

文章编号:1000-0550(2014)04-0611-12

深水块状砂岩碎屑流成因的直接证据:“泥包砾”结构^①

——以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组研究为例

李相博^{1,2} 刘化清^{1,2} 张忠义³ 袁效奇³ 完颜容^{1,2}
牛海青^{1,2} 廖建波^{1,2} 王菁^{1,2}

(1.中国石油勘探开发研究院西北分院 兰州 730020;2.中国石油天然气集团公司油藏描述重点实验室 兰州 730020;
3.中国石油长庆油田公司勘探开发研究院 西安 710018)

摘要 水下碎屑流沉积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,然而目前还没有一个确定水下沉积物的块体搬运过程的公认鉴别标志。通过对鄂尔多斯盆地湖盆中央地区几个露头剖面的地质调查,首次在延长组深水厚层块状砂岩中发现了一种“泥包砾”结构,并分析了其形成与演变过程。研究认为这种“泥包砾”结构主要与三角洲前缘特殊的“碎屑流”成因机理与发育过程有关,其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(宾汉塑性体)被搬运的,自始至终表现出其在搬运过程中是被介质的强度所支撑的,据此认为“泥包砾”结构是确定延长组深水厚层块状砂岩为碎屑流成因的最有意义的标志性证据,并由此建立了延长组深水砂岩从开始启动到搬运、再到沉积的过程与模式。同时,本文认为“泥包砾”也为深海沉积中块体搬运作用与搬运过程的研究提供了一种可借鉴的关键性判识标志,对于当前全球深水(包括深海与深湖)油气勘探以及目前国际地学界广泛开展的大陆边缘沉积物“从源到汇”过程的研究都有积极意义。

关键词 “泥包砾”结构 砂质块体搬运 砂质碎屑流 延长组 鄂尔多斯盆地

第一作者简介 李相博 男 1965年出生 博士 高级工程师 石油地质学与深水沉积研究 E-mail:lixiangbo911@sina.com

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

越来越多的勘探和研究实例证实,深水块状砂岩(DWMs)是较好的油气储集单元(如目前在挪威海^[1,2]、北海^[3-5]、墨西哥湾^[6,7]、巴西近海^[6,8]、西非^[6]、俄罗斯^[8]、印度孟加拉湾^[9]以及中国的陆相盆地^[10-14]等众多地区均发现了与深水块状砂岩有关的油气藏),然而目前对“深水块状砂岩”成因一直存在争议,有学者认为是高密度浊流^[15,16]或超高浓密度流^[17],有的则认为是由块体搬运方式控制形成的砂质碎屑流^[3,18-20],也有学者用高密度浊流与(砂质)碎屑流两个概念来解释其成因^[21,22]。由于浊流属于牛顿流体,正粒序是浊流沉积最重要的鉴别特征^[23-25],因此,用浊流概念来解释块状砂岩显然是不合适的。相对而言,由于Shanmugam^[7,25]提出的砂质碎屑流概念具有如下广泛的内涵,可能更符合现今条件下人们对深水环境中沉积物搬运与沉积过程的理解,因而正

在被越来越多的研究者所关注^[4,7,20,22,26-38]。

Shanmugam提出的砂质碎屑流概念内涵包括以下几个要点^[25]:①塑性流变;②多种沉积物支撑机制(内聚强度、摩擦强度及浮力);③块体搬运方式;④砂和砾大于25%~30%;⑤25%~95%沉积物(碎石、砂、和泥)体积浓度;⑥可变的黏土含量,以往认为只有具有较高的黏土含量才能形成碎屑流的观念是错误的,实验表明,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^[39]。

由此可以看出,“砂质碎屑流”术语不是一个简单岩石名称,而是代表了一个在岩石组分、结构以及强度等方面的连续沉积序列(谱系),而且在这个沉积序列中有一个共同特性,即塑性流变特征。Shanmugam^[20]进一步认为在深水环境中,沉积物重力在搬运和沉积的过程中有很大作用,主要的沉积物重力过程包括滑坡、崩塌、碎屑流和浊流等,其中的碎屑流属于块体搬运,由于砂质碎屑流属于碎屑流中的一种,Shanmugam

^①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)与国家自然科学基金项目(批准号:41172131)联合资助
收稿日期:2013-12-18;收修改稿日期:2014-06-08

(DWMs)的概念做了如下新定义:认为是一种与深水沉积物相伴生的、不具有任何沉积构造的、厚度常常大于1 m的单砂体^[21]。

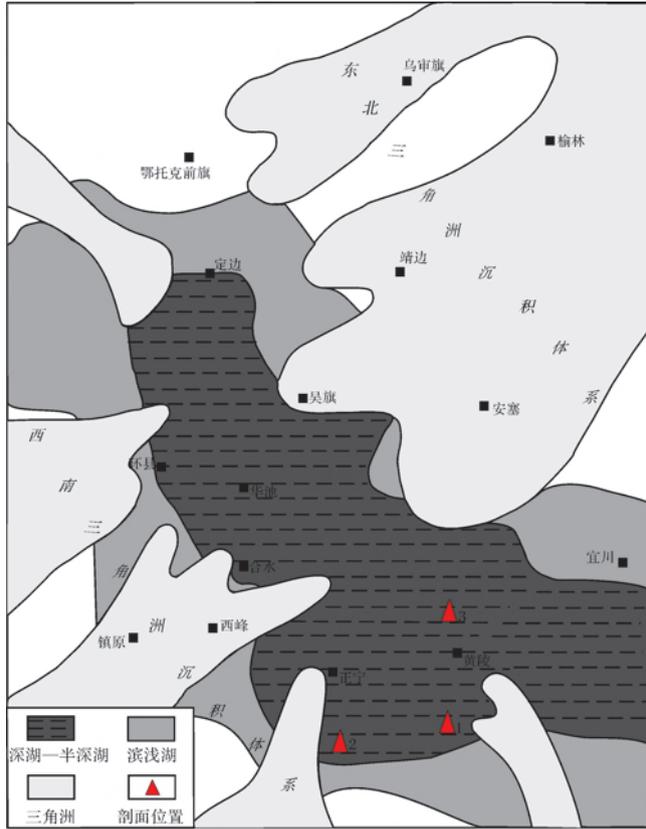


图2 延长组湖泊—三角洲体系分布图(位置见图1)

- 1.铜川柳林川露头剖面;
- 2.旬邑山水河露头剖面;
- 3.黄陵葫芦河露头剖面

Fig.2 Distribution of lake-delta system in Yanchang Formation

在我们的研究区鄂尔多斯陆相盆地中,笔者通过对湖盆中心地区50口钻井岩芯(长度约1 100 m)及10余个露头剖面详细观察和分析测试,发现小于0.5 m的砂岩大都具明显正粒序层理,且常以砂泥岩薄互层形式出现,构成多个韵律层,显然它们相当于Bouma序列A段^[24],属于经典浊积岩。而大于0.5 m的砂岩常具有块状、无沉积构造及悬浮的泥岩撕裂屑等特征,与经典浊流沉积存在明显差别,而与上述Stow^[21]描述的块状砂岩特征类似,据此,笔者将这种大于0.5 m的砂岩称为深水块状砂岩(即本文所指的块状砂岩),并将其解释为砂质碎屑流成因,详见笔者已发表文献^[12,13,42]。

2 “泥包砾”结构的基本特征

“泥包砾”结构主要分布在湖盆中央深水区的铜

川柳林川、旬邑山水河及黄陵葫芦河地区的露头剖面上(图2),其赋存介质均为深水块状砂岩。下面着重以前两个地区为例做简要介绍。

2.1 铜川柳林川长6露头剖面上的“泥包砾”结构

(1) 背景沉积

柳林川剖面位于盆地东南部(图2),受东南物源体系控制^[44]。延长组长6~长7段在柳林川瑶曲镇附近出露较好(图3a),其中长6段岩性多为灰绿色、黄绿色块状与薄层状细粒砂岩不等厚互层,局部夹灰黑色泥岩、少量劣质油页岩。

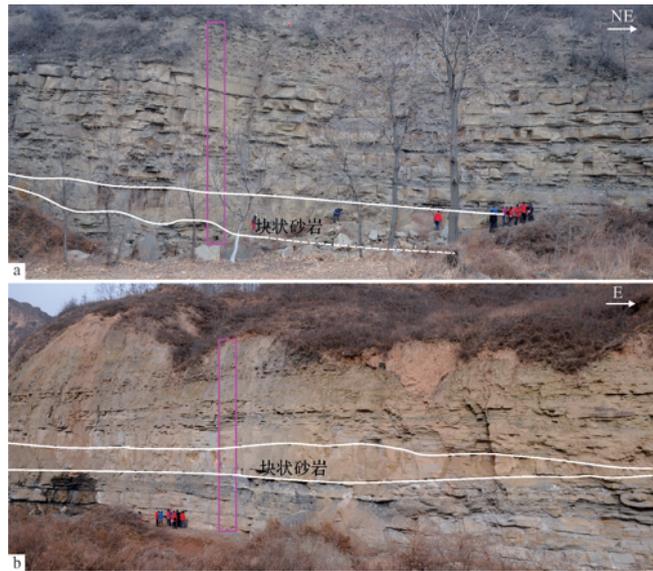


图3 研究区的露头照片

- a.铜川柳林川瑶曲镇露头(位置见图2中的1);
- b.旬邑山水河露头(位置见图2中的2)

注:①照片a中的红色矩形框为图4a沉积柱状图位置,照片b中的红色矩形框为图6a沉积柱状图位置;②照片a与b中的“块状砂岩”均代表单个成因单元的砂体。

Fig.3 Outcrops in the study area

根据笔者已经建立的沉积判别标志^[13,42],该套岩性组合为浅湖—半深湖环境下的一套重力流沉积组合,其中具有粒序层理的薄层状细砂岩(厚度<0.5 m)为浊流成因,厚层块状砂岩为砂质碎屑流成因(图4a)。这一认识与邹才能等(2012)对该区的研究结果相吻合^[38]。

由于“泥包砾”结构发育在如上所述的砂质碎屑流形成的块状砂岩中,现将该区块状砂岩主要特征介绍如下:①长石含量极低,一般不足10%,石英含量约30%,岩屑含量偏高,可达35%左右(表1),杂基含量一般少于10%,以水云母杂基为主。②单砂体厚度一般大于0.5 m,最大可达2~3 m(图3a、图4a)。

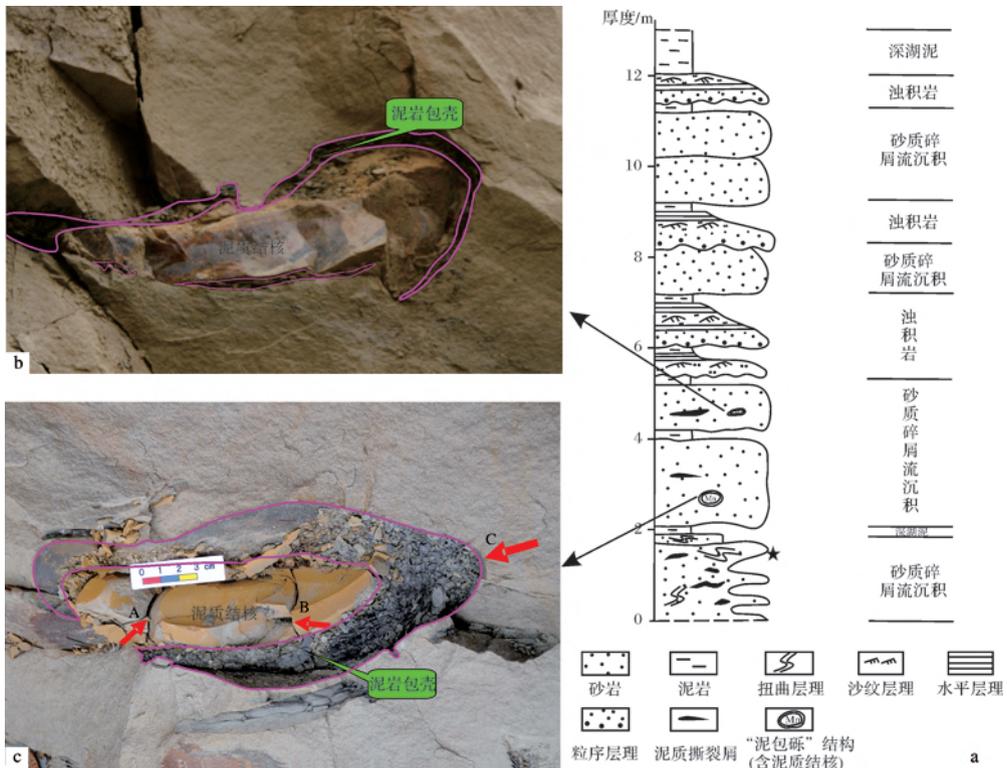


图4 铜川柳林川地区延长组长6露头沉积相与“泥包砾”结构特征(位置见图3a红色矩形框)

a.长6露头沉积相剖面;b,c.厚层砂岩中“泥包砾”结构的露头照片,照片中的红色线条指示了泥质包壳的分布范围,其中在4b中泥质包壳厚度小于1 cm,在4c中约2~4 cm。

Fig.4 Sedimentary facies of Change 6 outcrops and “argillaceous parcel” in Liulichuan, Tongchuan

表1 延长组深水沉积露头砂岩碎屑组分一览表(数据来自文献44)

Table 1 Characteristics of sandstone detrital component (%) of outcrops in deep-water sediments of Yanchang Formation

露头位置	油层组	主要陆源碎屑/%									
		石英	长石	火成岩岩屑	高变质岩岩屑	石英岩屑	浅变质岩岩屑	白云岩岩屑	灰岩岩屑	云母	绿泥石
铜川柳林川	长6	33.2	2.3	1.2	0	6.2	8.3	1.5	19.0	7.3	0
	长7	30.6	9.3	4.5	0.8	7.8	14.3	1.5	7.3	5.3	0.9
旬邑山水河	长6+7	37.1	8.4	2.5	0.7	4.3	10.3	5.2	0.3	6.8	0.5

由于本露头植被覆盖严重,对砂体的平面展布延伸情况难以做出判断,但根据附近的露头(如图2中的黄陵葫芦河地区)与湖盆中央的许多钻井揭示,研究区单砂体大多呈垂直湖岸线的条带状展布,沿长轴方向可延伸十几千米,短轴方向(即横向)一般不超过2 km,厚度变化快,边界突变;③砂岩内部不具有层理构造,但常见呈悬浮状、随机分布泥砾,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^[42]。④砂岩成分成熟度普遍偏低、结构成熟度较高,多数具颗粒支撑结构;⑤砂岩顶底面均突变接触,其中顶面常与半深湖—深湖相泥岩或具粒序层理的浊积岩接触,接触面较为平坦,底面有的由于发育负载构造现象^[45]或软

沉积物拖曳变形现象而高低不平,有的较为平坦(图3a、图4a)。

(2) “泥包砾”结构的特征

具有两层结构,常由较大的内核和几厘米厚的泥质外壳两部分组成。内核为泥质结核(图5),形状为圆锥形(图4b)或纺锤形(图4c),最大长度不超过30 cm,宽度几厘米至十几厘米;整个结核被薄层黑色泥页岩组成的外壳呈同心环状包裹而成“泥包砾”结构,漂浮在厚层块状粉细砂岩中(图4),显示被砂岩介质的强度所支撑。

此外,图4c中的“泥包砾”结构还有两个明显特征,一是结核内部发育若干垂向节理缝(图4c中箭头A与B所示),显示其遭受过垂向压扁作用(推测与

上覆地层压力有关);同时该节理缝并没有穿过泥岩外壳和围岩,说明这种压扁作用主要发生在沉积后到成岩前的软沉积物阶段,当时泥质外壳和围岩均处于塑性状态,如果恢复该“泥包砾”结构的原始形态的话,其在沉积前的搬运阶段应该为近似圆形。二是“泥包砾”结构的泥质外壳与围岩(砂岩)接触形态呈浑圆状弧形(图4c中箭头C所示),这一方面显示“泥包砾”结构在其中发生过旋转或滚动作用,另一方面也显示围岩(砂岩)处于塑性状态,这与从上述节理缝发育特征得出的结论是一致的。

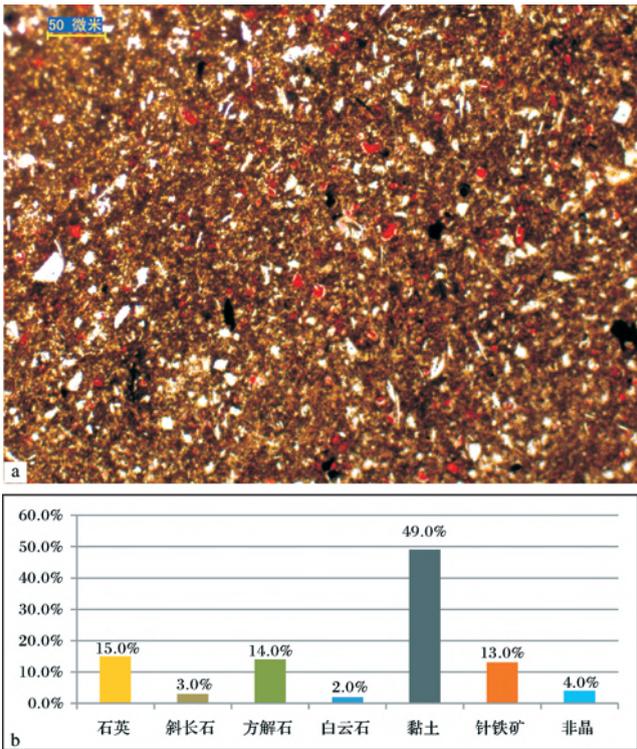


图5 泥质结核的单偏光照片(a)及其X射线衍射分析结果(b)

注:照片a为泥质结核的岩石薄片,显示由大量细粉砂和泥质组成,细粉砂主要由石英、灰岩屑及云母片等陆源碎屑所组成;图b为泥质结核的全岩X衍射分析数据,可以看出,粒径小于0.03 mm的陆源碎屑黏土矿物为岩石主要组成部分。

Fig.5 Thin section plane polarization photo of mudstone blob and its X-ray diffraction analysis result (b)

2.2 旬邑山水河长7露头剖面上的“泥包砾”结构

(1) 背景沉积

旬邑县山水河剖面位于旬邑县城附近及县城以南地区(图2),仅出露长10~长6段沉积,其中长7段沉积时受西南物源体系控制明显^[44]。长7段典型露头位于县城东北3 km处(图3b),岩性为灰绿色细

砂岩、粉砂岩与泥质粉砂岩不等厚互层,局部夹粉砂质泥岩、暗色泥页岩及油页岩。根据笔者先前的研究^[13,42],该套岩性组合中的厚层块状砂岩同样为半深湖相—深湖环境下的砂质碎屑流沉积(图6a)，“泥包砾”结构也同样发育在厚层块状砂岩中。

从该露头剖面“泥包砾”结构所赋存的块状砂岩特征看,其碎屑组分(表1)、沉积构造、所含泥砾产状、单层砂岩厚度等特征也与柳林川长6段十分类似,所不同的是该区块状砂岩底面非常平坦、光滑,不具有侵蚀作用。这一现象可以用水下碎屑流中存在的滑水机制(hydroplaning)现象来解释^[25],这又从另一个方面证实了其作为砂质碎屑流成因。

(2) “泥包砾”结构特征

也具有两层结构,但与上述柳林川含泥质结核的“泥包砾”结构不同,在该地区发现了内核为砂质团块的“泥包砾”结构(图6b,c),其形状为近似梨形(长4 cm,宽3 cm),岩矿组分与围岩基本一致,具有长石含量低(10.8%)、岩屑含量(33%)与石英含量(34.6%)较高的特点。该团块被厚度不等的黑色泥岩包裹后形成了近似椭圆形(长轴8 cm,短轴6 cm)的“泥包砾”结构,悬浮在厚层块状粉细砂岩中(图6),同样显示被砂岩介质强度所支撑。此外,图6b中“泥包砾”结构还具有两个明显特征,一是其与砂岩介质(围岩)接触形态呈浑圆状(如图6b中箭头A所示),显示该“泥包砾”结构在塑性状态的砂岩介质中发生过滚动或旋转作用,这与从前述柳林川长6露头观察到的现象完全一致;二是“泥包砾”结构的泥质外壳并没有把作为内核的砂岩团块完全包裹起来,在“泥包砾”结构上下边界局部地方(图6b中箭头B与C所示)泥质外壳减薄甚至消失。裸露出的内核部分(砂岩团块)与围岩直接接触,从而将泥质外壳分隔为左右两半部分,其中左侧泥岩原始纹层呈卷曲状态,紧密围绕内核分布,而右侧泥岩较为松弛,部分甚至脱落,由此进一步判断该“泥包砾”至少在沉积的最后阶段在砂岩介质中做过逆时针滚动或旋转(旋转方向见图6b中弯曲箭头所示)。至于局部地方泥质外壳减薄消失的现象,可以这样解释:在“泥包砾”结构旋转过程中,由于其内核相对较硬且形状不规则,在边棱突出处与围岩(砂岩)近距离或直接接触(如图6b中箭头B与C所示处),于是产生摩擦作用增强与应力集中现象,从而迫使该位置处较软的泥质外壳部分向两侧发生塑形流动而造成。

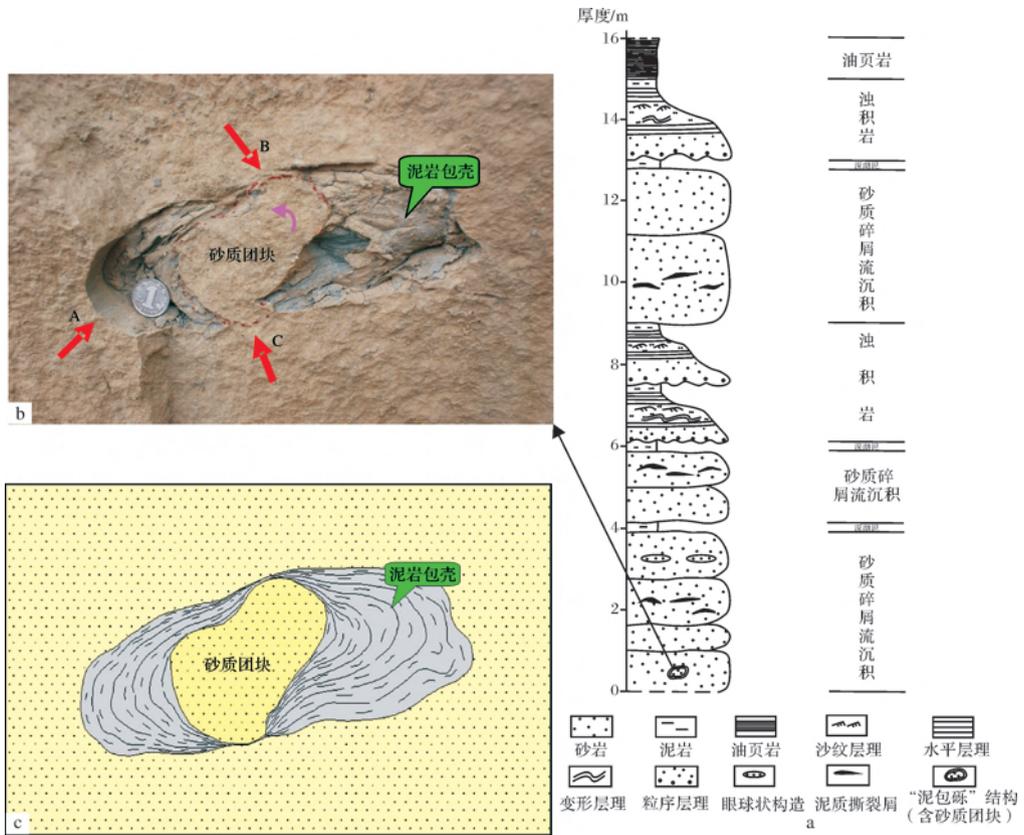


图6 旬邑山水河地区延长组长7露头沉积相与“泥包砾”结构特征(位置见图3b中的红色矩形框)

a.长7露头沉积相剖面;b.厚层砂岩中的“泥包砾”结构照片;c.照片b的地质解释;照片中的弯曲箭头指示砂质团块转动方向

Fig.6 Sedimentary facies of Change 7 outcrops and “argillaceous parcel” in Shanshuihe profile, Xunyi

2.3 “泥包砾”结构的地质意义

上述两个地区“泥包砾”结构特征清楚的表明,其泥质外壳以及赋存它的块状砂岩介质均具有塑性变形性质,而且在其沉积阶段被砂岩介质的强度所支撑。事实上,除含有“泥包砾”结构外,如前所述,这些块状砂岩中还含有呈悬浮状态分布的泥砾,而这一点已被许多学者认为是识别块体搬运和砂质碎屑流的重要证据^[19,25,46]。

“泥包砾”结构作为一种具有双层结构的特殊泥砾悬浮在厚层块状粉细砂岩中,同样揭示了其所赋存的块状砂岩至少在沉积前的最后时刻还处于塑性状态。事实上,从下文的分析可以看出,“泥包砾”结构不但指示了沉积物在最后沉积阶段具有塑性状态,而且指示了从搬运阶段开始自始至终都保持了这种塑性状态。

3 “泥包砾”结构的形成机理

所谓机理应该包括泥质结核或砂质团块与泥质外壳的来源以及泥质是如何黏附包裹在结核或团块

上的过程等。

通过中外文献检索,“泥包砾”现象过去只有在黏性碎屑流(泥石流)中发现过^[15,47~51],对于前者,一般的解释是,较大的砾石或整体性较好的大土块(黄土和红土等)在被黏性泥石流搬运过程中,一方面碰撞了边棱,另一方面又不断地黏附着一层泥砂等细粒物质或泥浆体而形成;对于后者,通常被认为是由于冰碛物分选性极差,黏土和砾石紧密包裹在一起堆积而形成。显然,不论在泥石流或冰川沉积环境,泥砂等细粒物质之所以能够包裹在砾石上,一是因为搬运它的介质富含泥砂等细粒沉积,二是这种介质(泥质)具有黏性,否则就不能附着在内核上。

但我们发现的这种“泥包砾”与上述泥石流及冰川成因“泥包砾”结构存在很大不同,首先是“泥包砾”结构中的内核并非砾石或鹅卵石,而是成分与围岩相近的砂岩岩块或者含泥质结核;其次,我们发现的“泥包砾”结构并非赋存于富含泥质的细粒沉积中,而是赋存于黏土杂基含量很少的纯净砂岩当中,显然,它绝对不可能是“泥包砾”结构形成的最初原

始环境,那么,其究竟来自何处呢?

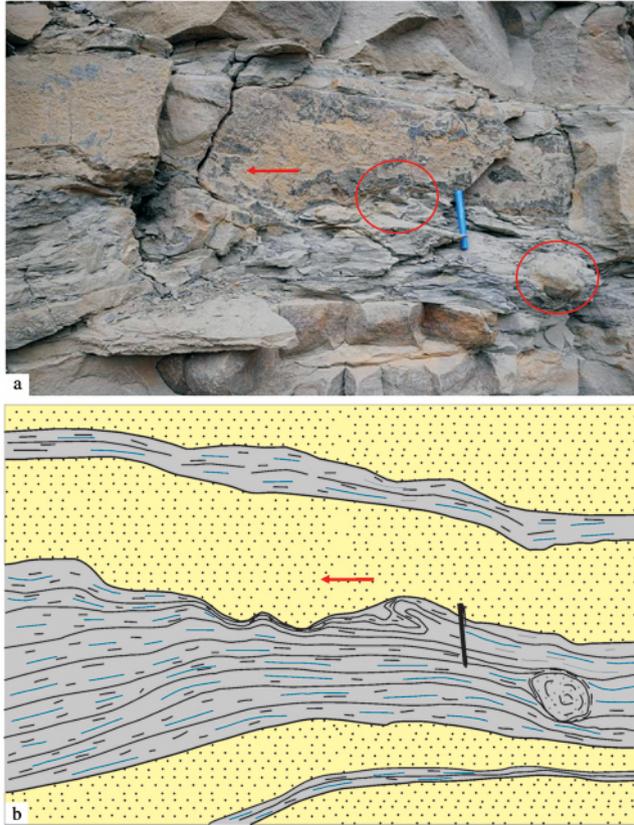


图7 柳林川地区延长组长6段粉砂质泥岩中的“泥包砾”结构(位置见图4a中★处)

a.露头照片;b.地质解释

注意:①照片左侧圆圈处为粉砂质泥岩内部的“S”形扭曲现象,指示该粉砂质泥岩遭受了上覆砂岩相对向左侧的拖曳作用(箭头所示);②照片右侧圆圈处为粉砂质泥岩内部由粉砂质团块组成的一个“泥包砾”结构,指示了“泥包砾”结构最初形成于富含泥质的细粒沉积物中。

Fig.7 “Argillaceous parcel” in silty mudstone in Chang 6 of Yanchang Formation, Liulinchuan

柳林川长6露头剖面上的另外一个地质现象为“泥包砾”结构来源的合理解释提供了线索。在该剖面底部厚层块状砂岩中夹有一层厚度不等(最厚处约50 cm,最薄处约20 cm)、呈断续分布的粉砂质泥岩(图7)。泥岩内部存在明显拉长撕裂等塑性变形现象,且在与砂岩接触处呈“S”形扭曲(图7a,左侧圆圈处),上覆砂岩底面亦呈“S”形起伏,显示下伏粉砂质泥岩遭受了上覆砂岩相对向左侧的拖曳作用(图7中箭头所示)。一个有趣的现象是,在粉砂质泥岩内部存在一粉砂质团块(大小约6 cm×6 cm)(图7a,右侧圆圈处),其外层已经被泥质(厚度约2 cm)包裹而成“泥包砾”结构,且其赋存状态与泥岩介质

的变形扭曲形态相互协调一致(图7a,b),显示二者共同被上覆砂岩所拖曳。由此看来,“泥包砾”结构最初存在于富含泥质的细粒沉积物中,这与陆上黏性泥石流中的情况是完全相同的。

图7中的现象再一次清楚地表明,砂质与泥质都是作为塑性状态被搬运的,由于泥质抗剪切能力弱,最终被撕裂成泥岩撕裂屑漂浮在砂岩内部,而“泥包砾”结构较纯泥岩抗剪切能力强,最终得到保存并进入砂岩内部而成我们如今看到的现象,图7中的“泥包砾”结构展示的正是这一过程的生动写照!

那么,上述富含泥质沉积物中的砂质团块或泥质结核又是来自何处?后期又是如何转化为“泥包砾”结构而进入砂岩当中的呢?这是下文要回答的问题。

3.1 泥岩中泥质结核或砂质团块的来源

由于黏土矿物的胶体性质,在三角洲前缘或滨湖与浅湖环境的泥岩中,往往会发育一些与黏土矿物有关的泥质结核,或含有灰质或铁质的泥质结核,这在陆相湖盆中实际上是一种普遍沉积现象^[52]。通过对图4b中泥质结核的X衍射分析(图5),其中的黏土矿物重量百分比高达49%,由此推断,该地区泥质结核的发育可能与黏土矿物的相对富集有关。此外,受生物活动影响^[52],在滨湖与浅湖环境的泥岩中还可能出现一些灰质或铁质结核。

对于湖相泥岩中的砂质团块来源,乔秀夫等^[45,53]做过详细研究,认为与古地震作用有关。在砂泥岩互层地区,由于砂岩密度较泥岩大,上覆较粗砂岩层会下陷至下伏较细砂层或泥岩中形成负载构造,当遇到地震振动摇晃作用时,负载体会脱离母岩完全落入下伏层形成球体或椭球体,即球—枕构造。郑荣才等^[54]曾在鄂尔多斯盆地白豹地区的钻井岩芯中发现过这种特殊构造,一些砂岩球状体呈坠入状产出在长6深湖相泥岩中;李元昊等^[55]也对延长组长6~长7段中的砂球构造、球枕构造以及液化砂岩脉进行过仔细描述。由此看来,延长组沉积记录中的确存在大量砂球或砂质团块构造。

最近,乔秀夫等^[53]在龙门山地区须家河组中发现了丰富的古地震记录,反映与鄂尔多斯盆地相毗邻的川西乃至青藏高原东北部地区晚三叠世曾有过强烈与频繁的地震构造活动。事实上,在鄂尔多斯盆地延长组长6~长7段中,存在多套薄层状凝灰岩,它们厚度不大,但分布广泛,岩性及电性特征明显,长期以来一直被作为区域地层等时对比的可靠标志^[41],笔者曾经认为这些凝灰岩正是盆地周缘地区晚三叠世

火山与地震活动的产物^[56]。因此,从区域地质背景看,延长组中也具有发育砂球或球枕构造的动力学条件。

3.2 “泥包砾”结构的形成过程

前期研究表明^[13,42],延长组砂质碎屑流起源于三角洲前缘沉积物的再搬运。三角洲前缘沉积以砂泥岩互层为典型特征,受如前所述的诸因素影响,在其中的泥岩中(指再搬运之前的泥岩),可能会发育砂质团块或泥质结核。从以下分析可以看出,正是三角洲前缘特殊的地层结构与特殊的“碎屑流”成因机理最终形成了赋存于砂岩中的“泥包砾”结构。

三角洲前缘的碎屑流与陆上碎屑流(泥石流)在成因机理方面有很大不同,后者是陆上就近形成的风化产物与水混合在一起的块体搬运形式,通常表现为较大的颗粒被黏土—水基质强度所支撑, Middleton 等^[57]称其为“真正的碎屑流”;前者则是风化产物被水流搬运和机械分异后,首先在三角洲前缘形成砂泥岩互层结构,再由于重力滑塌或者液化作用导致整体性运动,进而转化为碎屑流的。由于三角洲前缘沉积物经历过流水分选作用,所以与“真正的碎屑流”不同,通常形成不同粒级的砂质碎屑流、粉砂质碎屑流或泥质碎屑流等^[46]。

由于泥质与砂质的抗剪强度有显著不同,三角洲前缘的砂质碎屑流和泥质碎屑流的形成有一定次序性。王德坪^[46]研究表明,在 50 m 水下,砂质沉积物的抗剪强度至少为 245 kN/m²,是其中泥质沉积物的 6~12 倍。由于抗剪强度的这种显著差别,在由重力引起的沿坡面的剪应力还远小于砂质沉积物的抗剪强度时,其下伏的泥质沉积物即开始液化和剪切变形,继而产生撕裂和碎屑流化,而此时上覆的砂质沉积物尚没有开始变形。也就是说,在三角洲前缘沉积物的再搬运初期,被搬运的沉积物可分为上、下两部分,下部为首先液化变形并以碎屑流方式运动的泥质沉积物,上部为砂质沉积物,颗粒之间相互具有相对固定的关系,如同一个固体,附着于下部的泥质沉积物之上滑动前进。这个过程与陆上碎屑流沉积一般具有的上、下两层韵律结构相类似^[58],即下部已剪切变形的泥质沉积物相当于层流段(laminar flow),上部的砂质沉积物相当于“刚性筏”流段(rigid raft)。

根据 Middleton G V 和 Hampton M A 的分析^[57],水下碎屑流(块体流)在流动过程中,其内部任何层段上都存在着剪应力。随着下伏泥质沉积物的碎屑流化,若其中含有泥质结核或砂球构造与球枕构造,

由于其强度比作为介质的泥质浆体高,它在浆体的流动中,往往会表现出刚体性质。这种具有刚体性质的结核或砂球构造,在顶、底受到介质不同大小的剪切力作用时,必然会产生旋转或滚动,在这个过程中,黏稠状的泥质浆体必然会不断黏附于内核之上,从而形成如同陆上泥石流中常看到的“泥包砾”结构,这就是如图 7 中所看到的现象。有关黏性碎屑流中相对较刚性泥砾在受到剪切应力作用时产生旋转的现象在世界各地都有发现,前人也进行过相关实验模拟验证^[59,60]。

随着流动的继续发展(搬运距离增大、水体加深),沉积层将进一步混合,下伏的泥岩层连同其中的“泥包砾”结构会陆续卷入上覆砂质沉积物中。由于泥岩层与“泥包砾”结构本身的强度与作为介质的砂岩存在差异,在后期的继续搬运中两者的“命运”大不一样:泥岩抗剪强度比砂岩弱,被砂岩介质撕裂成长条状泥质撕裂块或体积更小的撕裂屑、撕裂片彼此平行零散分布于块状砂岩中;而“泥包砾”结构由于其强度与作为介质的砂质相近,会继续表现出刚体性质,并且在顶、底受到介质的剪切力作用时会继续产生滚动与旋转,因此,与介质砂岩的接触面多呈浑圆形态,这就是如图 4b、图 4c 与图 6b 中所看到的现象。

从上述分析可以看出,由于“泥包砾”结构不同于普通的“泥质撕裂屑”,它具有硬而厚的内核和软而薄的外壳,因而其形成与牵引流或浊流作用绝对无关,否则,一定会被流水冲洗干净而只剩下内核部分。它之所以能够经受长距离的搬运而仍然保持完好状态(具有两层结构),充分说明搬运它的介质在整个搬运过程中(不仅在沉积阶段)自始至终都保持了这种塑性状态。因此,完全可以把“泥包砾”结构作为块体搬运过程和砂质碎屑流沉积物识别的最有意义的标志性证据。

4 延长组深水砂岩形成过程

在上述“泥包砾”结构特征及形成过程研究基础上,结合笔者曾经建立的延长组深水沉积模式^[13,42],对该区深水砂岩(包括薄层状浊积岩和块状砂岩)的起源、搬运与沉积过程形成了较为清晰的认识,其形成过程大致可以划分为以下 5 个阶段(图 8):

(1) 三角洲前缘砂泥岩互层形成阶段:来自母岩区的风化产物经流水搬运和机械分异后,在三角洲前缘堆积而形成砂泥岩互层结构。在该阶段,由于砂岩

密度较泥岩大,上覆砂岩层下陷至下伏泥岩中形成负载构造,当遇到地震振动摇晃作用时,负载体会脱离母岩,落入下伏泥岩层中而形成球体或椭球体;同时,由于黏土矿物的富集或生物作用,在泥岩中可发育泥质结核、灰质结核或铁质结核等。

(2) 泥质碎屑流形成阶段:在重力及古地震等外力诱因作用下,泥岩首先发生剪切变形,形成泥质碎屑流;在剪切作用影响下,赋存在泥岩中的砂球与泥质结核发生滚动,形成特有的“泥包砾”结构。

(3) 砂质碎屑流形成阶段:随着流动的继续发

展,上覆砂岩逐步液化产生砂质碎屑流;下伏泥岩进一步强烈变形,形成的泥质撕裂屑连同其中的“泥包砾”结构陆续卷入上覆砂质沉积物中。

(4) 砂质碎屑流沉积阶段:在深湖平原或坡角处,碎屑流“冻结停止”^[19],内部保留碎屑流搬运过程中形成的“泥包砾”及泥岩撕裂屑等特殊现象。

(5) 浊流沉积阶段:据 Shanmugam 等研究,水下碎屑流在搬运过程中,有时遭遇湖水稀释,并在其头部形成紊流团(浊流),最终与砂质碎屑流分离,在深湖平原处形成浊积岩^[2]。

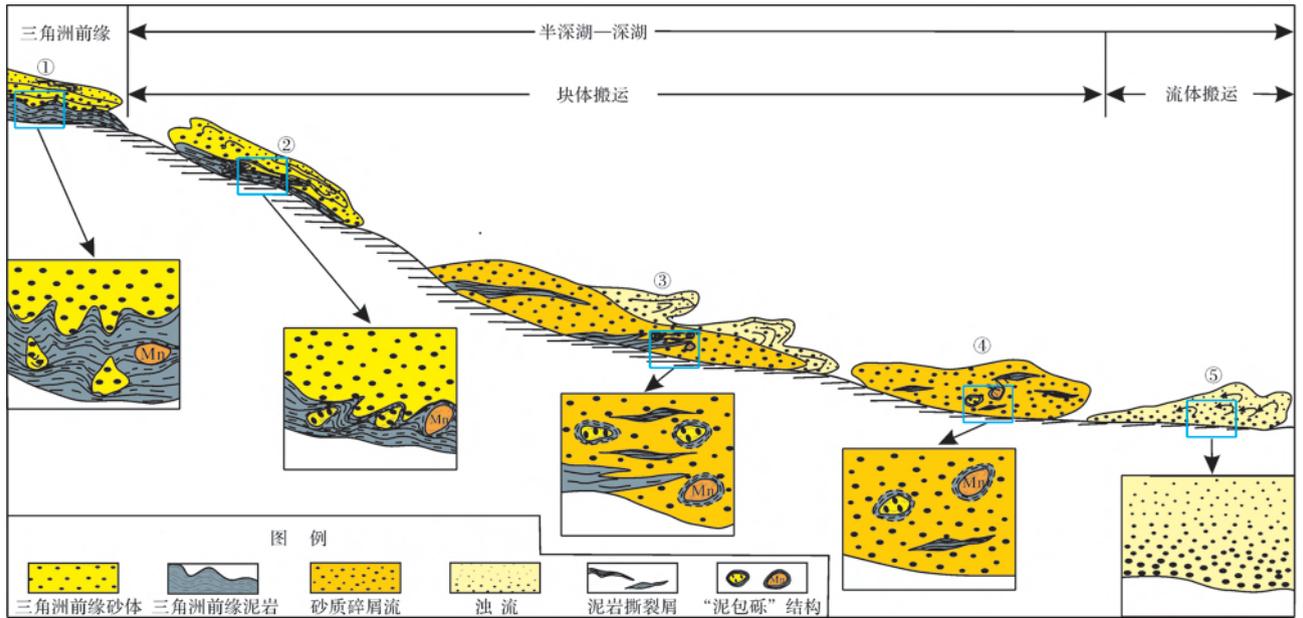


图8 延长组深水砂岩的搬运与沉积过程示意图

①三角洲前缘砂泥岩互层形成阶段;②泥质碎屑流形成阶段;③砂质碎屑流形成阶段;④砂质碎屑流沉积阶段;⑤浊流沉积阶段

Fig.8 Transportation and sedimentation process of deepwater sandstone in Yanchang Formation

5 结论

(1) 通过对鄂尔多斯盆地几个露头剖面的地质调查,首次在延长组深水厚层块状砂岩中发现了一种“泥包砾”结构,即泥质结核或砂质团块被几厘米厚的泥质外壳呈同心环状所包裹,漂浮在厚层块状砂岩中。

(2) 分析了“泥包砾”结构的形成与演变过程,认为主要与三角洲前缘特殊的“碎屑流”形成过程有关。由于黏土矿物的相对富集或受生物与古地震作用,在三角洲前缘砂泥岩互层结构的泥岩中可能会发育泥质结核或砂质团块;由于三角洲前缘的“碎屑流”总是从泥岩开始,先形成泥质碎屑流,与此同时,泥岩中的砂质团块或泥质结核在其中滚动形成泥质

包壳,此后由于上覆砂岩液化再形成砂质碎屑流,被撕裂的泥岩碎片及含泥质包壳的团块逐步卷入了砂岩中,由此形成了赋存于砂岩中的“泥包砾”结构。

(3) 提出“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(宾汉塑性体)被搬运的,自始至终表现出其在搬运中是被介质的强度所支撑的,据此认为“泥包砾”结构是确定延长组深水厚层块状砂岩为砂质碎屑流成因的最有意义的标志性证据,并以它为示踪标志,建立了延长组深水砂岩从开始启动到搬运,再到沉积的过程与模式。

(4) 本文认为“泥包砾”也为深海沉积中块体搬运作用与搬运过程的研究提供了一种可借鉴的关键性判识标志,这不仅对于当前全球深水(深海与深湖)油气勘探具有重要价值,而且对于目前国际地学

界广泛开展的大陆边缘沉积物“从源到汇”过程的研究有积极意义。

致谢 由衷感谢美国德克萨斯州立大学 Shanmugam 教授针对作者初稿提出的重要的修改意见,感谢中国石油勘探开发研究院西北分院刘震华高级工程师帮助素描清绘了部分图件。

参考文献 (References)

- Solheim A, Bryn P, Sejrup H P, *et al.* Ormen Lange: An integrated study for the safe development of a deep-water gas field within the Storegga Slide complex, NE Atlantic continental margin: Executive summary[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(1/2): 1-9
- Shanmugam G, Lehtonen L R, Straume T, *et al.* Slump and debris flow dominated upper slope facies in the Cretaceous of the Norwegian and Northern North Seas (61°~67°N): Implications for sand distribution [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(6): 910-937
- Shanmugam G, Moiola R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma[J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79(5): 672-695
- Purvis K, Kao J, Flanagan K, *et al.* Complex reservoir geometries in a deep water elastic sequence, Gryphon Field, UKCS: injection structures, geological modeling and reservoir simulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(2): 161-179
- Duranti D, Hurst A. Fluidization and injection in the deep-water sandstones of the Eocene Alba Formation (UK. North Sea) [J]. *Sedimentology*, 2004, 51(3): 503-529
- Shanmugam G. Deep-water Processes and Facies Models: Implications for sandstone petroleum reservoirs[M]. Amsterdam: Elsevier, 2006
- Shanmugam G. New Perspectives on Deep-water Sandstones: Origin, recognition, initiation, and reservoir quality[M]. Amsterdam: Elsevier, 2012
- Meckel T. Classifying and characterizing sand-prone submarine mass-transport deposits [R]. New Orleans: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2010
- Shanmugam G, Shrivastava S K, Das B. Sandy debrites and tidalites of Pliocene reservoir sands in upper-slope canyon environments, offshore Krishna-Godavari Basin (India): Implications[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(9): 736-756
- 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 [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]
- 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流集体的首次发现 [J]. *岩性油气藏*, 2009, 21(4): 19-21 [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Wanyan Rong, *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, 陈启林, 等. 大型坳陷湖盆沉积坡折带特征及其对砂体与油气的控制作用——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. *沉积学报*, 2010, 28(4): 717-729 [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Chen Qilin, *et al.* Characteristics of slope break belt in large depression lacustrine basin and its controlling effect on sandbody and petroleum; Taking the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin as an example[J]. *Acta Sedimentary Sinica*, 2010, 28(4): 717-729]
- 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 [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 Ordos Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(3): 286-294]
- 潘树新, 郑荣才, 卫平生, 等. 陆相湖盆块体搬运体的沉积特征、识别标志与形成机制 [J]. *岩性油气藏*, 2013, 25(2): 9-18 [Pan Shuxin, Zheng Rongcai, Wei Pingsheng, *et al.* Deposition characteristics, recognition mark and form mechanism of mass transport deposits in terrestrial lake Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2013, 25(2): 9-18]
- Lowe D R. Sediment gravity flows: II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1982, 52(1): 279-297
- Kneller B, Branney M J. Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive beds [J]. *Sedimentology*, 1995, 42(4): 607-616
- Mulder T, Alexander J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 269-299
- Shanmugam G. High-density turbidity currents: are they sandy debris flows? [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1996, 66(1): 2-10
- Shanmugam G. Ten turbidite myths [J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 58(3/4): 311-341
- Shanmugam G. New perspectives on deep-water sandstones: Implications [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(3): 316-324
- Stow D A V, Johansson M. Deep-water massive sands: nature, origin and hydrocarbon implications [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(2): 145-174
- Talling P J, Masson D G, Sumner F J, *et al.* Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types [J]. *Sedimentology*, 2012, 59(7): 1937-2003
- Kuenen P H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. *The Journal of Geology*, 1950, 58(2): 91-127
- Bouma A H. *Sedimentology of Some Flysch Deposits* [M]. Amsterdam: Elsevier Publication, 1962: 168
- 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(2): 285-342
- Gee M J R, Masson D G, Watts A B, *et al.* The Saharan debris flow: An insight into the mechanics of long-runout submarine debris flows

- [J]. *Sedimentology*, 1999, 46(2): 317-335
- 27 Surlyk F, Noe-Nygaard N. Sand remobilization and intrusion in the Upper Jurassic Hareelv Formation East Greenland[J]. *Bulletin of the Geological Society of Denmark*, 2001, 48: 169-188
 - 28 Mellere D, Plink-Björklund P, Steel R. Anatomy of shelf deltas at the edge of a prograding Eocene shelf margin, Spitsbergen[J]. *Sedimentology*, 2002, 49(6): 1181-1206
 - 29 McHugh C M G, Damuth J E, Mountain G S. Cenozoic mass-transport facies and their correlation with relative sea-level change, New Jersey continental margin[J]. *Marine Geology*, 2002, 184(3/4): 295-334
 - 30 Amy L A, Talling P J, Peakall J, *et al.* Bed geometry used to test recognition criteria of turbidites and (sandy) debrites[J]. *Sedimentary Geology*, 2005, 179(1/2): 163-174
 - 31 Mitchell J K, Holdgate G R, Wallace M W, *et al.* Marine geology of the Quaternary Bass Canyon system, southeast Australia: a cool-water carbonate system[J]. *Marine Geology*, 2007, 237(1/2): 71-96
 - 32 Gervais A, Mulder T, Savoye B. Sediment distribution and evolution of sedimentary processes in a small sandy turbidite system (Golo system, Mediterranean Sea): implications for various geometries based on core framework[J]. *Geo-Marine Letters*, 2006, 26(6): 373-395
 - 33 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
 - 34 Draganits E, Schlaf J, Grasemann B, *et al.* Giant submarine landslide grooves in the Neoproterozoic/Lower Cambrian Phe Formation, northwest Himalaya: mechanisms of formation and palaeogeographic implications[J]. *Sedimentary Geology*, 2008, 205(3/4): 126-141
 - 35 Encinas A, Finger K L, Nielsen S N, *et al.* Rapid and major coastal subsidence during the late Miocene in southcentral Chile[J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2008, 25(2): 157-175
 - 36 Migeon S, Ducassou E, Le Gondec Y, *et al.* Lobe construction and sand/mud segregation by turbidity currents and debris flows on the western Nile deep-sea fan (Eastern Mediterranean) [J]. *Sedimentary Geology*, 2010, 229(3): 124-143
 - 37 Olson H C, Damuth J E. Character, distribution and timing of latest Quaternary mass-transport deposits in Texas-Louisiana intraslope basins based on high-resolution (3.5 kHz) seismic facies and Piston Cores[C]// Mosher David C, Craig Shipp R, Moscardelli Lorena, *et al.* Submarine Mass Movements and Their Consequences: Advances in Natural and Technological Hazards Research, 2010, 28: 607-617
 - 38 Zou C N, Wang L, Li Y, *et al.* Deep-lacustrine transformation of sandy debrites into turbidites, Upper Triassic, Central China [J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 265/266: 143-155
 - 39 Marr J, Harff P, Shanmugam G, *et al.* Experiments on subaqueous sandy debris flows. Supplement to EOS Transactions, AGU Fall Meeting, San Francisco, 1997, 78(46): 347
 - 40 Driscoll N, Nittrouer C. Source to Sink Studies[R]. *Margins Newsletter*, 2002, 5: 1-24
 - 41 杨俊杰. 鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律[M]. 北京:石油工业出版社, 2002 [Yang Junjie. Structural Evolution and Petroleum Distribution Rules in Ordos Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002]
 - 42 Li Xiangbo, Chen Qilin, Liu Huaqing, *et al.* Features of sandy debris flows of the Yanchang Formation in the Ordos Basin and its oil and gas exploration significance[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(5): 1187-1202
 - 43 付锁堂, 邓秀芹, 庞锦莲. 晚三叠世鄂尔多斯盆地湖盆沉积中心厚层砂体特征及形成机制分析[J]. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1081-1089 [Fu Suotang, Deng Xiuqin, Pang Jinlian. Characteristics and mechanism of thick sandbody of Yanchang Formation at the centre of Ordos Basin [J]. *Acta Sedimentary Sinica*, 2010, 28(6): 1081-1089]
 - 44 贺静, 冯胜斌, 袁效奇, 等. 鄂尔多斯盆地周缘延长组露头剖面砂岩组分及地质意义分析[J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(6): 30-43 [He Jing, Feng Shengbin, Yuan Xiaqi, *et al.* Sandstone component of outcrops of Yanchang Formation in the margin of Ordos Basin and its geological significance[J]. *Lithological Reservoir*, 2011, 23(6): 30-43]
 - 45 乔秀夫, 李海兵. 沉积物的地震及古地震效应[J]. *古地学期刊*, 2009, 11(6): 593-610 [Qiao Xiufu, Li Haibing. Effect of earthquake and ancient earthquake on sediments[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2009, 11(6): 593-610]
 - 46 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 [Wang Deping. The sedimentation and formation mechanism of lacustrine endogenic debris flow[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1991, 65(4): 299-317]
 - 47 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 [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]
 - 48 方小敏, 沈明智, 牟响智. 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 [Fang Xiaomin, Shen Mingzhi, Mu Yunzhi. Preliminary exploration on microscopic structure and the forming mechanism of debris flow in Wudu[J]. *Science China (Seri. B)*, 1991, (2): 205-215]
 - 49 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 [Wang Yuelun, Jia Lanpo. Observation of glacier in Quaternary in Zhoukoudian [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1952, 32(1/2): 16-25]
 - 50 李四光. 华北平原西北边缘地区的冰碛和冰水沉积[C]//中国第四纪冰川遗迹研究文集. 北京: 科学出版社, 1964: 1-13 [Li Siguang, Glacial material and glacial water sedimentation in the north-western margin of Huabei Plain[C]// Research Atlas of Quaternary Glacial Remains. Beijing: Science Press, 1964: 1-13]
 - 51 赵国龙, 朱洪森, 李泊洋, 等. 论内蒙古第四纪冰川和冰臼群的成因[J]. *中国区域地质*, 2001, 20(2): 200-205 [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]
 - 52 王昌勇, 郑荣才, 高博禹, 等. 珠江口盆地荔湾井区珠江组深水扇沉积特征[J]. *中国地质*, 2010, 37(6): 1628-1637 [Wang Chan-

- gyong, Zhen Rongcai, Gao Boyu, *et al.* Deepwater fan sedimentary characteristics of Zhujiang Formation in Liwan area of Zhujiang River mouth basin[J]. *Geology in China*, 2010, 37(6): 1628-1637]
- 53 乔秀夫,郭宪璞,李海兵,等. 龙门山晚三叠世软沉积物变形与印支期构造运动[J]. *地质学报*, 2012, 86(1): 132-156 [Qiao Xiufu, Guo Xianpu, Li Haibing, *et al.* Soft-sediment deformation in the Late Triassic and the Indosinian Tectonic Movement in Longmenshan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(1): 132-156]
- 54 郑荣才,文华国,韩永林,等. 鄂尔多斯盆地白豹地区长6油层组湖底滑塌浊积扇沉积特征及其研究意义[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2006, 33(6): 566-575 [Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Han Yonglin, *et al.* Discovery and significance of sublacustrine slump turbidite fans in Chang 6 oil-bearing formation of Baibao region in Ordos Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Natural Science Edition*, 2006, 33(6): 566-575]
- 55 李元昊,刘池洋,王秀娟. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组震积岩特征研究[J]. *沉积学报*, 2008, 26(5): 772-779 [Li Yuanhao, Liu Chiyang, Wang Xiujuan. Discovery and significance of seismites in Late Tertiary Yanchang Formation of Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(5): 772-779]
- 56 李相博,刘化清,陈启林,等. 鄂尔多斯晚三叠世盆地构造属性及盆地后期改造问题[J]. *石油实验地质*, 2012, 34(4): 376-382 [Li Xiangbo, Liu Huaqing, Chen Qilin, *et al.* Tectonic properties and post-reformation in Late Triassic, Ordos Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2012, 34(4): 376-382]
- 57 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
- 58 Johnson A M. *Physical Processes in Geology* [M]. San Francisco: Freeman, Cooper & Company, 1970: 17-18; 496-501; 517-519
- 59 Hooyer T S, Iverson N R. Clast-fabric development in a shearing granular material: Implications for subglacial till and fault gouge[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(5): 683-692
- 60 Hölzel M, Grasemann B, Wagreich M. Numerical modelling of clast rotation during soft-sediment deformation: A case study in Miocene delta deposits[J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2006, 95(5): 921-928

“Argillaceous parcel” Structure: A direct evidence of debris flow origin of deep-water massive sandstone of Yanchang Formation, Upper Triassic, the Ordos Basin

LI Xiang-bo^{1,2} LIU Hua-qing^{1,2} ZHANG Zhong-yi³ YUAN xiao-qi³
WANYAN Rong^{1,2} NIU Hai-qing^{1,2} LIAO Jian-bo^{1,2} WANG Jing^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Reservoir Description, CNPC, Lanzhou 730020;

3. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, China, Xi'an 710018)

Abstract: Subaqueous debris flow controlled by mass transport process is a sedimentation type in deep-water (deep-marine or deep-lacustrine) environment increasingly recognized in recent years. However, at present, there are no accepted criteria to identify the mass transport process of subaqueous sediments. Through the geological survey of several outcrop profiles in the center of the Ordos lacustrine basin, a kind of “argillaceous parcel” structure has been found for the first time in deep-water thick massive sandstone of Yanchang Formation, and its formation and evolution process have been analyzed. What we can conclude is that this sedimentary structure is mainly related to the specific formation mechanism and development process of “debris flow” in delta front. Its formation process shows that the sediments containing it were characterized by transportation of particles en masse (Bingham plastics) and supported by the strength of medium at all times. Accordingly, we are confident that the “argillaceous parcel” structure is the one of most significant evidence indicating the origin of deep-water thick massive sandstone of Yanchang Formation as debris flow. Consequently, the model of transport process from the start to transport and then to sedimentation of Yanchang Formation deep-water sandstone is established. Moreover, this paper attempts to point out that the “argillaceous parcel” structure is also a key identification marker for identifying the mass transport and its process in deep-marine sedimentation, and that our work is not only significant for the global deep-water (deep-marine and deep-lacustrine) oil & gas exploration but also positive for the “source to sink” research of sediments in the continental margins that is widely performed in the current geoscience field.

Key words: “argillaceous parcel”; mass transport; sandy debris flow; Yanchang Formation; Ordos Basin