很难根据测井资料判断块体搬运方向,即使利用特殊测井方法,如高精度地层倾角测井资料也很难^[1]。

5 深水体块搬运沉积体系岩相类型与岩相组合

有关深水重力流岩相类型划分主要有特征描述划分法、基于沉积物成因划分法、根据沉积特征英文首字母缩写进行编码划分法以及相的级次和特征描述结合划分法等几种划分方法^[25,56-59]。特征描述划分方法是早期通过颗粒大小、顶底接触几何学、原生沉积构造等现象,对深水岩相给予较粗略地划分,适用于基于露头资料描述的中等尺度或较大尺度的深水岩相划分^[56]。而基于沉积物成因划分法前提是深水沉积物流体之间部分是可以转换的,但这一观点至今仍受到多数学者质疑^[25,57]。根据沉积特征英文首字母缩写进行编码的深水岩相划分更多集中在重力流沉积物本身,与其相关的深水泥、生物成因和化学成因沉积物描述较少,且垂向上具有成因联系的沉积物组合特征分析较少^[58]。根据相的级次和特征描述结合的划分方法是目前较为流行的深水岩相划

分方法,即通过单一成因深水重力流过程解剖,结合沉积特征差异描述,建立岩相类型和岩相序列组合^[25,59]。

上述深水重力流岩相划分方法对于深水MTDs岩相类型划分具有很强的指导意义。Tripsanas等通过对北美东部边缘深水MTDs岩心观察与描述,根据沉积特征、沉积物变形类型及其程度等要素将深水MTDs岩相划分为6大类和12个亚类^[54]:外源层状沉积物;(高)扭曲层状沉积物;硬(软)碎屑支撑含泥碎屑砾岩;(非)均质基质支撑含泥碎屑砾岩;均质基质支撑含很少泥碎屑;冰川成因均质基质支撑含泥碎屑砾岩;薄碎屑支撑/薄正递变含泥碎屑砾岩;混杂沉积物(图8)。同时根据深水MTDs不同位置可能的搬运机制和流体过程,划分岩相组合为6大类和13个亚类^[54]:局部滑动/滑塌或上倾断崖处沉积物;垮塌碎屑物;垮塌碎屑物尾部或滑落碎屑物;富含碎屑泥流;低变形滑动/滑塌、残留块体、滞留沉积物;高变形滑动沉积物;高速率黏结性碎屑流;由高到低速率黏结性碎屑流的滞留沉积物;低速率黏结性碎屑流;含少量碎屑的泥流;冰川成因低速率黏结性碎屑流;大型块体运动前端泥流;无黏结性碎屑流(图8)。

Tripsanas等的划分方案重点强调了沉积位置、沉积物变形、颗粒间支撑类型和沉积物成因等因素,对于纵向沉积组合趋势判断及生物和化学成因沉积物则涉及较少^[54]。另外,受不同的学者对深水搬运过程认识的差异,国际上对于深水MTDs岩相类型的划分仍没有一个较统一的结果^[15,25,54-55],而且基于不同地质背景下的岩相类型划分结果也并不一定适用于其他地区,如Tripsanas等划分方案中的具有局部因素的冰川成因沉积物等。

6 深水体块搬运沉积体系与油气关系

在油气勘探实践过程中,深水MTDs可以构成油气的盖层、储层,甚至在特殊的环境下可以成为烃源岩^[1,4,15]。这主要与物源区可供搬运的沉积物粒度等初始特征及搬运过程中不同的地质条件有关,目前报道最多的是其作为油气盖层和储层^[1,4,60]。

深水MTDs作为油气有效盖层已被多个研究者所证实,常见的封盖样式以顶部区域性封堵和侧向封堵为主^[4]。已发现的深水MTDs对油气具有封盖能力的原因概况起来主要有^[4,9,16]:①附属型深水MTDs具有搬运距离长、分布范围广、厚度大、连续性好等特点,具备区域性盖层条件;②块体搬运沉积物多富含粘土,通

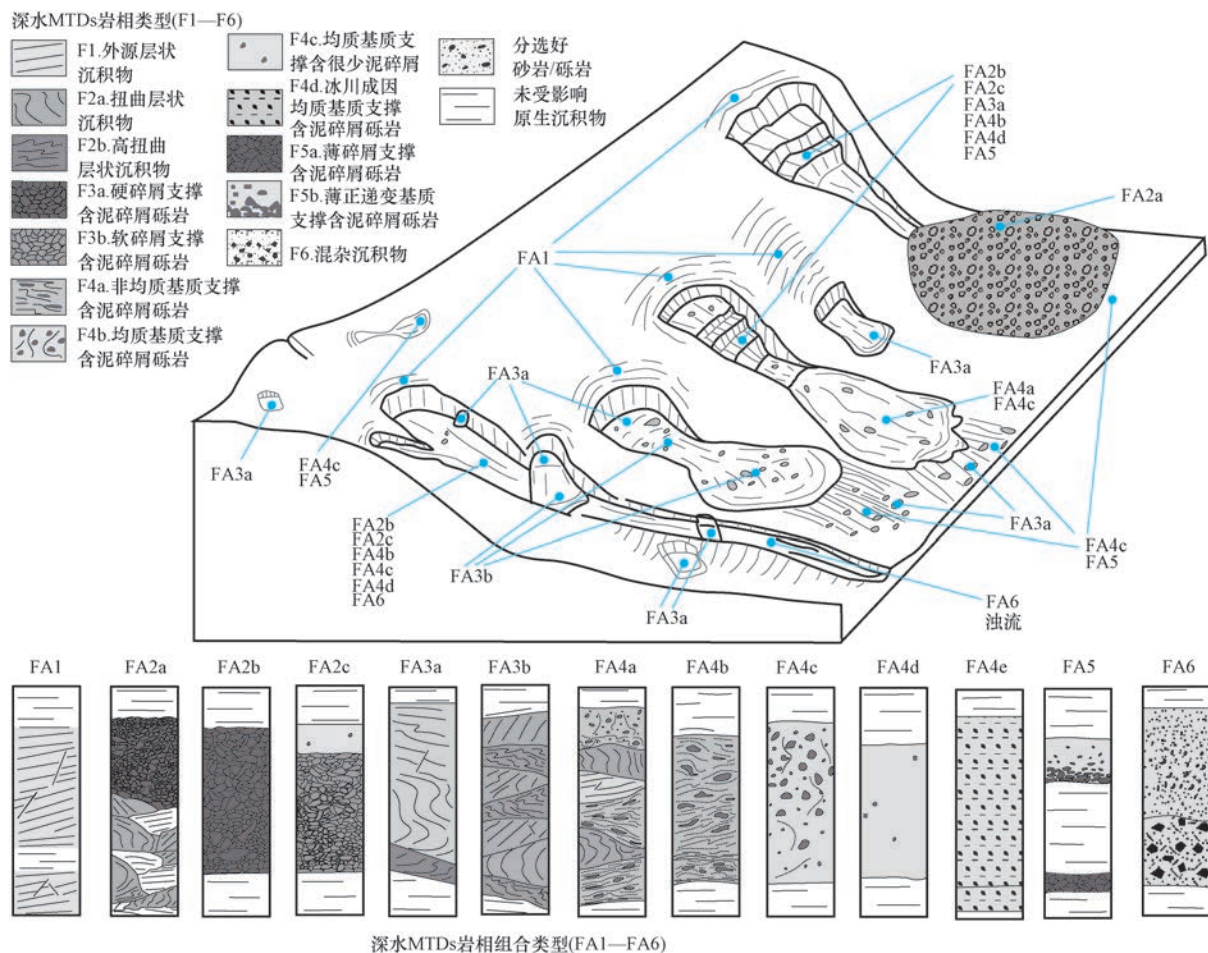


图8 深水MTDs岩相类型和岩相组合(据文献[54],有修改)

Fig. 8 Lithofacies types and lithofacies associations of deep-water MTDs(modified from reference[54])

常上覆深海洋细粒沉积体,从而形成纵向上致密岩体组合;③快速沉积和整体固结的特征导致沉积体内部往往具有超压现象;④先存不规则地形及下切水道等被MTDs覆盖后可以从侧向上对储层内油气进行封堵形成地层圈闭。

常见的深水MTDs具有低孔低渗特征,但是在某些特定环境下,深水MTDs也可形成重要的油气储层,全球不同地区深水油气勘探实践也证实了这一观点^[16-17,60]。印度东部海岸的K-G盆地上新世峡谷内充填砂质碎屑流可以形成厚度累计达32 m的油气储层,孔隙度和渗透率均很高,而同时期的泥质块体搬运沉积物则没有形成有效储层^[10,12]。北海维京地堑北部Statfjord油田的储层是受中侏罗世的断裂控制,砂体从构造脊部经滑动、滑塌等二次搬运至构造低位,被围岩所限制并保存^[15,17]。墨西哥湾德克萨斯州南部地区,渐新世Frio组砂岩储层是由上倾方向的低位扇体大规模滑塌后堆积在深海水道内充填而形成

的^[17,60]。上述不同地区的实例表明,非附属型深水MTDs形成油气储层的可能性明显大于附属型深水MTDs,这是由于局限环境下发育的MTDs搬运距离短、后期受破坏作用小且可以被快速的保存下来,当其与烃源岩形成有效沟通后,成为油气储层的可能性大^[4,16]。而附属型MTDs作为油气盖层意义明显大于其作为储层的意义,但是在长距离水下搬运过程中,受其侵蚀而残留下的浊流沉积物与MTDs一起可以构成优质的储盖组合,是深水区重要的潜在油气勘探目标^[4]。

7 存在的主要问题及研究展望

7.1 存在的主要问题

1) 深水块体搬运沉积过程认识有待进一步深化和统一。目前不同的学者持有的不同观点导致对于深水MTDs定义、范围、识别及成因等认识结果的不统

一。进一步加强对水下实际现象的观测,并结合水槽实验、数学模拟等多种研究方法的投入是深入了解深水块体搬运过程的重要条件。

2) 不同地质背景下深水 MTDs 形成条件研究明显不足。有关附属型深水 MTDs 研究较多,而非附属型,即局限环境下深水 MTDs 研究成果较少。形成条件中触发机制研究成果较多,但主要仍停留在定性描述阶段,其他形成条件成果认识较少。

3) 深水 MTDs 与浊流沉积物区别研究不足。虽然目前从搬运过程、流体流变学特征等方面理论上将深水 MTDs 与浊流沉积物分开,但是现实操作过程中,由于深水重力流沉积快速变化、搬运过程的连续性和多期叠置等因素,根据现有资料正确并严格区分这两者仍然不易。

4) 古代与现代深水 MTDs 共性与差异性研究不足。目前报道的全球深水 MTDs 实例以新生代为主,早期实例研究较少,而古代深水 MTDs 对于深水油气勘探而言可能更具有现实意义。

5) 有关深水 MTDs 的岩相类型和岩相组合至今仍未形成统一的标准体系。

7.2 研究展望

随着海域工程设施风险的逐渐重视和全球深水油气勘探的快速发展,笔者综合分析认为深水 MTDs 未来研究主要集中在以下几个方面:

1) 岩心、露头高精度资料和地震、测井、声学探测等低精度资料综合应用分析多尺度深水 MTDs 特征。受水深条件限制,深水区钻井费用高、取心资料少、不确定因素多,现今 MTDs 研究多以低分辨率的地震资料分析为主,尺度小、范围相对局限。未来可以结合全球不同环境下的深水油气勘探高精度地球物理资料,辅以国际上大陆斜坡计划所获得的多类型数据,从广度和深度上全方位解剖该类沉积体系。

2) 深水 MTDs 形成条件特别是不同地质背景下触发机制深入研究。随着高精度水下探测仪器的不断更新,现今的单一 MTDs 发生事件将会逐步被捕捉到,结合古代 MTDs 资料解剖,逐渐形成不同大地构造背景下、不同部位或不同类型的 MTDs 触发条件、形成过程信息,进而对全球其他相似地质背景下可能发生的 MTDs 进行预测和分析。

3) 水下块体搬运机理、沉积物组成及深水重力流沉积物一体化研究。关于深水沉积物重力流成因及搬运过程研究一直是沉积学界热点领域,加强观测和水槽实验相似性模拟是目前较为现实的手段。不同精度

观测仪器的投入观测是从水下沉积物形成过程出发,“将今论古”研究其搬运机理。水槽实验模拟是从沉积物组成、形态以及不同地质条件中寻找其相似性出发,解剖分析现今残余的沉积物可能形成过程。两者有效结合才能更好判断深水环境沉积物形成。

4) 深水 MTDs 在何种环境或条件下可以形成烃源岩、储层或盖层。深水 MTDs 体积大、发育期次多、叠置关系复杂,作为油气储层和盖层原因在前述中已有阐明,但作为烃源岩与其物源物质本身有很大关系,在埋藏过程中伴随原始有机质成烃需要具备特定的温度和时间等条件,目前虽很少见报道,但进一步加强深水油气勘探实例解剖和烃类检测等技术是明确深水 MTDs 成烃、成藏和封盖机理的必要手段。

5) 古代深水 MTDs 详细解剖及油气勘探意义。古代 MTDs 破坏严重,残余沉积物分析困难。根据现有地球物理资料精细解剖沉积体系叠置关系,建立不同时间段研究区沉积体系沉积模式和演化过程可以相对准确地还原 MTDs 沉积背景和可能的变化过程,另外,进行有效的类比分析和实验研究也是现阶段重要手段。

6) 深水 MTDs 侵蚀能力和地质风险评估。关于近现代的深水 MTDs 侵蚀和搬运能力,国际上已有相关数据库进行详细地记录,基于历史数据,建立不同地区、不同类型和不同规模 MTDs 破坏能力数学模型是未来该领域一个重要方向。

参 考 文 献

- [1] Posamentier H, Martinsen O. The character and genesis of submarine mass-transport deposits: insights from outcrop and 3D seismic data [C]//Shipp R, Weimer P, Posamentier H. Mass-transport deposits in deepwater settings. Tulsa: SEPM Special Publication, 2009: 7-38.
- [2] Masson D, Harbitz C, Wynn R, et al. Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2006, 364 (1845): 2009-2039.
- [3] Maslin M, Owen M, Day S, et al. Linking continental-slope failures and climate change: testing the clathrate gun hypothesis [J]. Geology, 2004, 32 (1): 53-56.
- [4] Moscardelli L, Wood L, Mann P. Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90 (7): 1059-1088.
- [5] Shipp R, Weimer P, Posamentier H. Mass-transport deposits in deepwater settings: an introduction [C]//Shipp R, Weimer P, Posamentier H. Mass-transport deposits in deepwater settings. Tulsa: SEPM Special Publication, 2009: 3-6.
- [6] COSTA Canada Project. Costa Canada Activities [EB/OL]. (2004-3-29) [2016-7-20]. <http://www.costa-canada.ggl.ulaval.ca/english.html>.
- [7] Shipp R, Weimer P, Posamentier H. Mass-transport deposits in deepwater settings [M]. Tulsa: SEPM Special Publication, 2009: 1-527.
- [8] 中国科学院海洋地质与环境重点实验室. 近海底地质过程研究

- 组情况简介及相关在研项目介绍[EB/OL].(2014-11-17)[2016-7-26].http://mage.qdio.cas.cn/ktzjs_27124/hydl-gcjqhjyx/hydlgcjqhjyx_yzjs/.
- [9] Moscardelli L, Wood L. Morphometry of mass-transport deposits as a predictive tool[J]. Geological Society of America Bulletin, 2016, 128(1-2): 47-80.
- [10] Wang L, Wang Z, Yu S, et al. Seismic responses and controlling factors of Miocene deepwater gravity-flow deposits in Block A, Lower Congo Basin[J]. Journal of African Earth Sciences, 2016, 120: 31-43.
- [11] Chen H, Zhan W, Wu S. Response of geomorphic and geological processes to insufficient and ample sediment supply along the upper continental slope in the north-western South China Sea[J]. Journal of Earth System Science, 2016, 125(8): 1635-1655.
- [12] Davide G, Tiago M. Bi-modal deformation styles in confined mass-transport deposits; Examples from a salt minibasin in SE Brazil[J]. Marine Geology, 2016, 379: 176-193.
- [13] Sobiesiak M, Alsop G, Kneller B, et al. Sub-seismic scale folding and thrusting within an exposed mass transport deposit; A case study from NW Argentina[J]. Journal of Structural Geology, 2017, 96: 176-191.
- [14] Safadi M, Meilijson A, Makovsky Y. Internal deformation of the south-east Levant margin through continued activity of buried mass transport deposits[J]. Tectonics, 2017, 36(3): 559-581.
- [15] Shanmugam G. New perspectives on deep-water sandstones: origin, recognition, initiation and reservoir quality[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012: 1-423.
- [16] Shipp R, Nott J, Newlin J. Physical characteristics and impact of mass transport complexes on deepwater jetted conductors and suction anchor piles[J]. Journal of Cataract & Refractive Surgery, 2004, 13(2): 151-156.
- [17] IHS Energy. Edin[EB/OL]. (2016-3-25)[2016-8-10]. <http://www.ihsenergy.com>.
- [18] Purvis K, Kao J, Flanagan K, et al. Complex reservoir geometries in a deep water clastic sequence, Gryphon Field, UKCS; injection structures, geological modeling and reservoir simulation[J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(2): 161-179.
- [19] Hampton M, Lee H, Locat J. Submarine landslides[J]. Reviews of Geophysics, 1996, 34(1): 33-59.
- [20] Canals M, Lastras G, Urgeles R, et al. Slope failure dynamics and impacts from seafloor and shallow sub-seafloor geophysical data; case studies from the COSTA project[J]. Marine Geology, 2004, 213(1-4): 9-72.
- [21] Dott R. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes[J]. AAPG Bulletin, 1963, 47(1): 104-128.
- [22] Middleton G, Hampton M. Sediment gravity flows; mechanics of slow and deposition[C]// Middleton G, Bouma A. Turbidites and deep-water sedimentation. Tulsa: SEPM Pacific Section Short Course, 1973: 1-38.
- [23] Varnes D. Slope movement types and processes[C]// Schuster R, Krizek R. Landslides; analysis and control, special report 176. Washington: National Academy of Science, 1978: 11-33.
- [24] Stow D. Deep-sea clastics; where are we and where are we going? [C]// Brenchly P, Williams P. Sedimentology: recent developments and applied aspects. Oxford: Blackwell Scientific, 1985: 67-94.
- [25] Pickering K, Hiscott R. Deep marine systems: processes, deposits, environments, tectonics and sedimentation[M]. Oxford: American Geophysical Union and Wiley, 2016: 1-402.
- [26] Moscardelli L, Wood L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad[J]. Basin Research, 2008, 20(1): 73-98.
- [27] Lewis K. Slumping on a continental slope inclined at 1°-4°[J]. Sedimentology, 1971, 16(1-2): 97-110.
- [28] Bull S, Cartwright J, Huuse M. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data[J]. Marine and Petroleum Geology, 2009, 26(7): 1132-1151.
- [29] Prior D, Bornhold B, Johns M. Depositional characteristics of a submarine debris flow[J]. The Journal of Geology, 1984, 92(6): 707-727.
- [30] Hüneke H, Mulder T. Deep-sea sediments[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011: 1-823.
- [31] Meckel L. Reservoir characteristics and classification of sand-prone submarine mass-transport deposits[C]// Shipp R, Weimer P, Posamentier H. Mass-transport deposits in deepwater settings. Tulsa: SEPM Special Publication, 2009: 423-452.
- [32] Shanmugam G. Transport mechanisms of sand in deep-marine environments-insights based on laboratory experiments; discussion[J]. Journal of Sedimentary Research, 2011, 81(11): 841.
- [33] 朱筱敏. 沉积岩石学(第四版)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 372-391.
- Zhu Xiaomin. Sedimentary petrology (4th edition)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 372-391.
- [34] Pickering K, Hiscott R, Hein F. Deep-marine environments[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 1-416.
- [35] Carlson P, Karl H. Development of large submarine canyons in the bering sea indicated by morphologic, seismic, and sedimentologic characteristics[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(10): 1594-1615.
- [36] Bryn P, Solheim A, Berg K, et al. The storegga slide complex; repeated large scale sliding in response to climatic cyclicity[C]// Locat J, Mienert J. Submarine mass movements and their consequences. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2003: 215-222.
- [37] Mulder T, Cochonat P. Classification of offshore mass movements[J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66(1): 43-57.
- [38] Nemec W. Aspects of sediment movement on steep delta slopes[C]// Colella A, Prior D. Coarse-grained deltas. Oxford: Blackwell Scientific, 1990: 29-73.
- [39] Mosher D, Shimeld J, Hutchinson D, et al. Submarine landslides in Arctic sedimentation; Canada basin[C]// Yamada Y, Kawamura K, Ikehara K, et al. Submarine mass movements and their consequences. Dordrecht: Springer, 2012: 147-157.
- [40] Lee C, Nott J, Keller F, et al. Seismic expression of the Cenozoic mass transport complexes, deepwater Tarfaya-Agadir basin, offshore Morocco[C]// Offshore Technology Conference Proceedings; OTC16741. Houston, 2004.
- [41] Wynn R, Talling P, Masson D, et al. Investigating the timing, processes and deposits of one of the world's largest submarine gravity flows: 'the bed 5 event' off northwest Africa[C]// Mosher D, Shipp R, Moscardelli, et al. Submarine mass movements and their consequences. Dordrecht: Springer, 2010: 463-474.
- [42] Rogers K, Goodbred S. Mass failures associated with the passage of a large tropical cyclone over the swatch of no ground submarine canyon (Bay of Bengal)[J]. Geology, 2010, 38(11): 1051-1054.
- [43] Torelli L, Sartori R, Zitellini N. The giant chaotic body in the Atlantic Ocean off Gibraltar; new results from a deep seismic reflection survey

- [J]. Marine and Petroleum Geology, 1997, 14(2): 125–138.
- [44] Ratzov G, Collet J, Sosson M, et al. Mass-transport deposits in the northern Ecuador subduction trench: result of frontal erosion over multiple seismic cycles [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 296(1–2): 89–102.
- [45] Denne R, Scott E, Eickhoff D, et al. Massive Cretaceous-Paleocene boundary deposit, deep-water Gulf of Mexico: new evidence for wide-spread Chicxulub-induced slope failure [J]. Geology, 2013, 41(9): 983–986.
- [46] Alves T, Kurtev K, Moore G, et al. Assessing the internal character, reservoir potential, and seal competence of mass-transport deposits using seismic texture: a geophysical and petrophysical approach [J]. AAPG Bulletin, 2014, 98(4): 793–824.
- [47] Nardin T, Hein F, Gorsline D, et al. A review of mass movement processes, sediment and acoustic characteristics, and contrasts in slope and base-of-slope systems versus canyon-fan-basin systems [C] // Doyle L, Pilkey O. Geology of continental slopes, Tulsa; SEPM Special Publication, 1979: 61–73.
- [48] 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.
- [49] Mulder T, Alexander J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J]. Sedimentology, 2001, 48(2): 269–299.
- [50] Woodcock N. Sizes of submarine slides and their significance [J]. Journal of Structural Geology, 1979, 1(2): 137–142.
- [51] Mohrig D, Whipple K, Hondzo M, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows [J]. Geological Society of America Bulletin, 1998, 110(3): 387–394.
- [52] Posamentier H, Walker R. Deep-water turbidites and submarine fans [C] // Posamentier H, Walker R. Facies models Revisited. Tulsa; SEPM Special Publication, 2006: 399–520.
- [53] King P, Ilg B, Strachan L, et al. Outcrop and seismic examples of mass-transport deposits from a late Miocene deep-water succession, Taranaki basin, New Zealand [C] // Shipp R, Weimer P, Posamentier H. Mass-transport deposits in deepwater settings. Tulsa; SEPM Special Publication, 2009: 311–348.
- [54] Tripanas E, Piper D, Jenner K, et al. Submarine mass-transport facies: new perspectives on flow processes from cores on the eastern North American margin [J]. Sedimentology, 2008, 55(1): 97–136.
- [55] Jenner K, Piper D, Campbell D, et al. Lithofacies and origin of late Quaternary mass transport deposits in submarine canyons, central Scotian slope, Canada [J]. Sedimentology, 2007, 54(1): 19–38.
- [56] Mutti E, Ricci Lucchi F. Turbidites of the Northern Apennines introduction to facies analysis [J]. International Geology Review, 1978, 20(2): 125–166.
- [57] Mutti E. Turbidite sandstones [M]. Parma: Agip and Università di Parma, 1992: 1–275.
- [58] Ghibaudo G. Subaqueous sediment gravity flow deposits: practical criteria for their field description and classification [J]. Sedimentology, 1992, 39(3): 423–454.
- [59] Pickering K, Hiscott R, Kenyon N, et al. Atlas of deep water environments: architectural style in turbidite systems [M]. London: Chapman & Hall, 1995: 1–333.
- [60] Weimer P, Slatt R. Introduction to the petroleum geology of deepwater settings [M]. Tulsa: AAPG Studies in Geology, 2007: 1–816.

(编辑 张亚雄)

(上接第39页)

- [20] 刘保金, 张先康, 鄞少英, 等. 龙门山山前彭州隐伏断裂高分辨率地震反射剖面 [J]. 地球物理学报, 2009, 52(2): 538–546.
- Liu Baojin, Zhang Xiankang, Feng Shaoying, et al. High-resolution seismic reflection profile across Pengzhou buried fault in the frontal areas of Longmen Shan [J]. China Journal of geophysics, 2009, 52(2): 538–546.
- [21] 赵向原, 曾联波, 刘忠群, 等. 致密砂岩储层中钙质夹层特征及与天然裂缝分布的关系 [J]. 地质论评, 2015, 61(1): 163–171.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Liu Zhongqun, et al. Characteristics of calcareous interbeds and their impact on the distribution of natural fractures in tight sandstone reservoirs [J]. Geology Review, 2015, 61(1): 163–171.
- [22] 曾联波, 赵继勇, 朱圣举, 等. 岩层非均质性对裂缝发育的影响研究 [J]. 自然科学进展, 2008, 18(2): 216–220.
- Zeng Lianbo, Zhao Jiyong, Zhu Shengju, et al. Impact of rock anisotropy on fracture development [J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(2): 216–220.
- [23] 赵明, 樊太亮, 于炳松, 等. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩储层裂缝发育特征及主控因素 [J]. 现代地质, 2009, 23(4): 709–718.
- Zhao Ming, Fan Tailiang, Yu Bingsong, et al. Ordovician carbonate reservoir fracture characteristics in Tazhong area of Tarim Basin [J]. Geoscience, 2009, 23(4): 709–718.
- [24] 赵向原, 曾联波, 王晓东, 等. 鄂尔多斯盆地宁县-合水地区长6、长7、长8储层裂缝差异性及其开发意义 [J]. 地质科学, 2015, 50(1): 274–285.
- Zhao Xiangyuan, Zeng Lianbo, Wang Xiaodong, et al. Differences of natural fracture characteristics and their development significance in Chang 6, Chang 7 and Chang 8 reservoir, Ningxian-Heshui area, Ordos Basin [J]. Chinese Journal of geology, 2015, 50(1): 274–285.
- [25] Laderia F L, Price N. J. Relationship between fracture spacing and bed thickness [J]. Journal of Structural Geology, 1981, 3(2): 179–183.
- [26] Huang Q, Angelier J. Fracture spacing and its relation to bed thickness [J]. Geological Magazine, 1989, 126(4): 355–362.
- [27] Narr W. Fracture density in the deep subsurface: techniques with application to Point Arguello oil field [J]. AAPG Bulletin, 1991, 75(8): 1300–1323.
- [28] 曾联波. 低渗透砂岩储层裂缝的形成与分布 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- Zeng Lianbo. Formation and distribution of fractures in low-permeability sandstone reservoir [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.

(编辑 张亚雄)