

陆相湖盆深水重力流混合事件层沉积及沉积学意义

杨田^{1,2)}, 操应长³⁾, 田景春¹⁾, 牛小兵^{3,4)}, 李士祥⁵⁾, 周新平⁵⁾, 金杰华³⁾, 张倚安¹⁾

- 1) 油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学), 沉积地质研究院, 四川成都, 610059;
- 2) 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室, 山东青岛, 266071;
- 3) 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛, 266580;
- 4) 中国石油长庆油田分公司第八采油厂, 陕西西安, 710000;
- 5) 中国石油长庆油田公司勘探开发研究院, 陕西西安, 710018

内容提要:重力流混合事件层在陆相湖盆广泛发育,其形成和分布对理解重力流沉积演化过程及重力流沉积常规与非常规油气勘探开发意义重大。以涠西南凹陷流沙港组一段和鄂尔多斯盆地延长组7段重力流沉积为研究对象,分析湖盆重力流混合事件层的沉积特征、类型、成因及沉积模式,并进一步探讨其地质意义。湖盆主要发育滑动、滑塌重力驱动块体搬运沉积和砂质碎屑流、泥质碎屑流、高密度浊流和低密度浊流等重力流流体沉积,同时广泛发育重力流混合事件层沉积。湖盆重力流混合事件层包含多层结构、双层结构和频繁互层三种大的类型;其中,双层结构的重力流混合事件层进一步根据上下两个沉积单元厚度的差异可细分为两个亚类。多层结构的混合事件层主要为流体侵蚀或砂体液化成因,多发育于混合事件层沉积近端;双层结构与频繁互层结构的混合事件层主要为流体减速膨胀、泥质碎屑流中碎屑颗粒的差异沉降成因,多发育于混合事件层沉积远端。相同沉积单元组成的沉积层在垂向上的规律叠置是岩芯中识别重力流混合事件层沉积的可靠依据;在未明确其沉积过程的情况下可能会导致沉积信息的错误解读。同时,重力流混合事件层的发育会导致重力流沉积非均质性增强,不利于常规油气的储集;但是,重力流混合事件层形成的细粒沉积物是非常规油气“甜点”区发育的优势沉积岩相组合类型。

关键词: 浊流;碎屑流;混合事件层;地质意义;陆相湖盆

深水重力流是陆上沉积物向深水盆地运输的主要动力机制,是形成深水环境广泛分布的粗碎屑沉积物及其伴生的细碎屑沉积物的主要沉积过程(Mulder et al., 2001; Talling et al., 2015)。由于深水重力流的形成多与地震、洪水等事件作用沉积息息相关,同时深水环境广泛分布与日常生活息息相关的海底电缆、输油管道等,研究深水重力流砂体的形成和分布不仅对保护海底电缆、输油管道等具有重要的现实意义(Talling et al., 2013; Yang Tian et al., 2015a; Yang Renchao, 2017a),更重要的是对研究全球沉积物的搬运过程、稳定的碳循环过程、塑料微粒全球循环机制、地震(洪水、海啸)等自然灾害的再发周期有重要的科学意义(Galy et

al., 2007; Hughes Clarke, 2016; Clare et al., 2016; Kane et al., 2020)。此外,深水重力流沉积多为油气富集的有利场所,其相关研究同样能促进油气的高效勘探与开发(Yang Renchao, 2017a)。

重力流沉积的研究是涉及重力流“触发-搬运-沉降”动力学过程的综合研究(Talling et al., 2012; Yang Tian et al., 2015a, 2015b; Cao Yingchang et al., 2017a, 2017b; Song Mingshui et al., 2017),由于重力流流体类型多样,在搬运过程中不可避免地会发生不同流体类型的转化与混合(Haughton et al., 2009; Talling et al., 2012; Cao Yingchang et al., 2017a)。早期研究多关注了重力流搬运过程中,在相对沉积近端,伴随环境水体的卷入,高浓度

注:本文为国家自然科学基金项目(编号42072126,41802127)、青岛海洋科学与技术国家实验室海洋地质过程与环境功能实验室开放基金资助项目(编号MGQNLM201816)和2019年中国石油科技创新基金项目(编号2019D-5007-0106)联合资助的成果。

收稿日期:2020-09-01;改回日期:2020-10-19;网络发表日期:2021-03-01;责任编辑:任东;责任编辑:黄敏、蔡志慧。

作者简介:杨田,男,1989年生。研究员,主要从事深水重力流沉积研究。E-mail:yangtian19@cdut.edu.cn。

引用本文:杨田,操应长,田景春,牛小兵,李士祥,周新平,金杰华,张倚安. 2021. 陆相湖盆深水重力流混合事件层沉积及沉积学意义. 地质学报, 95(12): 3842~3857, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021066.
Yang Tian, Cao Yingchang, Tian Jingchun, Niu Xiaobing, Li Shixiang, Zhou Xinping, Jin Jiehua, Zhang Yi'an. 2021. Deposition of deep-water gravity-flow hybrid event beds in lacustrine basins and their sedimentological significance. Acta Geologica Sinica, 95(12):3842~3857.

的碎屑流向低浓度浊流的转化过程(Mutti et al., 2009; Li Chunlei et al., 2012; Shanmugam, 2013; Cao Yingchang et al., 2017a);近期研究发现在相对沉积远端,低浓度的浊流在搬运过程中随着泥质杂基含量的增加,流体的湍动受到抑制,可进一步转化为高浓度的泥质碎屑流(Baas et al., 2009; Sumner et al., 2009; Haughton et al., 2009; Craig et al., 2020)。这种浊流转化形成的泥质碎屑流沉积多与浊流沉积混合伴生,出现在浊流形成的低杂基含量砂岩之上,上部泥质碎屑流沉积与下部浊流沉积之间多呈渐变或突变接触,组合形成重力流混合事件层(Lowe et al., 2000; Talling et al., 2004; Haughton et al., 2009)。Haughton et al. (2009)根据沉积特征的差异,将混合事件层自下而上划分为 H1—H5 五个沉积单元;H1 为浊流形成的净砂岩,砂体厚度较大,粒序层理发育,泄水构造常见;H2 为浊流和碎屑流之间的过渡流体形成的频繁的薄层砂泥互层;H3 为泥质碎屑流沉积,内部可发育大量的漂浮泥岩碎屑;H4 主要为低密度浊流沉积,沙纹层理较常见;H5 主要为浊流形成的泥质沉积。Talling(2013)认为混合事件层 H1 与 H3 组合形成的双层结构最为常见,并且 H1 单元沉积厚度差异大;H2 单元沉积在重力流混合事件层中极少出现,而多以砂泥频繁互层的形式形成中厚层沉积(Lowe et al., 2000; Haughton et al., 2009)。

混合事件层沉积的相关研究成为近年来国际沉积学研究的热点问题,大量学者围绕海相盆地大量发育的重力流混合事件层的沉积特征、成因机制及分布规律等开展了深入研究(Talling et al., 2004, 2015; Haughton et al., 2009; Talling, 2013; Yang Tian et al., 2018; Fønnesu et al., 2018; Pierce et al., 2018)。相较海相盆地,陆相湖盆由于构造活动强烈、地形高差大、湖水密度低,具有重力流砂体发育的天然优势(Yang Tian et al., 2015b; Hovikoski et al., 2016);并且湖盆底部泥质沉积疏松、有机质富集,是研究泥质成分及含量控制下重力流转化和混合形成的混合事件层成因机制及分布模式的天然实验室,然而现阶段相关研究还极为少见(Hovikoski et al., 2016; Tan Mingxuan et al., 2016; Cao Yingchang et al., 2017a; Dodd et al., 2018; Fongngern et al., 2018; Yang Tian et al., 2020)。陆相湖盆中重力流混合事件层是否发育、具有怎样的沉积特征、如何形成、具有怎样的分布模式

等系列问题还有待深入研究(Hovikoski et al., 2016; Tan Mingxuan et al., 2016; Cao Yingchang et al., 2017a)。

陆相湖盆类型多样,特别是断陷湖盆和坳陷湖盆重力流沉积广泛发育(Cao Yingchang et al., 2017a, 2017b)。前期研究发现陆相断陷湖盆涠西南凹陷流沙港组一段和陆相坳陷湖盆鄂尔多斯盆地延长组长 7 段重力流沉积中混合事件层沉积发育,从而为系统对比研究陆相湖盆重力流混合事件层沉积特征、成因机制和沉积模式提供了典型实例。以上述两个盆地重力流沉积为研究对象,系统研究陆相湖盆混合事件层研究中存在的问题,并进一步探讨其地质意义,以期丰富湖盆沉积学理论体系,并为湖盆深水重力流沉积的常规与非常规油气勘探提供指导。

1 地质概况

1.1 涠西南凹陷

涠西南凹陷位于北部湾盆地北部凹陷,是中国南海北部大陆架西部的一个重要的富油气凹陷(图 1a)。凹陷东南缘与企西隆起相接,西北缘为涠西南断层,西南缘与海中凹陷相邻,中间被涠西南低凸起相隔(Jin Jiehua et al., 2019a;图 1a)。古近纪时期,涠西南凹陷为典型的陆相断陷盆地,受北东东—南西西向的系列大断层控制,形成北陡南缓、北断南超的构造格局,地层自下而上依次为长流组、流沙港组、涠洲组(Yang Xibing et al., 2019)。流沙港组自下而上可以进一步细分为流三段、流二段和流一段 3 个沉积时期,其中,流一段沉积时期构造活动强烈,形成了大量的深水重力流沉积(图 1a),并且重力流混合事件层发育。

1.2 鄂尔多斯盆

鄂尔多斯盆地是中国的第二大含油气盆地,横跨陕、甘、宁、蒙及晋五省,构造区划分为西缘冲断带、天环坳陷、伊陕斜坡、晋西挠褶带、伊盟隆起和渭北隆起 6 个单元(Fu Jinhua et al., 2019)。晚三叠世延长期,华北陆块和扬子板块相撞,受秦岭造山活动影响,发育一套大型坳陷盆地背景下的河流-三角洲-湖泊相碎屑岩沉积(Yang Renchao et al., 2014)。延长组自上而下可分为 10 段(长 1~长 10),其中,长 7 段为最大湖泛期,湖盆水体深度大、水域面积广,发育一套富有机质泥页岩及三角洲-重力流的细粒砂岩沉积(图 1b),重力流沉积广泛分布,且重力流混合事件层发育。

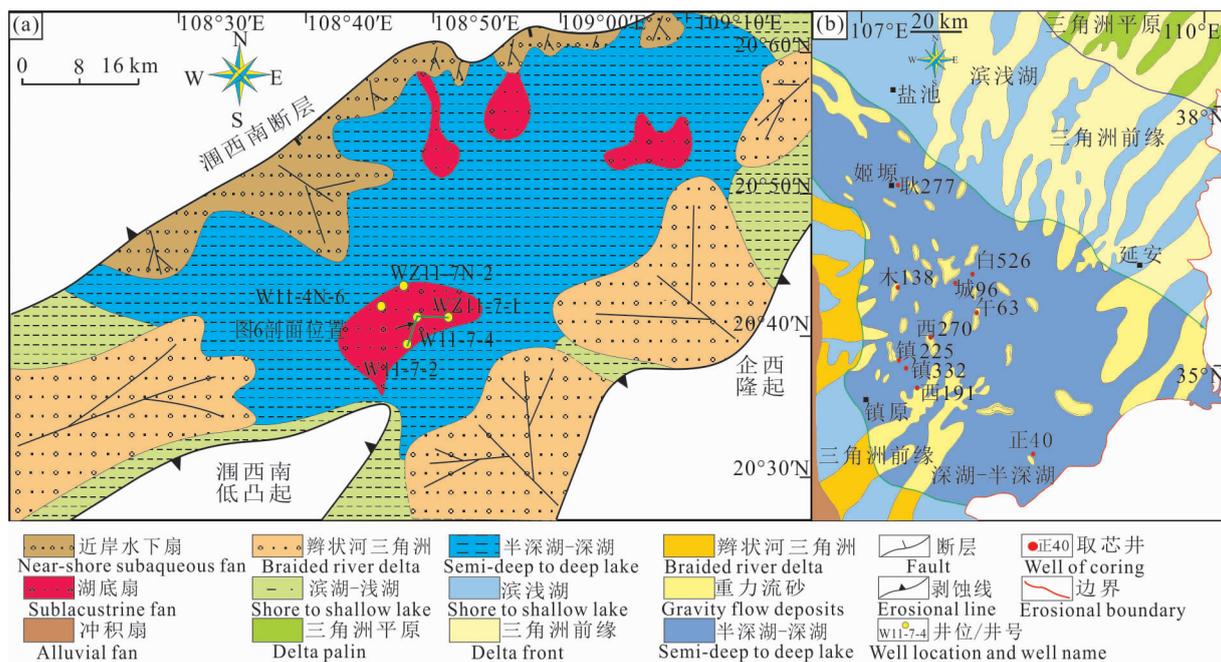


图1 涇西南凹陷与鄂尔多斯盆地位置与沉积相分布图

Fig. 1 Location of Weixinan depression and Ordos Basin and distribution of sedimentary facies

(a) 一涇西南凹陷流沙港组一段沉积相分布图; (b) 一鄂尔多斯盆地长7₃亚段沉积相平面图

(a)—Sedimentary facies distribution of the first member of Liushagang Formation in Weixinan sag; (b)—sedimentary facies distribution of the third submember of seventh member of Yanchang Formation in Ordos basin

2 重力流沉积物特征

陆相湖盆重力流沉积作用类型多样,根据前人对陆相湖盆重力流流体类型的认识(Yang Tian et al., 2015a, 2019a, 2020),本次研究认为湖盆主要存在泥质碎屑流、砂质碎屑流、高密度浊流、低密度浊流等重力流流体类型,并且滑动、滑塌等块体搬运沉积发育。

2.1 涇西南凹陷重力流沉积物特征

涇西南凹陷流沙港组一段主要发育滑动、滑塌块体搬运沉积和砂质碎屑流、泥质碎屑流、高密度浊流和低密度浊流等重力流流体沉积(图2a~e)。滑动、滑塌沉积以WZ11-4N-6井,2190.33~2191.33 m深度区间最为典型,整体表现为砂泥混杂变形;内部可见大量的褶皱变形、砂岩液化脉、阶梯状断层等软沉积物变形构造发育,此外可见明显的下凹滑动面(图2a)。砂质碎屑流沉积以WZ11-4N-6井2210.34~2211.34 m深度区间最为典型,以含砾粗砂岩沉积为主;整体块状,粒序和层理构造不发育,内部见漂浮泥砾,泥砾磨圆较好,在沉积序列不同部位均有分布,指示块状整体固结卸载沉积(Talling et al., 2012;图2b)。高密度浊流沉积以WZ11-

4N-6井,2218.34~2219.34 m深度区间最为典型,以中细砂岩沉积为主;单个沉积序列显示微弱的正粒序,沉积序列下部多为块状,可见微弱侵蚀或内部少量泥岩撕裂屑,类似鲍玛序列Ta段,沉积序列上部可见平行层理,类似鲍玛序列Tb段;垂向上,厚度不同的类似沉积序列上下叠置,反映较为稳定的水动力条件(Southern et al., 2017;图2c)。低密度浊流沉积以WZ11-7-4井,2182.50~2183.33 m深度区间最为典型,以粉细砂岩沉积为主;单个沉积序列显示微弱的正粒序,透镜状,内部砂纹发育,厚度多小于5 cm,类似鲍玛序列Tc段;垂向上,薄层沉积序列上下叠置,形成典型的砂泥薄互层,指示沉积远端的弱沉积动力环境(Yang Tian et al., 2019a;图2d)。除了上述典型沉积特征之外,在WZ11-7-1井,2521.13~3231.95 m深度区间,还可见到单个沉积序列下部为块状砂质碎屑流沉积或高密度浊流沉积,类似混合事件层H1段;上部为泥质碎屑流沉积构成的沉积序列,类似混合事件层H3段;垂向上不同厚度的沉积序列叠置,认为其代表了典型的重力流混合事件层(Haughton et al., 2003, 2009; Talling et al., 2004;图2e)。

2.2 鄂尔多斯盆地重力流沉积物特征

鄂尔多斯盆地延长组7段的重力流沉积同样包

括滑动、滑塌块体搬运沉积和砂质碎屑流、泥质碎屑流、高密度浊流和低密度浊流等重力流体沉积(图 2f~j)。滑动滑塌沉积以城 96 井, 1987.30~1988.19 m 深度区间为代表, 整体表现为砂泥均一混杂, 可见大量不同倾向的阶梯状小断层, 指示了局部的微弱再搬运作用(图 2f), 由于城 96 井远离盆地边界(图 1c), 因而大尺度变形相对不发育。砂质碎屑流沉积以城 96 井, 2072.37~2073.34 m 深度区间最为典型, 整体为粉细砂岩; 粒序和层理构造不发育, 整体块状, 内部含有大小和形态各异的泥岩撕裂屑, 呈漂浮状分布于沉积序列不同位置, 指示块体搬运沉积过程(Talling et al., 2012; 图 2g)。高密度浊流沉积以城 96 井, 1956.66~1958.5 m 深度区间最为典型, 以粉细砂岩沉积为主; 单个沉积序列显示微弱的正粒序, 下部含油性要好于上部含油性, 指示沉积物粒度向上变细, 底部可见微弱侵蚀, 上部平行层理发育, 泥质含量增加, 类似鲍马序列 Tb 段, 垂向上不同厚度沉积序列叠置(图 2h)。低密度浊流沉积以城 96 井, 1996.46~1997.56 m 深度区间最为典型, 以粉细砂岩沉积为主; 单个沉积序列显示微弱正粒序, 整体呈透镜状, 纱纹交错层理发育, 类似鲍马序列 Tc 段, 单层厚度小于 10 cm; 垂向上以薄层粉砂岩同薄层泥岩构成的砂泥韵律层叠置为典型特征(图 2i)。除了上述典型重力流沉积类型及特征外, 在城 96 井 2022.77~2024.01 m 深度区间, 同样观察到类似混合事件层垂向叠置的沉积特征, 单个沉积序列以下部块状砂质碎屑流沉积或高密度浊流沉积, 上部泥质碎屑流沉积组合为特征(图 2j)。

通过对涪西南凹陷流沙港组一段和鄂尔多斯盆地延长组 7 段深水重力流沉积特征分析, 发现均存在典型的重力流混合事件层。其沉积特征及成因与传统重力流沉积类型之间存在一定差异, 进而对其开展进一步的研究。

3 重力流混合事件层特征及类型

3.1 重力流混合事件层特征

研究区重力流混合事件层存在多种类型的沉积单元组合, 并且不同的沉积单元之间沉积特征差异显著。涪西南凹陷流沙港组一段的重力流混合事件层包含多层结构、双层结构和频繁互层三种类型(图 3a~d)。多层结构混合事件层底部 H1 段可见微弱正粒序, 底部与下伏沉积物呈侵蚀接触; 向上渐变为 H2 段, 以厚度 1 cm 左右明暗相间条带为典型特征, 暗条纹泥质含量明显高于亮条纹; H2 与 H3 段

之间为突变接触, H3 段砂泥混杂, 可见漂浮的砾石和泥质碎屑及砂质团块, 反映整体塑性泥质碎屑流沉积特征; H3 顶部可能被薄层浊流沉积和泥岩覆盖, 也有可能被侵蚀(图 3a)。双层结构混合事件层厚度分布在 0.1~2 m 之间, 下部 H1 段沉积特征多变, 整体呈块状或显微弱正粒序(图 3b、c), 内部可见明显的垂直泄水通道(泄水网络)或液化脉(图 3b), 其颜色较周围基质偏亮, 反映泄水淋滤导致的杂基含量的降低(Southern et al., 2017; Porten et al., 2019), H1 段上部可见部分的漂浮状泥质碎屑, 局部可见微弱的平行层理(图 3b、c)。双层结构上部以 H3 段为主(图 3b、c), 当 H3 段被侵蚀而 H2 段发育时同样构成双层结构(图 3c), 但 H1 与 H2 的双层结构组合较为罕见; H3 段中泥质碎屑、砂质团块发育, 可见部分砂岩液化脉(图 3b); H2 段以明暗相间条带叠置为特征(图 3c)。双层结构混合事件多在垂向上叠置, 形成较大厚度的沉积组合, 同时反映沉积动力环境较为稳定(图 3c)。明暗相间条带频繁互层形成的混合事件层多为粉砂与泥质粉砂沉积, 亮条带以粉砂沉积为主, 可见微弱正粒序; 暗条带以泥质粉砂或粉砂质泥沉积为主, 为泥质碎屑流(泥流)沉积产物, 多与低密度浊流沉积伴生, 反映较弱的沉积动力环境(图 3d)。

鄂尔多斯盆地延长组 7 段的重力流混合事件层以双层结构为主, 偶见多层结构(图 3e~j)。双层结构的厚度和沉积特征差异显著, 厚层的双层结构混合事件层多大于 1 m, 其下部的 H1 段以块状为主, 内部可垂直泄水通道、泄水网络发育, H1 段的上部亦可见少量的漂浮泥质碎屑; 上部的 H3 段多为泥质粉砂质, 内含少量的砂质团块(图 3e)。厚度较小的双层结构重力流混合事件层多小于 0.3 m(图 3f~i), 下部 H1 段多为块状, 内部可见泄水构造(图 3h); 下部 H1 段与上部 H3 段突变接触, 以其显著的颜色差异而易于区分, H3 段多为泥质粉砂或粉砂质泥岩(图 3f~i), 整体泥质含量高, 颜色偏暗(图 3f~i), 局部发育少量漂浮泥质碎屑(图 3f、i)。多层结构的重力流混合事件层下部 H1 段显示微弱正粒序, 底部微弱侵蚀; H1 与 H2 渐变接触, H2 显薄层明暗相间条带互层; 顶部 H3 显深灰色, 泥质含量最高。

3.2 重力流混合事件层类型

在两个盆地重力流混合事件层沉积特征分析的基础上, 进一步根据沉积单元组成、沉积特征和沉积单元厚度的差异, 将陆相湖盆的重力流混合事件层

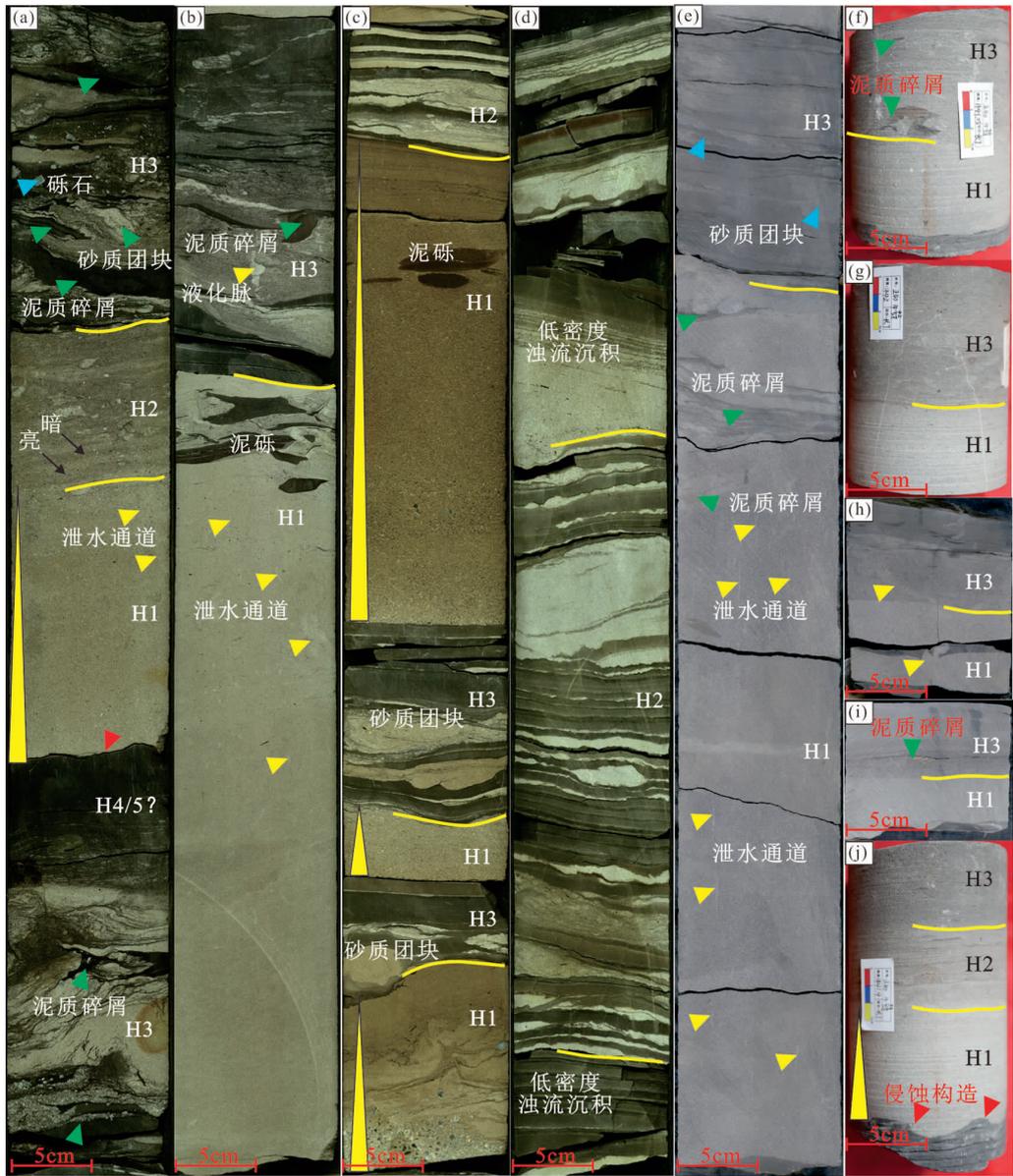


图 3 陆相湖盆重力流混合事件层典型沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of gravity flow hybrid event beds in lacustrine basin

(a)—涠西南凹陷, WZ11-7-1, 2517.52~2518.16 m, 三层结构重力流混合事件层及不同期次混合事件层的垂向叠置; (b)—涠西南凹陷, WZ11-7-1, 2511.53~2512.30 m, 双层结构重力流混合事件层; (c)—涠西南凹陷, WZ11-7-4, 2171.72~2172.39 m, 双层结构重力流混合事件层及不同期次混合事件层的垂向叠置; (d)—涠西南凹陷, WZ11-7-4, 2189.31~2189.80 m, 双层结构重力流混合事件层频繁互层; (e)—鄂尔多斯盆地, 城 96 井, 2023.30~2024.01 m, 双层结构重力流混合事件层; (f)—鄂尔多斯盆地, 正 40 井, 1441.05 m, 双层结构重力流混合事件层; (g)—鄂尔多斯盆地, 正 40 井, 1442 m, 双层结构重力流混合事件层; (h)—鄂尔多斯盆地, 城 96 井, 2076.84 m, 双层结构重力流混合事件层; (i)—鄂尔多斯盆地, 城 96 井, 1976.14 m, 双层结构重力流混合事件层; (j)—鄂尔多斯盆地, 正 40 井, 1441.4 m, 三层结构重力流混合事件层

(a)—Weixinan sag, WZ11-7-1, 2517.52~2518.16 m, tripartite structures gravity flow hybrid event beds and vertical stacking of hybrid event beds with different period; (b)—Weixinan sag, WZ11-7-1, 2511.53~2512.30 m, bipartite structures gravity flow hybrid event beds; (c)—Weixinan sag, WZ11-7-4, 2171.72~2172.39 m, bipartite structures gravity flow hybrid event beds and vertical stacking of hybrid event beds with different period; (d)—Weixinan sag, WZ11-7-4, 2189.31~2189.80 m, frequently interbedded bipartite structures gravity flow hybrid event beds; (e)—Ordos basin, Cheng 96, 2023.30~2024.01 m, bipartite structures gravity flow hybrid event beds; (f)—Ordos basin, Zheng 40, 1441.05 m, bipartite structures gravity flow hybrid event beds; (g)—Ordos basin, Zheng 40, 1442 m, bipartite structures gravity flow hybrid event beds; (h)—Ordos basin, Cheng 96, 2076.84 m, bipartite structures gravity flow hybrid event beds; (i)—Ordos basin, Cheng 96, 1976.14 m, bipartite structures gravity flow hybrid event beds; (j)—Ordos basin, Zheng 40, 1441.4 m, tripartite structures gravity flow hybrid event beds

划分为多层结构、双层结构和频繁互层重力流混合事件层三种大的类型(图4)。其中,双层结构的重力流混合事件层进一步根据上下两个沉积单元厚度的差异,细分为下部沉积单元厚度大于上部沉积单元厚度(图4b)和下部沉积单元厚度小于上部沉积单元厚度两个亚类(图3c)。

多层结构的重力流混合事件层与 Haughton et al. (2009) 提出的标准序列类似,整体厚度分布在0.3~3.5 m之间,主要表现为下部H1段和上部的H3段之间存在过渡流体沉积形成的明暗相间条带,且累计厚度一般不超过20 cm;下部H1段垂直泄水通道常见,上部H3段砂质团块、泥岩撕裂屑、变形泥质条带等发育(图3a,j,图4a),H3段可被低密度浊流沉积形成的H4与H5段覆盖。下部沉积单元厚度大于上部沉积单元厚度的双层结构重力流混合事件层与多层结构沉积特征类似,整体厚度分布在0.3~3 m之间,下部H1段整体呈块状,泄水通道发育;上部H3段以泥质砂岩沉积为主,其中砂质团块、泥岩撕裂屑、变形泥质条带含量较多层结构的H3段有所降低(图3b,e,图4b)。下部沉积单元厚度小于上部沉积单元厚度的双层结构重力流混合事件层整体厚度分布在0.1~3 m之间,其下部H1段整体呈块状,泄水通道不发育;上部H3段以泥质砂岩沉积为主,其中砂质团块、泥岩撕裂

屑、变形泥质条带少见(图3g,i,图4c)。频繁互层重力流混合事件层类似薄层状上部沉积单元厚度大于下部沉积单元厚度双层结构重力流混合事件层的垂向叠置,单层厚度可小于0.01 m,累计厚度可达5 m(图3d,图4d)。

不同盆地类型发育的重力流混合事件层类型存在一定差异,濠西南凹陷流沙港组一段发育的重力流混合事件层多层结构和双层结构常见,偶见频繁互层类型;双层结构以下部沉积单元厚度大于上部沉积单元厚度为主,可能指示了阶梯状断阶地形和相对强烈的构造活动利于混合事件层中H1段的发育。鄂尔多斯盆地延长组7段的重力流混合事件层以双层结构为主,偶见多层结构和频繁互层类型;双层结构以下部沉积单元厚度小于上部沉积单元厚度为主,可能指示了平缓地形和相对弱的构造活动利于混合事件层中H3段的发育。

4 重力流混合事件层成因机制及沉积模式

4.1 重力流混合事件层成因机制

重力流混合事件层的成因认识现阶段还存在较多的争议(Cao Yingchang et al., 2017a),如何准确的识别重力流混合事件层的成因还存在较大的不确定性。在明确陆相湖盆重力流混合事件层沉积特征

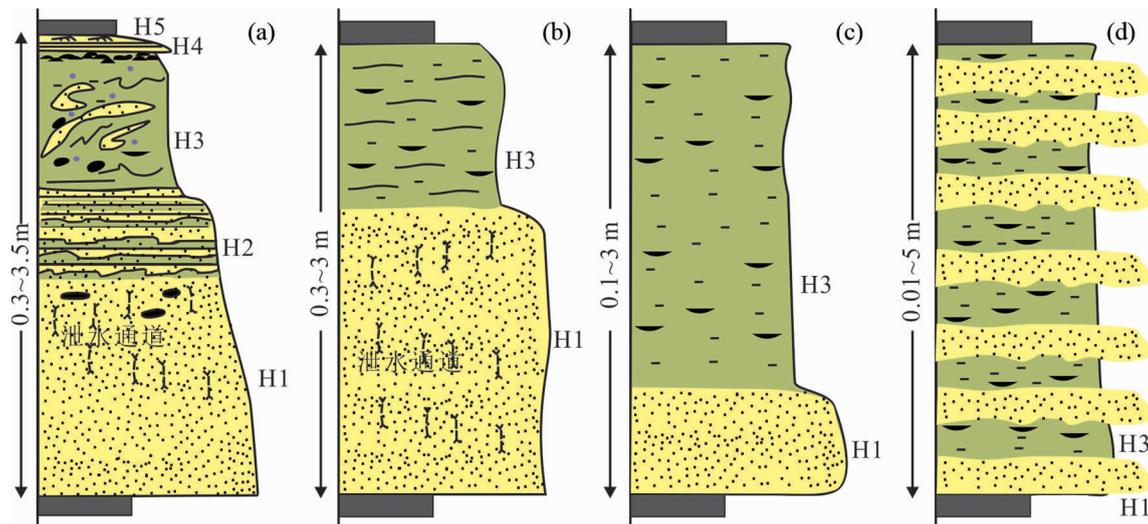


图4 陆相湖盆典型重力流混合事件层类型

Fig. 4 Typical types of gravity flow hybrid event beds in lacustrine basin

(a)—多层结构重力流混合事件层;(b)—双层结构重力流混合事件层,H1厚度大于H3;

(c)—双层结构重力流混合事件层,H1厚度小于H3;(d)—双层结构混合事件层频繁互层

(a)—Multilayer structure gravity flow hybrid event bed;(b)—bipartite structure gravity flow hybrid event bed with the thickness of H1 unit more than H3 unit;(c)—bipartite structure gravity flow hybrid event bed with the thickness of H1 unit less than H3 unit;(d)—frequently interbedded bipartite structures gravity flow hybrid event beds

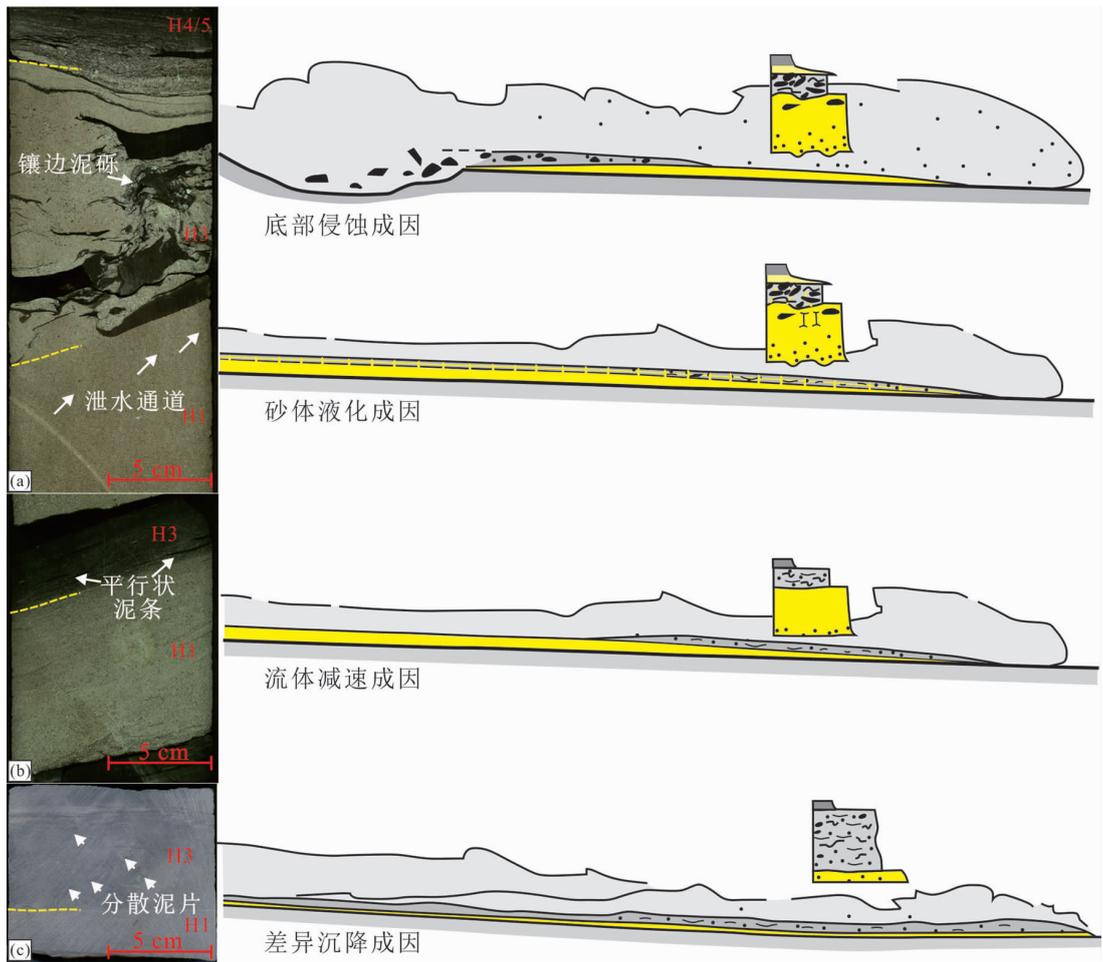


图 5 陆相湖盆典型重力流混合事件层成因

Fig. 5 Formation mechanisms of gravity flow hybrid event beds in lacustrine basin

(a) 流体侵蚀或液化成因多层结构重力流混合事件层; (b) 流体膨胀减速成因双层结构重力流混合事件层;

(c) 流体差异沉降成因双层结构重力流混合事件层

(a)—Multilayer structure gravity flow hybrid event bed caused by flow erosion or liquefaction;

(b)—bipartite structure gravity flow hybrid event bed caused by flow expansion and deceleration;

(c)—bipartite structure gravity flow hybrid event bed caused by differential settling processes

及其类型差异的基础上,对不同类型混合事件层的成因进行分析。

多层结构的重力流混合事件层多为流体侵蚀成因或砂体液化成因(图 5a)。其下部的 H1 段与下伏地层之间可表现为侵蚀接触关系(图 3a),同时,其 H3 段中的泥岩撕裂屑边缘多参差不齐、杂乱分布,特别是部分泥岩撕裂屑外部还残留有粒径明显大于周围基质砂体的粗砂或砾石颗粒(镶边泥砾)(图 5a),这些泥砾很可能指示了流速较快、搬运沉积物粒度较粗的流体对泥质基底的强侵蚀作用,然后泥质碎屑在浮力作用下向上搬运聚集到流体上部,随着泥质碎屑搬运过程中的磨损,上部泥质含量增加,最终转化为泥质碎屑流沉积,形成混合事件层(Haughton et al., 2009; Yang et al., 2018; 图

5a)。此外,在多层或双层结构重力流混合事件层的 H1 段中存在大量的垂直泄水通道(图 3a、b、e,图 5a),广泛发育的泄水作用可能也是导致混合事件层形成的原因。原始沉积组构如下部块状沉积、上部砂泥互层沉积的高密度浊流沉积,其下部块状沉积的泄水作用会刺穿上部的砂泥互层沉积组构,导致泥岩破裂形成类似泥岩撕裂屑(Li Shunli et al., 2017),这种情况下形成的泥岩撕裂屑的边部撕裂茬多具有定向弯曲的特征,指示流体刺穿成因。同时,泄水过程可能会导致上部沉积物的失稳流动,利于上部泥质砂岩层的大面积分布;如此,下部泄水构造发育的块状砂与上部被刺穿的砂泥互层形成类似重力流混合事件层(Higgs, 2010)。

流体减速膨胀导致的流体转化是下部沉积单元

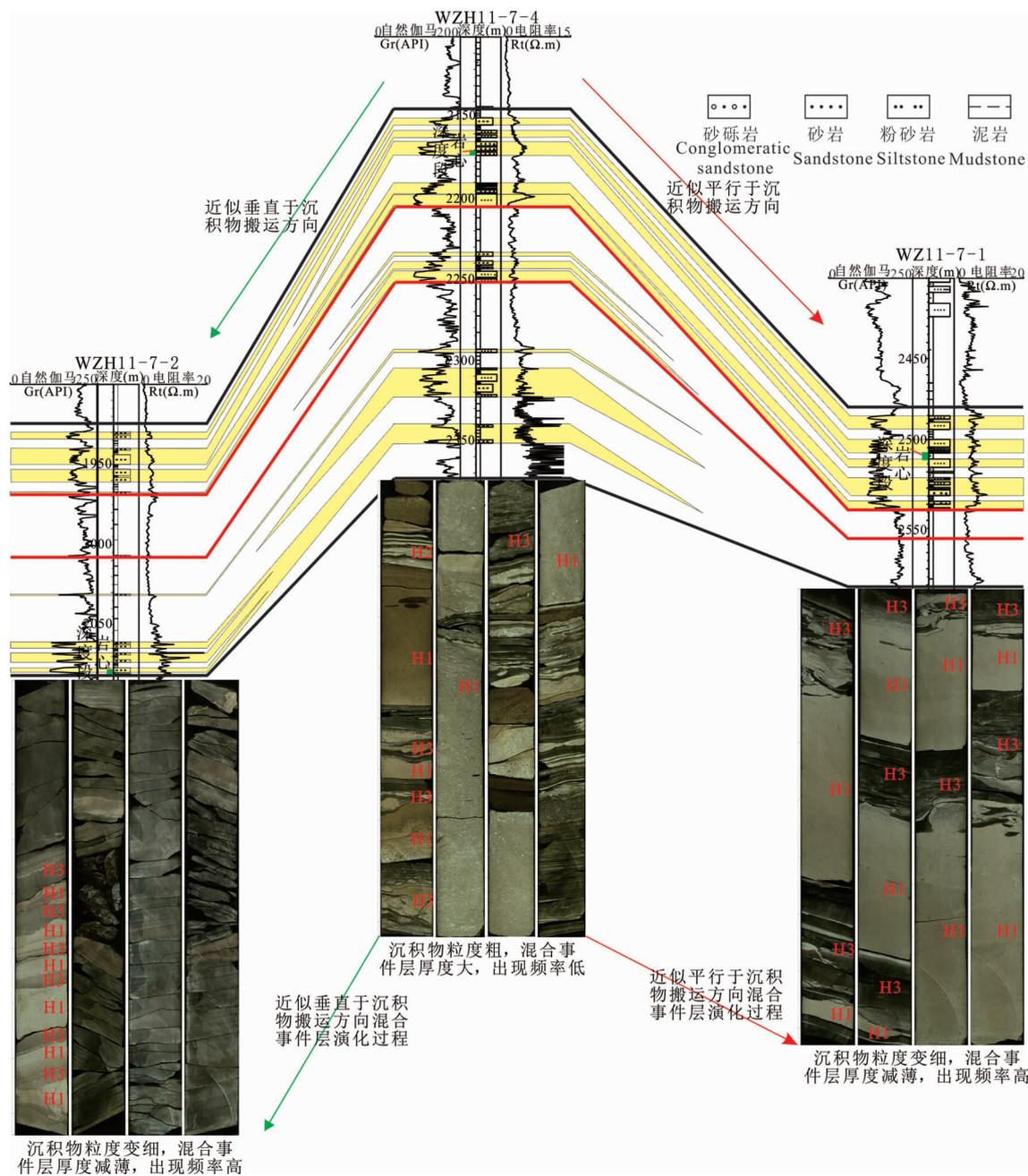


图6 陆相湖盆重力流混合事件层沉积分布特征(剖面位置见图1b)

Fig. 6 Distribution characteristics of gravity flow hybrid event beds in lacustrine basin (the location of profile see Fig. 1b)

厚度大于上部沉积单元厚度的双层结构重力流混合事件层的可能成因(图5b)。一方面, 该种情况下部分H1段中保留了部分的似平行层理牵引沉积构造(图5b); 另一方面, 其上部的H3段一般厚度较薄, 且发育部分平行排列的长条状泥质条带(图5b), 指示了流体相对较弱的内聚力(Talling, 2013)。重力流搬运过程中由于局部限制减弱, 导致流体膨胀减速, 粗粒沉积物在底部优先富集沉淀, 上部薄层流体由于泥质含量不断增加转化为泥质碎屑流(泥流)而整体固结沉积, 从而构成下部沉积单元厚度大于上

部沉积单元厚度的双层结构混合事件层。

泥质碎屑流中碎屑颗粒的差异沉降过程是下部沉积单元厚度小于上部沉积单元厚度的双层结构重力流混合事件层的可能成因(图5c)。一方面, 该种情况下H1段厚度较薄, 块状为主, 不显或显微弱的正粒序(图5c); 另一方面, 其上部的H3段一般厚度较大, 泥质杂基呈分散状且可见部分分散状泥片, 指示具有一定的流体强度, 为泥质碎屑流(泥流)沉积产物(图5c)。整体以H3段沉积为主, 指示在泥质碎屑流停止搬运后, 孔隙水释放的过程中会导致其

内部的砂质颗粒重排,在下部聚集形成薄层的 H1 段(Sumner et al., 2009)。薄层的该类混合事件层在垂向上的叠置则可能形成频繁互层类型的重力流混合事件层。

4.2 重力流混合事件层沉积模式

在重力流混合事件层沉积特征和成因分析的基础上,对重力流混合事件层的分布特征进行分析。涠西南凹陷流沙港组一段重力流混合事件层发育的井位包括 WZ11-7-1、WZ11-7N-2 和 W11-4N-6,均位于深水重力流沉积的远端和外围(图 1b);而鄂尔多斯盆地延长组 7 段的重力流混合事件层发育的井位包括西 191、西 270、镇 225、正 40、城 96 和午 63 等井,均位于相对厚层重力流砂体沉积的边缘(图 1c,图 6,图 7a)。因而,认为湖盆重力流混合事件层的分布与海相重力流混合事件层的分布规律类似,主要分布在重力流沉积的相对远端与边缘(Haughton et al., 2009; Hovikoski et al., 2016)。

通过对涠西南凹陷流沙港组一段重力流事件层发育井位的连井对比分析发现,从沉积砂体中心向边缘,砂体整体的厚度逐渐减薄(图 6)。砂体中心发育的混合事件层粒序相对较粗,H1 段厚度明显大于 H3 段,相同厚度的岩芯中,混合事件层出现的频率较低(图 6)。从砂体中心平行于沉积物搬运方向,砂体厚度减薄,沉积物粒度变细,H1 段与 H3 段厚度差异减小,相同厚度的岩芯中,混合事件层出现频率较砂体中心沉积明显增加(图 6)。从砂体中心垂直于沉积物搬运方向,砂体厚度出现明显减薄,沉积物粒度变细,H1 段与 H3 段厚度差异减小且频繁互层(图 6)。

沿沉积物搬运方向,从沉积近端到沉积远端,重力流流体的侵蚀能力逐渐减弱;最先开始形成的重力流混合事件层多为流体侵蚀成因,具有多层结构,且下部沉积单元 H1 段厚度大于上部沉积单元 H3 段的厚度;随着搬运距离的增加和流体的限制减弱,逐步转化为流体膨胀减速成因的双层结构重力流混合事件层,混合事件层的整体厚度有所减薄,下部沉积单元 H1 段厚度仍然大于上部沉积单元 H3 段的厚度;随着流体的进一步搬运与砂质沉积物的进一步沉淀,在沉积最远端转化为泥质碎屑流碎屑颗粒差异沉降成因的混合事件层,整体厚度进一步减薄,下部沉积单元 H1 段厚度小于上部沉积单元 H3 段的厚度;混合事件层顶部可被低密度浊流沉积或背景泥质沉积覆盖(Yang Tian et al., 2018; Pierce et

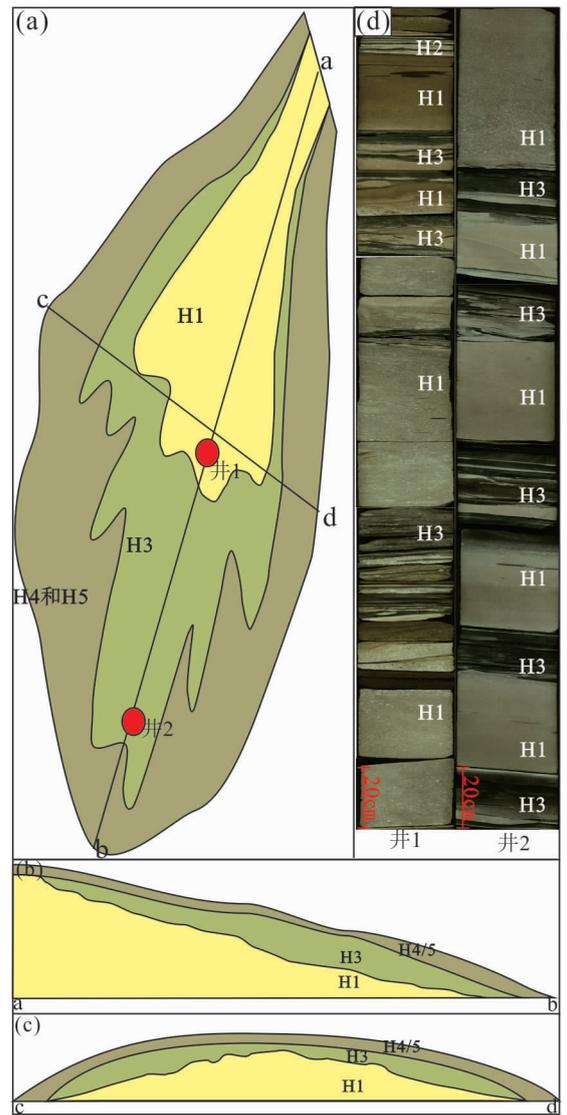


图 7 陆相湖盆重力流混合事件层发育重力流沉积模式
Fig. 7 Depositional model of gravity flow deposits with development of hybrid event beds in lacustrine basin

(a)一重力流混合事件层平面分布特征;(b)一重力流混合事件层纵剖面结构及分布特征;(c)一重力流混合事件层横剖面结构及分布特征;(d)一重力流混合事件层相对近端与远端井位沉积特征;井1—WZ11-7-4;井2—WZ11-7-1

(a)—The plane distribution of gravity flow hybrid event beds; (b)—longitudinal profile geometry and distribution of gravity flow hybrid event beds; (c)—lateral profile geometry and distribution of gravity flow hybrid event beds; (d)—sedimentary characteristics of gravity flow hybrid event beds in proximal and distal; Well 1—WZ11-7-4; Well 2—WZ11-7-1

al., 2018; 图 7b)。在垂直于沉积物搬运方向的横剖面上,其中心对应于重力流搬运主泓线方向,流体搬运能力和侵蚀能力最强,形成侵蚀因为主、厚度较大的多层或双层结构重力流混合事件层,以下部沉积单元 H1 段厚度大于上部沉积单元 H3 段的厚

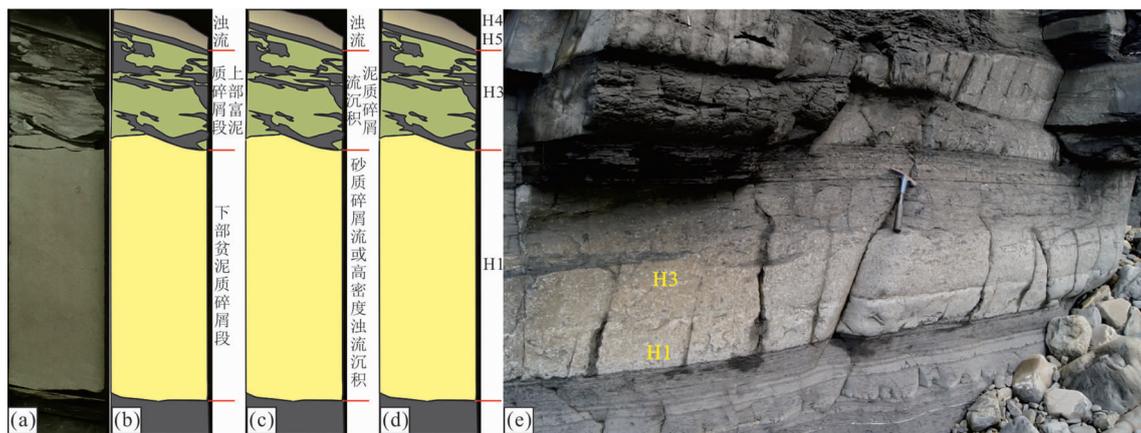


图8 重力流沉积物岩芯特征多解性分析

Fig. 8 Characteristics of gravity flow deposits core with various formation mechanism interpretation

- (a)—涪西南凹陷, WZ11-7-1, 2508.63~2509.20 m, 重力流沉积物岩芯照片; (b)—砂质碎屑流成因解释;
 (c)—砂质碎屑流或高密度浊流沉积与泥质碎屑流沉积垂向叠加成因解释; (d)—重力流混合事件层成因解释;
 (e)—灵山岛下白垩统重力流混合事件层沉积野外露头侧向稳定分布
- (a)—Weixinan sag, WZ11-7-1, 2508.63~2509.20 m, Photo of gravity-flow deposits core;
 (b)—interpreted as the deposits of sandy debris flow; (c)—interpreted as vertical stacking of sandy debris or
 high-density turbidites and muddy debris; (d)—interpreted as gravity flow hybrid event beds;
 (e)—the lateral continue distribution of gravity flow hybrid event beds, lower Cretaceous, Lingshan Island

度为典型特征;从中心向两侧,随着远离主泓线方向,重力流流体搬运和侵蚀能力减弱,依次形成流体膨胀减速和泥质碎屑流碎屑颗粒差异沉降成因的混合事件层(图7c)。

在重力流混合事件层发育的相对近端,如井1位置所示,以侵蚀作用成因的厚度不等的重力流混合事件层的垂向叠置为主要特征,单个混合事件层厚度多大于50 cm, H1段厚度大于H3段厚度(图7d);在重力流混合事件层发育的相对远端,如井2位置所示,以薄层频繁互层类型的重力流混合事件层和低密度浊流沉积垂向叠置为主要特征,单个混合事件层厚度多小于50 cm, H1段厚度与H3段厚度接近(图7d)。

5 沉积学意义

5.1 沉积过程解析地质意义

陆相湖盆重力流混合事件层的发现,促使我们进一步思考岩芯观察分析重力流沉积过程的局限性(Tan Mingxuan et al, 2016; Jin Jiehua et al., 2019b)。在重力流沉积岩芯分析中沉积界面的拟定对沉积作用类型及其产物的确定起到十分关键的作用,但并不是所有的岩性界面都代表了不同的重力流沉积事件。以涪西南凹陷, WZ11-7-1井, 2508.63~2509.20 m深度区间的重力流沉积物岩

芯照片为例(图8a),可认为其整体为砂质碎屑流沉积,下部为贫泥质碎屑段,上部为富泥质碎屑段(图8b; Shanmugam, 2013);在无法准确判别上部沉积单元泥质杂基含量的情况下,可以将其解释为下部砂质碎屑流沉积或高密度浊流沉积,上部泥质碎屑流沉积(图8c; Liu Jianping et al., 2017);如果认为下部的沉积单元与上部沉积单元存在伴生关系,则可解释为重力流混合事件层(图8d; Haughton et al., 2009)。因而,孤立的岩芯照片分析解释往往存在多解性(Eggenhuisen et al., 2010),因为其无法体现沉积物侧向的分布特征(图8e),而侧向分布特征对沉积物成因具有重要指示意义。如重力流混合事件层沉积其野外露头以不同沉积单元组成的单层岩层侧向稳定分布为典型特征(图8e);在无法获知侧向分布特征的情况下,需要更加注重岩芯垂向上的组合特征和规律。相同沉积单元组成的沉积层在垂向上的规律叠置则表明这些沉积单元存在成因上的联系,是在岩芯中识别重力流混合事件层沉积的可靠依据(Haughton et al., 2009),如WZ11-7-1井中出现的相同沉积单元组成沉积层在垂向上的规律叠置指示了其典型的混合事件层沉积(图7d)。总之,砂质碎屑流沉积或高密度浊流沉积与泥质碎屑流沉积可能偶尔组合(图8c),但是规律的组合需要考虑其为统一成因;因而,湖盆的深水重力

流沉积需要更加注重野外露头的研究。同时,如若以深水重力流沉积物为载体,解读其所蕴含的古环境及古构造演化信息,在无法准确识别重力流混合事件层及其形成过程的前提下,单纯的地球化学分析极有可能会造成相关信息的误解(Zhang Xuwei et al., 2014)。

5.2 重力流沉积油气勘探开发启示

陆相湖盆重力流混合事件层的发现,对重力流沉积常规油气勘探与开发会产生消极的影响。由于重力流混合事件层上部 H3 段多以泥质砂岩沉积为主,其孔隙度和渗透率较下部的 H1 段砂质沉积要明显降低,从而形成垂向上的流体分隔层,导致储层的沉积非均质性增强;特别是在 H3 段的厚度达到地层总厚度的 20% 以上时,将对流体的流动产生较大的影响(Amy et al., 2009)。因而,在常规油气储量计算预测、开发方案制定和油藏管理决策方面都要充分考虑重力流混合事件层 H3 段发育带来的负面影响(图 9a)。具体而言,储量计算时需要将混合事件层 H3 段作为非储集层扣除,不可避免地会导致整体储量的降低;开发方案制定时需要根据混合事件层 H3 段平面分布及发育程度,充分考虑其发育对流体流动的阻碍作用,选择合适的井位、制定针对性的注采开发方案(Amy et al., 2009)。

陆相湖盆重力流混合事件层的发现,则对重力流沉积非常规油气勘探与开发产生了非常积极的影响。陆相湖盆深水细粒沉积广泛发育,蕴藏了丰富的页岩油气资源(Qiu Zhen et al., 2020);除了传统的悬浮沉积成因外,深水重力流作为细粒沉积的重要成因机制逐步受到重视(Schieber, 2016; Song Mingshui et al., 2017; Yang Renchao et al., 2017b; Boulesteix et al., 2019; Davarpanah et al., 2020)。细粒重力流由于其流体物质组成富含黏土矿物和有机质,其沉积物特征、搬运演化过程及分布规律都与传统粗粒重力流之间存在明显差异;在黏土矿物和有机质综合作用下,细粒重力流在搬运过程中更易发生湍流抑制作用导致浊流向泥质碎屑流转化,形成重力流混合事件层(Baas et al., 2009; Hovikoski et al., 2016; Baker et al., 2017; Craig et al., 2020)。下部沉积单元 H1 段厚度小于上部沉积单元 H3 段厚度的双层结构重力流混合事件层与频繁互层重力流混合事件层是细粒重力流沉积物的重要表现形式(图 3d, 9b)。这种重力流混合事件层成因的细粒沉积上部 H3 段多富含有机质(Hovikoski et

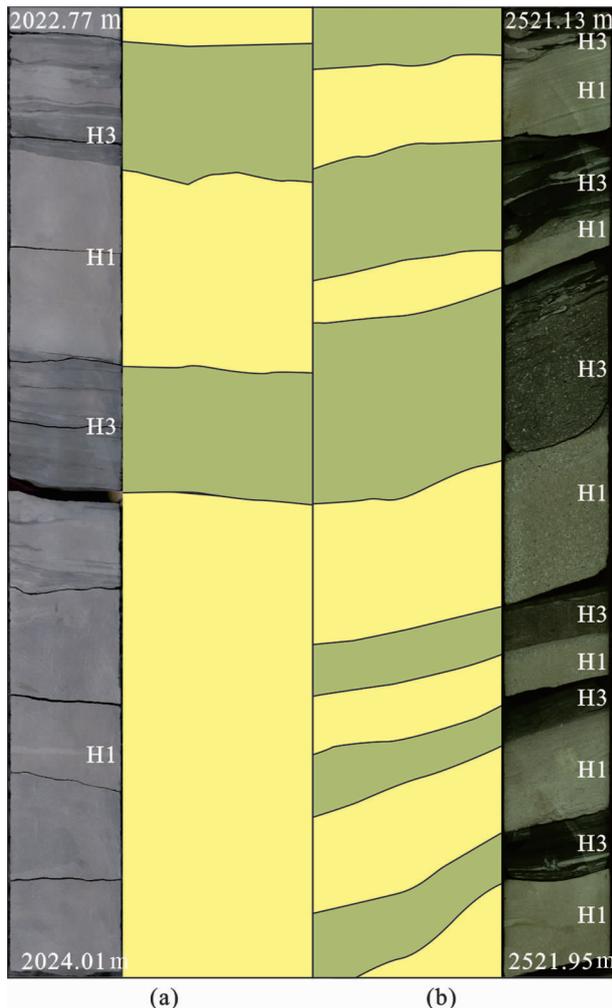


图 9 重力流混合事件层沉积常规与非常规油气勘探启示

Fig. 9 Conventional and unconventional oil and gas exploration significances of gravity-flow hybrid event beds (a)—重力流混合事件层沉积常规油气勘探的不利启示,鄂尔多斯盆地,城 96 井;(b)—重力流混合事件层沉积非常规油气勘探的有利启示,涪西南凹陷,WZ11-7-1 井 (a)—Gravity-flow hybrid event beds bad for conventional oil and gas exploration, Ordos basin, Cheng 96; (b)—gravity-flow hybrid event beds benefit for unconventional oil and gas exploration, Weixinan sag, WZ11-7-1

al., 2016; Craig et al., 2020), 利于油气的生成;而下部的 H1 段物性较好,利于油气的富集;同时,这种砂泥互层的沉积组构具有易于压裂的先天优势,是页岩油气中的“甜点”区发育的优势沉积岩相组合类型(图 9b; Yang Tian et al., 2019b)。现阶段关于重力流混合事件层与页岩油气富集之间的关系尚不明确,相关研究可能会为细粒非常规油气勘探开发提供新的思路。

6 结论

(1) 涪西南凹陷流沙港组一段和鄂尔多斯盆地

延长组7段的重力流沉积主要包括滑动滑塌沉积、砂质碎屑流沉积、泥质碎屑流沉积、高密度浊流沉积和低密度浊流沉积,同时广泛发育重力流混合事件层沉积。

(2) 涪西南凹陷流沙港组一段发育的重力流混合事件层以多层结构和双层结构常见,偶见频繁互层类型;双层结构以下部沉积单元厚度大于上部沉积单元厚度为主;鄂尔多斯盆地延长组7段的重力流混合事件层以双层结构为主,偶见多层结构和频繁互层类型;双层结构以下部沉积单元厚度小于上部沉积单元厚度为主。

(3) 湖盆重力流混合事件层包含流体侵蚀、砂体液化、流体减速膨胀、泥质碎屑流中碎屑颗粒的差异沉降等多种成因机制。

(4) 重力流混合事件层发育的相对近端,以侵蚀作用成因的厚度不等的重力流混合事件层的垂向叠置为主要特征;重力流混合事件层发育的相对远端,以薄层频繁互层类型的重力流混合事件层和低密度浊流沉积垂向叠置为主要特征。

(5) 相同沉积单元组成的沉积层在垂向上的规律叠置是在岩芯中识别重力流混合事件层沉积的可靠依据;在未明确其沉积过程的情况下可能会导致沉积信息的错误解读。重力流混合事件层的发育会导致重力流沉积非均质性增强,不利于常规油气的储集;但是,重力流混合事件层形成的细粒沉积物是非常规油气“甜点”区发育的优势沉积岩相组合类型。

References

Amy L A, Peachey S A, Cardiner A A, Talling P J. 2009. Prediction of hydrocarbon recovery from turbidite sandstones with linked-debrite facies: numerical flow-simulation studies. *Marine and Petroleum Geology*, 26: 2032~2043.

Baas J H, Best J L, Peakall J, Wang M. 2009. A phase diagram for turbulent, transitional, and laminar clay suspension flows. *Journal of Sedimentary Research*, 79: 162~183.

Baker M L, Baas J H, Malarkey J, Jacinto R S, Craig M J, Kane I A, Barker S. 2017. The effect of clay type on the properties of cohesive sediment gravity flows and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 87(11): 1176~1195.

Boulestex K, Poyatos-Moré M, Flint S S, Taylor K G, Hasiotis S T. 2019. Transport and deposition of mud in deep-water environments: processes and stratigraphic implications. *Sedimentology*, 66(7): 2894~2925.

Cao Yingchang, Yang Tian, Wang Yanzhong, Zhang Shaomin, Wang Sijia, Zhang Qingqing, Wang Xinyi. 2017a. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current. *Earth Science Frontiers*, 24(3): 234~248(in Chinese with English abstract).

Cao Yingchang, Yang Tian, Wang Yanzhong, Li Wenqiang. 2017b. Formation, evolution and sedimentary characteristics of super-critical sediment gravity-flow. *Acta Petrolei Sinica*, 38(6): 607

~621(in Chinese with English abstract).

Clare M A, Hughes Clarke J E, Talling P J, Cartigny M J B, Pratomo D G. 2016. Preconditioning and triggering of offshore slope failures and turbidity currents revealed by most detailed monitoring yet at a fjord-head delta. *Earth and Planetary Science Letters*, 450: 208~220.

Craig M J, Baas J H, Amos K J, Strachan L J, Manning A J, Paterson D M, Hope J A, Nodder S D, Baker M L. 2020. Biomediation of submarine sediment gravity flow dynamics. *Geology*, 48: 72~76.

Davarpanah J S, Wells M G. 2020. Dynamics of settling driven convection beneath a sedimentladen buoyant overflow: implications for the length scale of deposition in lakes and the coastal ocean. *Sedimentology*, 67(1): 699~720.

Dodd T J H, McCarthy D J, Richards P C. 2018. A depositional model for deep-lacustrine, partially confined, turbidite fans: early Cretaceous, North Falkland Basin. *Sedimentology*, 66: 53~80.

Eggenhuisen J T, McCaffrey W D, Houghton P D W, Butler R W H, Moore I, Jarvie A, Hakes W G. 2010. 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. *Marine and Petroleum Geology*, 27: 1595~1615.

Fongngern R, Olariu C, Steel R, Olariu C, Steel R, Mohrig D, Krezsek C, Hess T. 2018. Subsurface and outcrop characteristics of fluvial-dominated deep lacustrine clinoforms. *Sedimentology*, 65: 1447~1481.

Fonnesu M, Felletti F, Houghton P D W, Patacci M, McCaffrey W D. 2018. Hybrid event bed character and distribution linked to turbidite system subenvironments: the North Apennine Gottero Sandstone (north-west Italy). *Sedimentology*, 65: 151~190.

Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, Feng Shengbin, Liang Xiaowei, Xin Honggang, You Yuan. 2019. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos basin. *China Petroleum Exploration*, 24(5): 601~614.

Galy V, France-Lanord C, Beyssac O, Faure P, Kudrass H, Palhol F. 2007. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system. *Nature*, 450: 407~10.

Houghton P D W, Barker S P, McCaffrey W D. 2003. 'Linked' debrites in sand-rich turbidite systems-origin and significance. *Sedimentology*, 50: 459~482.

Houghton P, Davis C, McCaffrey W, Barker S. 2009. Hybrid sediment gravity flow deposits-Classification, origin and significance. *Marine and Petroleum geology*, 26: 1900~1918.

Higgs R. 2010. Comments on Hybrid sediment gravity flows e classification, origin and significance from Houghton, Davis, McCaffrey and Barker (*Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26, 1900-1918). *Marine and Petroleum Geology*, 27: 2062~2065.

Hovikoski J, Therkelsen J, Nielsen L H, Bojesen-Koefoed J A, Nytoft H P, Petersen H I, Abatzis I, Tuan H A, Phuong B T N, Dao C V, Fyhn M B W. 2016. Density-flow deposition in a fresh-water lacustrine rift basin, Paleogene bach long VI graben, Vietnam. *Journal of Sedimentary Research*, 86(8): 982~1007.

Hughes Clarke J E. 2016. First wide-angle view of channelized turbidity currents links migrating cyclic steps to flow characteristics. *Nat Commun*, 7: 11896.

Jazi S D, Wells M G. 2020. Dynamics of settling-driven convection beneath a sediment-laden buoyant overflow: implications for the length-scale of deposition in lakes and the coastal ocean. *Sedimentology*, 67: 699~720.

Jin Jiehua, Cao Yingchang, Wang Jian, Yang Tian, Liu Juan, Wang Xinyi, Wang Shuping. 2019a. New discovery of hyperpycnal flow deposits in the Elx 1 section of the steep slope belt in the

- Weixinan sag. *Earth Science Frontiers*, 26(4): 250~258 (in Chinese with English abstract).
- Jin Jiehua, Cao Yingchang, Wang Jian, Yang Tian, Zhou Lei. 2019b. Deep-water sandy debris flow deposits: concepts, sedimentary processes and characteristics. *Geological Review*, 65(3): 689~702 (in Chinese with English abstract).
- Kane I A, Clare M A, Miramontes E, Wogelius R, Rothwell J J, Garreau P, Pohl F. 2020. Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation. *Science*, 368: 6495.
- Li Cunlei, Ren Weiwei, Tang Mingming. 2012. Preliminary study on gravity flow depositional system based on fluid properties conversion theory. *Geological Review*, 58(2): 285~296 (in Chinese with English abstract).
- Li Shunli, Li Shengli, Shan Xin, Gong Chenglin, Yu Xinghe. 2012. Preliminary Study on Gravity Flow Depositional System Based on Fluid Properties Conversion Theory. *Geological Review*, 58(2): 285~296.
- Liu Jianping, Xian Benzong, Wang Junhui, Ji Youliang, Lu Zhiyong, Liu Saijun. 2017. Classification, formation, and transport mechanisms of mud clasts. *International geology review*, 59: 1609~1620.
- Liu Jianping, Xian Benzong, Wang Junhui, Ji Youliang, Lu Zhiyong, Liu Saijun. 2017. Sedimentary architecture of a sub-lacustrine debris fan: eocene Dongying Depression, Bohai Bay Basin, East China. *Sedimentary Geology*, 362: 66~82.
- Lowe D R, Guy M. 2000. Slurry-flow deposits in the Britannia Formation (Lower Cretaceous), North Sea: a new perspective on the turbidity current and debris flow problem. *Sedimentology*, 47: 31~70.
- Mutti E, Bernoulli D, Ricci Lucchi F, Tinterri R. 2009. Turbidites and turbidity currents from Alpine 'flysch' to the exploration of continental margins. *Sedimentology*, 56: 267~318.
- Mulder T, Alexander J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*, 48: 269~299.
- Pierce C S, Haughton P D W, Shannon P M, Pulham A J, Barker S P, Martinsen O J. 2018. Variable character and diverse origin of hybrid event beds in a sandy submarine fan system, Pennsylvanian Ross Sandstone Formation, western Ireland. *Sedimentology*, 65: 952~992.
- Porten K W, Warchol M J, Kane I A. 2019. Formation of detrital clay grain coats by dewatering of deep-water sands and significance for reservoir quality. *Journal of Sedimentary Research*, 89: 1231~1249.
- Qiu Zheng, Zou Caineng. 2020. Unconventional Petroleum Sedimentology: connotation and prospect. *Acta Sedimentologica Sinica*, 38(1): 1~29.
- Schieber J. 2016. Mud re-distribution in epicontinental basins-exploring likely processes. *Marine and Petroleum Geology*, 71: 119~133.
- Shanmugam G. 2013. New perspectives on deep-water sandstones: implications. *Petroleum Exploration and Development*, 40(3): 316~324.
- Song Mingshui, Xiang Kui, Zhang Yu, Cai Pan, Liu Jianlei, Yang Renchao. 2017. Research progresses on muddy gravity flow deposits and their significances on shale oil and gas: a case study from the 3rd oil-member of the Paleogene Shahejie Formation in the Dongying Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(4): 740~751 (in Chinese with English abstract).
- Southern S J, Kane I A., Warchol M J, Porten K W, McCaffrey W D, Talling P. 2017. Hybrid event beds dominated by transitional-flow facies: character, distribution and significance in the Maastrichtian Springar Formation, north-west Vøring Basin, Norwegian Sea. *Sedimentology*, 64: 747~776.
- Sumner E J, Talling P J, Amy L A. 2009. Deposits of flows transitional between turbidity current and debris flow. *Geology*, 37(11): 991~994.
- Talling P J. 2013. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models. *Geosphere*, 9(3): 460~488.
- Talling P J, Amy L A, Wynn R B, Peakall J, Robinson M. 2004. Beds comprising debrite sandwiched within co-genetic turbidite: origin and widespread occurrence in distal depositional environments. *Sedimentology*, 51(1): 163~194.
- Talling P J, Masson D G, Sumner E J, Malgesini G. 2012. Subaqueous sediment density flows: depositional processes and deposit types. *Sedimentology*, 59: 1937~2003.
- Talling P J, Allin J, Armitage D A, Arnott, R W C, Cartigny M J B, Clare M A, Felletti F, Covault J A, Girardelos S, Hansen E, Hill P R, Hiscott R N, Hogg A J, Hughes Clarke J E, Jobe Z R, Malgesini G, Mozzat A, Naruse H, Parkinson S, Peel F J, Piper D J W, Pope E, Postma G, Rowley P, Sguazzini A, Stevenson C J, Sumner E J, Sylvester Z, Watts C, Xu J P. 2015. Key future directions for research on turbidity currents and their deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 85: 153~168.
- Tan Mingxuan, Zhu Xiaomin, Geng Mingyang, Liu Changni. 2016. The flow transforming deposits of sedimentary gravity flow-hybrid event bed. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(6): 1108~1119 (in Chinese with English abstract).
- Yang Renchao, He Zhiliang, Qiu Guiqiang, Jin Zhijun Sun Ddongsheng, Jin Xiaohui. 2014. Late Triassic gravity flow depositional systems in the southern Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 41(6): 661~670 (in Chinese with English abstract).
- Yang Renchao, Jin Zhijun, van Loon A J, Han Zuozhen, Fan Aiping. 2017a. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos basin, central China: implications for unconventional petroleum development. *AAPG Bulletin*, 101(1): 95~117.
- Yang Renchao, Yin Wei, Fan Aiping, Han Zuozhen, van Loon A J. 2017b. Fine grained, lacustrine gravity-flow deposits and their hydrocarbon significance in the Triassic Yanchang Formation in southern Ordos basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 19(5): 791~806 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tian, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, Zhang Shaomin. 2015a. Status and trends in research on deep-water gravity flow deposits. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(2): 610~631.
- Yang Tian, Cao Yingchang, Wang Yanzhong, Zhang Shaomin. 2015b. Types, sedimentary characteristics and genetic mechanisms of deep-water gravity flows: a case study of the middle submember in Member 3 of Shahejie Formation in Jiyang depression. *Acta Petrolei Sinica*, 36(8): 1048~1059 (in Chinese with English abstract).
- Yang Tian, Cao Yingchang, Friis H, Liu Keyu, Wang Yexin. 2018. Origin and evolution processes of hybrid event beds in the Lower Cretaceous of the Lingshan Island, eastern China. *Australian Journal of Earth Sciences*, 64(4): 517~534.
- Yang Tian, Cao Yingchang, Liu Keyu, Wang Yanzhong, Zavala C, Friis H, Song Mingshui, Yuan Guanghui, Liang Chao, Xi Kelai, Wang Jian. 2019a. Genesis and depositional model of subaqueous sediment gravity-flow deposits in a lacustrine rift basin as exemplified by the Eocene Shahejie Formation in the Jiyang Depression, Eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 102: 231~257.
- Yang Tian, Cao Yingchang, Liu Keyu, Zhou Lingli, Jin Jiehua. 2019b. Origin of deep-water fine-grained sediments as revealed from the Lower Cretaceous rifting basin sequence in the Lingshan Island, Yellow Sea, Eastern China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 186: 104065.
- Yang Tian, Cao Yingchang, Liu Keyu, Tian Jingchun, Carlos Z, Wang Yanzhong. 2020. Gravity flow deposits caused by different initiation processes in a deep-lake system. *AAPG Bulletin*, 104(7): 1643~1499.
- Yang Xibing, Zhao Yyanpu, Lu Jiang, Qin Chunyu, Luo Bihua, He Jie, Ma Jianghao. 2019. Sedimentary characteristics and

controlling factors of sublacustrine fans in Sag C, Weixinan depression, Beibuwan Basin. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 38: 18~28 (in Chinese with English abstract).

Zhang Xuewei, Scholz C A, Hecky R E, Wood D A, Zal H J, Ebinger C J. 2014. Climatic control of the late Quaternary turbidite sedimentology of Lake Kivu, East Africa; implications for deep mixing and geologic hazards. *Geology*, 42: 811~814.

参 考 文 献

- 操应长, 杨田, 王艳忠, 张少敏, 王思佳, 张青青, 王心怿. 2017a. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制. *地学前缘*, 24(3): 234~248.
- 操应长, 杨田, 王艳忠, 李文强. 2017b. 超临界沉积物重力流形成演化及特征. *石油学报*, 38(6): 607~621.
- 付金华, 牛小兵, 谈卫东, 冯胜斌, 梁晓伟, 辛红刚, 尤源. 2019. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展. *中国石油勘探*, 24(5): 601~614.
- 金杰华, 操应长, 王健, 杨田, 刘娟, 王心怿, 王淑萍. 2019a. 涪西南凹陷陡坡带流一段上亚段异重流沉积新发现. *地学前缘*, 26(4): 250~258.
- 金杰华, 操应长, 王健, 杨田, 周磊. 2019b. 深水砂质碎屑流沉积: 概念、沉积过程与沉积特征. *地质论评*, 65(3): 689~702.
- 李存磊, 任伟伟, 唐明明. 2012. 流体性质转换机制在重力流沉积体系分析中应用初探. *地质论评*, 58(2): 285~296.
- 邱振, 邹才能. 2020. 非常规油气沉积学: 内涵与展望. *沉积学报*, 38(1): 1~29.
- 宋明水, 向奎, 张宇, 蔡攀, 刘建磊, 杨仁超. 2017. 泥质重力流沉积研究进展及其页岩油气地质意义——以东营凹陷古近系沙河街组三段为例. *沉积学报*, 35(4): 740~751.
- 谈明轩, 朱筱敏, 耿名扬, 刘常妮. 2016. 沉积物重力流流体转化沉积—混合事件层. *沉积学报*, 34(6): 1108~1119.
- 杨田, 操应长, 王艳忠, 张少敏. 2015b. 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. *石油学报*, 36(8): 1048~1059.
- 杨仁超, 何治亮, 邱桂强, 金之钧, 孙冬胜, 金晓辉. 2014a. 鄂尔多斯盆地南部晚三叠世重力流沉积体系. *石油勘探与开发*, 41(6): 661~670.
- 杨仁超, 尹伟, 樊爱萍, 韩作振, A. J. (Tom) van Loon. 2017b. 鄂尔多斯盆地南部三叠系延长组湖相重力流沉积细粒岩及其油气地质意义. *古地理学报*, 19(5): 791~806.
- 杨希冰, 赵彦璞, 陆江, 秦春雨, 罗碧华, 何杰, 马江浩. 2019. 北部湾盆地涪西南凹陷C洼湖底扇沉积特征及控制因素分析. *地质科技情报*, 38: 18~28.

Deposition of deep-water gravity-flow hybrid event beds in lacustrine basins and their sedimentological significance

YANG Tian^{*1,2)}, CAO Yingchang³⁾, TIAN Jingchun¹⁾, NIU Xiaobing^{3,4)},
LI Shixiang⁵⁾, ZHOU Xinping⁵⁾, JIN Jiehua³⁾, ZHANG Yi'an¹⁾

1) *State Key Laboratory of oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation (Chengdu University of Technology),
Institute of Sedimentary Geology, Chengdu, Sichuan 610059, China;*

2) *Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science
and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China;*

3) *School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;*

4) *No. 8 Oil Production Plant of Changqing Oilfield Company, PetroChina., Xi'an, Shaanxi 710000, China;*

5) *Exploration and Development Research Institute of Changqing Oilfield Company, PetroChina, Xi'an, Shaanxi 710018, China*

** Corresponding author: yangtian19@cdut.edu.cn*

Abstract

The formation and distribution of hybrid event beds, common in lacustrine basins, is significant for understanding the evolution processes of gravity-flow, conventional and unconventional oil and gas exploration, and development of deposits within. Considering the gravity-flow deposits in the first member of the Liushagang Formation in the Weixinan sag, and the seventh member of Yanchang Formation in the Ordos basin as examples, the sedimentary characteristics, types, formation mechanisms, depositional model as well as the oil and gas geological significance of hybrid event beds in lacustrine basin are discussed. The gravity-flow deposits in the lacustrine basin include slide and slump deposits, sandy and muddy debris flow deposits, high and low density turbidity-current deposits, and the common hybrid event beds. Three types of hybrid event beds are identified including sandwich structure, bipartite structure, and banded structure. The bipartite structured hybrid event beds can further subdivided based on the thickness difference between the upper and lower division. Sandwich structured hybrid event beds are mainly caused by flow erosion or liquefaction and located in the proximity of hybrid event beds. Bipartite structured and banded structured hybrid event beds, which are located in the distal part of the hybrid event beds, are mainly attributed to flow deceleration and expansion, and differential settling of detrital grains in a muddy debris flow. The vertical stacking of different beds with the same internal depositional unit composition in the core is a reliable identification mark for hybrid event beds. A lack of knowledge of the formation processes of these hybrid event beds may lead to a misunderstanding of the depositional processes. The development of hybrid event beds adds to the depositional heterogeneity of gravity-flow deposits, which is bad for conventional oil and gas preservation. However, the fine-grained deposits caused by hybrid event beds are good lithofacies associations, which is the sweet spot for unconventional oil and gas development.

Key words: turbidity currents; debris flows; hybrid event bed; geological significances; lacustrine basin