

DOI: 10.13745/j.esf.yx.2016-11-25

深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制

操应长^{1,2}, 杨田^{1,*}, 王艳忠¹, 张少敏¹, 王思佳¹, 张青青¹, 王心悻¹

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580

2. 海洋国家实验室 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071

CAO Yingchang^{1,2}, YANG Tian^{1,*}, WANG Yanzhong¹, ZHANG Shaomin¹, WANG Sijia¹,
ZHANG Qingqing¹, WANG Xinyi¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong, et al. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(3): 234-248

Abstract: Hybrid event bed refers to the deposit of mixed deep-water gravity flow in a single gravity flow event which contains turbidity current, debris flow and sometimes transitional flow. Hybrid event beds can be subdivided into three types: sandy debrite-turbidite couplets (type 1), co-genetic turbidite-muddy debrite beds (type 2), and turbidite-muddy debrite multi-interlayered beds (type 3). Seven kinds of recognition of the genesis of type 1 beds include liquefaction, breaking up of flow, shearing on the top leading to erosion, mixing due to instability and wave formation at the surface, hydraulic jump, the head of the flow mixing with the environmental water body, and the integrated transformation by the action of multi mechanism. The geneses of type 2 and type 3 beds are the transformation of gravity flow and different transport and settling processes including the covering of turbidite by debris flow, the late-stage settling of sand from the debris flow plug, the transformation from turbidity currents into debris flows by erosion of muddy base, the transformation from turbidity currents into debris flows by deceleration and expansion, debris flows formed by local margin failure in turbidity currents, and debris flows formed by reversing buoyancy in turbidity current. The sandy debrite-turbidite couplets and the co-genetic turbidite-muddy debrite beds with rich mud clasts are distributed from proximal to distal in banded or leaf patterns. The co-genetic turbidite-muddy debrite beds with poor mud clasts are distributed in bulls-eye patterns in distal or in the lower parts of the basin. The distribution of the hybrid event beds is influenced by the internal factors such as the content of mud, the size of particle, the density of flow and by the external factors such as the genesis of gravity flow, paleotopography, and tectonic movements. The research of the genesis and distribution of the hybrid event beds is important for perfecting the deep-water gravity theory, guiding the exploration of conventional and unconventional oil and gas in deep-water sandstone, and understanding the law of natural activities thus to avoid potential hazards. More attentions should be paid to the various geneses, formation conditions, and the lateral distribution and evolution law of hybrid event beds.

Key words: debris flow; turbidity current; flow transformation; transitional flow; hybrid flow; hybrid event bed; deep-water gravity flow; genesis

收稿日期:2015-12-13;修回日期:2016-03-30

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05009-003);中央高校基本科研业务费专项资金项目(14CX06070A)

作者简介:操应长(1969—),男,教授,博士生导师,地质学专业,主要从事沉积学、层序地层学及油气储层地质学的教学与科研工作。

E-mail:cyc8391680@163.com

*通讯作者简介:杨田(1989—),男,博士研究生,沉积学和油气储层地质学专业。E-mail:yangtian9645@126.com

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2017,24(3)

摘要:同一重力流事件形成的包含碎屑流和浊流及其之间过渡流体的混合流沉积形成的沉积层称为混合事件层。混合事件层主要包含下部砂质碎屑流-上部浊流混合事件层(类型 1)和下部浊流-上部泥质碎屑流混合事件层(类型 2)以及泥质碎屑流和浊流频繁互层混合事件层(类型 3)3 种类型。类型 1 主要为流体转化成因, 包含液化作用、沉积物破碎、流体顶部剪切侵蚀、接触面不稳定性及波浪破碎、水力跳跃、流体头部与环境水体混合和多种机制作用下的整体转化 7 种成因认识。类型 2 和类型 3 主要涉及流体转化及流体差异搬运和沉降过程成因, 包含碎屑流覆盖浊流、碎屑流内部差异沉降、浊流侵蚀转化、浊流膨胀减速、局部沉积物垮塌和浮力转化 6 种成因认识。下部砂质碎屑流上部浊流混合事件层和下部浊流上部厚层富含泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层在沉积近端到沉积远端均有分布, 多呈条带状或树枝状; 下部浊流上部贫泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层主要在沉积远端或基底相对低部位分布, 多呈环带状或牛眼状。深水重力流混合事件层的分布主要受泥质含量、颗粒粒度、水体密度等内部因素和重力流成因机制、古地形和构造活动等外部因素综合控制。深水重力流混合事件层的形成及其分布研究对于丰富和完善重力流沉积理论, 指导现阶段深水重力流砂体常规和非常规油气勘探及理解自然活动规律、防灾减灾具有重要意义。现阶段对深水重力流混合事件层的多种成因及形成条件和横向分布演化规律的研究还有待进一步深入。

关键词:碎屑流; 浊流; 流体转化; 过渡流体; 混合流; 混合事件层; 深水重力流; 成因机制

中图分类号: P618.130.1; TE122.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2017)03-0234-15

0 引言

深水重力流作为地球上最主要的沉积物搬运机制之一^[1-9], 能够在海底斜坡和深海平原及深湖区形成厚度和规模巨大的粗碎屑砂体沉积及伴生的细粒沉积。研究重力流砂体的形成和分布, 对于理解全球沉积物的搬运、高效的油气勘探、战略性电缆通讯网络的潜在危害保护、地震等自然灾害的再发周期研究意义重大^[7-8,10]。深水重力流砂体的形成是一个包含深水重力流“触发-搬运-沉降”的综合作用过程, 也称为重力流事件^[5]。由于深水重力流流体类型多样^[6,10], 并且不同类型重力流之间存在相互转化^[11-16], 使得单一的重力流事件能够形成多种类型重力流混合沉积组合, 因而其分布规律复杂^[17-18]。深水重力流主要存在碎屑流和浊流两种流体类型^[5], 由于碎屑流与浊流具有共同的重力驱动内因, 早期研究认为, 沉积物再搬运形成深水重力流的过程中, 由于发生环境水体的卷入控制沉积物浓度的变化, 具有从塑性块体逐渐转化为碎屑流, 然后再转化为浊流的演化过程^[13], 因而从盆地边缘到盆地中心依次分布塑性块体、碎屑流和浊流沉积。由于不同流体流速差异较大, 并不存在垂向上流体混合的现象^[13], 这种深水重力沉积的有序分布规律长期以来主导着重力流砂体的分布预测。后期研究发现, 重力流的分布并不是简单的有序分布, 除了沉积近端存在碎屑流和浊流沉积在垂向上的规律组合以外^[16,19], 通过大量野外露头、钻井岩心、水槽实验、数值模拟实验和地球物理特征对深水重力流砂体分

布的研究, 发现在深水盆地中也存在广泛发育的泥质碎屑流沉积^[4,6,17-25]。这种泥质碎屑流沉积多与浊流沉积伴生, 出现在浊流形成的砂岩之上, 泥质碎屑流沉积与浊流沉积之间渐变或突变接触^[18], 泥质碎屑流与浊流之间的过渡流体沉积形成的频繁砂泥互层^[26-28,20]; 厚度相似砂体的稳定分布以及相同沉积组合砂体在垂向上规律性重复, 表明砂体为同一深水重力流事件形成^[20,29], 主要反映浊流向泥质碎屑流的转化及混合沉积过程。Haughton 等^[20]对这种深水重力流混合沉积的标准序列进行了定义, 认为自下而上可以划分为 H1—H55 个沉积单元: H1 为浊流形成的干净砂体, 砂体厚度较大, 粒序层理发育, 泄水构造常见; H2 为浊流和泥质碎屑流之间的过渡流体形成的浊流沉积与泥质碎屑流沉积薄层频繁互层; H3 为泥质碎屑流沉积, 内部可发育大量的泥质碎屑, 杂基含量高; H4 主要为低密度的浊流沉积, 由于晚期浊流流体失去限制, 导致侧向迁移速度大于沉积物沉降速度, 砂纹层理较为常见^[30]; H5 主要为浊流形成的薄层含微弱正粒序粉砂质泥到泥质沉积。

这种与传统的重力流分布模式相悖的深水重力流混合事件层的发现, 使国内外学者开始重新审视深水重力流流体转化与混合机制的多样性和重力流沉积分布模式的复杂性。近年来, 以爱尔兰都柏林大学 Haughton 教授和英国国家海洋研究中心 Talling 教授为代表的国外学者对此问题予以了高度的重视^[2-3,6,17-18,20]。由于我国的深水重力流沉积相关研究起步相对较晚, 并多以陆相湖盆的古代深水重力流沉积为研究对象, 加之重力流沉积研究问

题相对复杂,因而在相关的理论认识上与国际同行还存在一定的差距,仅有部分学者对深水重力流流体转化和混合机制^[10,31-33]进行了探讨,并且主要关注砂质碎屑流向浊流的流体转化过程。笔者近期在山东灵山岛深水重力流沉积的研究中发现,该区以陆相沉积为主的晚白垩世地层中同样存在下部浊流沉积上部泥质碎屑流沉积组合的混合事件层,因而,认为有必要对国际深水重力流沉积研究的这一最新研究进展进行系统总结,以期为我国的深水重力流沉积研究提供新的知识增长点。

1 混合事件层相关术语的定义和内涵

深水重力流混合事件层(hybrid event bed)主要是指同一重力流事件形成的包含碎屑流和浊流及其之间过渡流体的混合流沉积形成的沉积层^[6]。混合流(hybrid flow)主要指同一重力流事件中由于流体转化形成的同时具有多种流变性质的流体。重力流的流体转化(flow transformation)主要是指同一重力流事件中碎屑流和浊流之间转化的过程,流体转化方向主要受沉积物浓度变化控制;转化过程的连续性决定是否包含过渡流体。深水重力流过渡流体(transitional flow)指流体从高雷诺数变为低雷诺数或者从低雷诺数变成高雷诺数时产生湍流构造的流体,包含浊流抑制过渡流体、低转化层流和高转化层流三种过渡流体类型^[34]。

对深水重力流的早期研究认为主要存在碎屑流向浊流转化过程,其形成的混合事件层以下部碎屑流上部浊流沉积组合为典型特征,Talling等^[18]和Haughton等^[17]认为,这种沉积层主要由沉积近端沉积物垮塌形成的厚度巨大的碎屑流上部由于环境水体稀释形成薄层的浊流沉积组合形成,并将其称作碎屑流浊流混合巨层(debrite-turbidite hybrid megabed)。Felix等^[19]则认为,这种沉积层是深水重力流沉积物沉积近端砂质碎屑流向浊流转化的常见沉积类型,并且根据转化程度的差异总结了5种类型,将其称为碎屑流-浊流沉积组合(debrite-turbidite couplets)。随着研究的深入,部分学者认识到浊流同样可以向泥质碎屑流转化,形成底部浊流上部泥质碎屑流混合事件层,Haughton等^[17]将其称为碎屑流-浊流关联沉积(linked debrites-turbidites),并将上部的碎屑流沉积定义为关联碎屑流沉积(link debrites),反映其由浊流转化成因的特殊

性;Talling等^[18]将这种沉积层称为碎屑流-浊流组合沉积层(co-genetic debrite-turbidite beds);为了与碎屑流向浊流转化的形成的碎屑流-浊流沉积组合区分,Jackson等^[35]建议将这种沉积层定义为浊流-碎屑流组合沉积层(co-genetic turbidite-debrite beds),上部的碎屑流沉积称为关联碎屑流沉积(link debrites)。此外,Lowe等^[26-28]将深水重力流中厚层的碎屑流沉积与浊流沉积薄层互层沉积归因于泥流沉积(slurry flows),Sylvester和Lowe^[36]、Haughton等^[20]认为,这种沉积主要是碎屑流和浊流之间转化的过渡流体沉积,属于碎屑流与浊流频繁转化成因,是一种特殊的混合事件层。

2 碎屑流与浊流混合事件层类型及特征

2.1 碎屑流与浊流沉积特征

碎屑流主要为塑性流变学特征的层状流,其沉积物支撑机制主要是基质强度、颗粒间的摩擦强度和浮力,沉积物整体停止流动,块状固结,以块状层理和泥质碎屑发育为典型特征。碎屑流沉积根据杂基含量和结构差异,分为起结构杂基作用的泥质碎屑流和起成分杂基作用的砂质碎屑流。泥质碎屑流沉积物多为厚层块状杂基支撑砾岩、含碎屑或不含碎屑的砂质泥岩等,顶底面与泥岩突变接触;砂质碎屑流沉积多为厚层块状砂岩、含砾砂岩,顶底面与泥岩突变接触,漂浮状泥砾和泥岩撕裂屑多在沉积相序中上部发育。浊流主要为携带大量泥砂的具牛顿流变性质和紊流状态沿盆地底部流动的高密度流体,颗粒主要受流体扰动支撑,逐级递减沉降。浊流沉积以中细砂岩、粉砂岩为主,发育完整或不完整的鲍马序列;能量较强的浊流沉积以正粒序层理为典型特征,当沉积物粒度分异不明显时也可形成块状层理,底部一般与泥岩冲刷突变接触,相序底部可含部分冲刷成因的泥岩撕裂屑;能量较弱时多发育平行层理与砂纹层理。

2.2 碎屑流与浊流混合事件层

根据混合事件层的组成特征,可以划分为下部砂质碎屑流上部浊流混合事件层,下部浊流上部泥质碎屑流混合事件层(内部可能存在过渡流体沉积,顶部可能存在低密度浊流和泥质沉积),泥质碎屑流和浊流频繁互层混合事件层三种主要类型(图1)。

2.2.1 下部砂质碎屑流上部浊流混合事件层

Talling^[7]和Haughton等^[20]认为,该种类型的

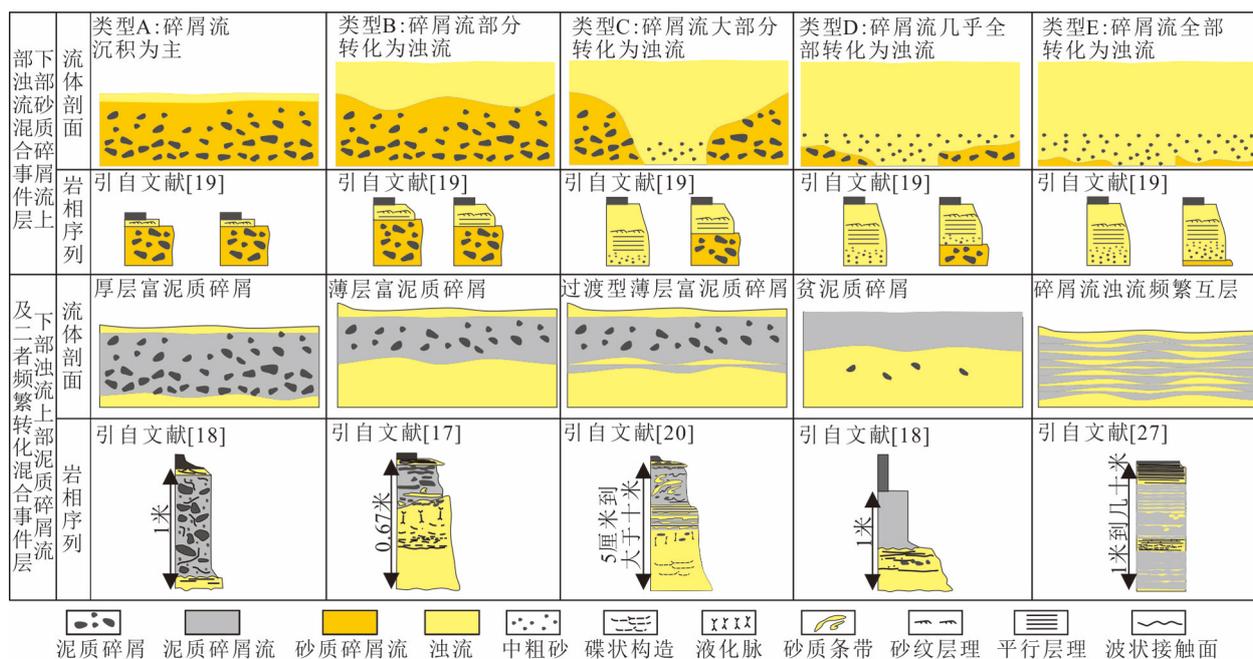


图 1 深水重力流混合事件层类型^[17-19, 26-28]

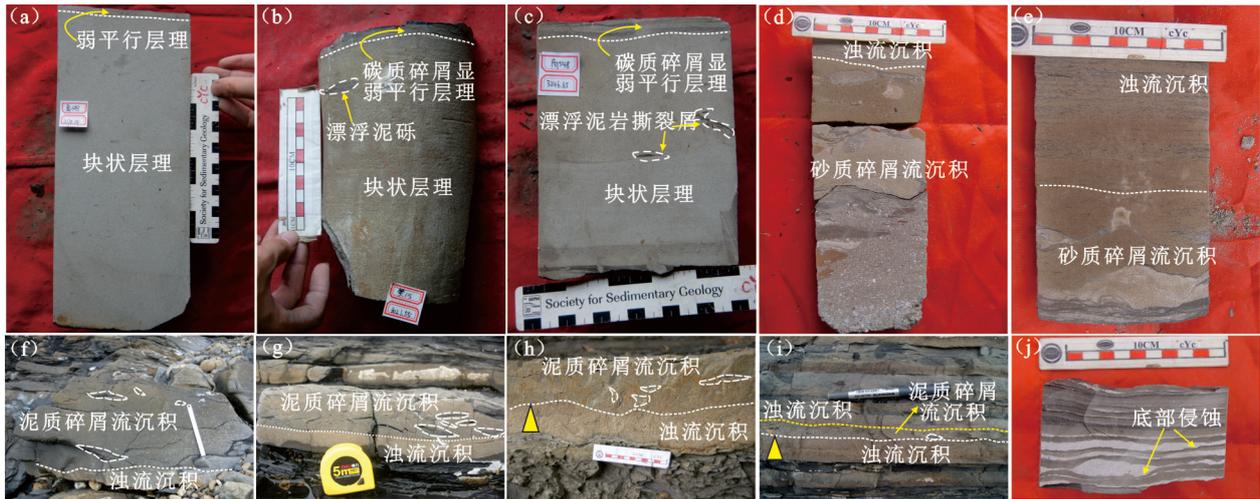
Fig. 1 Types of composite deep-water gravity flows deposit beds^[17-19, 26-28]

混合事件层以下部厚层碎屑流上部薄层浊流沉积组合为典型特征, 主要为地震触发成因, 在沉积近端最为常见, 也称为混合巨层。碎屑流沉积厚度一般可达几十米到几百米, 碎屑颗粒十分发育, 杂乱排列无明显粒序结构, 碎屑颗粒最长可达 100 m^[6]; 浊流沉积一般粒序层理发育, 厚度可达 6~20 m^[6]; 碎屑流沉积一般与浊流沉积突变接触^[6], 上部浊流沉积主要为下部碎屑流表面转化形成。在对波兰喀尔巴阡山和法国阿尔卑斯山深水重力流沉积中碎屑流向浊流转化沉积野外露头观察的基础上, Felix 等^[19]认为, 下部砂质碎屑流上部浊流混合事件层在碎屑流向盆地中心搬运的不同地方广泛分布, 主要受砂质碎屑流整体转化程度控制, 根据转化程度的高低, 可以划分为 A—E 5 种类型(图 1, 图 2a—e)。类型 A 主要是砂质碎屑流沉积, 顶部发生部分转化形成薄层浊流沉积, 与混合巨层沉积特征类似; 类型 B 砂质碎屑流向浊流转化程度增强, 在砂质碎屑流与浊流之间形成波状接触面, 上部浊流沉积厚度较类型 A 增加; 类型 C 砂质碎屑流向浊流的转化进一步增强, 砂质碎屑流不再连续沉积, 形成下部砂质碎屑流透镜体沉积与上部浊流沉积; 类型 D 砂质碎屑流几乎完全转化为浊流, 仅在沉积层底部有少量砂质碎屑流沉积; 类型 E 全部转化为浊流, 砂质碎屑流沉积特征基本不可见, 主要为浊流沉积^[19]。

2.2.2 下部浊流上部泥质碎屑流沉积混合事件层

下部浊流上部泥质碎屑流沉积混合事件层是另一种常见混合事件层类型, Houghton 等^[20]对这种混合事件层标准相序进行了定义, 从下到上划分为 H1—H5 5 个不同的成因部分(图 3)。实际沉积中发现的该种类型的混合事件层中, H2、H4 一般少见, 根据顶部泥质碎屑流沉积厚度及所含泥质碎屑情况, 进一步划分为顶部富泥质碎屑、顶部贫泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层两种类型(图 1, 图 2f—i)。

(1) 顶部富泥质碎屑混合事件层。该类型的混合事件层厚度一般大于 0.1 m, 0.6~1.3 m 最为常见, 以上部相对较厚富含泥质碎屑的泥质碎屑流沉积与下部相对较薄杂基含量较低的浊流沉积为主要特征^[6, 18]。上部泥质碎屑流沉积中泥质碎屑包含泥砾和泥岩撕裂屑两种类型, 泥砾一般大于 0.1 m, 磨圆较好, 漂浮状; 泥岩撕裂屑一般小于 0.1 m, 无固定形态泥质碎片。上部泥质碎屑流沉积厚度 1~2 m, 泥质碎屑被泥质杂基强度支撑, 呈漂浮状, 杂乱排列, 不显粒序, 部分泥质碎屑两端可见明显拉长特征, 反映层流流动特征, 在泥质碎屑流沉积的中上部最为发育^[37]。下部浊流沉积泥质含量低, 粒序层理为主, 部分浊流沉积由于粒度分异不明显呈块状, 厚度一般 0.1~0.3 m; 由于上部泥质碎屑流沉积速



(a) 临南洼陷, 商 548,3 274.24 m, 块状细砂岩, 下部砂质碎屑流沉积块状层理, 顶部浊流沉积微弱平行层理, 下部砂质碎屑流上部浊流沉积混合序列 A; (b) 博兴洼陷, 樊 115,3 021.55 m, 块状细砂岩, 下部砂质碎屑流沉积块状层理, 漂浮泥砾发育, 顶部浊流沉积碳质碎屑层弱平行层理, 下部砂质碎屑流上部浊流沉积混合序列 A; (c) 临南洼陷, 商 548,3 246.65 m, 块状细砂岩, 下部砂质碎屑流沉积块状层理, 漂浮泥岩撕裂层, 顶部浊流沉积碳质碎屑弱平行层理, 上部与下部沉积单元波状接触, 下部砂质碎屑流上部浊流沉积混合序列 B; (d) 涇西南凹陷, WZH11-1N-2, 2 117.8 m, 粉细砂岩, 下部砂质碎屑流沉积上部浊流沉积, 下部砂质碎屑流上部浊流沉积混合序列 B; (e) 涇西南凹陷, WZH11-4N-6, 2 117.5 m, 粉细砂岩, 下部砂质碎屑流沉积, 上部平行层理发育的浊流沉积, 下部砂质碎屑流上部浊流沉积混合序列 C; (f) 灵山岛地区, 船厂剖面, 下部单元浊流沉积, 上部单元块状泥质碎屑流沉积, 漂浮泥岩撕裂层发育, 上下沉积单元突变接触, 下部浊流上部厚层富含泥质碎屑泥质碎屑流混合事件层; (g) 灵山岛地区, 船厂剖面, 下部单元浊流沉积, 上部单元块状碎屑流沉积, 漂浮泥岩撕裂层发育, 上下沉积单元突变接触, 下部浊流上部薄层富含泥质碎屑泥质碎屑流混合事件层; (h) 灵山岛地区, 千层崖剖面, 下部单元粒序层理发育的浊流沉积, 上部单元块状碎屑流沉积, 少量漂浮泥岩撕裂层, 上下沉积单元渐变接触, 下部浊流上部贫泥质碎屑泥质碎屑流混合事件层; (i) 灵山岛地区, 灯塔剖面, 下部粒序层理发育的浊流沉积, 中部块状泥质碎屑流沉积, 顶部少粒序层理发育浊流和泥质沉积, 渐变界面, “三明治”结构混合事件层; (j) 涇西南凹陷, WZH11-7-4, 2 189.5 m, 浊流形成砂岩与泥质碎屑流形成的泥质粉砂岩频繁互层, 砂条底部侵蚀特征明显, 泥质碎屑流与浊流频繁互层混合事件层。

图 2 深水重力流混合事件层典型沉积特征

Fig. 2 The typical sedimentary characteristics of composite deep-water gravity flows deposit beds

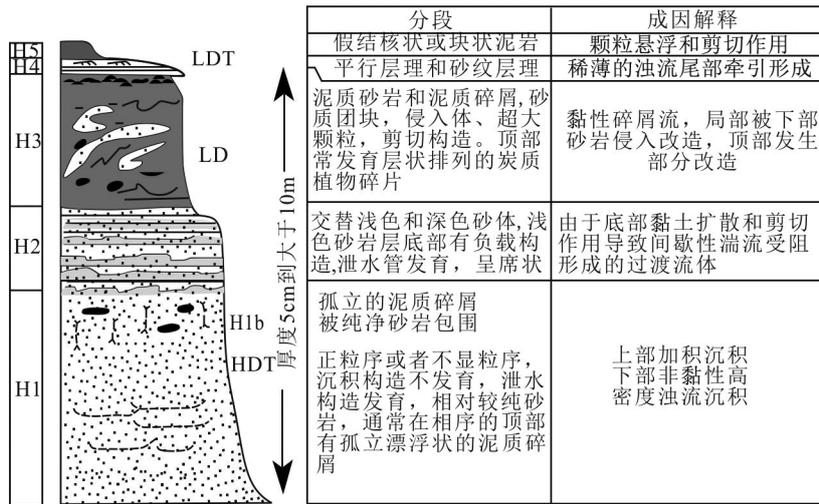


图 3 下部浊流上部泥质碎屑流沉积混合沉积标准序列^[20]

Fig. 3 The standard sequence of co-genetic turbidite-muddy debrite beds^[20]

率较快且厚度大, 下部砂体内部碟状构造、砂岩液化脉等泄水构造发育^[6,38]。浊流沉积与泥质碎屑流沉积之间以突变接触常见^[18,35], 可见波状接触面。意大利亚平宁山脉 Marnost-arenacea 组^[18]、南非的二

叠系卡鲁群^[39]均发育该种类型的混合事件层。

(2) 顶部贫泥质碎屑混合事件层。该种类型的混合事件层厚度一般大于 0.1 m, 0.4~1 m 最为常见, 以上部相对较薄泥质碎屑不发育的泥质碎屑流

沉积与下部相对较厚杂基含量较低的浊流沉积为主要特征^[6,18]。上部泥质碎屑流沉积厚度较薄,一般小于 0.5 m,泥质碎屑不发育,部分碎屑流沉积层富含碳质植物碎屑^[40],整体呈块状。下部浊流沉积厚度相对较大,一般大于 0.5 m,部分平行层理和波状纹层发育,内部可含少量孤立状泥质碎屑,底部粒序层理明显,部分浊流沉积由于粒度分异不明显呈块状。由于上部泥质碎屑流沉积速率相对较慢且厚度较薄,下部砂体内部碟状构造、砂岩液化脉等泄水构造少见^[20];浊流沉积与泥质碎屑流沉积之间以渐变接触最为常见^[18,35],可见部分波状接触面。意大利亚平宁山脉 Marnost-arenacea 组^[18]、阿根廷巴塔哥尼亚安第斯山脉 Punta Barrosa 组^[41]以及中国山东灵山岛地区(图 2f-i)均发育该种类型的混合事件层。

2.2.3 泥质碎屑流和浊流频繁互层混合事件层

该种类型的混合事件层以薄层砂质与泥质频繁互层、明暗条带相间为典型的沉积特征,砂质主要为浊流沉积,泥质主要为泥质碎屑流沉积,反映浊流与泥质碎屑流频繁转化沉积的特征^[20,42]。砂质沉积粒序层理发育,可见明显的泄水构造,底部重荷模发育;泥质沉积中可含少量的泥质碎屑和砂球,与砂岩接触面火焰构造和变形构造发育。整体厚度跨度较大,从几厘米到上百米均可发育(图 1,图 2j)。这种沉积首先被 Wood 和 Smith^[43]发现,后来 Ricci Lucchi 和 Valmori^[44]也对该沉积现象进行了描述,Lowe 等^[27-28]对北海 Britannia 组发育的该沉积现象做了系统工作,将其命名为泥流沉积。Haughton 等^[20]为了将这种反映流体转化的混合沉积同工程地质学上反映低黏度泥质沉积的泥流区分,将其定义为混合事件层的一种典型类型。

3 深水重力流混合事件层成因机制

深水重力流混合事件层的成因主要包含原地改造和流体转化两种成因认识。Higgs^[45]认为,混合事件层是原有洪水形成的重力流沉积物在地震等触发机制的作用下发生原地的液化变形改造并在上面覆盖浊流沉积形成。洪水形成的重力流包含三层结构:(A)早期底部形成的高密度流砂质沉积层;(B)后期形成的高密度流泥质韵律层,由于大量平行的云母和植物碎片阻碍泄水,易于液化;(C)背景泥质沉积。这种沉积组合是在地震作用下泥质韵律层由于液化向上挤入,下沉的部分形成假

的泥质碎屑,从而形成混合事件层。Haughton 等^[46]和 Talling^[47]认为,Higgs^[45]的认识并不能全面合理地解释混合事件层的成因,主张用重力流的流体转化及其搬运和沉降过程解释混合事件层的形成,包括砂质碎屑流向浊流的转化、浊流向泥质碎屑流的转化、两种流体搬运速度的相对快慢决定的接触状态,以及沉积物差异沉降过程综合控制混合事件层的形成(图 4)^[2-3,6,16-20,46]。

3.1 下部砂质碎屑流上部浊流混合事件层成因机制

该类型的混合事件层成因主要涉及砂质碎屑流向浊流转化成因机制。早期研究认为,砂质碎屑流向盆地中心搬运的过程中会发生稀释,逐渐转化为浊流^[12-13],不同学者对这种流体转化过程机制提出了多种成因认识(图 4-1)。认识一:液化作用是导致砂质碎屑流向浊流转化的主要原因(图 4-1a),液化作用会导致粗粒沉积物的优先卸载,从而使剩余的流体被稀释,发生整体转化^[47,26];后期的实验研究发现,液化作用引起早期粗粒沉积物沉淀后并没有使剩余流体稀释,反而使剩余流体变为浓度更高的层状流体^[48]。认识二:沉积物破碎转化是导致砂质碎屑流向浊流转化的主要原因(图 4-1b)^[49],砂质碎屑流在搬运的过程中会发生破碎转化,最终转化为浊流,这种转化只是部分流体发生转化,并且主要受流体物质组成控制。认识三:流体顶部剪切侵蚀是导致砂质碎屑流向浊流转化的主要原因(图 4-1c)^[50],砂质碎屑流流速较快且黏度较低时,流体的顶部与环境水体发生剪切作用,形成浊流;后期研究表明,流体头部的剪切混合作用对流体转化起着不可忽视的作用^[51],并且在发生滑水作用时流体头部和上部的转化作用会增强^[52]。认识四:快速搬运的流体由于环境水体接触面的不稳定性和流体表面波浪的形成,会与上覆水体发生混合转化(图 4-1d)^[53],这种流体转化多发生在砂质碎屑流具有较高的孔隙水压力,搬运较长时间发生充分混合的条件下。认识五:水力跳跃作用会导致砂质碎屑流向浊流转化(图 4-1e)^[54],砂质碎屑流快速流向速度较低、密度较小的流体时会发生水力跳跃作用,下部砂质碎屑流停止运动,顶部流体能够继续保持运动,从而使流体发生转化,但是这种流体转化机制只能使高密度流体发生少部分转化。认识六:砂质碎屑流头部与环境水体的混合是导致转化的主要原因(图 4-1f)^[55],流体头部环境水体可以分为停滞点上部水体和下部水体两部分,停滞点上部水体会在流体的头部形成

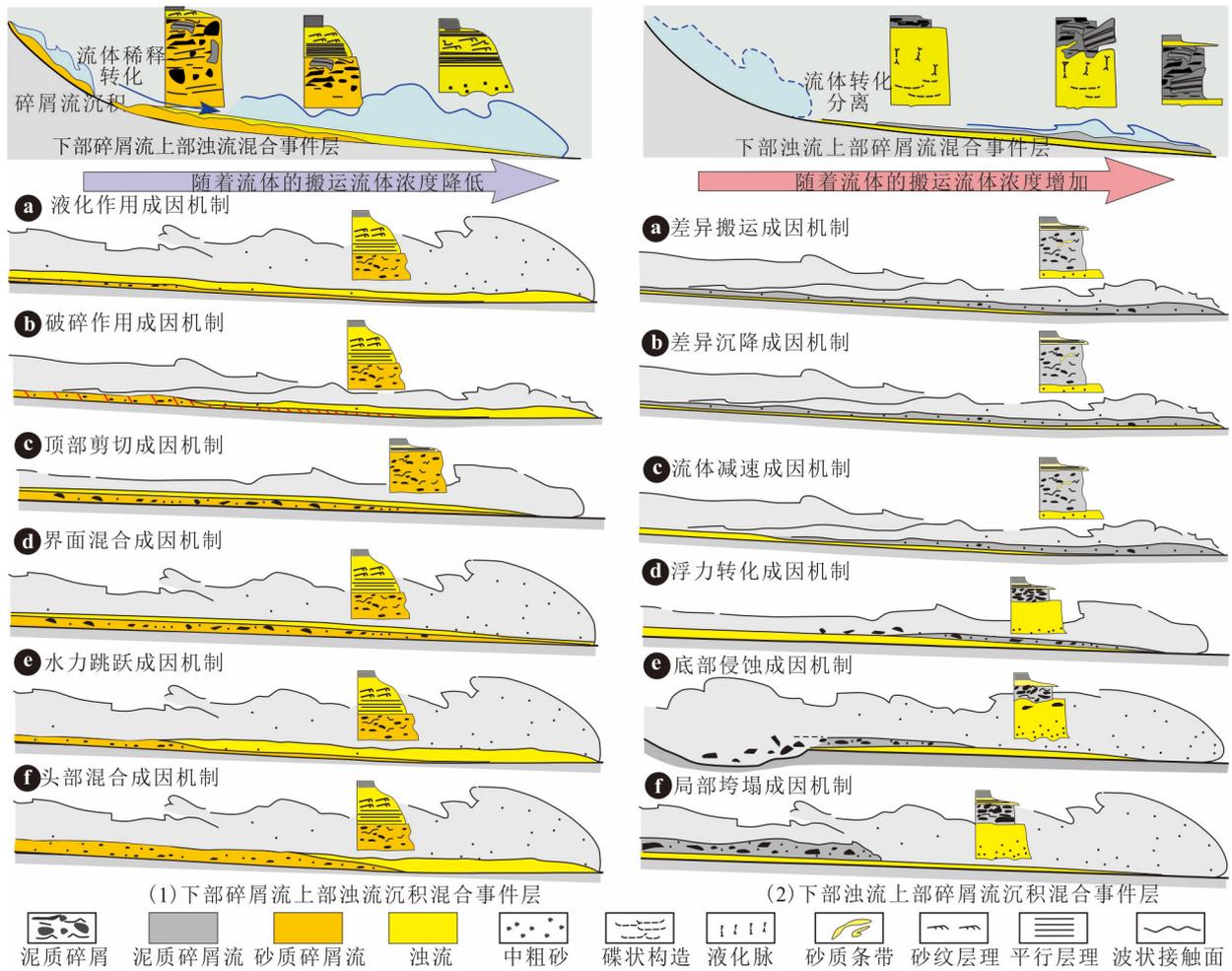


图 4 深水重力流混合事件层成因机制^[2-3,6,16-20,46]

Fig. 4 The genesis of composite deep-water gravity flows deposit beds^[2-3,6,16-20,46]

循环,与头部流体混合,从而使流体稀释形成浊流。认识七:砂质碎屑流向浊流发生整体转化^[16](图 4-1),主要包括流体侵蚀、底部流体分离、流体接触面波浪分离和浊流混合综合作用,流体的转化程度取决于流体的黏度和密度,作用于流体搬运的整个阶段,不同时间的转化方式存在差异,这也是目前的主流认识。

总的来看,这种流体转化过程主要发生在沉积近端^[16,19],在不同的沉积背景下,原始沉积物的物质组成不同,在沉积物搬运的不同阶段、不同的流速和流体体积、不同的转化时间具有不同的流体转化机制^[16],呈现不同的沉积相序组合特征。

3.2 下部浊流上部泥质碎屑流混合事件层成因机制

该类型的混合事件层成因主要涉及泥质碎屑流和浊流流体搬运和沉降过程差异和浊流向泥质碎屑流转化形成的沉积组合(图 4-2)。

3.2.1 流体差异搬运和沉降过程成因

泥质碎屑流和浊流流体搬运速率存在差异,浊流搬运速率一般高于泥质碎屑流^[6,20],泥质碎屑流在搬运过程中与环境水体的相互作用和混合会导致碎屑流部分转化为浊流,浊流搬运速率较快,使得浊流搬运到碎屑流前面并发生沉积,泥质碎屑流在沉积近端由于滑水机制和基底润湿作用,多发生过路作用不发生沉积^[2-3,6],最终泥质碎屑流搬运到浊流沉积区并发生沉积,形成下部浊流上部泥质碎屑流混合事件层^[6,20](图 4-2a)。相同流体内部不同粒级的沉积物颗粒沉降过程也存在较大差异,特别是泥质碎屑流停止搬运后,在孔隙水释放的过程中会导致不同粒级沉积物颗粒的重新排列^[34],粗粒沉积物会优先沉淀在流体的底部,在碎屑流的底部会形成一层泥质杂基含量较少、正粒序发育的砂岩沉积,从而形成下部相对纯砂岩和上部泥质碎屑流沉积混合事件

层^[6,18,23] (图 4-2b)。这种沉积类型的下部砂岩能否作为浊流沉积产物, 目前还存在一定的争议^[6,23]。

3.2.2 流体转化成因

关于浊流向泥质碎屑流转化形成下部浊流上部碎屑流混合事件层的成因还存在一定争议(图 5)^[23], 现阶段主要包含 4 种不同的观点。观点一: 浊流对富泥质基底的侵蚀是导致流体转化的主要原因(图 4-2e)^[6,17-18,20,24], 在沉积远端富泥质基底发育的地区, 由于快速搬运的浊流对下部泥质基底的侵蚀会导致流体中泥质沉积物含量增加, 泥质沉积物密度较低, 在浮力的作用下会在流体中发生上浮, 泥质含量的少量增加会使流体的流变学性质发生很大的变化^[23,56], 从而使得浊流上部的流体转化为泥质碎屑流, 底部砂岩的泄水作用可以使上部泥质碎屑流搬运较长距离^[17,20], 并且泥质碎屑流中的泥质碎屑一般位于流体的顶部, 最终形成底部浊流上部泥质碎屑流混合事件层。观点二: 局部的泥质沉积物垮塌混入是形成底部浊流上部泥质碎屑流混合事件层的主要原因(图 4-2f)^[6,17-18,20], 局部的沉积物垮塌会形成富含泥质碎屑的泥质碎屑流沉积, 泥质碎屑流混入到原有浊流中, 形成底部浊流沉积, 中间泥质碎屑流沉积, 顶部浊流沉积的混合事件层^[57]。观点三: 浊流搬运的晚期阶段, 颗粒流体导致流体减速是浊流转化为泥质碎屑流的主要原因(图 4-2c)^[58], 浊流在搬运的晚期阶段由于流体的膨胀导致能量不断减弱, 流速逐渐降低, 浊流中粒度相对较粗的沉积物颗粒优先沉积, 导致剩余流体泥质含量增加^[23], 粒度相对较细的沉积物颗粒能够继续被支撑^[59], 随着粗粒沉积物的逐渐卸载, 上部剩余流体泥质含量逐渐增加, 最终转化为泥质碎屑流, 形成底部浊流上部泥质碎屑流混合事件层^[18], 该种类型的混合事件层中一般泥质碎屑含量较低。观点四: 浮力转化导致的低密度碎屑组分上浮是流体转化的主要原因(图 4-2d)^[40]。Pritchard 和 Gladstone^[40] 认为, 洪水形成的异重流沉积在沉积的初始阶段主要形成高密度砂质沉积, 由于异重流中洪水(淡水)的密度相对于环境水体密度较低, 当粗粒沉积物卸载后密度相对较低的碳质植物碎屑和泥质碎屑由于较大的浮力作用向上漂浮, 在上部形成富含碳质碎屑和黏土杂基的泥质碎屑流^[20], 从而形成下部浊流上部泥质碎屑流混合事件层。

总的来看, 这种流体转化过程主要发生在沉积远端^[3,6], 在不同的沉积背景下, 原始沉积物的物质

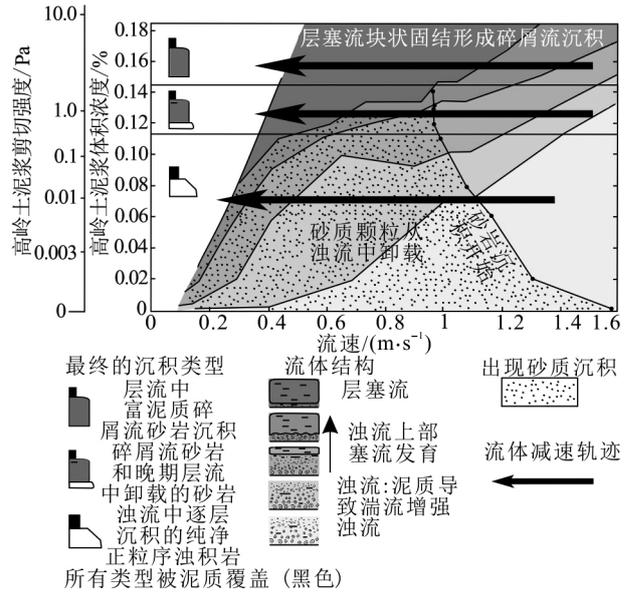


图 5 浊流向泥质碎屑流转化的水动力学机制^[23]

Fig. 5 The genesis of turbidity currents transformed into muddy debris flows^[23]

组成不同, 在沉积物搬运的不同阶段、不同的流速、流体体积、不同的转化时间可能具有不同的流体转化机制, 呈现不同的沉积相组合特征。

4 深水重力流混合事件层分布及控制因素

4.1 混合事件层分布特征

4.1.1 条带状分布

下部砂质碎屑流上部浊流混合事件层和下部浊流上部厚层富含泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层在沉积近端到沉积远端均有分布^[60] (图 6), 这种混合事件层一般碎屑流沉积厚度较大, 并且富含泥质杂基和泥质碎屑, 碎屑流在搬运的过程中易于发生滑水作用和基底润湿作用^[6], 从而能够使碎屑流搬运较长的距离到达盆地中心^[61]。由于碎屑流屈服强度较大, 环境水体不易混入, 仅在流体的表面发生部分的稀释, 形成浊流。砂质碎屑流搬运速度较快, 从而形成下部砂质碎屑流上部浊流混合事件层^[6,16,19-20], 沉积物以条带状为主。当碎屑流屈服强度相对较高时表面流体转化形成的浊流相对较少, 浊流搬运速度较快, 泥质碎屑流搬运速度相对较慢, 浊流沉积形成的基底被后期的碎屑流沉积覆盖^[6,20,46,62], 形成底部浊流上部碎屑流混合事件层, 沉积物以条带状为主(图 6a、b)。当碎屑流屈服强度相对较低时, 环境

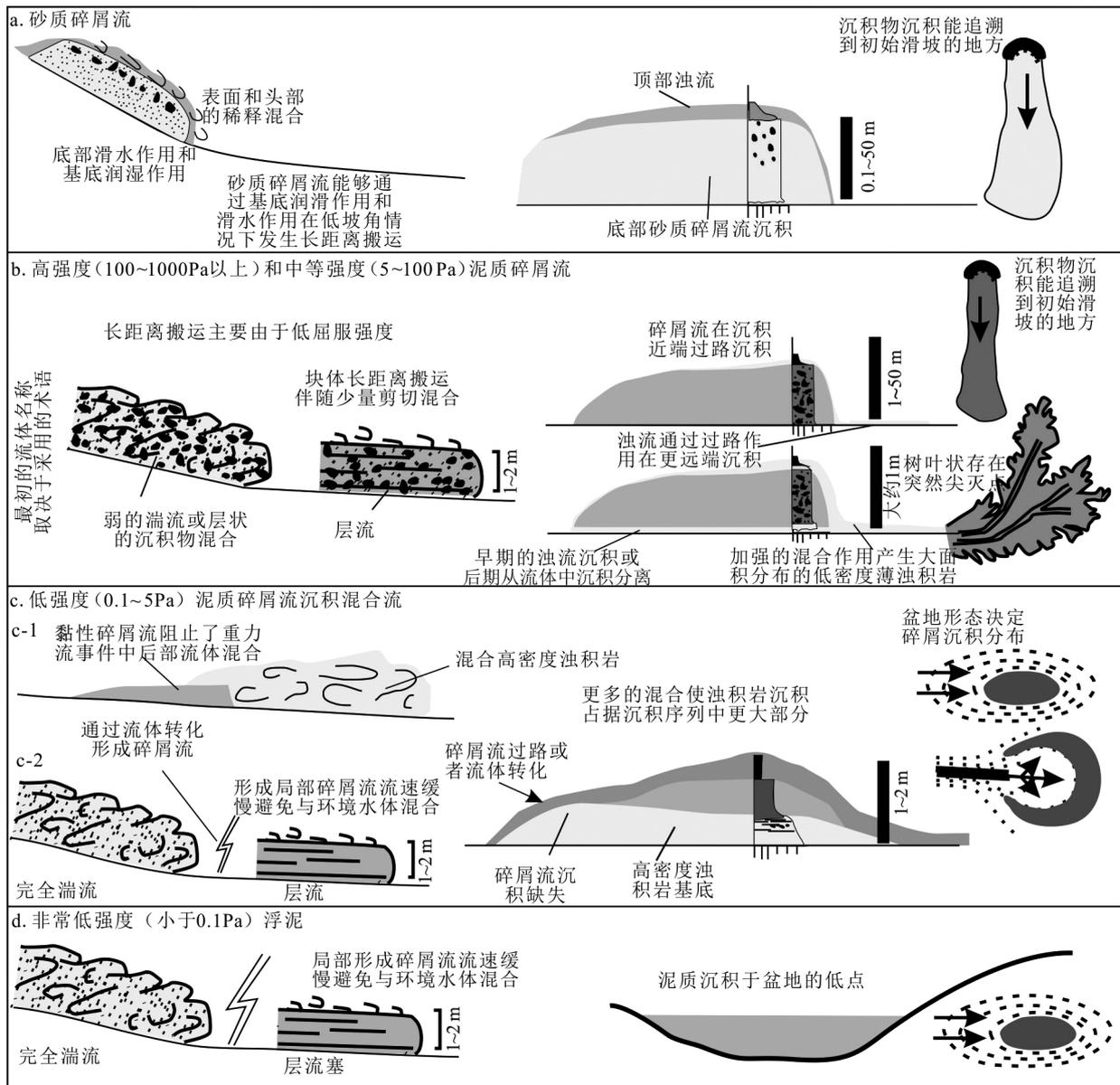


图 6 深水重力流混合事件层分布特征^[6]

Fig. 6 The distribution of composite deep-water gravity flows deposit beds^[6]

水体与流体的剪切作用相对较强,上部转化形成的浊流较多,形成下部和顶部浊流沉积中间碎屑流沉积的三层结构(图 6b),由于流体屈服强度相对较低,搬运的晚期会发生部分的流体膨胀扩大,整体形成类似树叶状的沉积物分布^[5-6]。

4.1.2 环带状分布

下部浊流上部贫泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层主要在沉积远端或基底相对低部位分布,这种混合事件层碎屑流屈服强度一般较低(小于 5 Pa),沉积相对较薄,并且富含黏土杂基和碳质植物碎片^[20,63],多由浊流发生局部侵蚀或者由于流体膨胀,流速降

低形成,呈环带状或牛眼状(图 6c,d)。当浊流由于对泥质基底局部侵蚀转化为泥质碎屑流或由于浊流进入基底相对低部位流速降低转化为泥质碎屑流时,多形成下部浊流上部泥质碎屑流的双层结构或者顶部发育薄层浊流沉积的三层结构混合事件层,这种混合事件层一般呈牛眼状局部分布或呈牛眼状充填基底相对低部位^[5-6]。浊流在搬运的晚期由于流体膨胀,流速降低,加之粒度相对较粗沉积物颗粒沉淀导致上部剩余流体泥质含量增加,最终转化为泥质碎屑流,形成下部浊流上部富含碳质植物碎片的泥质碎屑流混合事件层^[40],这种混合事件层一般

围绕流体边缘呈环带状分布^[5-6]。

4.2 混合事件层分布控制因素

4.2.1 内部因素

流体的物质组成是决定其流变学特征、搬运和沉降过程最主要的因素^[6]。流体中的泥质含量对流体性质具有显著的影响, 少量的泥质含量能够很大程度上改变流体的屈服强度, 从而决定流体的流变学性质^[12, 23, 64] (图 7a, b, e), 这是决定流体转化方向和程度的主要控制因素。Hampton^[12] 通过实验证实, 当流体中高岭土体积分数达 0.6%~1.5% 时就

能使细砂漂浮, 后期实验研究表明这一数值可能在 4.5%~7%; Sumner 等^[23] 的实验证实, 当流体中高岭土体积分数大于 14% 时能够使细砂和中砂颗粒保持漂浮, 当含有基质强度更强的黏土杂基时这一数值还能进一步降低。不同泥质含量的碎屑流具有不同的屈服强度, 从而决定流体搬运、转化和沉积过程及其分布特征^[6]。高泥质含量的碎屑流屈服强度较大, 泥质碎屑含量较高, 漂浮分布, 当泥质含量降低, 屈服强度降低时, 泥质碎屑倾向于在顶部分布, 流体转化多发生在表面, 形成的混合事件层多呈条

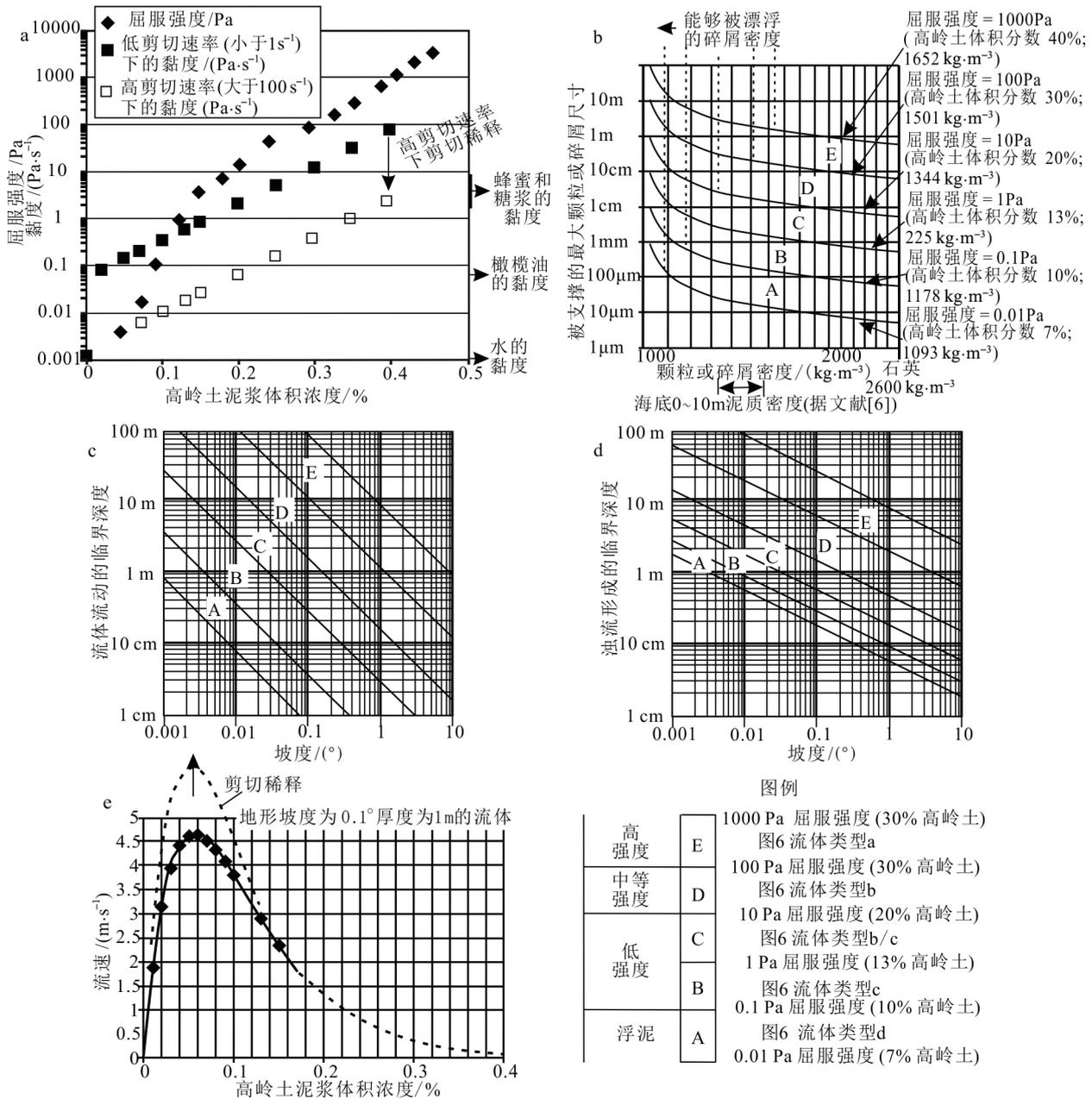


图 7 深水重力流混合事件层沉积及分布的控制因素^[6]

Fig. 7 The controlling factors of the sediment and distribution of composite deep-water gravity flows deposit beds^[6]

带状或树枝状分布^[5-6]。当流体流速较低时, 泥质含量的微小变化(体积分数小于4%)能使流体流变性质发生很大变化, 这种改变导致浊流流速降低向泥质碎屑流转化形成混合事件层, 呈环带状或牛眼状分布。Sumner等^[23]的实验证实, 当浊流速度为1.2 m/s时需要高岭土体积分数为12%时发生流体转化, 当浊流流速为0.2 m/s时需要高岭土体积分数仅为4%时发生流体转化就能形成泥质碎屑流。流体中原始水体的密度也会对流体的性质产生较大的影响, 洪水形成的异重流进入海水时由于原始水体密度比环境水体低, 浮力作用易使碳质碎屑和黏土杂基向上漂浮, 转化为泥质碎屑流^[40]。

4.2.2 外部因素

(1)重力流的成因机制。滑塌成因和洪水成因是目前深水重力流最为主要的两种成因机制, 其形成的深水重力流混合事件层类型及其分布特征存在一定的差异^[7-8, 10, 15, 65]。滑塌成因的深水重力流多在沉积近端发育碎屑流向浊流的转化^[13], 当再搬运沉积物以砂质为主时, 易于形成底部砂质碎屑流上部浊流混合事件层; 当再搬运沉积物以泥质为主时, 易于形成底部浊流上部富含泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层, 多呈条带状分布。在沉积远端多发生浊流向泥质碎屑流的转化^[20], 易于形成下部浊流上部贫泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层, 多呈环带状分布。一般认为洪水成因的深水重力流混合事件层不发育, Pritchard和Gladstone^[40]认为, 洪水成因的深水重力流沉积易于发生浮力转化, 在沉积远端形成下部浊流上部贫泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层, 呈环带状分布; Girard等^[66]认为, 洪水成因的深水重力流在沉积近端同样发育下部砂质碎屑流上部浊流的混合事件层; Higgs^[45]则认为, 洪水成因的深水重力流在地震作用下原地的液化改造是形成混合事件层的主要原因。

(2)古地形。地形坡度是决定流体转化形成混合事件层及控制其分布的重要因素^[6, 16, 38, 39, 67]。地形坡度决定了高密度流体搬运的临界条件、高密度流体向低密度流体转化的临界条件以及不同条件下流体的搬运速度(图7c)。相同屈服强度的流体, 地形坡度越大越有利于流体搬运, 越有利于发生流体转化(图7d); 地形坡度越大越有利于形成滑水作用和基底润湿作用^[6, 52], 从而使流体保持长距离的搬运, 在斜坡区形成过路沉积, 在盆地中心形成富泥质碎屑的混合事件层, 以条带状分布为主。基底的相

对低部位是沉积物卸载的有利地区, 由于会导致流体局部速率降低, 易于发生浊流向泥质碎屑流转化, 形成牛眼状分布的混合事件层^[2, 38]。

(3)构造活动。构造活动强烈的地方易于形成相对较陡的古地形, 易于高密度沉积物发生搬运转化^[20]; 另外构造活动能够造成沉积物的多次垮塌^[68], 多期次垮塌的沉积物混合作用易于形成下部砂质碎屑流上部浊流和下部浊流上部富含泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层^[20], 多呈条带状分布。此外, 构造活动强烈地区易于形成异重流沉积^[14, 69-70], 异重流沉积的晚期由于浮力转化作用, 形成上部富含碳质碎屑的混合事件层, 呈环带状分布。

5 研究意义及存在的问题

5.1 混合事件层研究意义

由于深水重力流沉积的突发性和破坏性, 使得对其开展直接观察和研究相对困难, 这也是造成现阶段深水重力流沉积相关研究争议众多的主要原因^[4-5, 71]。深水重力流混合事件层的发现及其研究的深入对于丰富和完善深水重力流沉积相关认识具有十分重要的作用, 使我们意识到无论是已有的浊流理论^[47]还是目前流行的砂质碎屑流沉积理论^[72]都存在一定的局限性, 完全否定不可取, 全盘接受、停滞不前更不可行^[73]。我们对深水重力流沉积分布的认识还相当局限, 已有的基于流体稀释的重力流砂体分布模型需要进一步的完善^[6, 17-18, 20]。深水重力流混合事件层沉积特征及其分布规律的研究, 对于我们准确地开展深水重力流砂体常规与非常规油气勘探预测具有十分重要的意义^[6, 9], 使我们对深水重力流储层的沉积非均质性有了进一步的深入认识^[21], 特别是分布在沉积远端的下部浊流上部泥质碎屑流混合事件层的发现, 为目前的非常规油气勘探提供了新的视角。这种浊流向泥质碎屑流转化搬运过程可以作为深水细粒沉积物搬运的重要机制, 对于我们理解非常规储层的形成和分布具有十分重要的意义^[10]。此外, 深水重力流沉积作为一种将陆上沉积物输送到深水区的事件沉积作用, 对其形成机制和分布规律的认识, 对于认知自然规律、理解全球气候变化及碳循环研究和防灾减灾具有十分重要的意义^[68, 73-74]。

5.2 存在的问题及攻关方向

深水重力流混合事件层成因及其分布的研究由

于起步相对较晚,加之研究手段和研究方法的局限性,目前还存在较多的问题有待深入研究^[6,20]。

5.2.1 混合事件层的成因机制

不同学者对混合事件层的成因提出了多种认识^[2-3,6,16-20,46],混合事件层的成因到底是一种还是有多种,不同的沉积类型是否对应不同的成因机制,在流体搬运和沉积的不同阶段、不同位置是否对应于不同的成因机制^[19];为什么有的地区发育混合事件层,有的地方不发育混合事件层^[20],受什么条件控制,什么条件最容易形成该种混合事件层;洪水成因的深水重力流演化过程中是否能产生混合事件层^[40,45-46,66]等关于混合事件层成因的问题还存在较多争议。对混合事件层成因机制的研究主要是通过通过对现有沉积构造的解释,再现流体的演化过程。然而,沉积构造反映的只是最后阶段的演化和沉积过程^[5,36,75],"源-汇"系统的差异可能是造成演化过程及最终沉积产物差异的根本原因。开展"源-汇"系统控制下的深水重力流流体演化及沉积过程综合研究可能是解决现阶段深水重力流混合事件层成因机制困惑的重要方法^[8]。

5.2.2 混合事件层的分布规律

沉积体的分布规律和分布模式是指导预测的核心和钥匙。关于混合事件层的分布问题,主要针对其垂向组合及其分布特征开展了大量研究^[6,17-18,20];受研究对象及条件的限制(如岩心对展布规律研究的局限性)^[76],对其侧向上的分布和演化研究稍显不足^[72]。侧向分布规律对于深水重力流砂体的分布模式的完善至关重要,在垂向组合规律研究的基础上以 Walther 相律为指导,从小尺度到大尺度,在代表性岩心和连续性较好露头等古代沉积物研究的同时,结合深水重力流混合沉积的实际观测、水槽和数值模拟实验等量化研究^[6,75],对明确混合事件层的分布规律具有十分重要意义。

6 结论

(1)混合事件层主要包含下部砂质碎屑流-上部浊流混合事件层和下部浊流-上部泥质碎屑流混合事件层以及泥质碎屑流和浊流频繁互层混合事件层3种类型。

(2)下部砂质碎屑流-上部浊流混合事件层主要为流体转化成因,包含液化作用、沉积物破碎、流体顶部剪切侵蚀、接触面不稳定性和波浪破碎、水力跳

跃、流体头部与环境水体混合和多种机制作用下的整体转化七种成因认识。下部浊流-上部泥质碎屑流混合事件层以及泥质碎屑流和浊流频繁互层混合事件层主要涉及流体转化及流体差异搬运和沉降过程成因,包含碎屑流覆盖浊流、碎屑流内部差异沉降、浊流侵蚀转化、浊流膨胀减速、局部沉积物垮塌和浮力转化六种成因认识。

(3)下部砂质碎屑流上部浊流混合事件层和下部浊流上部厚层富含泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层在沉积近端到沉积远端均有分布,多呈条带状或树枝状;下部浊流上部贫泥质碎屑的泥质碎屑流混合事件层主要在沉积远端或基底相对低部位分布,多呈环带状或牛眼状。深水重力流混合事件层的分布主要受泥质含量、颗粒粒度、水体密度等内部因素的控制和重力流成因机制、古地形和构造活动等外部因素综合控制。

审稿专家和文章编辑提出的宝贵建设性修改意见对提高本文质量发挥了重要作用,在此谨表衷心感谢!

参考文献

- [1] MULDER T, ALEXANDER J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits[J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 269-299.
- [2] TALLING P J, AMY L A, WYNN R B. New insight into the evolution of large-volume turbidity currents: comparison of turbidite shape and previous modelling results[J]. *Sedimentology*, 2007, 54(4): 737-769.
- [3] TALLING P J, WYNN R B, MASSON D G, et al. Onset of submarine debris flow deposition far from original giant landslide[J]. *Nature*, 2007, 450: 541-544.
- [4] TALLING P J, MALGESINI G, FELLETTI F. Can liquefied debris flows deposit clean sand over large areas of sea floor? Field evidence from the Marnoso-arenacea Formation, Italian Apennines[J]. *Sedimentology*, 2012, 60: 720-762.
- [5] TALLING P J, MASSON D G, SUMNER E J, et al. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(7): 1937-2003.
- [6] TALLING P J. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models[J]. *Geosphere*, 2013, 9(3): 460-488.
- [7] TALLING P J. On the triggers, resulting flow types and frequencies of subaqueous sediment density flows in different settings[J]. *Marine Geology*, 2014, 352(3): 155-182.
- [8] TALLING P J, PAULL C K, PIPER D J W. How are sub-

- queous sediment density flows triggered, what is their internal structure and how does it evolve? Direct observations from monitoring of active flows[J]. *Earth-Science Reviews*, 2013, 125(3): 244-287.
- [9] AMY L A, MCCAFFREY W D, TALLING P J. Special Issue Introduction; sediment gravity flows-Recent insights into their dynamic and stratified/composite nature[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26: 1897-1899.
- [10] YANG T, CAO Y C, WANG Y Z, et al. Status and trends in research on deep-water gravity flow deposits[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 2015, 89(2): 610-631.
- [11] FISHER R V. Flow transformation in sediment gravity flows[J]. *Geology*, 1983, 11(5): 273-274.
- [12] HAMPTON M A. The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1972, 42(4): 775-793.
- [13] MUTTI E, TINTERRI R, REMACHA E, et al. An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective[J]. *AAPG Course Notes*, 1999, 39: 93.
- [14] MUTTI E, TINTERRI R, BENEVELLI G, et al. Deltaic, mixed and turbidite sedimentation of ancient foreland basins[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 733-755.
- [15] MUTTI E, BERNOULLI D, LUCCHI F R, et al. Turbidites and turbidity currents from Alpine 'flysch' to the exploration of continental margins[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(1): 267-318.
- [16] FELIX M, PEAKALL J. Transformation of debris flows into turbidity currents; mechanisms inferred from laboratory experiments[J]. *Sedimentology*, 2006, 53(1): 107-123.
- [17] HAUGHTON P D W, BARKER S M, MCCAFFREY W D. 'Linked' debrites in sand-rich turbidite systems-origin and significance[J]. *Sedimentology*, 2003, 50(3): 459-482.
- [18] TALLING P J, AMY L A, WYNN R B, et al. Beds comprising debrite sandwiched within co-genetic turbidite; origin and widespread occurrence in distal depositional environments[J]. *Sedimentology*, 2004, 51(1): 163-194.
- [19] FELIX M, LESZCZYŃSKI S, ŚLĄCZKA A, et al. Field expressions of the transformation of debris flows into turbidity currents, with examples from the Polish Carpathians and the French Maritime Alps[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 2011-2020.
- [20] HAUGHTON P D W, DAVIS C, MCCAFFREY W, et al. Hybrid sediment gravity flow deposits; classification, origin and significance[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1900-1918.
- [21] AMY L A, PEACHEY S A, GARDINER A A, et al. Prediction of hydrocarbon recovery from turbidite sandstones with linked-debrite facies; numerical flow-simulation studies[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 2032-2043.
- [22] PYLES D R, JENNETTE D C. Geometry and architectural associations of co-genetic debrite-turbidite beds in basin-margin strata, Carboniferous Ross Sandstone (Ireland): applications to reservoirs located on the margins of structurally confined submarine fans[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1974-1996.
- [23] SUMNER E J, TALLING P J, AMY L A. Deposits of flows transitional between turbidity current and debris flow[J]. *Geology*, 2009, 37(11): 991-994.
- [24] ITO M. Downfan Transformation from turbidity currents to debris flows at a channel-to-lobe transitional zone: the Lower Pleistocene Otadai Formation, Boso Peninsula, Japan[J]. *Journal of Sediment Research*, 2008, 78(10): 668-682.
- [25] BAAS J H, BEST J L, JEFFREY P. Depositional processes, bedform development and hybrid bed formation in rapidly decelerated cohesive (mud-sand) sediment flows[J]. *Sedimentology*, 2011, 58(7): 1953-1987.
- [26] LOWE D R. Subaqueous liquefied and fluidized sediment flows and their deposits[J]. *Sedimentology*, 1976, 23: 285-308.
- [27] LOWE D R, GUY M. Slurry-flow deposits in the Britannia Formation (Lower Cretaceous), North Sea: a new perspective on the turbidity current and debris flow problem[J]. *Sedimentology*, 2000, 47(1): 31-70.
- [28] LOWE D R, GUY M, PALFREY A. Facies of slurry-flow deposits, Britannia Formation (Lower Cretaceous), North Sea: implications for flow evolution and deposit geometry[J]. *Sedimentology*, 2003, 50(1): 45-80.
- [29] FONNESU M, HAUGHTON P, FELLETTI F, et al. Short length-scale variability of hybrid event beds and its applied significance[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 67: 583-603.
- [30] JOBE Z R, LOWE D R, MORRIS W R. Climbing-ripple successions in turbidite systems: depositional environments, sedimentation rates and accumulation times[J]. *Sedimentology*, 2012, 59(3): 867-898.
- [31] 李云, 郑荣才, 朱国金, 等. 沉积物重力流研究进展综述[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 157-165.
- [32] 李存磊, 任伟伟, 唐明明. 流体性质转换机制在重力流沉积体系分析中应用初探[J]. *地质论评*, 2012, 58(2): 285-296.
- [33] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 深水重力流类型、沉积特征及成因机制: 以济阳坳陷沙河街组三段中亚段为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(8): 1048-1059.
- [34] BAAS J H, BEST J L, PEAKALL J, et al. A phase diagram for turbulent, transitional, and laminar clay suspension flows[J]. *Journal of Sediment Research*, 2009, 79(4): 162-183.
- [35] JACKSON C A L, ZAKARIA A A, JOHNSON H D, et al.

- Sedimentology, stratigraphic occurrence and origin of linked debrites in the West Crocker Formation (Oligo-Miocene), Sabah, NW Borneo [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1957-1973.
- [36] SYLVESTER Z, LOWE D R. Textural trends in turbidites and slurry beds from the Oligocene flysch of the East Carpathians, Romania [J]. *Sedimentology*, 2004, 51(5): 945-972.
- [37] KANE I A, PONTEN A S M. Submarine transitional flow deposits in the Paleogene Gulf of Mexico [J]. *Geology*, 2012, 40(12): 1119-1122.
- [38] JACKSON C A L, JOHNSON H D. Sustained turbidity currents and their interaction with debrite-related topography: Labuan Island, offshore NW Borneo, Malaysia [J]. *Sediment Geology*, 2009, 219: 77-96.
- [39] HODGSON D M. Distribution and origin of hybrid beds in sand-rich submarine fans of the Tanqua depocentre, Karoo Basin, South Africa [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 1940-1956.
- [40] PRITCHARD D, GLADSTONE C. Reversing buoyancy in turbidity currents: developing a hypothesis for flow transformation and for deposit facies and architecture [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1997, 26(10): 1997-2010.
- [41] MALKOWSKI M A, SHARMAN G R, GRAHAM S A, et al. Characterisation and diachronous initiation of coarse clastic deposition in the Magallanes-Austral foreland basin, Patagonian Andes [J]. *Basin Research*, 2015, 378(11): 156-163.
- [42] ZENG J, LOWE D R, PRIOR D B, et al. Flow properties of turbidity currents in Bute Inlet, British Columbia [J]. *Sedimentology*, 2006, 38(6): 975-996.
- [43] WOOD A, SMITH A J. The sedimentation and sedimentary history of the Aberystwyth Grits (Upper Llandoveryan) [J]. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 1958, 114, 163-195.
- [44] RICCI LUCCHI F, VALMORI E. Basin-wide turbidites in a Miocene, over-supplied deep-sea plain: a geometrical analysis [J]. *Sedimentology*, 1980, 27(27): 241-270.
- [45] HIGGS R. Comments on 'Hybrid sediment gravity flows-classification, origin and significance' from Houghton, Davis, McCaffrey and Barker (*Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26, 1900-1918) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(9): 2062-2065.
- [46] HAUGHTON P D W, DAVIS C, MCCAFFREY W, et al. Reply to comment by R. Higgs on 'Hybrid sediment gravity flows-classification, origin and significance' [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(9): 2066-2069.
- [47] KUENEN P H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. *Journal of Geology*, 1950, 58 (2): 91-127.
- [48] STIX J. Flow evolution of experimental gravity currents: implications for pyroclastic flows at volcanoes [J]. *Journal of Geology*, 2001, 109(3): 381-398.
- [49] SCHWARZ H U. Subaqueous slope failures-experiments and modern occurrences [M]. Stuttgart: Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1982.
- [50] MARR J G, HARFF P A, SHANMUGAM G. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: the role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113(11): 1377-1386.
- [51] TALLING P J, PEAKALL J, SPARKS R S J. Experimental constraints on shear mixing rates and processes: implications for the dilution of submarine debris flows [C] // DOWDESWEWEL J A, COFAIGH C. Glacier-influenced sedimentation on high-latitude continental margins. Geological Society, London, Special Publications, 2002, 203(1): 89-103.
- [52] MOHRIG D, WHIPPLE K X, HONDZO M, et al. Hydroplaning of subaqueous debris flows [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1998, 110(3): 387-394.
- [53] MORGENSTERN N R. Submarine slumping and the initiation of turbidity currents [M] // RICHARDS A F. Marine geotechnique. Urbana: University of Illinois Press, 1967.
- [54] ANDEL T H, KOMAR P D. Ponded sediments of the Mid-Atlantic ridge between 22° and 23° north latitude [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1969, 80: 1163-1190.
- [55] ALLEN J R L. Mixing at turbidity current heads, and its geological implications [J]. *Journal of Sediment Petrology*, 1971, 41(1): 97-113.
- [56] SOUTHERN S J, PATACCI M, FELLETTI F, et al. Influence of flow containment and substrate entrainment upon sandy hybrid event beds containing a co-genetic mud-clast-rich division [J]. *Sediment Geology*, 2015, 321: 105-122.
- [57] MCCAFFREY W, KNELLER B. Process controls on the development of stratigraphic trap potential on the margins of confined turbidite systems and aids to reservoir evaluation [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(6): 971-988.
- [58] MCCAVE I N, JONES K P N. Deposition of Ungraded muds from high-density non-turbulent turbidity currents [J]. *Nature*, 1988, 333: 250-252.
- [59] CANTERO M I, CANTELLI A, PIRMEZ C, et al. Emplacement of massive turbidites linked to extinction of turbulence in turbidity currents [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 5 (1): 42-45.
- [60] PATACCI M, HAUGHTON P D W, MCCAFFREY W D. Rheological complexity in sediment gravity flows forced to decelerate against a confining slope, Braux, SE France [J]. *Journal of Sediment Research*, 2014, 84(4): 270-277.
- [61] DUCASSOU E, MIGEON S, CAPOTONDI L, et al. Run-out distance and erosion of debris-flows in the Nile deep-sea

- fan system; evidence from lithofacies and micropalaeontological analyses[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39 (1): 102-123.
- [62] TRIPSANAS E K, PIPER D J W, JENNER K A, 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.
- [63] DAVIS C, HAUGHTON P, MCCAFFREY W, et al. Character and distribution of hybrid sediment gravity flow deposits from the outer Forties Fan, Palaeocene Central North Sea, UKCS[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26 (10): 1919-1939.
- [64] BARKER S P, HAUGHTON P D W, MCCAFFREY W D, et al. Development of rheological heterogeneity in clay-rich high-density turbidity currents: Aptian Britannia sandstone member, U. K. Continental Shelf[J]. *Journal of Sediment Research*, 2008, 78(2): 45-68.
- [65] PIPER D J W, NORMARK W R. Processes that initiate turbidity currents and their influence on turbidites: a marine geology perspective[J]. *Journal of Sediment Research*, 2009, 79(6): 347-362.
- [66] GIRARD F, GHIENNE J F, RUBINO J L. Occurrence of hyperpycnal flows and hybrid event beds related to glacial outburst events in a Late Ordovician proglacial delta (Murzuq Basin, SW Libya)[J]. *Journal of Sediment Research*, 2012, 82(9): 688-708.
- [67] PAULL C K, USSLER I W, CARESS D W, et al. Origins of large crescent-shaped bedforms within the axial channel of Monterey Canyon, offshore California[J]. *Geosphere*, 2010, 6(6): 755-774.
- [68] GEORGIPOULOU A, WYNN R B, MASSON D G, et al. Linked turbidite-debrite resulting from recent Sahara Slide headwall reactivation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(10): 2021-2031.
- [69] MULDER T, SYVITSKI J P M, MIGEON S, et al. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 861-882.
- [70] 杨田, 操应长, 王艳忠, 等. 异重流沉积动力学过程及沉积特征[J]. *地质论评*, 2015, 61(1): 23-33.
- [71] SHANMUGAM G. New perspectives on deep-water sandstones; implications[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 316-324.
- [72] MALGESINI G. Evolution of submarine sediment density flows deduced from long distance bed correlations[D]. Southampton: University of Southampton, 2012.
- [73] GALY V, FRANCE-LANORD C, BEYSSAC O, et al. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system[J]. *Nature*, 2007, 450: 407-410.
- [74] PETTER A L, STEEL R J. Hyperpycnal flow variability and slope organization on an Eocene shelf margin, Central Basin, Spitsbergen[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(10): 1451-1472.
- [75] TALLING P J, ALLIN J, ARMITAGE D A, et al. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits[J]. *Journal of Sediment Research*, 2015, 85(2): 153-169.
- [76] EGGENHUISEN J T, MCCAFFREY W D, HAUGHTON P D W, et al. Reconstructing large-scale remobilisation of deep-water deposits and its impact on sand-body architecture from cored wells: the Lower Cretaceous Britannia Sandstone Formation, UK North Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(7): 1595-1615.