

文章编号: 1000-0550(2009) 06-1065-11

陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征¹ ——以鄂尔多斯盆地为例

邹才能¹ 赵政璋² 杨 华³ 付金华³ 朱如凯¹ 袁选俊¹ 王 岚¹

(1 中国石油勘探开发研究院 北京 100083 2 中国石油天然气总公司 北京 100724 3 中国石油长庆油田分公司 西安 710021)

摘 要 国外深水沉积发展了 50 年,从浊流定义的普遍应用,到今天对鲍马序列、约克扇等经典模式持否定态度,深水沉积研究经历了一个推陈出新的过程。目前国外流行的砂质碎屑流理论是经典浊流理论的部分否定与新发展。本研究阐述国外砂质碎屑流的概念、实验、鉴别特征、沉积模式等最新认识,以运用砂质碎屑流理论解释鄂尔多斯盆地湖盆中部厚砂岩的成因机制为例,揭示我国陆相湖盆中心坡折带砂体分布特征与形成机制,为开拓陆相勘探领域提供理论支撑。

关键词 重力流 浊流 砂质碎屑流 鄂尔多斯盆地 相模式

第一作者简介 邹才能 男 1963 年出生 教授 沉积学及石油地质学 E-mail: zrc@petrochina.com.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

深水沉积是石油工业界勘探与研究最感兴趣的领域之一。从 1859—2007 年全球共发现大油气田(石油可采储量大于 0.685 亿吨,天然气可采储量大于 850 亿方)共 945 个,其中属被动陆缘深水环境的油田 341 个,占总发现量的 34%。巨大勘探成效使得各国地质学家们不断建立深水模式,发现更多砂体。我国广泛发育大型内陆湖盆,深水重力流沉积在每个湖盆中心部位均有发育,但普遍认为规模较小。2006 年长庆油田在白豹地区三叠系延长组长 6 层系发现面积为 3 000 km² 的大面积深水含油砂岩,形成 3 ~ 5 亿吨级储量,引起沉积学者对湖盆中部地区砂体成因的广泛关注。本文作者通过大量资料查询、露头与岩心观察、砂体形态分析,认为鄂尔多斯盆地湖盆中心厚砂岩为砂质碎屑流沉积。其他如渤海湾、松辽、四川等盆地的坡折带和湖盆中心均可能发育大规模砂质碎屑流沉积,改变了传统认识——湖盆中部只发育规模较小浊流的观点。

1 深水重力流理论的国内外发展演化

与三角洲、河流沉积相研究相比,深水重力流研究起步较晚。大洋中高密度流冲断海底电缆引起学者的注意。1948 年, Kuenen 提出海底峡谷可能由高密度流侵蚀形成,并于 1950 年发表“浊流形成粒序层理”一文,是重力流理论研究的开端^[1]。20 世纪 50

到 70 年代是重力流沉积模式的建立时期,不断有学者提出新的深水沉积模式,其中有影响力的为鲍马序列^[2,3]与约克综合扇模式^[4]。Waker^[5]把 Nomak 现代扇模式和 Mutti^[6] 古代海底扇的相概念结合起来,提出的综合扇模式由于其预测能力在油气勘探上受到重视。随着人们对深水沉积认识的深入,有学者撰文质疑鲍马序列和扇模式,并指出现代和古代扇系统比我们想像的要复杂^[7,8]。1994 年美国石油地质家协会联合科罗拉多矿院、斯坦福大学、Exxon 公司等多家单位考察 Ouachita 山深水沉积剖面,并在 AAPG 撰文各抒己见,其中 Sharmugan 提出的砂质碎屑流概念及实验具有深远意义(图 1)。

国内学者对深水重力流的研究很多,如吴崇筠根据浊积砂体在湖盆中所处的位置和形态,将湖相浊积岩体系归纳为六种成因类型。基于对东部断陷盆地的研究,认为湖盆陡坡带边界大断层的下降盘广泛发育近岸浊积扇体;湖盆缓坡广泛发育带供给水道的远岸浊积扇,两种扇体可细分为内扇、中扇与外扇三个相带^[23]。此后学者对于深水重力流的相带划分有不同理解,分别运用远源与近源、薄层与厚层、粗粒与细粒、典型与非典型、坡移与滑塌等术语进行描述和分类^[9~13]。

总的看来,国内学者出于研究实用性的考虑,对深水重力流的研究集中于沉积的环境、相带划分与含

¹ 国家重大专项(项目编号: 2008ZX05001)资助。

收稿日期: 2009-02-22 收修稿日期: 2009-06-27

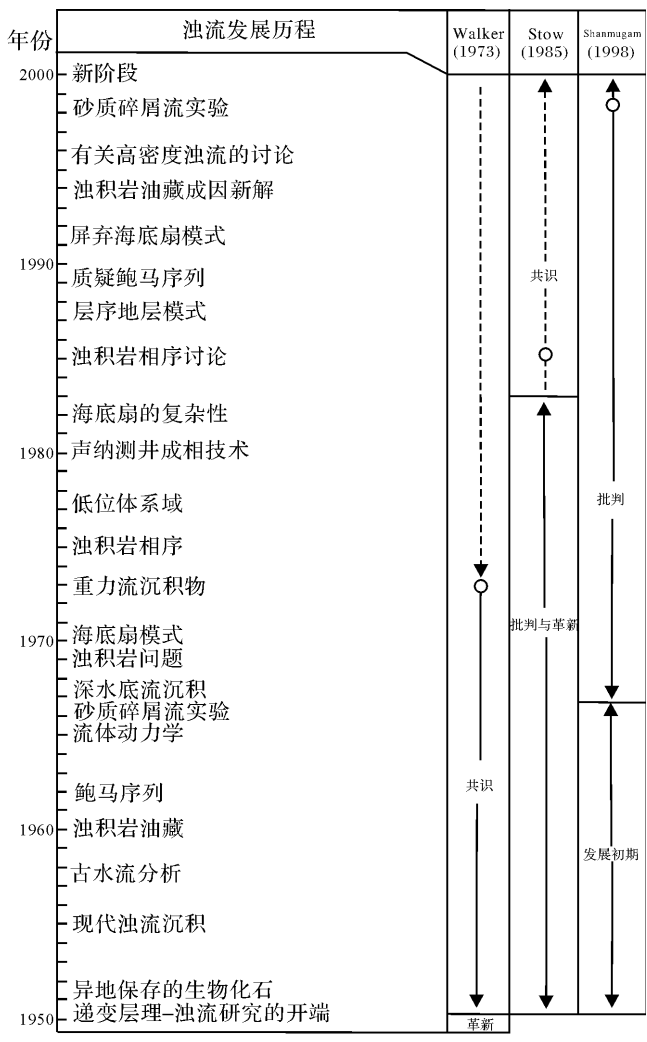


图 1 深水理论发展简表 (据 Shanmugan 修改, 2000)

Fig 1 Important contributions to deep-water research made during the past 50 years (after Shanmugan, 2000)

油性三个方面,而对深水重力流的流动机制研究涉及较少。

2 重力流沉积认识误区与砂质碎屑流

2.1 重力流沉积认识误区

沉积学界对于重力流沉积的认知程度存在差别,总的来说可概括为以下两个方面:浊积岩的内涵与鲍马序列重新解释。

深水重力流根据其沉积物支撑机制可分为颗粒流、沉积物液化流、碎屑流与浊流。有学者将这四种重力流沉积物统称为浊积岩,事实上浊积岩只是浊流沉积的产物(图 2)。浊流是一种紊流支撑的悬浮搬运,其沉积物表现为沉积颗粒的顺序排列,即粒序层理,鲍马序列 A 段的下部。A 段的上部块状层理被

解释为砂质碎屑流沉积,而 B、C、D 段则被解释为深水底流沉积或者牵引流的产物。换句话说,鲍马序列是深水沉积的岩相组合,包含多种流态的沉积物,只有粒序层理是鉴别浊流的标志。

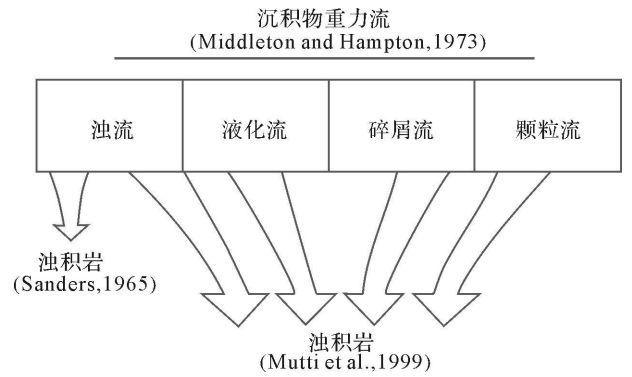


图 2 浊积岩的不同定义 (据 Shanmugan 修改, 2002)

Fig 2 Two differing definitions of the term "turbidites" (modified from Shanmugan, 2002)

在浊流理论逐渐更新的过程中建立的砂质碎屑流概念是对重力流理论的部分否定与补充,浊流与砂质碎屑流理论共同解释深水沉积物更加准确和完善。

2.2 砂质碎屑流

砂质碎屑流由 Hampton^[14]引入, Shanmugan 等美国学者在 365 m 的露头观察与 4 650 m 岩心分析的基础上完善砂质碎屑流概念^[15~22]。他认为浊流沉积在深水沉积物中所占比例较小,绝大部分为砂质碎屑流与底流改造沉积物。砂质碎屑流代表在粘性与非粘性碎屑流之间的连续作用过程,从流变学的特征看属于宾汉塑性流体,具有分散压力、基质强度和浮力等多种支撑机制。流体浓度较高,泥质含量低到中等,颗粒沉积时表现为整体固结。

砂质碎屑流与浊流的区别表现在流态、流变特征、流体浓度、发育位置、平面展布、砂体形态等 7 个方面(表 1)^[23]。挪威 Oslo 大学水槽实验研究表明,一期重力流中,密度大的砂质碎屑流分布在流体的底部,密度小的浊流分布于顶部和前端^[24],因此在沉积盆地中,浊流可以延伸盆地平原,砂质碎屑流往往在盆地斜坡部位沉积下来。

3 鄂尔多斯盆地中心白豹地区三叠系长 6 深水重力流沉积

3.1 区域地质背景分析

鄂尔多斯盆地北与河套盆地为邻,南接渭北隆起,东邻晋西挠褶带与吕梁隆起呼应,西缘以冲断沟

造带与六盘山对峙, 主体位于伊陕斜坡带。现今的的鄂尔多斯盆地构造轮廓总体呈东翼陡窄的南北向矩形盆地, 面积 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。内部构造简单, 呈平均地层层坡度不足 1° 的不对称西倾单斜构造。可划分为陕北斜坡、天环向斜、伊蒙隆起、中央古隆起、晋西挠折

带、渭北隆起六大一级构造单元(图 3)。上三叠统延长组自下而上划分为 5 个岩性段、10 个油层组(图 4)。盆地南部延长组沉积在纵向上可划分为河流相、浅湖—三角洲相、半深湖—深湖相、三角洲相及河流—沼泽相。

表 1 浊流与砂质碎屑流的差异性比较

Table 1 Comparison of turbidity currents and sandy debris flws

分类	流态	流变特征	流体浓度	层理构造	分布位置	平面展布	剖面形态
浊流	紊流	牛顿流体	< 28%	粒序层理	流体的顶部或前端	有水道扇体	孤立透镜状或薄层席状
砂质碎屑流	层流	宾汉塑性体	> 50%	块状层理, 顶部有漂浮泥砾	流体的底部	不规则舌状体	连续块状

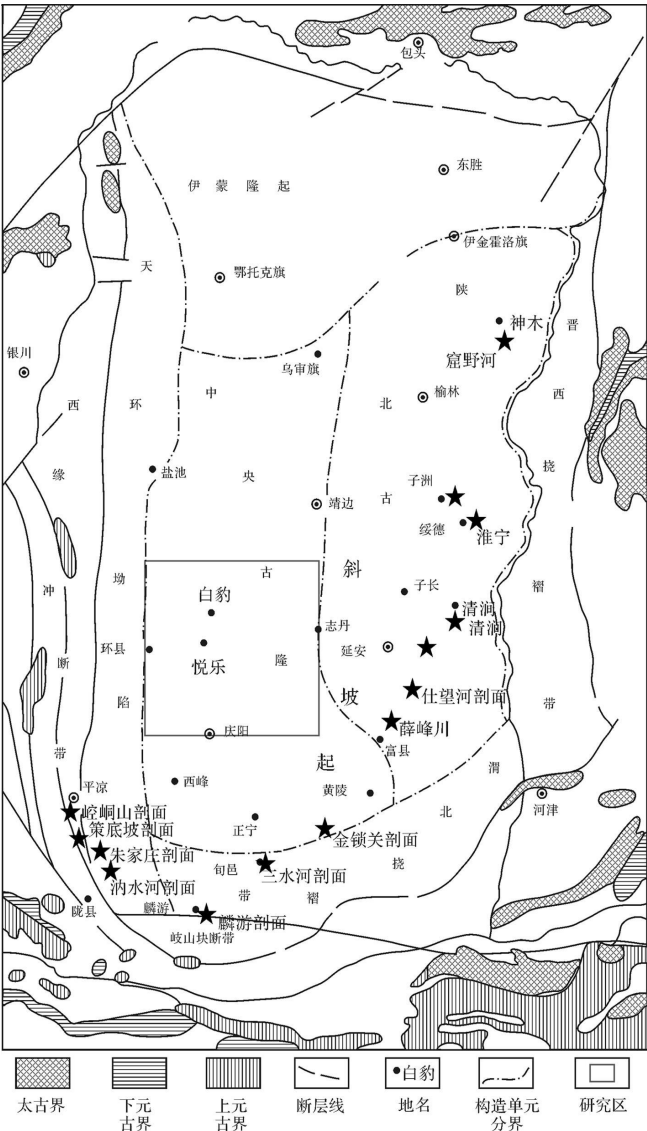


图 3 鄂尔多斯盆地构造区划分及研究区位置图

Fig 3 Sketch map of tectonic units of Ordos Basin and location of Baibao area

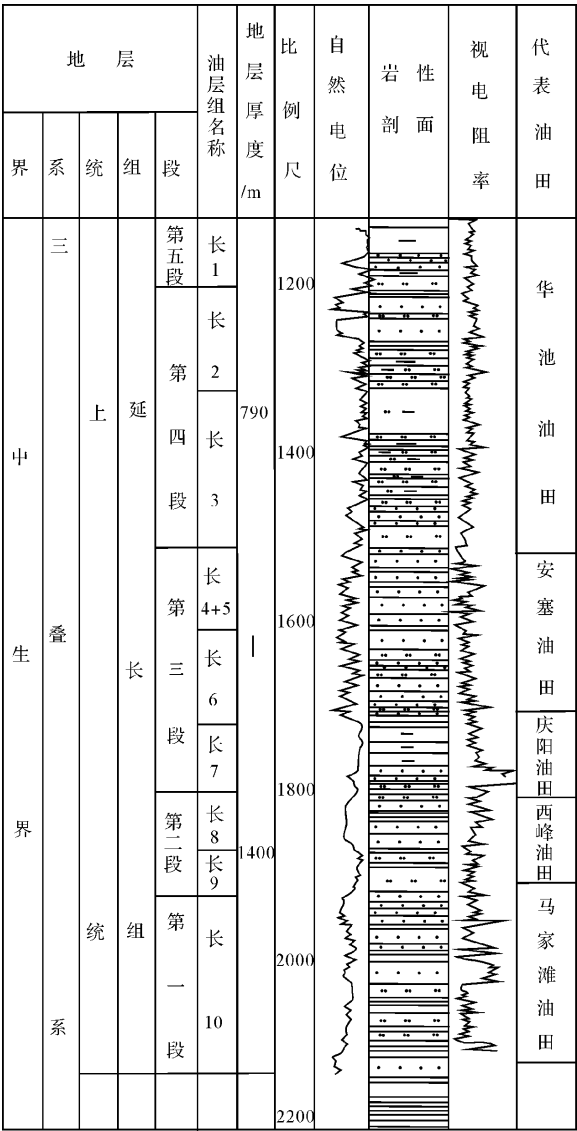


图 4 鄂尔多斯盆地延长组综合柱状图

Fig 4 The comprehensive stratigraphic column of Yanchang Formation of Ordos Basin

研究区白豹位于盆地陕北斜坡一级构造单元中西部(图 3),东西宽 73 km,南北长 79 km,面积约 5 760 km²。近年来,通过对该地区的勘探与初期研究,提出上三叠统“长 6 期湖盆中部大面积含砂”的新认识,改变了“湖盆中心以泥质岩为主,缺乏有效储层”的观点,开辟勘探新领域。

3.2 研究区深水重力流沉积标志

(1) 深湖相泥岩

深湖相泥岩是判断重力流的重要指标。如果一套砂岩中找不到典型的沉积构造标志,也可根据其下部的泥岩来判断。研究区长 6 小层处于长 7 湖盆逐渐萎缩时期,因而深湖相泥岩发育。岩心中可观察到黄铁矿、鱼化石、鱼鳞片等指示深湖环境的标志(图版 iv-a, b, c, d)。鱼鳞为方形并可见生长纹理,经鉴定为狼鲭鱼。岩心中发现腹足类化石,说明延长组长 6 沉积期的湖泊并不是封闭湖盆,有可能与盆地西部海域连通。

(2) 底部印模构造

形成于泥质沉积物表面上的冲刷痕,通常以上覆砂质层底面的铸模形式保存下来。这种构造主要发育于粉、细砂岩与泥岩的接触面上。在岩心中可观察到槽模、沟模等铸模构造,说明长 6 期该区发生了大规模重力流沉积(图版 iv-e, f)。

(3) 岩性突变面

细砂岩、粉细砂岩与其底部泥岩截然接触,接触面平直也是重力流沉积的重要标志。细砂岩厚度不等,从几米到几厘米均有,较厚砂岩一般含油,底部含有炭屑(图版 iv-g, h)。

(4) 准同生变形构造

准同生变形构造种类较多,岩心上现象较为丰富。根据作用因素不同可以分为:重力引起的差异负载或者超负载、沉陷作用、滑塌或滑动作用。由此形成的变形构造也较为常见,如负载囊、火焰构造、球状构造、滑塌角砾岩等。由沉积物液化引起的未固结沉积物喷出、注入或者侧向流动等作用过程,在岩心上表现为包卷层理、碎屑脉等构造(图版 ⑤-a, b, c, d, e, f)。

3.3 研究区重力流相特征与分析

砂质碎屑流的鉴定标志包含以下几个方面:①底部发育具剪切带的块状砂岩;②块状砂岩顶部有漂浮的泥岩碎屑集中存在的现象,并可表现为逆粒序;③存在板条状碎屑和页岩碎屑;④顶部接触面不规则,沉积几何体侧向尖灭。

白豹地区砂质碎屑流最具代表性的标志为含泥砾砂岩与无任何层理的块状砂岩。含泥砾砂岩的岩性较细,为细砂岩—粉细砂岩,泥砾的粒径差异较大。较为常见的泥砾直径约 3~5 cm,宁 36 井的泥砾直径可达 10 cm(图 5)。砾石的大小可能与滑塌变形的规模有关,也与运移距离的长短有关,岩心观察表明,较大的砾石还保留有原始的沉积构造—水平层理,泥砾均有棱角,说明这些页岩被打碎搬运后快速凝结下来;而大部分泥砾经过长时间搬运,颗粒大小趋于一致并逐渐被磨圆,因而在岩心中表现为质纯的椭圆状黑色泥砾,这种泥砾漂浮在基质之中的结构构造更加接近碎屑流沉积的“漂砾构造”。含泥砾的构造特征表明流体是呈层状流动的碎屑流,而不是紊乱状态的浊流。

由于这些泥砾的存在,含泥砾细砂岩几乎不具备储集性能,岩心中极少见含油含砾砂岩,仅在元 284 这口高产井中见到 7 cm 含油含砾砂岩,但该层段没有产出。部分井中含油含砾细砂岩有明显的钙质胶结现象,主要原因是泥砾中碱性地层水被压入砂岩,使得砂岩孔隙中产生碳酸盐岩沉淀。

块状砂岩是研究区重要储集层,岩心中可见大量含油块状砂岩,单层厚度 0.6~1.5 m,累计厚度可达 10~20 m,这些块状砂岩的存在是长 6_油层组高产的原因。块状砂岩中高角度裂缝发育,裂缝面可见碳酸盐岩脉充填。

当前流行的浊流理论认为只有这种呈正递变粒序的砂岩才是真正的浊流沉积,从流态的角度分析,只有紊流才能让沉积物颗粒按照比重依次沉降。侯方浩在《沉积构造》一书中展示许多渤海湾盆地湖底扇岩心照片,正递变砂岩是从砂砾岩到细砂岩的转变。而研究区由于沉积物颗粒较细,底部往往是灰色粉细砂岩或者粉砂岩,逐渐向上过渡为黑色泥岩(图 6)。颜色的转变远比粒度的变化更加明显。究其原因,可能是东部渤海湾断陷湖盆的沉积区离源区较近,洪水可将较大的颗粒带入湖底。而鄂尔多斯盆地河流源远流长,三角洲前缘河道沉积都少见中砂岩,所以其前端浊流沉积物粒度更细。典型浊流沉积在白 281 井部分层段有发现。该井粒序层理砂岩岩性极细,主要为粉细砂岩,少见细砂岩。砂岩与底部泥岩接触面平直,表明底部无冲刷;砂岩顶部可见水平层理,可能是底流形成的牵引流沉积构造。浊流形成沙泥岩薄互层厚度较小,单层厚度小于 3 cm,旋回也较少,可见重荷模。研究区浊流沉积规模很小,不能



图 5 山 140 井磨圆泥砾与宁 36 井具页理构造的泥砾
Fig 5 Discontinuous silt lenses of Well Shan 140 and Ning 36

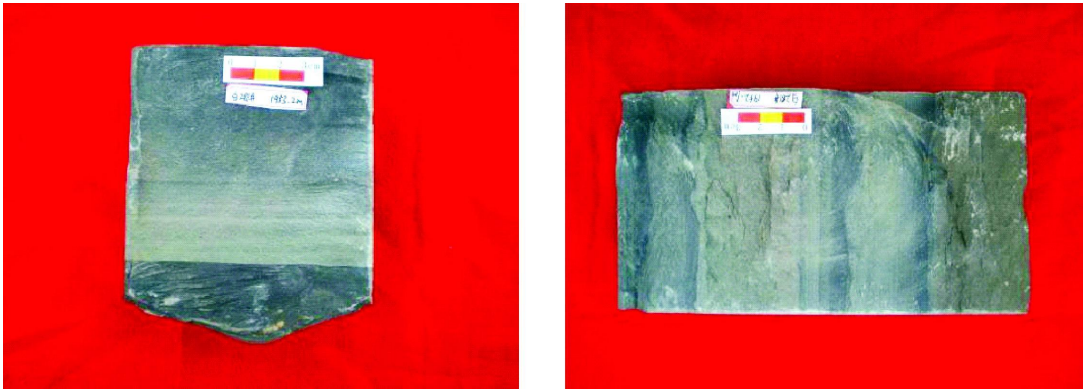


图 6 白 281 井浊流沉积
Fig 6 The deposits of turbidity currents of Well Bai 281

形成储集砂体。

3 4 研究区重力流沉积模式与相带划分

根据重力流沉积物特征及其发育的相关位置, 研究区的重力流沉积模式如图所示 (图 7)。三角洲前缘由于砂体快速堆积, 沉积物常常不稳定, 在外界触发机制下, 发生滑动形成重力流沉积。在触发力下, 松动的岩层首先发生滑动崩塌, 然后发生滑塌, 这时岩层可能由一个整体破碎成多个块体, 伴随大量的软沉积物变形。随后随着水体注入, 岩层块体破碎搅浑, 以碎屑流的形式呈层状流动, 在三角洲前缘台缘带斜坡上及深湖平原上形成大面积的砂质碎屑流舌状体, 碎屑流沉积物的前方或者顶部发育少量的浊流沉积。在岩心中可观察到浊积岩与砂质碎屑流形成互层。

对于三角洲前缘滑塌浊积岩成因研究, 赵密福^[25]等认为洼陷带开阔程度和沉积古地形、水动力条件和三角洲的规模、高建设性、三角洲前缘位置的变化和盆地的演化是控制滑塌浊积岩形成和发育的主要控制因素。邱桂强^[26]、陈嘉树^[27]等则偏重于强

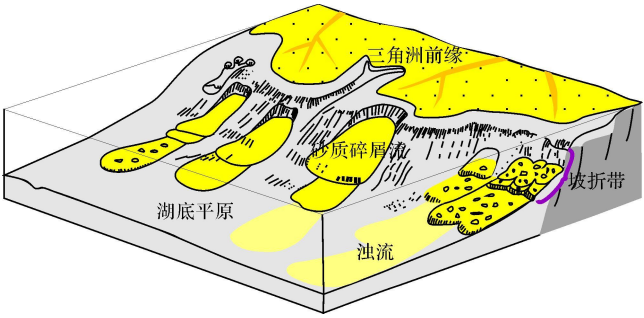


图 7 砂质碎屑流沉积模式
Fig 7 The sandy debris depositional model

调地形的重要性。鄢继华^[28]通过水槽实验总结出四种滑塌浊积岩类型: 无触发机制的天然滑塌、与波浪作用相关的滑塌、与地震作用相关的滑塌、与底形相关的砂岩透镜体。该学者认为地震和波浪以及堆积过甚作用是最主要触发机制。

笔者认为这种重力流模式与盆地的潮湿气候环境与构造特点有密切关系。鄂尔多斯盆地延长组沉积期气候潮湿, 物源供给充足, 湖区宽浅, 湖浪作用微

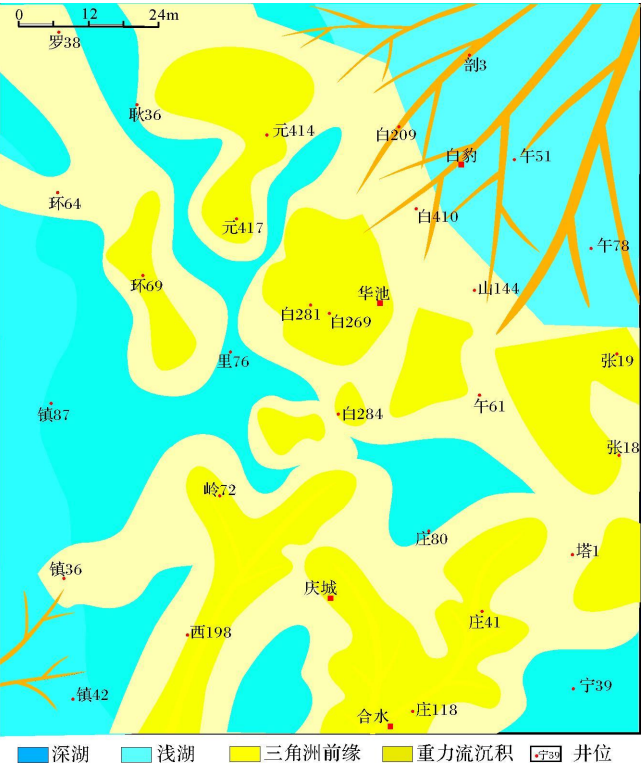


图 9 鄂尔多斯盆地湖盆中心长 6 沉积相平面展布图

Fig 9 The sedimentary facies distribution of Chang 6 interval in Ordos Basin

泥质充填。而发育于扇三角洲和浊积扇中的碎屑流沉积也为砂、泥基质支撑的砾石, 故而孔隙不发育。由此在相带分析中, 碎屑流沉积不作为储层考虑。砂质碎屑流实验证明这种流态可以形成纯净的, 泥质含量低 ($< 1\%$) 的底部砂岩。研究区这种块状纯净的含油砂岩非常发育 (图版 ㉔-h), 日产上百吨的元 414 井的产油层段主要发育这种块状砂岩。元字号砂带上每口井中都能发现块状砂岩和含泥砾的细砂岩, 各井产油能力因储层条件不同而有差异。

通过对研究区的砂体分布及沉积相带分布综合对比, 我们不难发现, 三角洲前缘相带广泛发育砂质碎屑流, 与三角洲前缘呈共生关系。白豹地区的砂质碎屑流沉积没有固定提供补给的浊流水道, 但砂体具有纵向延伸不远、横向叠置连片的特点。因此勘探中应该质疑断陷湖盆中沿浊流水道纵向寻找浊积扇的策略, 在松辽、渤海湾等盆地沿湖岸线平行方向在坡折带下寻找砂质碎屑流的叠置大规模砂体。

4 结论与意义

在大量露头与岩心观察基础上建立的砂质碎屑

流理论, 是对现行经典浊流理论的部分否定与补充。在许多深水盆地中, 运用浊流的鲍马序列、扇模式等不能够完全解释所有的深水重力流, 更多深水砂体是砂质碎屑流的产物。砂质碎屑流与普通泥石流不同, 是一种泥质含量少、体积浓度较大、具多种支撑机制、层流为主、整体固结的宾汉塑性流体。其沉积物呈不规则的朵叶状, 无固定水道。

鄂尔多斯盆地白豹地区长 6 油层组发育大套深水砂岩。砂岩中可见砂质碎屑流两种基本岩性: 较纯净的块状砂岩与含有泥砾的细砂岩, 正粒序浊积岩不发育, 块状含油砂岩是该区的主要储集岩性, 侧向具一定连续性, 垂向累积厚度较大。砂质碎屑流的朵体发育于三角洲缘的坡折带下, 纵向延伸不远但横向叠置连片, 是湖盆斜坡与中心部位最有利的目标区。

在国内深水研究中, 浊积岩占主导地位, 砂质碎屑流引入陆相湖盆解释深水重力流是一个新的观点与认识。新的沉积模式可以使我们对陆相湖盆斜坡和深水区有不一样的视角, 提出新的目标区, 对勘探部署有一定的指导作用。目前这方面的工作还需进一步深化, 我们对于深水环境下沉积作用和砂的分布的理解仍然不深。特别是砂质碎屑流沉积的地震反映与测井响应识别还是亟待探索的问题。我们已经认识到, 就地形、沉积作用、几何形态、堆积方式而言, 深水系统是及其复杂的, 也意识到没有一个单一的相模式能够解释复杂深水环境中的所有变化^[31]。我们预测砂质碎屑流在我国松辽、渤海湾、四川等陆相湖盆乃至海相盆地中是广泛分布与存在的。

致谢 在研究过程中得到了薛叔浩、顾家裕等专家以及长庆油田相关专家的指导和帮助, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

1 Kuenen Ph H, Migliorini C I Turbidity currents as a cause of graded bedding[J]. Journal of Geology, 1950, 58 97-127

2 Bouma A H. Sedimentology of Some Flysch Deposits a Graphic Approach to Facies Interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier Pub Co 1962, 88-123

3 Bouma A H. Recent and ancient turbidites and contourites[J]. Transactions-Gulf Coast Association of Geological Societies 1962, 22 205-221

4 Normark W R. Growth patterns of deep sea fans[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 1970, 54 2170-2195

5 Walker R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans models for exploration for stratigraphic traps[J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 1978 62 932-966

- 6 Mutti F, Ricci Lucchi F. Turbidites of the northern Apennines: introduction to facies analysis[J]. *International Geology Review*, 1972, 20: 125-166
- 7 Walker R G. Turbidites and submarine fans[J]. *Geological Association of Canada*, 1992a: 239-263
- 8 Murray J R, Moore D G. Growth of the Bengal deep-sea fan and denudation in the Himalayas[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, 82: 563-572
- 9 吴崇筠, 李纯菊, 刘国华, 等. 断陷湖盆中的浊积岩[C]// 中国石油学会石油地质委员会主编. 碎屑岩沉积相研究. 北京: 石油工业出版社, 1988: 1-17[Wu Chongjun, Li Chunju, Liu Guohua, *et al*. Turbidites in faulted Lake Basin[C]// *Petroleum Geology Institute of Chinese Petroleum Society: Study of Clastic Sedimentary Facies* Beijing: Petroleum Industry Press, 1988: 1-17]
- 10 赵俊兴, 李凤杰, 申晓莉, 等. 鄂尔多斯盆地南部长6和长7油层浊流事件的沉积特征及发育模式[J]. *石油学报*, 2008, 29(3): 389-394[Zhao Junxing, Li Fengjie, Shen Xiaoli, *et al*. Sedimentary characteristics and development pattern of turbidity event of Chang6 and Chang7 oil reservoirs in the southern Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 29(3): 389-394]
- 11 傅强, 吕苗苗, 刘永斗, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世浊积岩发育特征及地质意义[J]. *沉积学报*, 2008, 26(2): 186-191[Fu Qiang, Lv Miao, Liu Yongdou, *et al*. Developmental characteristics of turbidite and its implication on petroleum geology in Late-Triassic Ordos Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(2): 186-191]
- 12 刘召君. 湖泊水下扇沉积特征及影响因素—以伊通盆地莫里青断陷双阳组为例[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1): 148-154[Liu Zhaojun. Lacustrine subaqueous fan sedimentary characteristics and influencing factors: A case study of Shuangyang Formation in Moling fault subsidence of Yitong basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(1): 148-154]
- 13 张金亮, 沈凤. 乌尔逊凹陷大磨拐河组近岸水下扇储层特征[J]. *石油学报*, 1991, 12(3): 25-35[Zhang Jinliang, Shen Feng. Characteristics of nearshore subaqueous fan reservoir in Damoguaihe Formation, Wuerxun Depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1991, 12(3): 25-35]
- 14 Hampton M A. Competence of fine-grained debris flows[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1975, 45: 834-844
- 15 Shamugan G, Moiola R J. An unconventional model for the deep-water sandstones of the Jackfork Group (Pennsylvanian), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma[C]. *Proceedings of Gulf Coast Section of Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Foundation 15th Annual Research Conference*, 1994: 311-326
- 16 Shamugan G, Moiola R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1995, 79: 672-695.
- 17 Shamugan G, Moiola R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma: Reply[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1997, 81: 476-491.
- 18 Shamugan G, Zinbrick G. Sandy slump and sandy debris flow facies in the Pliocene and Pleistocene of the Gulf of Mexico: implications for submarine fan models. In *Proceedings of American Association of Petroleum International Congress and Exhibition, Caracas, Venezuela, Official Program*, 1996: A45
- 19 Shamugan G, Bloch R B, Danuth, *et al*. Basin-floor fans in the North Sea: sequence stratigraphic models vs sedimentary facies Reply[J]. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 1997, 81: 666-672
- 20 Shamugan G, Hemance W E, Okiya J O, *et al*. Slump dominated upper slope reservoir facies. Intra-Quaiboe (Pliocene), Edop Field, Offshore Nigeria (abs.). In *Proceedings of American Association of Petroleum Geologists Annual Convention Official Program*, 1995: 88a
- 21 Shamugan G, Moiola R J, McPherson J G, *et al*. Comparison of turbidite facies associations in modern passive-margin Mississippi Fan with ancient active-margin fans[J]. *Sedimentary Geology*, 1988, 58: 63-77
- 22 Shamugan G. Ten turbidite myths[J]. *Earth-Science Reviews*, 2002, 58: 311-341
- 23 邹才能, 陶士振, 袁选俊, 等. 连续型油气藏形成条件与分布特征[J]. *石油学报*, 2009, 30(3): 324-331[Zou Caineng, Tao Shenzhen, Yuan Xuanjun, *et al*. The formation conditions and distribution characteristics of continuous petroleum accumulations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 30(3): 324-331]
- 24 Elverhoi A, Issler D, *et al*. Emerging insights into the dynamics of submarine debris flows[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005, 5: 633-648
- 25 赵密福, 信荃麟, 刘泽容. 惠民凹陷临南洼陷滑塌浊积岩的分布规律及其控制因素[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(3): 267-271[Zhao Mifu, Xin Quanchun, Liu Zerong. Distribution rules of fluxoturbidite in the Linnan sag of the Huimin depression and their control factors[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2001, 23(3): 267-271]
- 26 邱桂强, 王居峰, 张昕, 等. 东营三角洲沙河街组三段中亚段地层格架初步研究及油气勘探意义[J]. *沉积学报*, 2001, 19(4): 569-574[Qiu Guiqiang, Wang Jufeng, Zhang Xin, *et al*. Preliminary study on stratigraphic architecture of middle Shahan Dongying delta and its significance to hydrocarbon exploration[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(4): 569-574]
- 27 陈嘉树, 杨立明. 东辛地区沙河街组三段中部砂体沉积特征及控制因素[J]. *石油勘探与开发*, 1997, 24(5): 38-41[Chen Jiashu, Yang Liming. Sandbody characteristic and control factors in the middle third member of Shahejie Formation in Dongxin region[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1997, 24(5): 38-41]
- 28 鄢继华, 陈世悦, 宋国奇, 等. 三角洲前缘滑塌浊积岩形成过程初探[J]. *沉积学报*, 2004, 22(4): 573-578[Yan Jihua, Chen Shiwei, Song Guoqi, *et al*. Preliminary study on the formation of fluxoturbidite in front of delta[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(4): 573-578]
- 29 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 等. 大型敞流湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布[J]. *地质学报*, 2008, 82(6): 813-825[Zou

- Caineng ZhaoWenzhi ZhangXinyang *et al* Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins[J]. *Acta Geologica Sinica* 2008, 82(6): 813-825]
- 30 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 Hua-guo Han Yonglin Discovery and significance of sublacustrine slump turbidite fans in Chang 6 oil-bearing formation of Baibao region in Ordos Basin[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2006 33(6): 566-575]
- 31 王多云, 李凤杰, 王峰, 等. 储层预测和油藏描述中沉积学的一些问题[J]. 沉积学报, 2004, 22(2): 193-197[Wang Duoyun, Li Fengjie Wang Feng *et al* Some sedimentological problems on reservoir prediction and oil-pool characterization[J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2004 22(2): 193-197]
- 32 庞雄, 陈长民, 朱明, 等. 深水沉积研究前缘问题[J]. 地质论评, 2007, 53(1): 36-43[Pang Xiong Chen Changming Zhu Ming *et al* Frontier of the deep-water deposition study[J]. *Geological Review*, 2007, 53(1): 36-43]

Genetic Mechanism and Distribution of Sandy Debris Flows in Terrestrial Lacustrine Basin

ZOU Cai-neng¹ ZHAO Zheng-zhang² YANG Hua³ FU Jin-Hua³ ZHU Ru-kai¹
YUAN Xuan-jun¹ WANG Lan¹

(1 Research Institute of Petroleum Exploration & Development PetroChina Beijing 100083

2 Exploration & Production Company Petrochina Company Limited Beijing 100011;

3 Changqing Oilfield Company PetroChina Xian 710021)

Abstract The study of deep water sedimentation has developed fifty years. The misuse of term “turbidite” to deposits of deep water is common. Then the denial of Bouma sequence as the turbidite facies sequence and related fan depositional mode, the study on deep-water has undergone circle on cognition. The sandy debris theory is an innovation and negation to classical turbidity theory. The definition, experimentation, identification feature and sedimentation model were introduced in the passage. Applying the sandy debris theory to explain the reason why thick sand bodies could occur in the center of lake in Ordos basin. By the way, the mechanism and characteristic of sand body at slope in terrestrial lacustrine basin could be revealed. The theory would be one of theoretical basis to continental exploration.

Key words sediment-gravity flows, turbidity currents, sandy debris flows, Ordos Basin, facies mode



图版 iv 说明: a 鱼化石; h 黄铁矿; c 腹足类化石; d 狼鳍鱼方形鳞片; e 沟模; f 槽模; g 沙泥岩互层接触面平直; h 炭屑



图版⑩说明: a 肠状构造; b 包卷层理; c 变形层理; d 重力断层; e 砂球构造; f 火焰构造; g 砾; h 块状砂岩