

陆相盆地深水沉积中的块体搬运作用与搬运机理研究 ——以鄂尔多斯盆地延长组为例

李相博^{1,2}, 王菁^{1,2}, 廖建波^{1,2}, 龙礼文^{1,2}, 潘树新^{1,2}, 李智勇^{1,2}, 完颜容^{1,2}

(1. 中国石油勘探开发研究院西北分院, 甘肃兰州 730020;

2. 中国石油天然气集团公司油藏描述重点实验室, 甘肃兰州 730020)

摘要:由块体搬运作用形成的碎屑流是近年来在深水环境(深海或深湖)中日益受到重视的一种沉积类型,但深水环境中的块体搬运作用及其碎屑流沉积与陆上相比较,有显著的特殊性。通过对深水沉积物重力流搬运和沉积作用研究现状的综述,明确了深水块体搬运与流体搬运作用的概念、主要区别及控制因素;并以鄂尔多斯陆相盆地延长组为例,提出了块体搬运与流体搬运的识别标志,探讨了水下沉积物呈块体状态搬运的机理,认为少量的黏土杂基的润滑作用与等厚黏土薄膜的“黏附剂”作用是延长组“砂质碎屑流”在水下能呈块体搬运而没有被水体打散的根源。同时指出在鄂尔多斯盆地延长组深湖区,由块体搬运作用形成的“厚层砂岩”具有最有利的生储配置关系,是油气勘探的最有利目标。

关键词:深水沉积;块体搬运;搬运机理;延长组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE121.3

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2015)04-0625-09

引用格式:Li Xiangbo, Wang Jing, Liao Jianbo, *et al.* The mechanism of transport process of deep-water sedimentation in Lacustrine Basin: A case study of deep-water sandstone in Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(4): 625-633. [李相博, 王菁, 廖建波, 等. 陆相盆地深水沉积中的块体搬运作用与搬运机理研究——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(4): 625-633.]

0 引言

块体搬运作用是碎屑流(也称“泥石流”)形成的主要方式,过去,碎屑流沉积物一直被认为是冲积扇与扇三角洲沉积的标志性特征^[1],在正常三角洲(辫状河与曲流河三角洲)及深湖相沉积中少见。但是,近年来在鄂尔多斯大型坳陷湖盆中央深水区的延长组中部长6段发现了由块体搬运作用而形成的纯净砂岩碎屑流沉积^[2-6],这一发现彻底改变了人们的传统认识。

从层序地层观点看,延长组中部长6段处于低位期^[7],可容纳空间小,高建设型三角洲体系强烈进积,其前缘砂体直接覆盖在饱含水的前三角洲泥岩

之上,具有天然的不稳定性,这十分有利于沉积物的二次搬运和块体搬运作用的发生,从而形成砂质碎屑流。盆地中央地区的一些露头与许多钻井岩心都揭示了这一从源到汇的搬运与沉积过程^[4],但目前的研究还不够深入,主要存在2方面的问题:一是究竟如何理解深水环境中的块体搬运(如碎屑流)与流体搬运(如浊流)的概念差别?它们的区别标志是什么?二是前期研究表明^[3],延长组砂质碎屑流中的泥质含量不足10%,砂质(中细砂)含量超过90%,这根本不可能形成基质支撑,所谓的“砂质碎屑流”根本就不是真正意义上的“碎屑流”,那么,其成因机理究竟是什么?为什么在水下能呈块体搬运

收稿日期:2014-04-08;修回日期:2015-03-23.

基金项目:国家科技重大专项“岩性地层油气藏成藏规律、关键技术及目标评价”(编号:2011ZX05001-003-004);国家自然科学基金项目(编号:41172131)联合资助。

作者简介:李相博(1965-),男,甘肃环县人,高级工程师,博士,主要从事石油地质及深水沉积研究. E-mail:lixiangbo911@sina.com.

而没有被水体打散?

基于上述原因,本文通过对沉积物重力流搬运与沉积研究现状的简要回顾,探讨了水下块体与流体2种搬运作用的概念、区别及控制因素,并以延长组研究为例,分析了水下沉积物呈块体搬运的机理,这不仅对指导陆相湖盆深水油气勘探具有重大现实意义,而且也将极大地丰富和发展陆相湖盆沉积学理论。

1 块体搬运与流体搬运的区别与控制因素

1.1 块体搬运与流体搬运的概念与区别

深水沉积过程机理的研究对于认识深水砂岩的搬运和沉积本质相当重要。地质学家原来一直认为深海平原是一个宁静世界,仅仅接受远洋悬浮沉积^[8]。20世纪50年代初期,Kuenen等^[9]提出了浊流理论概念,揭开了深水沉积学研究的新篇章。随着研究的深入,人们逐步认识到在深水环境中,沉积物重力在搬运和沉积的过程中有很大作用^[10],于是一些沉积学家认为水下也存在如同陆上碎屑流(泥石流)一样的沉积搬运过程,陆续提出了沉积物在水下的块体搬运概念,如Weimer等^[11]最初使用“块体搬运复合体”(Mass transport complexes)来描述深水沉积物的搬运机制;Moscardelli等^[12]进一步将重力流分为2大类型:块体搬运体系和浊流,并明确指出块体搬运体系包括滑坡(Slides)、崩塌(Slumps)和碎屑流(Debris flows)。目前,块体搬运沉积体系渐渐成为一个通用的术语,用来描述各种类型的块体搬运。然而,前人对这一概念只是一种笼统定性的描述,为了深入分析水下沉积物的沉积搬运过程,Shanmugam^[8]引入了下述流体力学上的分类概念。

在流体力学中,通常把符合牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体(Newtonian fluids),否则称作非牛顿流体,即宾汉塑性体(Bingham plastics)^[7]。前者是一种不具有固有内在强度的流体(如水),其变形与所施加的应力呈线性正相关,紊流的判别值是雷诺数(R),即当 $R > 2\,000$ 时,就开始有紊流发生;后者则具有一定强度,当所施加的应力超过一个临界值后,变形才开始出现并呈线性正相关(图1),其发生紊流的判别值应为雷诺数值(R)和宾汉值(B)^[8]。按照这一概念,Shanmugam^[8]将沉积物重力流划分为牛顿流体(Newtonian flows)和塑性流体(Plastic flows)2种类型,并认为后者主要包括黏

结碎屑流(Cohesive debris flows)、液化流(Liquefied flows)、流体化流(Fluidized flows)、颗粒流(Grain flows)^[13-14]以及砂质碎屑流(Sandy debris flows)与非黏性液化颗粒流(Liquefied cohesionless coarse-particle flow)。笔者遵循了Shanmugam^[8]的这一流变学(Rheology)分类原则,将“流体搬运”与“块体搬运”的概念做如下定义:如果沉积物呈牛顿流体状态搬运,即属于流体搬运;反之如果沉积物呈塑性流体(非牛顿流体状态)搬运,则属于块体搬运。“流体搬运”与“块体搬运”的主要区别特征见表1。

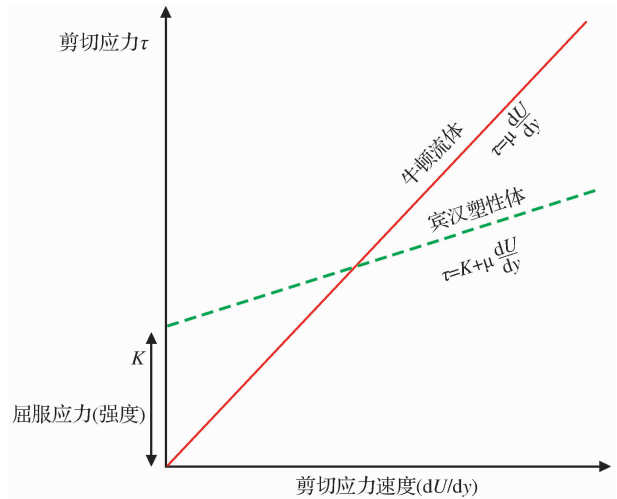


图1 牛顿流体(浊流)与宾汉塑性体(碎屑流)的流变学特征(据文献[8])

Fig. 1 Rheology of Newtonian fluids (e. g. turbidity currents) and Bingham plastics (e. g. debris flows)

雷诺数: $R = \frac{\rho U D}{\mu}$, $R > 2\,000$ 为浊流, $R < 500$ 为层流;

宾汉数: $B = \frac{K D}{\mu U}$, $R \approx 1\,000 B$ 为浊流, $R/B = \rho u^2 \approx 1\,000 =$ 浊流;

K 为强度; μ 为黏度; ρ 为密度; u 为速度; du/dy 为速度变化速率, D 为流动厚度

表1 流体搬运与块体搬运的区别

Table 1 The differences between fluid transport and mass transport

	流体搬运	块体搬运
流变学特征	牛顿流体	宾汉塑性体
应变关系式	$\tau = \mu \gamma$	$\tau = K + \mu \gamma$ ($\tau > K$ 时); $\gamma = 0$ ($\tau \leq K$ 时)
颗粒状态	颗粒之间无黏性,水分子可自由进入沉积物颗粒之间	颗粒之间有黏性,水分子不能自由进入沉积物颗粒之间 ^[8]
流动特征	由水和沉积物组成的二相流动	水—沉积物构成一个整体,为一相流动 ^[8]
搬运状态	液体	软沉积物
实例	牵引流,浊流,水	碎屑流,颗粒流

1.2 块体搬运与流体搬运的控制因素

由上述分析可以看出,“流体搬运”与“块体搬运”主要与沉积物的流变学特征有关,其实,Nardin等^[15]很早就指出,沉积物的块体搬运过程受控于其塑性行为。Pierson等^[16]进一步研究指出,沉积物的流变学特性主要受控于沉积物的浓度,与沉积物颗粒大小及其物理化学性质关系不大,由此看来,水

下沉积物的搬运形式(“流体搬运”或“块体搬运”)也主要受控于沉积物的浓度。

Shanmugam^[8]基于上述认识,编制了沉积物浓度与各种流体模式及流变学特性之间的相关关系图谱(图2)。该图谱清楚地表明,牛顿流体与塑性流体体积浓度界限大约在20%~25%之间,显然,该浓度界限也是流体搬运与块体搬运的界限。

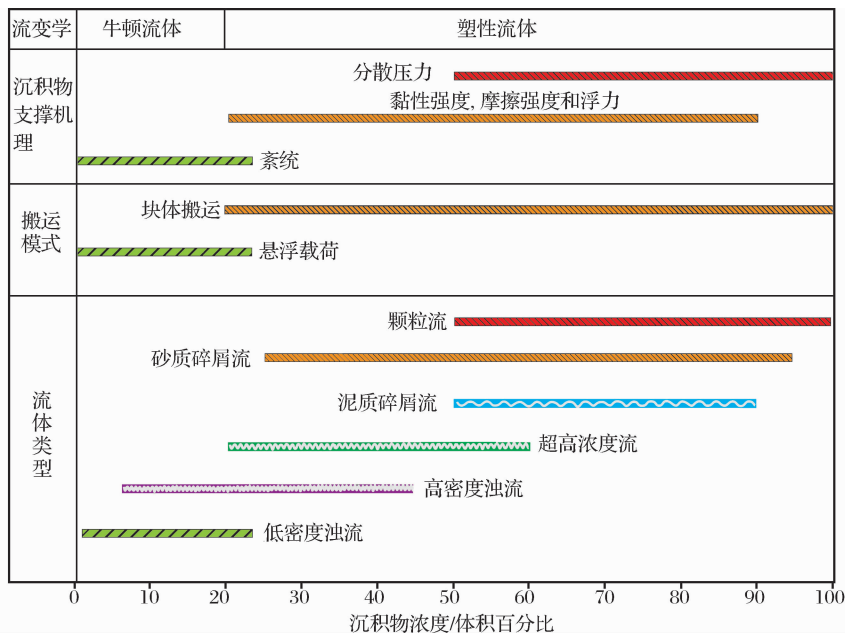


图2 沉积物流变学特性与沉积物浓度的关系(据文献[8])

Fig. 2 The relationship between sediment rheology and concentration

2 延长组深水沉积中的流体搬运与块体搬运识别标志

依据上述概念,牵引流与浊流属于流体搬运范畴,颗粒流、液化流及滑坡、崩塌与碎屑流等重力过程均属于块体搬运范畴,由于在深水沉积中,碎屑流和浊流及其沉积物应用价值高,争论也多,因此本文重点以延长组深水沉积中的纯净砂岩碎屑流和浊流为例,探讨块体搬运与流体搬运两者的识别标志。

通过新近对部分钻井岩心和野外露头的观察描述与分析测试,认为延长组中砂质碎屑流与浊流沉积物在岩石结构、沉积构造及顶底接触关系等诸多方面存在明显差别(表2)。

需要说明的是,笔者将块状砂岩中的“泥包砾”结构作为块体搬运与砂质碎屑流识别的关键性标志(表2)。这一现象是笔者最近在延长组野外露头考察中发现的,在长6段与长7段的厚层块状砂岩中均有发育(图3)。通过中外文献检索,这种“泥包砾”现

象(也称“泥球”)过去只有在黏性碎屑流(泥石流)^[14,17-19]和冰川沉积^[20-21]中发现过,在纯净的砂岩介质中未见报道。研究认为这种“泥包砾”结构的形成过程自始至终表现出含有它的沉积物是作为块体状态被搬运的,有关内容笔者已做过专门讨论^[22]。

3 延长组深水厚层块状砂岩的块体搬运机理

所谓机理,主要指块状砂岩在水下呈块体状态搬运过程中获得强度支撑的机理。众所周知,陆上碎屑流(泥石流)之所以能呈块体状态搬运,主要是依靠沉积物的基质强度(黏土—水基质的内聚强度)、分散压力(由颗粒碰撞产生的摩擦强度)及向上浮力(由水和细粒物质混合产生)支撑的^[23-24],尤其是沉积物中的黏土矿物和水的结合物使碎屑流体形成了基质结构,使得悬浮于其中的较大颗粒在流动中被基质的内聚力(强度)所支撑,从而在沉积物自身重力作用下得以向前搬运。

表 2 流体搬运与块体搬运识别标志对比(延长组深水沉积)

Table 2 The recognition marks comparison between fluid transport and mass transport (deep-water sedimentation of the Yanchang Formation)

搬运类型	沉积结构	沉积构造	单岩层厚度	泥砾分布特征	片状矿物、植物碎片分布特征	顶底接触关系	空间分布	
							平面	剖面
块体搬运 (砂质碎屑流)	砂级—粉砂级,常缺少大的碎屑组分。概率曲线与搬运前沉积物类型有关(大多数反映分流河道沉积)	厚层、块状。有时发育碎屑流特有的“韵律结构”,即下部发育层流段,上部发育具块状层理的“刚性”筏段;有时仅发育上部“刚性”筏段或下部层流段(文献[24])	一般大于0.5m,最大可达数十米	砂岩内部常见呈悬浮状、零散分布泥砾,且多为长条状,长轴方向有一定指向性。泥砾两端或具撕裂茬,或呈尖灭状,或有拖长变形现象;偶见“泥包砾”现象,呈椭圆状零散分布	云母等片状矿物、植物碎片与其他颗粒“搅混”在一起,随机分布,且具有一定方向性,显示纹层状流动特征	顶底面均突变接触,其中顶面常为不规则状;底面多数情况平坦,有时可发育负载现象或软沉积物拖曳变形现象	孤立或连续不规则舌状,横向变化快。多分布在斜坡或复杂地貌变化处,即斜坡扇模式(文献[8])	孤立或叠加透镜体
流体搬运 (浊流)	砂级—粉砂级—泥级,概率曲线为单段式,斜率小,C-M图平行于C=M基线	粒序递变层理或含有粒序层理的鲍玛序列。在岩性上表现为砂泥岩薄互层,且分布稳定,在露头上常形成特有的“复理石”韵律层理	小于0.5m	仅在具粒序递变层理的砂岩底部可见冲刷泥砾	云母等片状矿物多集中在粗碎屑上部或层面附近	底面常见槽模等侵蚀冲刷现象,顶面为渐变界面	有水道扇体,横向上分布相对稳定。多分布在湖底平原上	薄层状(扇中)或透镜体(扇根)

然而,延长组块状砂岩的岩石组成与陆上碎屑流(泥石流)有很大不同。通过对湖盆中心地区长6段—长7段近800块厚层块状砂岩样品的薄片鉴定,其岩石类型主要为长石砂岩或长石岩屑砂岩(图4),支撑结构大多为颗粒支撑—孔隙式胶结[图5(a)—图5(d)],而杂基支撑—基底式胶结较少。碎屑粒度以粉细粒为主,除偶见泥砾外,几乎没有大的碎屑颗粒。填隙物主要为泥质杂基及各种胶结物,其中充填粒间孔隙的泥质杂基主要为水云母[图5(d),图5(e)],少量为绿泥石及灰泥等。充填粒间的胶结物以环边绿泥石(膜)[图5(a)—图5(c)]及方解石[图5(b),图5(d)]为主,少量为自生伊利石等[图5(f)]。需要强调的是,上述块状砂岩中杂基含量普遍不高(图6),受控于东北物源体系的葫芦河剖面长6段杂基含量平均仅为4.8%;受控于东南物源体系的铜川瑶曲剖面长6段杂基含量也不超过10%;如此低的泥质含量(不足10%)根本不可能形成如同陆上泥石流那样的基质支撑,那么,它们在水下能呈块体搬运而没有被水体打散的机理究竟是什么?下文有关国内外研究现状的调研分析及延长组环边绿泥石胶结物形成演化研究成果为这一问题的回答提供了线索。

以往,存在一个不正确的观念,即只有具有较高的黏土含量才能形成碎屑流。实际上,Hampton^[25]很早就注意到,2%的黏土含量对砂质碎屑流所需要的强度已经足够了。Costa等^[26]也介绍过一种贫泥的碎屑流,其泥质成分只占到了1%或者2%或更少,他认为少量泥质成分对碎屑起到了一定润滑作用(Lubricated)。

为了进一步验证低黏土含量的砂质碎屑流形成过程,美国明尼苏达大学的圣安东尼瀑布实验室(St. Anthony Falls Laboratory of the University of Minnesota)曾经开展过水下砂质碎屑流模拟实验研究^[27],实验所用的沉积物泥浆由石英砂(120 μm)、黏土(膨润土或高岭石)、煤渣(其体积密度与石英砂相同,2.6g/cm³)与水组成,其中煤渣作为示踪材料。实验结果表明,砂质碎屑流确实不需要高的黏土含量。用重量百分比含量为0.5%的膨润土或5%高岭石即可产生砂质碎屑流。若将石英砂改为300 μm 尺寸的中砂进行实验,则所需要的膨润土或高岭石重量百分比含量分别为1.5%与5%。实验同时表明,如果没有黏土含量,将不能形成碎屑流,砂与水的浆体或者变为短命(Short-lived)的颗粒流,或者很快形成了浊流^[27]。

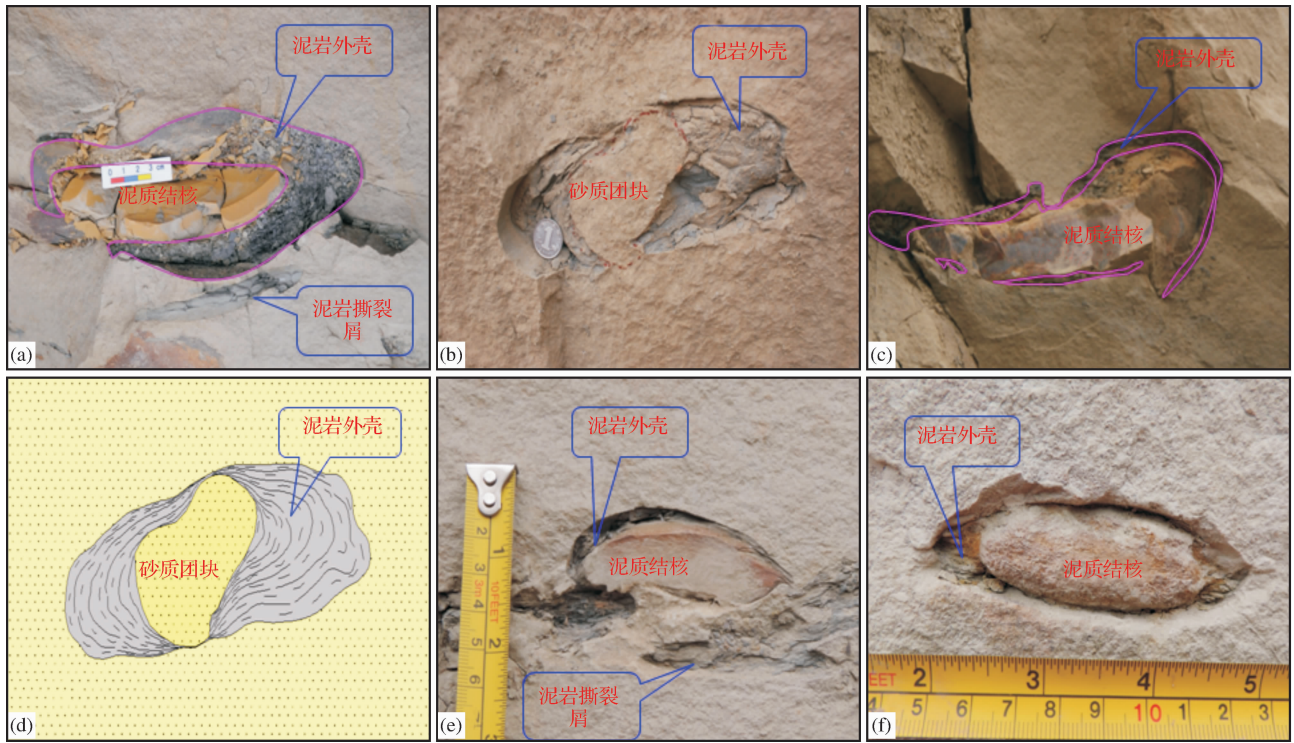


图3 延长组长6段深水块状砂岩中的“泥包砾”结构照片

Fig. 3 Photographs of “mud-coated structure” features in deep-water massive sands in Chang 6 of Yanchang Formation, Ordos Basin

注:本文发现的“泥包砾”结构均由内核和泥质外壳2部分组成。内核一般为泥质或砂质团块,通常被薄层黑色泥页岩组成的外壳呈近似同心环状包裹而成“泥包砾”现象,与泥岩撕裂屑一起漂浮在厚层块状粉细砂岩中。(a)纺锤形“泥包砾”结构,尺寸为12cm×6cm,内核为泥质结核(暗黄色部分),外壳为黑色泥岩,照片中的红色线条指示了泥质包壳的分布范围,铜川瑶曲剖面,长6油层组;(b)椭圆形“泥包砾”结构,尺寸为8cm×6cm,内核为砂岩团块,外壳为黑色泥岩,旬邑山水河剖面,长7油层组;(c)圆锥形“泥包砾”结构,尺寸为30cm×12cm,内核为泥质结核(暗黄色部分),外壳为薄层状(厚度为5mm左右)黑色泥岩,照片中的红色线条指示了泥质包壳的分布范围,铜川瑶曲剖面,长6油层组;(d)照片(b)的地质解释;(e)似泥包砾现象,纺锤形,尺寸为6cm×2cm,表现为灰绿色泥岩(厚度为1~5mm)呈圆弧形包裹在褐红色泥质团块的外侧,形成半个泥包砾,旬邑山水河剖面,长7油层组;(f)纺锤形“泥包砾”结构,尺寸为6cm×2.5cm,浅灰色泥岩围绕褐红色泥质结核形成包壳,由于风化作用,呈包壳状存在的泥岩部分已经脱落,从而在泥质团块周围形成了宽度为1~5mm左右的明显亏空区,旬邑山水河剖面,长7油层组

从上述实验研究不难看出,为了在水下环境中能够长距离搬运粗碎屑物质,基质泥含量较少的砂质碎屑流除了必须具备塑性流(宾汉姆流)特征外,还应该具有黏结流一样的特征(就像等 Middleton 等^[23]所描述的“真正碎屑流”那样)。只有这样,才能阻止外部水分子进入流体中,从而维持流体在长距离搬运过程中的整体性。但目前人们对砂质碎屑流是否为黏结流的认识尚有争议。例如,由于基质中黏结性泥含量较少, Mulder 等^[28]将这部分命名为超高密度流(Hyperconcentrated density flow),认为其属于摩擦流,流体中的沉积颗粒是分散的,颗粒之间不具有黏结性(但还属于塑性流)。Talling 等^[29]将其命名为弱黏结碎屑流(Dcs),认为黏结强度不足以支撑砂质颗粒。王德坪^[24]通过对渤海湾盆地东营凹陷古近系沙河街组中碎屑流沉积的研

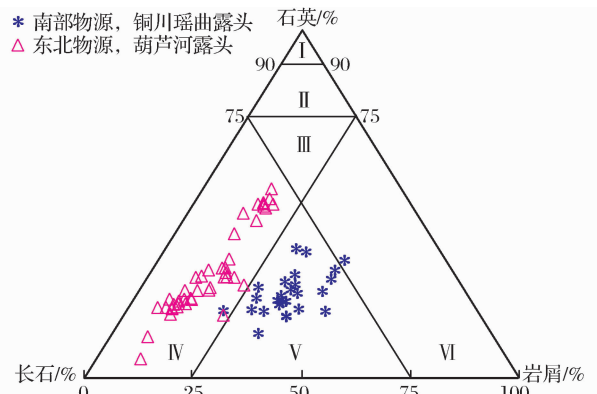


图4 延长组长6段深水块状砂岩样品三角投点
Fig. 4 Rock type of thick sandstones in Chang 6 member of Yanchang Formation

I: 纯石英砂岩; II: 石英砂岩; III: 次长石岩屑砂岩或次岩屑长石砂岩; IV: 长石砂岩; V: 长石质岩屑砂岩或岩屑质长石砂岩; VI: 岩屑砂岩

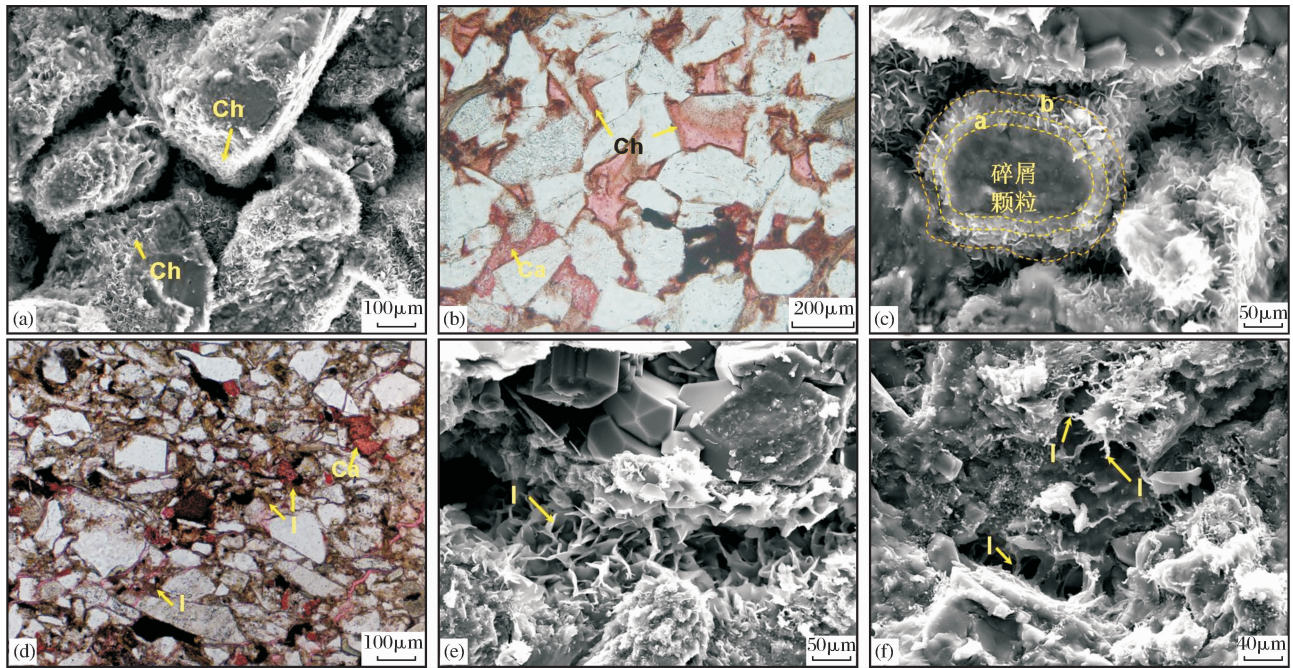


图5 延长组长6段深水块状砂岩微观特征

Fig. 5 Micro-scope characteristics in deep-water massive sands in Chang 6 of Yanchang Formation, Ordos Basin

(a) 颗粒支撑—孔隙式胶结, 绿泥石黏土壳呈叶片状生长在颗粒表面, 白111井, 2 114.0m, 长₆₃; (b) 颗粒支撑—孔隙式胶结, 绿泥石膜呈厚环边状围绕颗粒分布, 与(a)为同一样品; (c) 颗粒支撑—孔隙式胶结, 绿泥石壳由2层组成, 里层(图中a)靠近颗粒, 晶形不好, 外层(图中b)晶形较好, 白120井, 2 119.17m, 长₆₃; (d) 粉—细粒长石岩屑砂岩, 总体为颗粒支撑, 颗粒分选, 磨圆均较差, 充填物杂基以水云母(伊利石)为主, 瑶曲剖面, 长₆₃; (e) 粒间充填的叶片状伊利石, 属于正杂基, 里122井, 2 341.63m, 长₆₃; (f) 粒间充填的丝缕状自生伊利石, 城121井, 1 955.18m, 长₆₃; (b)与(d)是单偏光照片, 其余都是扫描电镜照片; 图中Ch、Ca及I分别代表绿泥石、方解石及伊利石

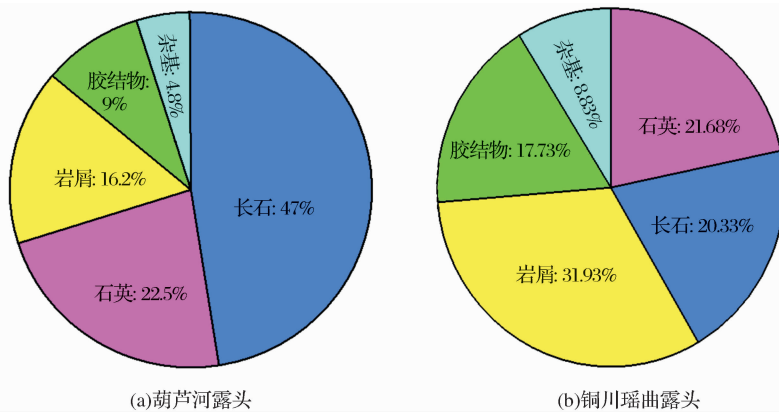


图6 延长组长6段深水块状砂岩岩石组分构成

Fig. 6 Rock composition of thick sandstones in Chang 6 member of Yanchang Formation

究, 对陆上碎屑流(泥石流)与水下砂质碎屑流的成因机理进行了比较, 认为在陆上“真正的碎屑流”中, 黏土—水基质起了结构意义上的基质作用, 表现为内聚强度(Cohesion); 而在黏土含量少砂质碎屑流中, 沉积的原生黏土主要存在于颗粒接触处, 黏土—水基质(凝胶)成了颗粒间的一种黏附剂, 起了成分意义上的基质作用, 表现为黏附强度(Adhesion)。

据研究^[24], 由于碎屑流砂体是包含巨大颗粒表面积的黏附体系, 所以, 少量的黏土—水基质在颗粒间呈薄膜状时, 产生的黏附力(Adhesion)将很大。笔者认同王德坪^[24]的观点, 即在砂质碎屑流中, 虽然内聚强度减小了, 但黏附强度增大了, 虽然在砂质碎屑流中黏土—水基质不能形成诸如陆上黏性泥石流那样的基质支撑结构, 但同样具有黏结流一样的特征。

实际上,在研究区,姚泾利等^[30]曾提出在位于三角洲前缘地区水动力条件最强的地方,极细的黏土颗粒无法沉淀下来,但可以在颗粒表面发生吸附,形成一层薄薄的等厚薄膜层,由此,他们还建立了延长组绿泥石黏土膜的演化模式(图7)。该模式揭示,延长组深水砂岩中的环边绿泥石胶结物看似是一种成岩现象,实际上最初是由沉积作用形成的黏土膜转化而来的。果真如此的话,该等厚薄膜层在颗粒之间必然充当了“黏附剂”的角色,使得颗粒相互之间存在着巨大吸引作用。

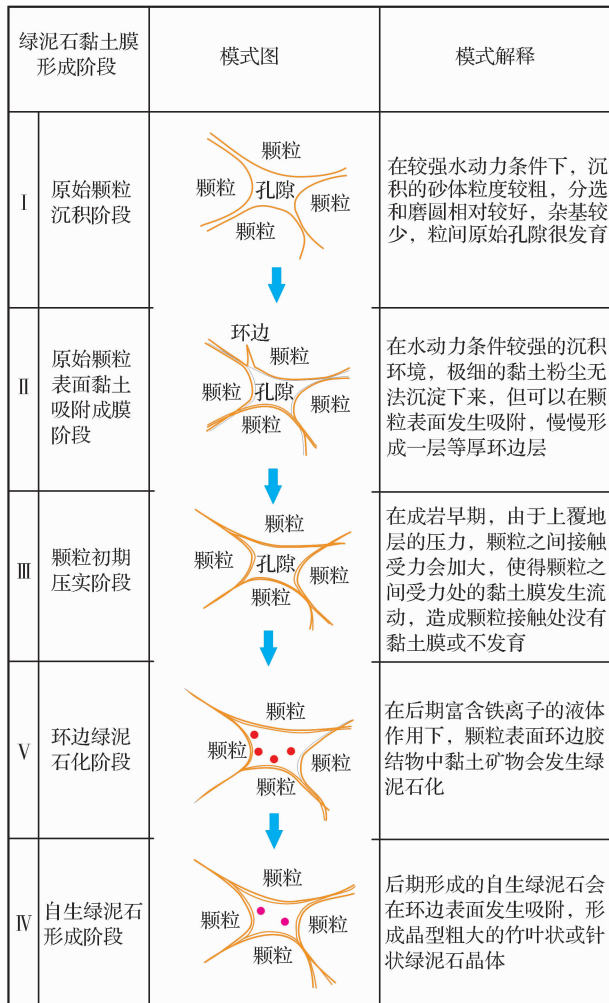


图7 延长组绿泥石黏土膜的演化模式(据文献[30])

Fig. 7 Evolution model of chlorite coating in Yanchang Formation

由此看来,少量黏土杂基的润滑与黏附作用可能是延长组“砂质碎屑流”在水下能呈块体搬运而没有被水体打散的根本原因。虽然 Talling 等^[29]认为这种纯净砂岩碎屑流的成因机理目前尚不清楚,但如果延长组砂岩颗粒间含有黏土薄膜这一现象具有普遍性的话,相信为近年来全球深水环境(海底或湖

底)中广泛发育的砂质碎屑流成因解释提供了一个新视角。

4 块体搬运特点及石油地质意义

现已查明^[31-32],在湖盆中央深水区,主要的沉积作用包括悬浮载荷沉积、浊流沉积及块体搬运沉积,悬浮载荷主要形成泥质沉积,浊流作用形成砂泥薄互层沉积,相比之下,块体搬运作用效率最高,是深水沉积区“厚层砂岩”形成的重要机制。

在鄂尔多斯盆地延长组,由于块体搬运作用将三角洲前缘砂体直接搬运到了湖盆中央的生烃中心地区,与长7段优质烃源岩直接接触,具有最有利的生储配置关系,可形成下生上储或上生下储的油藏组合,是油气勘探的现实领域。另外,砂质碎屑流在陆相湖盆中可能具有一定普遍性,因此,该研究对我国其他盆地(包括断陷与坳陷盆地)岩性油气藏的勘探开发同样具有一定借鉴意义。

5 结语

(1)通过对陆相鄂尔多斯湖盆深水块状砂岩宏观、微观结构的详细解剖,提出了块体搬运(碎屑流)与流体搬运(浊流)的识别标志,并认为少量黏土杂基的润滑与黏附作用可能是延长组“砂质碎屑流”在水下能呈块体搬运而没有被水体打散的根本原因。

(2)深水块状砂岩是当前深水领域(深海与深湖)油气勘探的主要目标,随着勘探技术的进步与深水地质资料(地震与岩心资料)的不断积累,人们必将在深水沉积类型划分、沉积与搬运过程以及沉积模式等方面取得更加深入、全面的认识,从而为深水沉积优质储层预测乃至非常规油气勘探开发提出新的思路。

参考文献(References):

- [1] Xue Liangqing, Galloway W E. Fan-delta, braid delta and the classification of delta systems[J]. Acta Geological Sinica, 1991, 65(2): 141-153. [薛良清, Galloway W E. 扇三角洲、辫状河三角洲与三角洲体系的分类[J]. 地质学报, 1991, 65(2): 141-153.]
- [2] Li Xiangbo, Liu Huaqing, Wan Yanrong, et al. First discovery of sandy debris flow reservoir in Yanchang Formation, Triassic, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2009, 21(4): 19-21. [李相博, 刘化清, 完颜容, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组砂质碎屑流储集体的首次发现[J]. 岩性油气藏, 2009, 21(4): 19-21.]
- [3] Li Xiangbo, Fu Jinhua, Chen Qilin, et al. The concept of sandy debris flow and its application in the Yanchang Formation

- deep water sedimentation of the Ordos Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 286-294. [李相博, 付金华, 陈启林, 等. 砂质碎屑流概念及其在鄂尔多斯盆地深水沉积研究中的应用[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3): 286-294.]
- [4] Li Xiangbo, Liu Huaqing, Chen Qilin. The characteristics of the sandy debris flow of the Triassic Yanchang Formation and its exploration significance in the Ordos Basin, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(5): 1187-1202.
- [5] Zou Caineng, Zhao Zhengzhang, Yang Hua, *et al.* Genetic mechanism and distribution of sandy debris flows in terrestrial lacustrine basin[J]. *Acta Sedimentary Sinica*, 2009, 27(6): 1065-1075. [邹才能, 赵政璋, 杨华, 等. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征——以鄂尔多斯盆地为例[J]. *沉积学报*, 2009, 27(6): 1065-1075.]
- [6] Yao Jingli, Wang Qi, Zhang Rui, *et al.* Origin and spatial distribution of carbonate cements in Yanchang Formation (Triassic) sandstones within the lacustrine center of Ordos Basin, NW China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2011, 22(6): 943-950. [姚泾利, 王琪, 张瑞, 等. 鄂尔多斯盆地中部延长组砂岩中碳酸盐胶结物成因与分布规律研究[J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(6): 943-950.]
- [7] Guo Yanru, Liu Huaqing, Li Xiangbo, *et al.* Method system on studying sequence stratigraphic framework of large sagged lacustrine basin: A case study from Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(3): 384-391. [郭彦茹, 刘化清, 李相博, 等. 大型凹陷湖盆层序地层格架的研究方法体系——以鄂尔多斯盆地中生界延长组为例[J]. *沉积学报*, 2008, 26(3): 384-391.]
- [8] Shanmugam G. 50 years of the turbidite Paradigm(1950s-1990s): Deep-water processes and facies models: A critical perspective[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17: 285-342.
- [9] Kuenen Ph H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. *Journal of Geology*, 1950, 58: 91-127.
- [10] Dott R H Jr. Dynamics of subaqueous gravity depositional processes[J]. *AAPG Bulletin*, 1963, 47: 104-128.
- [11] Weimer P, Slatt R. Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Settings[M]. *AAPG Studies in Geology 57*, SEPM Special Publication, 2007: 1-419.
- [12] Moscardelli L, Wood L. New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad[J]. *Basin Research*, 2008, 20: 73-98.
- [13] Lowe D R. Sediment-gravity flows: Their classification, and some problems of applications to natural flows and deposits [M]//Doyle L J, Pilkey O H. *Geology of Continental Slopes*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1979, 27: 75-82.
- [14] Lowe D R. Sediment-gravity flows, II: Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1982, 52(1): 279-297.
- [15] Nardin T R, Hein F J, Gorsline D S, *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 floor systems[M]//Doyle L J, Pilkey O H. *Geology of Continental Slopes*. Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication 27, 1979: 61-73.
- [16] Pierson T C, Costa J E. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows[M]//Costa J E, Wiczorek G F. *Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation*. Geological Society of America Reviews in Engineering Geology VII, 1987: 1-12.
- [17] Tian Zhaoyi, Xu Haipeng, Zeng Siwei. Accumulation geomorphology and sediment characteristics of viscous debris flow [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1985, (1): 30-41. [田昭一, 徐海鹏, 曾思伟. 黏性泥石流的堆积地貌及沉积物的特征[J]. *水土保持通报*, 1985, (1): 30-41.]
- [18] He Mingjing, Sun Gennian, Song Yongmei. Study on the formation causes of the geologic landscape relics in the Cuihuashan Mountain National Geo-Park in Xi'an City, Shaanxi Province[J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(2): 145-149. [贺明静, 孙根年, 宋咏梅. 陕西西安翠华山地质景观遗迹成因探析[J]. *干旱区地理*, 2005, 28(2): 145-149.]
- [19] Fang Xiaomin, Shen Mingzhi, Mu Yunzhi. Preliminary exploration on microscopic structure and the forming mechanism of debris flow in Wudu[J]. *China Science: Serial B*, 1991, (2): 205-215. [方小敏, 沈明智, 牟昀智. 武都泥石流显微构造及其形成机制初探[J]. *中国科学: B辑*, 1991, (2): 205-215.]
- [20] Wang Yuelun, Jia Lanpo. Observation of glacier in Quaternary in Zhoukoudian[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1952, 32(1/2): 16-25. [王曰伦, 贾兰坡. 周口店第四纪冰川现象的观察[J]. *地质学报*, 1952, 32(1/2): 16-25.]
- [21] Zhao Guolong, Zhu Hongsen, Li Boyang, *et al.* Quaternary glacial geology and origin of glacial pothole swarms in Inner Mongolia[J]. *Regional Geology of China*, 2001, 20(2): 200-205. [赵国龙, 朱洪森, 李泊洋, 等. 论内蒙古第四纪冰川和冰白群的成因[J]. *中国区域地质*, 2001, 20(2): 200-205.]
- [22] Li Xiangbo, Liu Huaqing, Zhang Zhongyi, *et al.* "Argillaceous parcel" structure: A direct evidence of debris flow origin of deep-water massive sandstone of Yanchang Formation, Upper Triassic, the Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 611-622. [李相博, 刘化清, 张忠义, 等. 深水块状砂岩碎屑流成因的直接证据: "泥包砾"结构——以鄂尔多斯盆地延长组为例[J]. *沉积学报*, 2014, 32(4): 611-622.]
- [23] Middleton G V, Hampton M A. Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition[M]//Middleton G V, Bouma A H. *Turbidites and deep-water sedimentation: Short course lecture notes, Part I*. California: Los Angeles, 1973: 1-38.
- [24] Wang Deping. The sedimentation and formation mechanism of lacustrine endogenic debris flow[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(4): 299-317. [王德坪. 湖相内成碎屑流的沉积及形成机理[J]. *地质学报*, 1991, 65(4): 299-317.]
- [25] Hampton M A. Competence of fine-grained debris flows[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975, 45: 834-844.
- [26] Costa J E, Williams G P. Debris Flow Dynamics (Videotape)

- [R]. US Geological Survey Open File Report of 84-0606, 1984.
- [27] Marr J, Harff P, Shanmugam G, *et al.* Experiments on Subaqueous Sandy Debris Flows[R]. Supplement to EOS Transactions. AGU Fall Meeting, San Francisco, 1997, 78(46):347.
- [28] Mulder T, Alexander J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits[J]. *Sedimentology*, 2001, 48:269-299.
- [29] Talling P J, Masson D G, Sumner F J, *et al.* Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types [J]. *Sedimentology*, 2012, 59:1937-2003.
- [30] Yao Jingli, Wang Qi, Zhang Rui, *et al.* Forming mechanism and their environmental implications of chlorite-coatings in Chang 6 sandstone(Upper Triassic) of Hua-Qing area, Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1):72-79.
- [姚涇利, 王琪, 张瑞. 等. 鄂尔多斯盆地华庆地区延长组长 6 砂岩绿泥石膜的形成机理及其环境指示意义[J]. *沉积学报*, 2011, 29(1):72-79.]
- [31] Wang Yingmin, Wang Hairong, Qiu Yan, *et al.* Process of dynamics and its response of deep-water sedimentation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(4):495-504. [王英民, 王海荣, 邱燕, 等. 深水沉积的地球动力学机制与响应[J]. *沉积学报*, 2007, 25(4):495-504.]
- [32] Xian Benzong, Wan Jinfeng, Dong Yanlei, *et al.* Sedimentary characteristics, origin and model of lacustrine deep-water massive sandstone: An example from Dongying Formation in Nanpu Depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(9):3287-3299. [鲜本忠, 万锦峰, 董艳蕾, 等. 湖相深水块状砂岩特征、成因及发育模式——以南堡凹陷东营组为例[J]. *岩石学报*, 2013, 29(9):3287-3299.]

The Mechanism of Transport Process of Deep-water Sedimentation in Lacustrine Basin: A Case Study of Deep-water Sandstone in Yanchang Formation, Ordos Basin

LI Xiang-bo^{1,2}, WANG Jing^{1,2}, LIAO Jian-bo^{1,2}, LONG Li-wen^{1,2}, PAN Shu-xin^{1,2},
LI Zhi-yong^{1,2}, WAN Yan-rong^{1,2}

(1, *PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development- Northwest, Lanzhou 730020, China*;

2. *Key Laboratory of Reservoir Description, CNPC, Lanzhou 730020, China*)

Abstract: Subaqueous debris flow which is formed by mass-transport in deep-marine and deep-lacustrine environments has been paid more and more attention, which is different from the subaerial debris flow. Through the summarization of the current research status on the gravity flow transportation and sedimentation of the deep-water sediments, the concept, main distinction and controlling factors of mass transportation and fluid transportation become clear. Taking the deep-water sandstone (mud poor sands) in Yanchang Formation of Ordos Basin as an example, the paper presents the identification criteria of the mass transportation and fluid transportation, and explores the mechanism of transport process of subaqueous mud-poor debris flow. It is thought that lubrication of a little of clay matrix and adhesion of clay membrane of equal thickness are the root reason why subaqueous mud-poor debris flow of Yangchang Formation can be mass-transport and isn't shattered by the water body underwater. In the deep-lacustrine of the Yangchang Formation, Ordos Basin, thick layer sandstone which is formed by the mass transport has most favorable reservoir configuration, and is the most beneficial oil and gas exploration target.

Key words: Deep-water sandstone; Mass-transport; Yanchang Formation; Ordos Basin