

文章编号:1673-5005(2011)01-0013-07

红河深水扇沉积物重力流特征

李 冬^{1,2}, 王英民^{1,2}, 王永凤^{1,2}, 徐 强³

(1. 中国石油大学 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;
3. 中国海洋石油总公司研究总院, 北京 100027)

摘要:依据地震、岩心和测井资料,通过唯一钻遇红河深水扇的 YC35 井的岩心观察与描述,对红河深水扇沉积物重力流沉积特征进行研究,并与典型的沉积模式相比较,确定红河深水扇的沉积物重力流类型。结果表明:YC35 井岩心沉积物为半深海环境下的重力流沉积;红河深水扇发育多种沉积物重力流类型,包括碎屑流、颗粒流、液化流以及浊流等,它们在纵向上相互叠置;红河深水扇属于富砂型深水扇,储层发育,这为红河深水扇的油气勘探奠定了物质基础。

关键词:红河深水扇; 沉积物; 重力流; 深水; 岩心

中图分类号:P 588. 2

文献标志码:A

doi:10. 3969/j. issn. 1673-5005. 2011. 01. 003

Characteristics of sediment-gravity flows in Red River deep-water fan

LI Dong^{1,2}, WANG Ying-min^{1,2}, WANG Yong-feng^{1,2}, XU Qiang³

(1. College of Geosciences in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;
3. Research Institute of CNOOC, Beijing 100027, China)

Abstract: The characteristics of sediment-gravity flows of the Red River deep-water fan were researched by core observation and description of well YC35 according to seismic, cores and logging data of study area. Well YC35 was the only well drilling the Red River deep-water fan. The types of sediment-gravity flows of the Red River deep-water fan were determined compared with the typical sedimentation model. The results indicate that the core sediments from well YC35 were the deposition of sediment-gravity flows in bathyal environment. And several types of sediment-gravity flows were developed in Red River deep-water fan, including debris flows, grain flows, liquified flows and turbidity currents, which overlaid on each other. Red River deep-water fan belongs to the sand-rich fan type, and reservoir developed in this area, which laid the material foundation for the oil and gas exploration.

Key words: Red River deep-water fan; sediments; sediment-gravity flows; deepwater; core

沉积物重力流沉积作为深水油气勘探的主要储层,一直是世界深水油气勘探研究的热点与重点。20 世纪 50 年代浊流的发现及其理论的建立,拉开了重力流研究的序幕;Kuenen 和 Migliorini 提出了浊流学说^[1],1961 年鲍玛建立了鲍玛序列^[2]并认为是浊积岩的经典标准层序,为广大学者所接受。如今学者们普遍对鲍玛序列及相关的扇模式持怀疑态度,以至于 Walker 将其在 1978 年建立的综合深水扇模式否定,这些使研究者认识到深水重力流沉积的复杂性^[3,4]。现今重力流沉积概念已由浊流沉积

扩展到碎屑流、颗粒流、液化沉积物流、重液流等多种重力流沉积,提出了多种重力流分类^[5],特别是近年来对白云深水扇的深入研究,丰富了我国在深水重力流沉积方面的认识,而对于同样发育于南海北部的红河深水扇的研究现在还很薄弱,对其沉积物重力流类型和特征尚没有清晰的认识。因此,笔者基于唯一钻遇红河深水扇的取心井(YC35 井)岩心及试验分析资料,进行红河深水扇沉积物重力流的类型和特征研究。

收稿日期:2010-04-11

基金项目:国家“973”重点基础研究发展计划项目(2009CB219407);国家自然科学基金项目(40572067)

作者简介:李冬(1982-),男(汉族),黑龙江哈尔滨人,博士研究生,主要从事沉积学、层序地层学、地震沉积学等方面的研究。

1 地质概况

琼东南盆地位于新生代的太平洋构造域与新特提斯构造域转换带的南海西北部陆缘,由南海北部陆缘张裂而形成,与典型的大西洋型被动陆缘盆地类似,属于准被动大陆边缘盆地。盆地先后经历了早古近纪以断裂活动控制盆地沉降为主的裂陷期和新近纪以来的裂后沉降为主的拗陷期。裂陷期沉积包括始新统、崖城组和陵水组,上部拗陷期沉积包括三亚组、梅山组、黄流组和莺歌海组^[6-12]。YC35 井取心段为梅山组上部和黄流组下半部。黄流期是开

阔浅海、半深海充填阶段,发育典型的陆架-陆坡体系,区域强烈沉降,水深急剧加大,此外,红河物源供应物质的能力因同期强烈的喜马拉雅造山而增强,发育了红河深水扇沉积体系。

红河深水扇位于莺歌海—琼东南盆地结合部,是一个巨型的深水扇沉积体,其主要物源来自于红河水系,主要形成时期为中—晚中新世。目前仅有二维地震资料与 YC35 井一口取心井资料,由于 YC35 井为红河深水扇取心井并且在黄流组有气层发现,使得该井倍受关注。YC35 井位于琼东南盆地西部的乐东凹陷内(图 1),在黄流组时期为深水沉积。

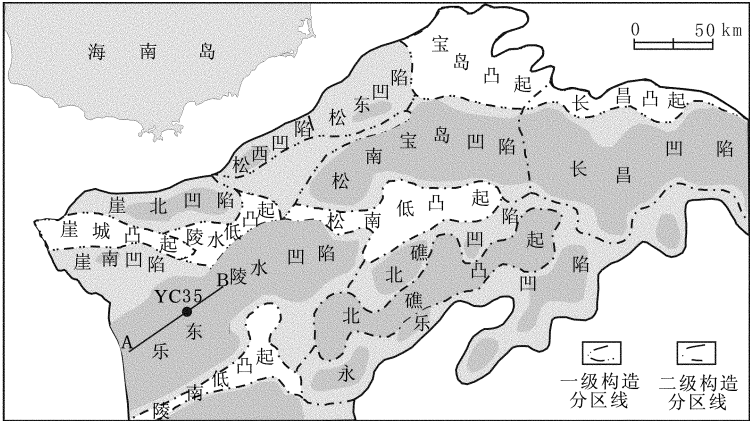


图 1 琼东南盆地构造区划分

Fig.1 Tectonic unit compartmentalization of Qiongdongnan Basin

2 YC35 井沉积物重力流沉积特征

2.1 地震反射特征

在过 YC35 井的地震剖面上(图 1),S30 界面处发育中央峡谷水道,具有明显下切谷特征,但未取心。YC35 井取心段主要为黄流组下部(图 2),由地震反射特征可以看出,黄流期(S30-S40)自西向东发

育一套楔状减薄巨型沉积体,最大厚度可达 2.0 km,整体具前积反射结构,内部强振幅反射杂乱,下切水道发育,为水道所高度复杂化,为典型的深水扇沉积,扇体内部的强振幅反射解释为粗粒沉积。通过近期研究认为该扇体为红河深水扇沉积,沉积物主要来自于红河方向,由地震反射特征可以推断 YC35 井黄流组为深水重力流沉积。

2.2 岩石结构特征

重力流主要的搬运方式是悬浮和递变悬浮载荷搬运,YC35 井岩心粒度基本特征为颗粒与杂基含量比值较低,分选性为很差~较好,在 C-M 图(图 3)上,c 群为含泥粉砂质细砂岩,该群样品量最多,具有统计学意义,c 群点的分布平行 C-M 线,与递变悬浮沉积(QR 段)相似,属于粒序悬浮区,且 C 值与 M 值的变化幅度均较大,这一点是浊流沉积 C-M 图的独有特征,岩心薄片的镜下观察发现镜下可见含斑性结构,为重力流沉积的典型结构^[13]。

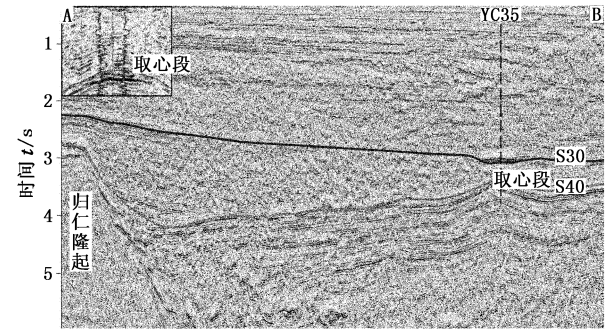


图 2 过 YC35 井地震剖面

Fig.2 Seismic section cross of well YC35

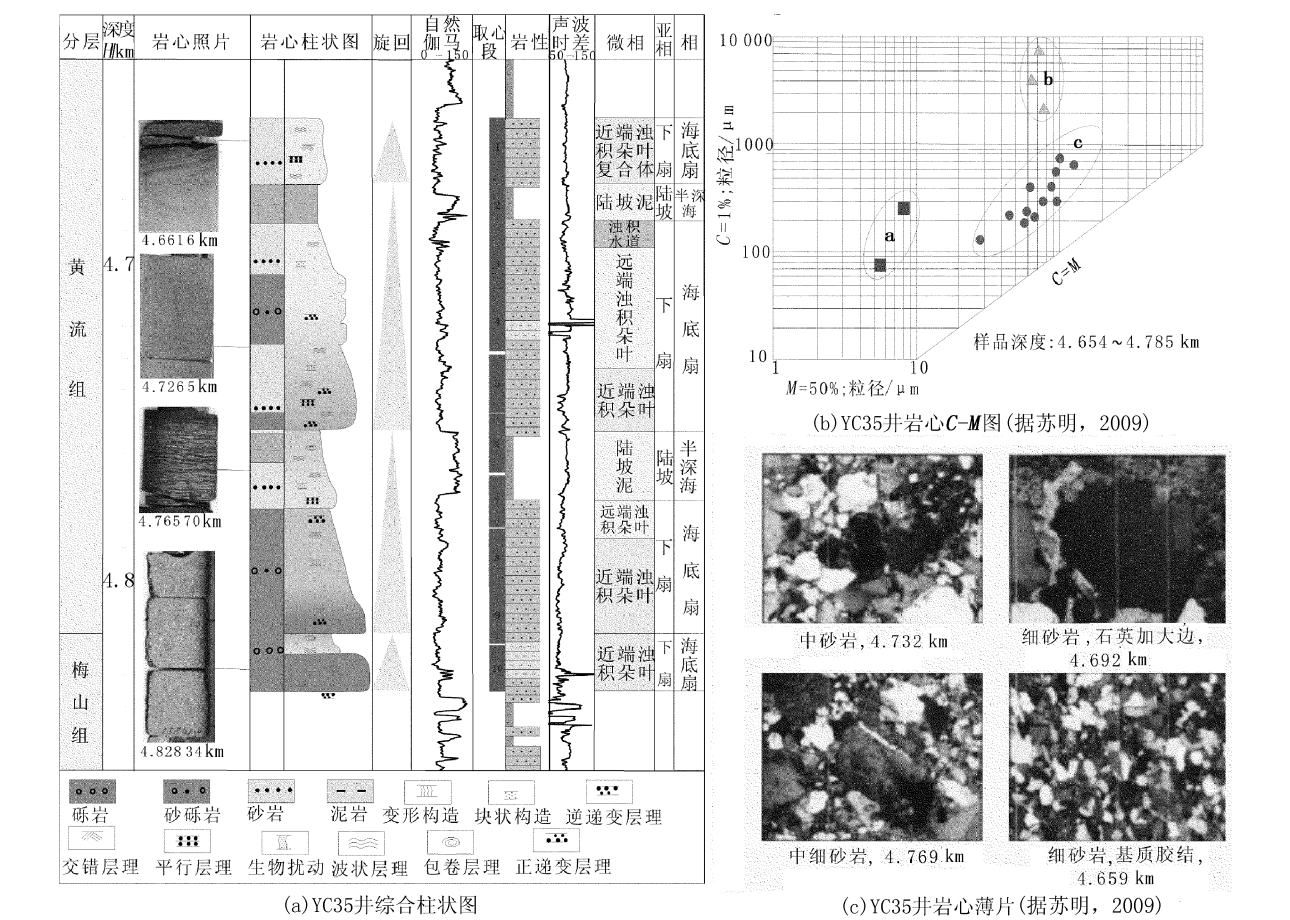


图 3 YC35 井岩心重力流沉积特征

Fig. 3 Characteristics of the sediment-gravity flows in the core of well YC35

2.3 岩电特征

YC35 井取心约 180 m, 深度为 4.654 3 ~ 4.834 4 km。通过岩心观察与描述, 在本段岩心中黄流组共识别出 3 期深水扇旋回 (图 4), 岩心中砂岩和砂砾岩沉积较发育, 泥岩为灰黑色, 为半深海泥岩沉积。岩心总体具有自下而上砂岩厚度变薄、粒度变细的特征 (图 4)。重力流垂向演化序列总体上为岩心下部杂基支撑的砾石质碎屑流较发育, 向上逐渐演化为以颗粒支撑的砂质与砾石质的颗粒流为主体的重力流沉积, 其中递变层理较普遍, 再向上发育一小段由超孔隙压力支撑的砂质的液化流, 泄水构造较发育, 至顶部则逐渐过渡为较细粒的浊流沉积, 其内部可见典型的 Bouma 序列, 整套垂向演化序列为重力流统一机制下的连续统一体, 反映了该重力流在不同阶段的演化产物, 表现出沉积物浓度逐渐变小以及水动力逐渐变弱的各个流态连续演化的过程, 与典型的重力流演化序列相一致, 具有一定的研究意义。在旋回上显示了水体逐渐变深的退积过程, 这与黄流组沉积时期二级相对海平面变化呈上升状态相一致^[14], 而每期深水扇旋回本身也为正旋回, 主要由低位域和海侵域组

成, 高位不发育。在测井曲线方面, 这 3 期深水扇沉积自然伽马曲线表现为箱状、齿化箱状以及箱形和钟形复合型, 声波时差曲线起伏变化不大, 主要表现为低声波时差, 说明红河深水扇应属于富砂的深水扇。沉积相演化方面, 深水扇沉积与半深海泥质沉积交互, 深水扇沉积主要为下扇亚相沉积, 下扇以浊积朵叶沉积为主, 为中—强振幅、亚平行或较差连续反射, 以砂岩为主, 下扇浊积砂厚度在 50 ~ 60 m 不等, 自然伽马曲线呈箱形 (图 2、3)。

2.4 沉积构造特征

Bouma 序列由 A ~ E 沉积单元构成, 为最初 Bouma 建立的浊积岩序列, 但是牵引流沉积单元 (B、C、D 段) 与浊流的最初定义是不一致的^[15]。真正的浊流 (流体流) 中通常只发生悬浮沉积, 在此前提下, 沉积物沉降后不再继续搬运, 沉积产物应该呈正递变沉积, 而组成 B、C、D 这些单元的颗粒在沉积前或搬运的最后阶段是被牵引流搬运的, 是牵引流沉积, 不是浊流沉积, 因此鉴别浊积岩的可靠标志仅仅是正递变层理^[16]。YC35 井岩心中正递变层理较发育 (图 5), 主要为砂砾岩沉积, 以颗粒支撑砂砾

岩、杂基支撑砂砾岩和块状砂岩为主,局部递变层理砂砾岩互相叠置,形成叠覆递变层理,可作为沉积物重力流的鉴别相标志。砂质泥岩中可见旋涡层理、滑塌变形层理,此外还发育重荷模、撕裂屑、旋涡层、变形砾、碟状构造、滑塌变形等特殊构造类型(图 4、

5);砂岩中时伴有少量反映牵引流水流机制的交错层理和斜波状层理、波状层理等(图 4);泥岩为深色暗色泥岩。这些构造特征均具有重力流沉积构造特点。由此可见,YC35 井岩心中重力流沉积构造发育,指示了其沉积物为半深海环境下的重力流沉积。

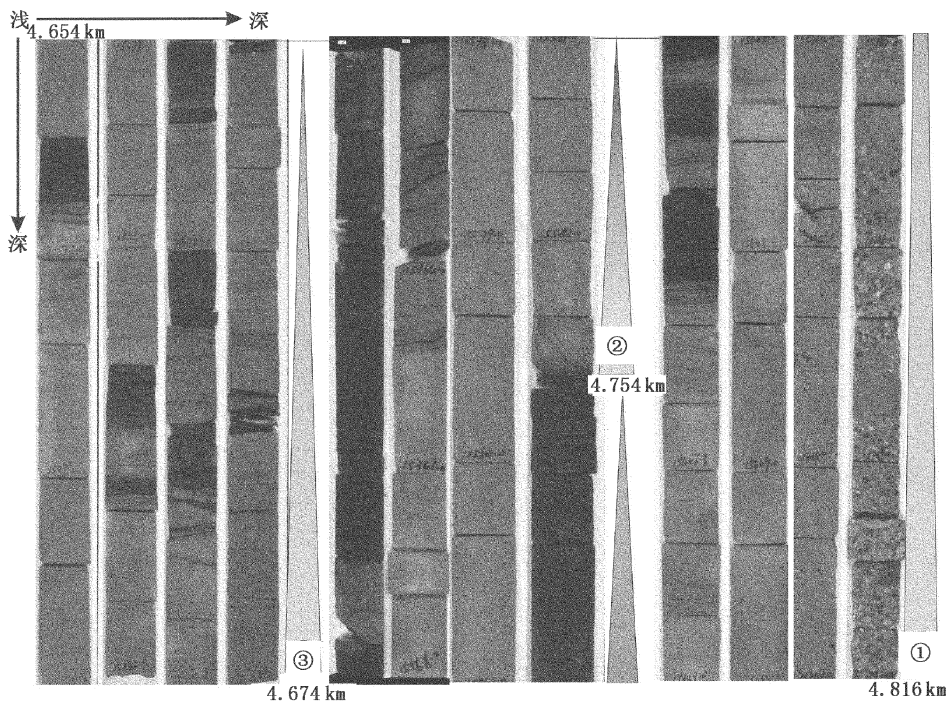


图 4 YC35 井岩心黄流组沉积中发育的三期深水扇旋回

Fig. 4 Three stages of submarine fan cycles in Huangliu group of core of well YC35

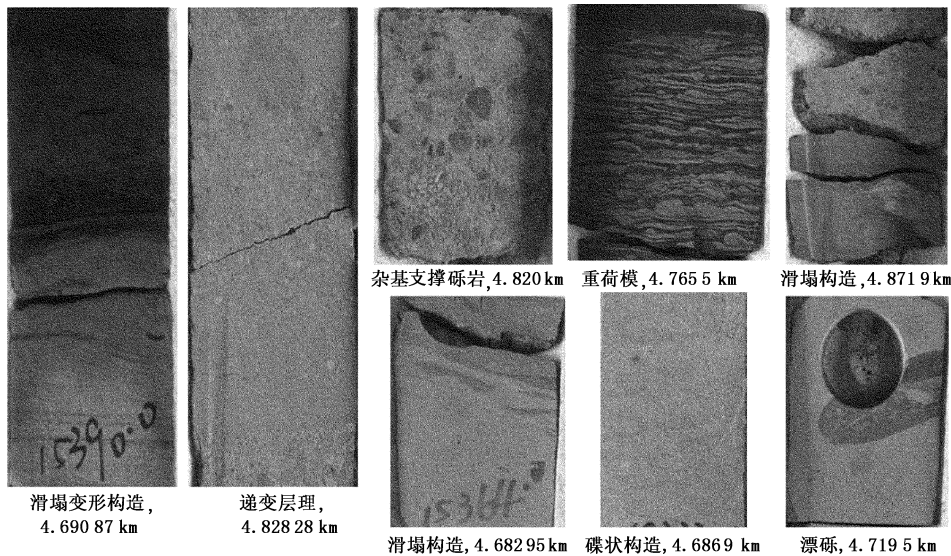


图 5 YC35 井岩心沉积物重力流构造

Fig. 5 Sediment-gravity flows structure in the core of well YC35

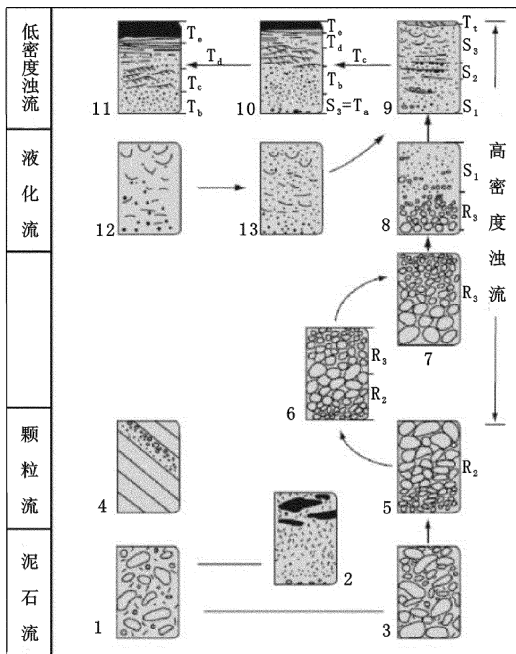
3 YC35 井黄流组沉积物重力流类型

总的来说,将沉积物搬运到深水环境的原始沉积过程被称为沉积物重力流^[17]。沉积物重力流包

括从块体流及碎屑流到浊流统一机制下的连续统一体,它们是沉积物重力流不同阶段的演化产物。比较常用的重力流分类是 Walker, Mutti 和 Keller 的分类方案,他们用不同的术语来描述不同的流态形成

的相应沉积产物的特征。笔者采用深受广大学者认同的 Lowe 的分类方案,对 YC35 井沉积物重力流类型进行划分^[18-22]。

Lowe 等^[21-22]根据沉积物—流体混合物的流变学特征划分为流体流(包括浊流、液化流、过渡的液化流)和岩屑流(包括过渡的液化流、颗粒流、黏滞流)两大类,并于 1982 年提出了高密度浊流和低密度浊流是岩屑流与流体流这两大类型的沉积物重力流演化成的连续统一体,具体特征见图 6^[22]。泥石流为砾、砂、泥、水相混合的高密度流体,由水和砂泥杂基支撑,沉积物中砾石含量小于 30%;碎屑流为砾、砂、泥、水相混合的高密度流体,由砾石间的碰撞和杂基联合支撑,沉积物中砾石含量大于 30%;颗粒流为砾、砂、水相混合的高密度流体,单纯由颗粒间的碰撞支撑,沉积物中砾石的含量小于 30%,砂岩含量大于 50%;液化流为砾、砂、水相混合的高密度流体,由超孔隙压力支撑,沉积物中砾石的含量小于 30%,砂岩含量大于 50%;浊流为砂、泥、水相混合的中低密度流体,由颗粒间的湍流支撑。沉积物中砂岩的含量大于 50%,黏土杂基含量大于 10% (15%)^[21-22]。



注: 1为泥石流; 2、3为碎屑流; 4为颗粒流;
5为变密度颗粒流; 6、7、8为高密度浊流;
9、10、11为低密度浊流; 12、13为液化流和流化流;
R为泥石流; S为砂级碎屑; R₁、S₁为牵引构造;
R₂、S₂为牵引构造的反粒序; R₃、S₃为悬浮作用的正向粒序

图 6 沉积物重力流的流变学演化示意图(据 Lowe,1982)

Fig. 6 Diagram illustrating the rheology evolution of sediment-gravity flow (After Lowe,1982)

本次通过对 YC35 井黄流组岩心的观察,再对

整段岩心总体特征进行研究,并对其沉积物重力流进行了分类,共识别出碎屑流、颗粒流、液化流、高密度浊流和低密度浊流 5 种沉积物重力流类型。

3.1 碎屑流沉积

碎屑流也称泥石流,由沉积粒径范围宽广(数毫米至数米)的沉积物组成,通常呈块状,无分选,无粒序,其顶部有时显正粒序,如图 7(a)所示。岩性以灰白色细砂岩为主,零散分布一些灰黑色泥砾,其中在距底 10 cm 处发育椭圆型泥砾(长轴 1 cm,短轴 0.5 cm),在距底 15 cm 处发育的椭圆型泥砾(长轴 5 cm,短轴 3 cm)中包有灰白色粉砂岩,具有滑塌变形现象。经过与 Lowe 的沉积物重力流类型模式对比之后认为该沉积岩应为碎屑流沉积。

3.2 颗粒流沉积

颗粒流沉积物粒度范围可以由黏土到砾石,但主要是砂质沉积。其沉积的最主要特征之一就是底面上可有底模,发育下细上粗的逆粒序或粗尾递变层理,如图 7(b)所示。岩性以灰白色细砂岩和细砾岩为主,发育 3 套逆粒序层理,砾石成分有泥与钾长石,在上部逆粒序层理底部见有底模构造。与 Lowe 的沉积物重力流类型模式对比后定为颗粒流沉积。

3.3 液化流沉积

液化流是砾、砂、水相混合的高密度流体,由超孔隙压力支撑。堆积物常为颗粒支撑的细砂岩和粗砂岩,成分与结构成熟度均低,成块状或具有泄水构造,变形构造是主要标志之一,尤其是碟状构造,如图 7(c)所示。岩性以灰白色细砂岩为主,颗粒成分以石英、钾长石为主,发育碟状构造。与 Lowe 的沉积物重力流类型模式对比后定为液化流沉积。

3.4 浊流沉积

浊流是人们最早研究的沉积物重力流。Lowe^[22]根据沉积物浓度将浊流细分为低密度浊流和高密度浊流。

低密度浊流的典型特征为具有典型的鲍马序列,由 A-B-C-D-E 5 个连续的层段构成,底部冲刷面之上依次是底部块状或递变砂岩层段(A 段),下平行纹层细砂岩段(B 段),交错纹层状或旋转纹层状的流水波纹粉-细砂岩层段(C 段),上平行纹层粉砂岩层段(D 段),顶部深海相块状泥岩段(E 段)。现实中较少发育完整的鲍马序列,其底层常常缺失。如图 7(d)所示,本段岩心自下而上发育鲍马序列的 A、B、C、D、E 段,经研究定为低密度浊流。

高密度浊流主要发育 S 与 R 沉积。如图 7(e)所示,4. 809 64 ~ 4. 810 35 km 主要发育灰白色细砾

岩沉积,砾石磨圆较好,砾石成分以石英、泥质为主。发育明显的双递变层理,在4.80985 km处砾石粒径

最大,可达1 cm。经与Lowe的沉积物重力流类型模式对比后定为高密度浊流沉积。

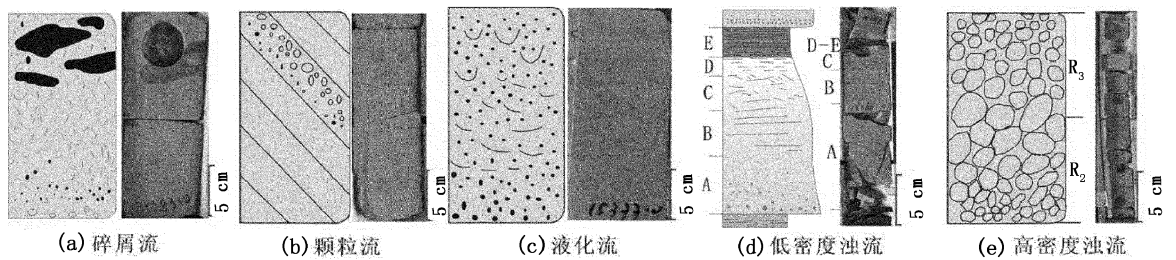


图7 YC3512井黄流组沉积物重力流类型

Fig.7 Types of sediment-gravity flow of Huangliu Group in well YC35

4 结论

(1)YC35井取心段发育3期深水扇沉积;发育多种典型的重力流沉积构造,如递变层理、撕裂屑、碟状构造、重荷模等;YC35井C-M图和薄片观察研究进一步证实了YC35井岩心沉积物为半深海环境下的重力流沉积。

(2)红河深水扇发育多种类型沉积物重力流,包括碎屑流、颗粒流、液化流、高密度浊流和低密度浊流5种沉积物重力流类型。

(3)YC35井岩心、测井及录井岩性指明红河深水扇属于富砂型海底扇,储层发育,这为红河深水扇的进一步研究和勘探提供了基础。

参考文献:

- [1] KUENEN P H, MIGLIORINI C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. Journal of Geology, 1950, 58 (2): 41-127.
- [2] BOUMA A H. Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier Pub Co, 1962: 168.
- [3] WALKER R G. Turbidites and submarine fans[C]//WALKER R G, JAMES N P. Facies models: response to sea level change. Canada: Geological Association of Canada, 1992: 239-263.
- [4] WALKER R G. Facies, facies models, and modern stratigraphic concepts[C]//WALKER R G, JAMES N P. Facies models: response to sea level change. Canada: Geological Association of Canada, 1992: 1-14.
- [5] 韩小锋, 陈世悦, 刘宝鸿, 等. 深水沉积特征研究现状及展望[J]. 特种油气藏, 2008, 15(2): 1-6.
HAN Xiao-feng, CHEN Shi-yue, LIU Bao-hong, et al. Present research status and forecast about deep-water deposition[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2008, 15(2): 1-6.
- [6] 朱伟林, 张功成, 高乐. 南海北部大陆边缘盆地油气地质特征与勘探方向[J]. 石油学报, 2008, 19(1): 1-9.
ZHU Wei-lin, ZHANG Gong-cheng, GAO Le. Geological characteristics and exploration objectives of hydrocarbons in the northern continental margin basin of South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 19(1): 1-9.
- [7] 龚再升, 李思田, 谢泰俊, 等. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [8] 龚再升. 中国近海含油气盆地新构造运动和油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 133-138.
GONG Zai-sheng. Neotectonic movement and hydrocarbon accumulation in petroliferous basins, offshore China[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 133-138.
- [9] 何家雄, 夏斌, 孙东山, 等. 南海北部琼东南盆地油气成藏组合及运聚规律与勘探方向分析[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 53-58.
HE Jia-xiong, XIA Bin, SUN Dong-shan, et al. Hydrocarbon accumulation, migration and play targets in the Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006, 33(1): 53-58.
- [10] 何家雄, 夏斌, 王志欣, 等. 南海北部边缘盆地西区油气运聚成藏规律与勘探领域及方向[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 12-18.
HE Jia-xiong, XIA Bin, WANG Zhi-xin, et al. Hydrocarbon accumulation and exploratory orientation in the western marginal basin of the northern South China Sea[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 12-18.
- [11] 何家雄, 夏斌, 施小斌, 等. 世界深水油气勘探进展与南海深水油气勘探前景[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(6): 748-752.
HE Jia-xiong, XIA Bin, SHI Xiao-bin, et al. Prospect and progress for oil and gas in deep waters of the world, and the potential and prospect foreground for oil and gas in deep waters of the South China Sea[J]. Natural Gas Geoscience, 2006, 17(6): 748-752.
- [12] 何家雄, 施小斌, 夏斌, 等. 南海北部边缘盆地油气勘探现状与深水油气资源前景[J]. 地球科学进展,

- 2007,22(3):261-270.
- HE Jia-xiong, SHI Xiao-bin, XIA Bin, et al. The status of the petroleum exploration in the northern South China Sea and the resource potential in the deep-water areas [J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(3):261-270.
- [13] 苏明,李俊良,姜涛,等. 琼东南盆地中央峡谷的形态及成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(4):86-92.
- SU Ming, LI Jun-liang, JIANG Tao, et al. Morphological features and formation mechanism of central canyon in the Qiongdongnan basin, northern south China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(4):86-92.
- [14] 李杰,林畅松,陈平富. 琼东南盆地莺歌海组—黄流组海平面变化与层序年代地层[J]. *地质论评*, 1999, 45(5):515-520.
- LI Jie, LIN Chang-song, CHEN Ping-fu. Sea Level Change and Sequence chronostratigraphy of the Yinggehai-Huangliu Formation in the Qiongdongnan Basin[J]. *Geological Review*, 1999, 45(5):515-520.
- [15] BOUMA A H, DEVRIES M B, STONE C G. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma: Discussion [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(3):470-472.
- [16] 张兴阳,罗顺社,何幼斌. 沉积物重力流深水牵引流沉积组合鲍玛序列多解性探讨[J]. *江汉石油学院学报*, 2001, 23(1):1-5.
- ZHANG Xing-yang, LUO Shun-she, HE You-bin. Deposit assemblage of gravity flow and traction current in deep water—a Study of the multiple interpretation of the Bouma sequence [J]. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 2001, 23(1):1-5.
- [17] MIDDLETON G V, HAMPTON M A. Turbidites and deep-water sedimentation [M]. United States: Pacific Section SEPM publication, 1973:1-38.
- [18] MIDDLETON G V, HAMPTON M A. Marine Sediment Transport and Environmental Management [M]. New York: John Wiley, 1976:197-218.
- [19] WALKER R G. Deep water sandstone facies and ancient submarine fans; models for exploration for stratigraphic traps [J]. *AAPG Bull.*, 1978, 62(6):932-966.
- [20] MUTTI E, TINTERRI R, REMACHA E, et al. An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective [M]. United States: The Education Department of the AAPG, 1999:39-61.
- [21] LOWE D R. Grain flows and grain flow deposits [J]. *Journal of sedimentary petrology*, 1976, 46(2):188-199.
- [22] LOWE D R. Sediment gravity flow II: depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Jour Sedi Petrol*, 1982, 52(1):279-297.

(编辑 徐会永)