

文章编号:1009-3850(2015)04-0106-07

浊流沉积研究的新进展:鲍马序列、海底扇的重新审视

李利阳^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院,北京 100083; 2. 武警黄金第四支队,辽宁 辽阳 111000)

摘要:本文在总结前人对浊流沉积研究的基础上,分析前人对浊流与浊积岩、浊流沉积与浊流相模式的对应关系之间的认识,并对鲍马序列进行重新审视。在海底扇研究过程中,鲍马序列已经不能充分反映浊流沉积的全过程。鲍马序列所反应的沉积模式其实是由碎屑流、浊流、底流等多种形式流体组合和改造后的结果,海底扇沉积模式不能笼统归结为浊流沉积作用的结果。在完善重力流、底流等沉积作用的同时,建立一个与沉积作用相互联系的深海沉积系统,以对深海研究提供更好地指导和预测。

关键词: 浊流;鲍马序列;海底扇;相模式

中图分类号: P512.2

文献标识码: A

浊流沉积作用和浊积岩的提出被认为是现代沉积学的发端。近些年来,国外的许多研究机构 and 大型石油公司对浊流及浊流沉积的研究十分关注。他们通过实验和数学模拟,对浊流的结构和流体力学取得了重要的新认识,而且一直尝试用仪器对深海进行直接观察,从而推进浊流地质学的进一步发展。我国也开展大洋科考活动和深海勘探,目前对南海深水扇的研究也取得了一定新的发现和认识。总的来说,对鲍马序列的认识,迄今持有两种观点,一部分人仍然坚持鲍马序列的正确性,认为鲍马序列对浊流沉积研究具有重要的、不可侵犯的地位;另一部分人则认为鲍马序列中存在许多的谬论,并不能完全解释浊流沉积中的很多现象。对鲍马序列的争论主要着重于对其相模式的解释方面的争论。值得注意的是,Shanmugam 在《地球科学评论》(Earth-Science Reviews)以《浊积岩的十个神话》为题发表了长达 31 页的评论性文章^[1],对过去 50 多年的浊流研究进行评论,从浊流的概念、浊积岩的类型、浊积岩的沉积构造、粒序层理,到浊积相和相模式等提出了他的看法和建议,在国际沉积学

界引起了轰动,使沉积学家对鲍马序列发起了新一轮的思考。

1 浊流及其几个相关的概念

浊流作为重力流的一种特殊形式,是由于流体中湍动悬浮着的沉积物所造成的密度差异而引起流动的水流。其内颗粒的支撑方式是流体搅动支撑,内颗粒处于一种自悬浮状态。从流变学来看,浊流为一种液态流。而浊积岩就是浊流沉积作用形成的沉积岩,由于在沉积过程中形成一套特殊的沉积构造组合,所以浊积岩提供的鲍马序列在过去很长时间内是识别浊流沉积的重要标志。然而,有一部分人认为,浊积岩包括浊流沉积以及所有与浊流沉积有关或相伴生的各种其它沉积所形成的岩层序列,并没有将浊流与其它类型的重力流严格地区分开来。这就使得当前对重力流沉积模式的识别问题也陷入了激烈的争论状态。沉积学家已经投入了大量精力对深海沉积进行研究,但无论是钻探还是物探都存在各自的局限,不能充分反映单层厚度只有几厘米到几十厘米的深海重力流沉积物。

这就在研究上,使得现代重力流沉积不能与露头古代沉积很好地相互印证。所以,现在我们不得不反思,鲍马序列作为一种沉积构造样式,是否能够反过来充分反映整个浊流形成、运动、沉积以及后期改造等过程。

除浊流外,重力流也可以被划分为其它几种流体。对于沉积重力流的分类方案,不同研究者提出了不同的分类,目前最为流行的是 Lowe 的分类。Lowe (1979, 1982)^[2-3] 在 Middlenton 和 Hampton (1973)^[4] 分类的基础上,将重力流划分为泥流(或

粘性碎屑流)、颗粒流、液化流、液体化流和浊流 5 种类型(表 1),并将浊流细分为低密度浊流和高密度浊流。但是 Lowe 分类中提出的高密度浊流概念受到了广泛的争论,因为人们所观察到的深水块状砂岩的塑性流变特征与液性流的高密度浊流流体特征存在着理论上的相悖。对于这一问题的出现,Shanmugam (1996)^[5] 把 Lowe (1982)^[3] 提出的高密度浊流定义为砂质碎屑流沉积,从流变学特征上看属于塑性流体,具有分散压力、基质强度和浮力等多种支撑机制^[1,5]。

表 1 沉积物重力流分类表^[3]
Table 1 Classification of the sediment gravity flows (after Lowe, 1982)

流体性质		流体类型		沉积物搬运机制
液态	流体态流	浊流	低密度浊流	流体滑动
			高密度浊流	
		液体化流		逃逸孔隙流体(完全支撑)
塑性(宾汉姆)	碎屑流	液化流	逃逸孔隙流体(部分支撑)	
		颗粒流	分散压力	
		泥流或粘性碎屑流	基质强度	

Shanmugam (1996)^[5] 在修改 Shultz (1984)^[6] 分类的基础上,将重力流重新划分为颗粒流、砂质碎屑流、泥质碎屑流和浊流 4 种流体(图 1)。他把“砂质碎屑流”定义为涵盖了变密度颗粒流、非粘性碎屑流、颗粒流、惯性流层、流动颗粒层、牵引毯、滑塌浊流等众多流态的一种流体。该分类方案及砂质碎屑流概念提出后,被我国学者广泛接受并运用。虽然 Shanmugam 将砂质碎屑流的概念引入浊流沉积体系中,但是实际上其效果也并没预期的那么明显。有人认为 Shanmugam 是把浊流及其模式狠狠地批判否定后,仅把浊积岩换上砂质碎屑流又开张营业了。

一次浊流事件其实是多种流态流体有序转换的结果。重力流从开始出现到最后形成沉积物过程中,存在多个流体阶段,而且不同的流体阶段之间、相同阶段内部也存在着流体性质的转换^[7,8],因此,岩石描述所显示出来浊流的多流态特征与浊流的单一流体这一概念相悖。

2 鲍马序列及其发展

在浊积岩研究中,著名的鲍马序列(图 2)是 Bouma 在 1962 年通过对法国东南部阿尔卑斯山脉地区 Annot 砂岩浊流沉积研究基础上提出的^[9]。Bouma 将其分为 Ta、Tb、Tc、Td、Te 五段,自下而上依

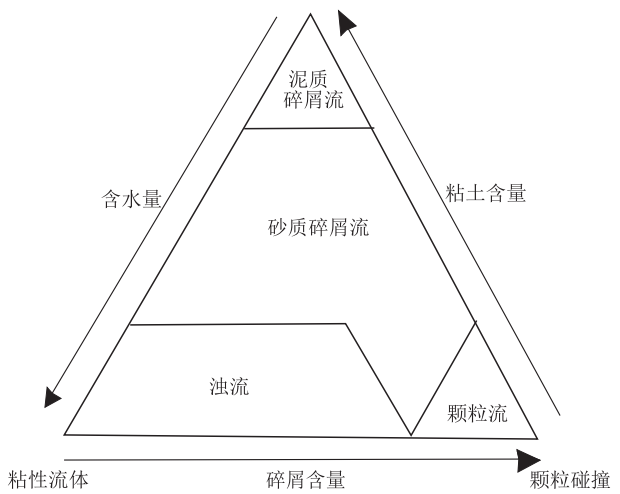


图 1 Shanmugam 的沉积物重力流分类三角图解^[5]
Fig. 1 Triangular diagram for the classification of the sediment gravity flows (after Shanmugam, 1996)

次为:Ta 段为粒级递变段或块状段,Tb 段为平行层理段,Tc 段为流水波纹层段,Td 段为水平层理段,Te 段为浊流间的泥岩段。通常情况下,在一个浊流沉积体中很少发育完整的 Ta-e 的组合,大多浊积岩序列都是不完整的。Bouma 认为这五段是一次浊流事件沉积的产物。Bouma 又在 1977 年注意到浊流中发育的牵引流沉积单元(Tb、Tc 段)与浊流的最初定义是不一致的;Middleton 和 Hampton (1973)^[4] 则认为 Ta、Tb、Tc、Td 四段为浊流沉积的产物,Te 段为

深海沉积或低密度浊流沉积的产物;Lowe(1982)^[3]认为 Ta 为高密度浊流沉积产物,Tb、Tc、Td 为低密度浊流沉积的产物,Te 段为远洋沉积的产物;Shanmugam(1997)^[10]则认为 Ta 为砂质碎屑流产物,即浊流沉积产物,Tb、Tc、Td 为底流改造沉积的产物,Te 为远洋或半深海沉积产物;李林(2011)认为鲍马序列只有 Ta 段为狭义的浊流沉积,Tb、Tc、

Td 四段为牵引流沉积,Te 段为悬浮沉积,并且在流动过程中可出现各种类型重力流的转换。浊流是由于密度差而颗粒成悬浮状态带动流体运动的,所以正粒序层表明浊流作用的结果没有争议,而其上的具有牵引流特征的沉积物归入到浊流成因,从目前看得值得商讨,其各个阶段具不同成因(表2)。

表 2 鲍马序列各阶段的不同成因解释		
Table 2 Genetic interpretation of individual intervals of the Bouma sequence		
E	页岩或泥岩	①浊流沉积;②深海、半深海沉积;③浊流沉积与深海、半深海沉积的综合
D	平行纹层段	①浊流沉积,为浊流尾部细粒沉积物的悬浮沉积;②深水底流沉积;③难以用水动力学理论及实验解释
C	波纹、波状或包卷层理	①浊流沉积,为下部流动状态下底负荷牵引的产物;②浊流沉积,浊流在流速愈来愈低下的连续沉积;③深水底流沉积;④深水牵引流沉积
B	平坦的平行纹层段	①浊流沉积;②浊流在流速愈来愈低下的连续沉积;②底负荷的牵引产物,为上部流动状态下的平坦床沙沉积;④悬浮负载沉积时的分凝作用或“流沙层”的反映;⑤深水底流改造单元;⑥深水牵引流沉积
A	块状段或递变段	①浊流沉积;②再沉积作用的底负荷部分;③上部流动状态下的逆行沙丘沉积;④颗粒流沉积;⑤半塑性快速流动层沉积;⑥次颗粒流沉积;⑦高密度浊流沉积;⑧高沉积物供给速率下的上部平行层沉积;⑨砂质碎屑流沉积;⑩水下重力流沉积

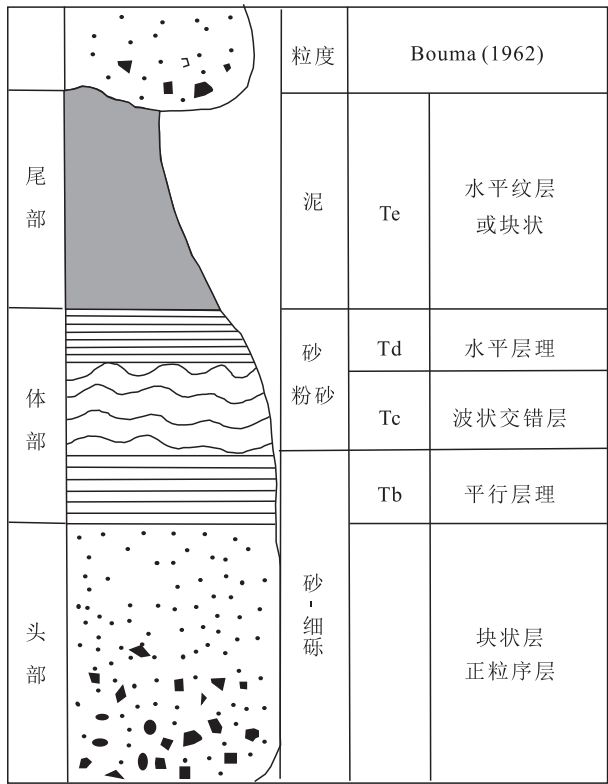


图2 鲍马序列及其特征

Fig.2 Classical Bouma sequence

浊流作用是复杂的,很多现象并不能用经典的鲍马序列来解释,而且浊流沉积根据其沉积物性质

的不同,沉积作用也存在很大的差别。目前很多学者认为,鲍马序列只能很好地解释砂质碎屑岩,而无法应用到砾质碎屑岩和泥质碎屑岩的研究中。Lowe(1982)^[3]在储层沉积学研究基础上根据浊流沉积物的粒度提出了分类方案,他将浊流进一步分为低密度浊流、砂质高密度浊流、砾石高密度浊流。如前所述,Shanmugam 对 Lowe 的浊流分类提出了异议,认为高密度浊流实际上是砂质碎屑流,并对重力流进行了重新的分类。正如 Mutti 等人^[11]所言,就海底地形、沉积作用、几何形态、堆积方式及其沉积物粒度而言,深水系统是非常复杂的,所以鲍马序列需要改进和补充,以便更符合我们对浊流的新认识。

3 浊流沉积形成机制的讨论

鲍马序列争论主要还是对浊流及浊积岩的定义不同而引起的。Bouma 认为浊积岩是碎屑流、颗粒流、液化流和浊流的沉积物;而 Shanmugam 认为浊积岩只是浊流的沉积物。其实,目前许多沉积学家都比较倾向于 Shanmugam 的理论,认为 Bouma 所谓的浊流太过笼统。

对鲍马序列形成机制的认识也存在分歧,这一点 Shanmugam 在他的《浊积岩的十个神话》里面进行了综合的阐述。Bouma 认为槽模构造指示浊流沉积,而 Shanmugam 则认为槽模构造只能代表有流体

侵蚀作用发生,并不能指示是浊流沉积。Bouma 认为正粒序是多次沉积事件叠加的产物,而 Shanmugam 认为正粒序仅仅是单一沉积事件的产物。人们在浊流沉积的下部发现并不是仅仅发育正粒序,而且常常发育有反递变牵引毯、上覆正递变、牵引沉积。李存磊等(2012)^[12]认为浊流下部沉积可分为反递变砂牵引毯、正递变悬浮沉积单元和块状含量砂岩 3 端元(图 3),并运用流体动力转变性质对其形成进行了分析;Bouma 最初认为交错层理是浊流形成的,他又在 1977 年注意到浊流中发育的牵引流沉积单元(Tb,Tc 段);Shanmugam 也认为交错层理是一种属于底流的牵引流作用的结果。他认为浊流以只形成简单的正粒序为特征,浊积岩没有复杂的颗粒层和碎石浮层,不发育逆粒序,不发育深水牵引构造(交错层理和有波痕的细粒沉积)。他进一步认为,深水牵引构造解释为深水底层流更好,尤其是在海底峡谷的潮汐底层流成因。

就浊积岩的形成机制而言,下部为深水悬浮沉积已获得广泛的认可。中段目前大家都认为是牵引流沉积,但对其力学驱动看法产生分歧。就近年来对深海流体的研究来看,底流作用有可能是中部层段的主要成因。Shanmugam 在《浊积岩的是个神话里面》也指出,波状交错层理具有侧向迁移的特点,这一点与内波的侧向迁移性相符合。其上部的水平层理也可以通过内波的逐渐减弱来解释,但是这一点仍需要直接观察和模拟的验证。下部的沉积目前则主要被认为系流体转换机制下形成的沉积,但是还有待进一步的证实。

4 浊积沉积及海底扇

浊流沉积体被称为海底扇。目前很多学者都提出了海底扇模式,最被大家认可的是 Walker (1978)^[13]的综合扇相模式(图 4),他把 Nomark (1970)^[14]的现代扇模式和 Mutti^[11]的古代海底扇

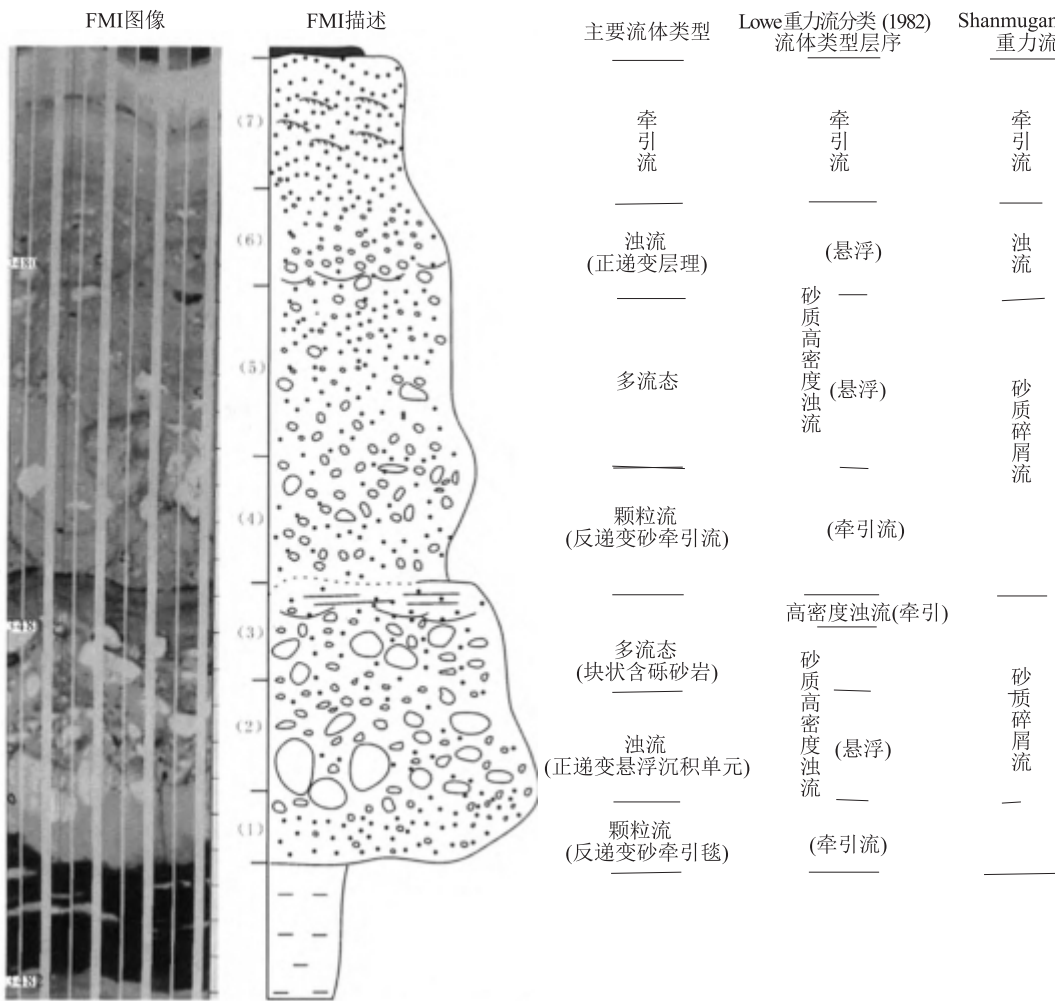


图 3 混合状态下的重力流沉积^[12]
Fig. 3 Gravity flow deposits under mixed flow regimes (after Li Cunlei et al. , 2012)

相结合起来,提出了含有上扇地区的单一的补给水道和在中部、下扇地区的叠覆扇叶状体的综合扇模式。综合扇模式中存在 6 种岩相:(1)砾岩和含砾砂岩,由砾质滑塌、滑移和碎屑流沉积组成;(2)扭曲变形的块状砂岩,系砂质滑坡、滑移和碎屑流作用的产物;(3)扭曲泥岩,解释为泥质滑塌、滑移和碎屑流产物;(4)波痕砂岩和粉砂岩,系底流再搬运产物;(5)正粒序砂岩和粉砂岩,为浊流沉积;(6)纹层泥岩,解释为深海和半深海沉积。

Nomark(1991)^[15]在将“沉积叶状体”运用到现在的 Navy 扇时出现了问题,放弃了他的“叠覆扇叶状体”的概念。随后,Walker(1992a)也放弃了他的综合扇模式。最近发现丘状起伏的形式也不仅仅

是浊积岩叠覆扇所独有的。海底扇模式实际上反映的是包括了各种重力流事件的堆积。同时还受到深水牵引流(等深流、内波流及内潮汐流等)改造并沉积作用的影响,并非仅仅是浊积砂岩^[16,17]。其存在 3 种类型的组合:浊流与伴生的牵引流形成的沉积物重力流深水牵引流沉积组合;其它沉积物重力流与伴生的牵引流形成的沉积物重力流深水牵引流沉积组合;其它深水牵引流(等深流、内波流及内潮汐流等)改造早期重力流沉积形成的沉积物重力流深水牵引流沉积组合^[18],其沉积特点类似于鲍马序列,即整体呈正递变序列,下部的块状段或微递变段和中上部的牵引流沉积构造单元。

深水沉积的研究似乎进入了一个误区,就是对

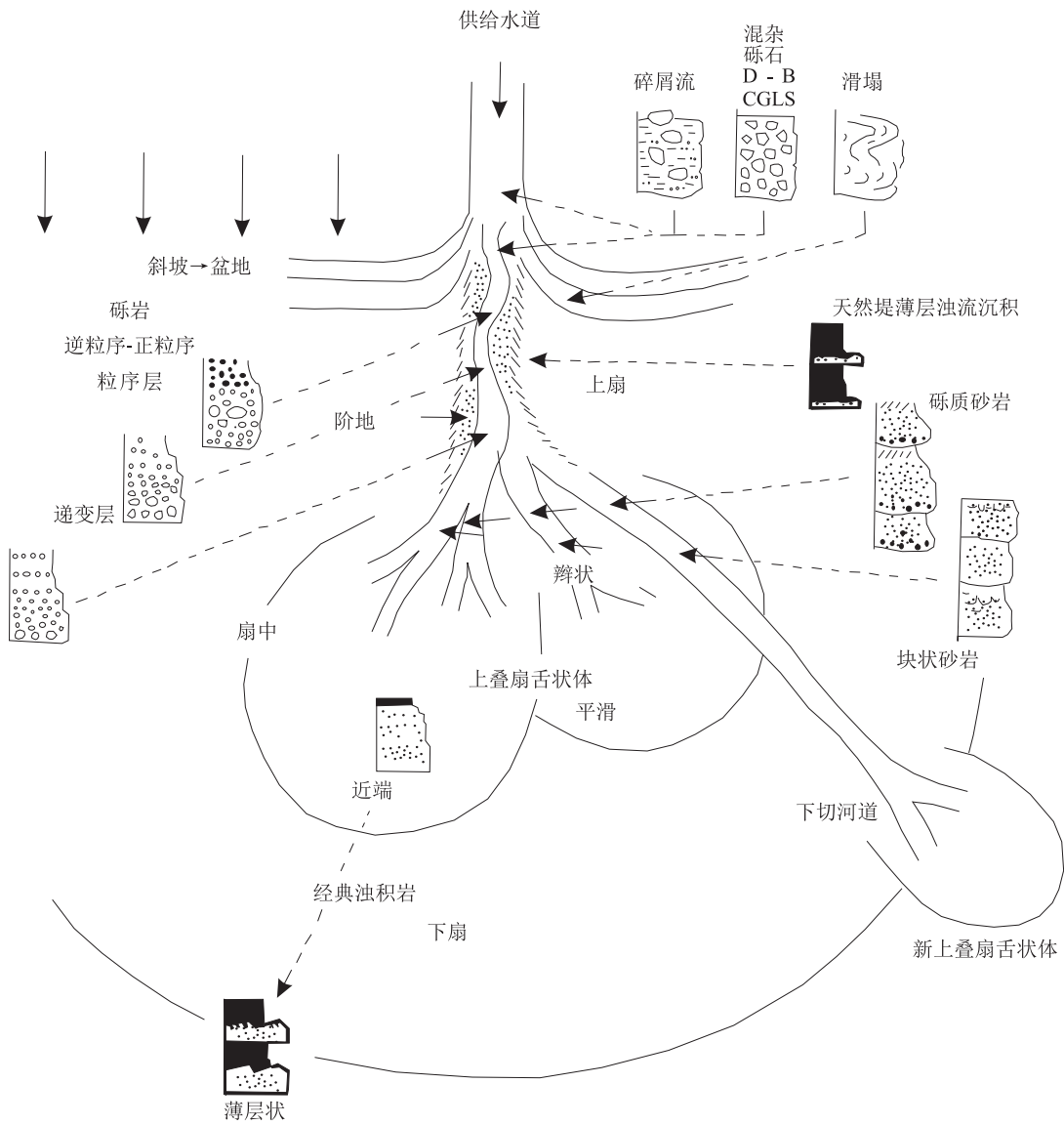


图 4 Walker 的综合扇相模式^[13]

Fig.4 Generalized fan facies model (after Walker, 1978)

沉积过程和沉积的流态认识尚未完全清楚,而且对浊流的定义比较混乱,这就导致深水沉积型式和结构模式的理解也存在着众多的争议。奇怪的是,石油工业却又是运用这些广受争议的相模式,成功的发现了一个又一个的深水油气田。因此,勘探家们就十分相信这些扇模式,他们在实际工作中几乎把所有的深水沉积砂岩都叫做浊积砂岩。这就导致科研认识与生产认识上的冲突,就是在科研上认为错误的理论却能在生产上行之有效。因此,目前使用的深海扇模式还有待研究。但是可以肯定的是,目前的相模式离成熟的相模式已经不远。当然目前的相模式还没有完全达到预测的目的,仅仅是储层识别过程中的一个步骤。正确的深水扇模式建立后要 对扇内沉积体进行沉积过程的再现和流态的识别,这样才能进一步地把真正的储层识别出来,才可以称为成熟的相模式。

5 结论

(1)浊流及有关重力流的概念目前认识上还没有获得统一,在获得最新发现和认识的同时,还要进一步的厘定。浊流作为重力流的一种形态,其在搬运沉积过程中,可与其它重力流发生转换。

(2)鲍马序列是一种仍广泛使用的浊积岩序列,但显然已经不能解释所有浊积岩问题,其中存在许多问题,需要进一步的研究发展和补充。就目前来看,Bouma 所建立起来的经典浊流模式还存在多种解释。所以除了对浊积岩中保存下来的沉积现象详加分析外,还要有现代深海沉积的佐证,摒弃其它重力流或牵引流沉积或改造作用的影响,才能建立更完善的浊流相模式。

(3)对浊积岩成因机制的研究仍需要直接的证据和理论上的证据的统一。现代沉积中,钻探和物探都存在一定的局限性,对浊积岩的研究还有待于研究手段分辨率的提高,以实现对现代浊流沉积物结构、构造、组构以及沉积物形态等的全方位、立体化认识。

(4)深海扇的沉积模式仍需丰富,以达到相模式的预测功能。在深海扇研究过程中,将其作为一个沉积系统看待,充分考虑到源沟汇的相互关系以及重力流、牵引流(等深流,内波流、内潮汐等)的相互作用。

(5)浊流沉积作用是多样的,应根据不同的沉积环境来建立相应的沉积模式,而不能仅仅将鲍马序列作为识别、预测浊流沉积的唯一模式。

参考文献:

[1] SHANMUGAM G. Ten turbidite myths[J]. Earth-Science Reviews,2002,58(3/4):311-341.

[2] LOWE D R. Sediment gravity flows;Their classification,and some problem of applications to natural flows and deposits [A]. Doyle L J et al. Geology of Continental Slopes [C]. Tulsa: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1979. 27:75-82.

[3] 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,1982,52:279-297.

[4] MIDDLETON G V ,HAMPTON M A. Sediment gravity flows: Mechanics of flow and deposition [A]. Middleton G V,Bouma A H. Turbidites and Deep-Sedimentation [C]. Los Angeles, California; SEPM Pacific Section,1973. 1-38.

[5] SHANMUGAM G. High-density turbidite currents; Are they sandy debris flows [J]? Journal of Sedimentary Research,1996,66:2-10.

[6] SHULTZ A W. Subaerial debris flow deposition in the upper Paleozoic Cutler Formation, western Colorado [J]. Journal of Sedimentary Research,1984,54:759-772.

[7] FELIX M,PEAKALL J. Transformation of debris flows into turbidity current; mechanisms inferred from laboratory experiments [J]. Sedimentology, 2006,53(1):107-123.

[8] 李云,郑荣才,朱国金,等. 沉积物重力流研究进展综述[J]. 地球科学进展,2011,26(2):158-165.

[9] BOUMA A H. Sedimentology of some flysh deposits: a graphic approach to facies interpretation [M]. Amsteden; Elsevier, 1962. 88-123.

[10] SHANMUGAM G. The Bouma sequence and the turbidite mind set [J]. Earth-Science Reviews,1997,42(4):201-229.

[11] MUTTI E,TINTERRI R,REMACHA E,et al. An introduction to the analysis of ancient turbidites basins from an outcrop perspective [C]//AAPG Continuing Education Course Note Series. Tulsa,Oklahoma,1999,39:61.

[12] 李存磊,任伟伟,唐明明,等. 流体性质转换机制在重力流沉积体系分析中应用初探[J]. 地质论评,2012,58(2):286-296.

[13] WALKER R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans models for exploration for stratigraphic traps [J]. AAPG Bulletin, 1978,62:932-966.

[14] NORMARK W R. Growth patterns of deep sea fans [J]. AAPG Bulletin,1970,54:2170-2195.

[15] NORMARK W R. Turbidite elements and the obsolescence of the suprafan concept [J]. Giornale di Geologia,1991,53(2):1-10.

[16] 李祥辉,王成善,胡修棉. 深海相中的砂质碎屑流沉积:以西藏特提斯喜马拉雅白垩系为例[J]. 矿物岩石,2000,20(1):45-51.

[17] 王青春. 内波与内潮汐沉积作用的方式[J]. 海洋地质动态, 2005,21(12):10-13.

[18] 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马序列多解性探讨[J]. 江汉石油学院学报,2001,23(1):1-5.

Current advances in the research of turbidity current deposits: Reinterpretation of the Bouma sequence and submarine fan deposits

LI Li-yang^{1, 2}

(1. *School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 2. *No. 4 Gold Exploration Party, Chinese Armed Police Force, Liaoyang 111000, Liaoning, China*)

Abstract: The present paper gives a reinterpretation of turbidity currents, turbidites and the Bouma sequence. In the research of modern submarine fans, the Bouma sequence can't represent the complete processes of turbidity current deposition. The sedimentary models indicated by the Bouma sequence, in fact, should be the combination and reworking of debris flows, turbidity currents and bottom currents, and thus the Bouma sequence can't be selected as the sole model for the recognition and prediction of turbidity current deposits. Instead, sedimentary models should be constructed according to distinct sedimentary environments due to the variety of turbidity current deposition. In addition, the turbidity current models will be further evidenced by modern deep-sea deposition in the future research.

Key words: turbidity current; Bouma sequence; submarine fan; facies model