

文章编号: 1000-0550(2009) 01-0077-10

深海沉积理论发展及其在油气勘探中的意义¹

李祥辉¹ 王成善² 金玮³ 冉波²

(1 南京大学地球科学系 南京 210093 2 中国地质大学 北京 100083 3 大庆油田有限责任公司勘探开发研究院 黑龙江大庆 163712)

摘要 深海沉积理论的进展主要涉及“鲍玛序列”、浊流、砂质碎屑流和深海层序地层四方面。以 Sharmugam 为代表认为:“鲍玛序列”并非唯一浊流产物,可含有砂质碎屑流、浊流、内潮汐、内波、等深流多种流体作用的结果;过去识别的“鲍玛序列”A 段有浊流也有相当部分是砂质碎屑流成因, B-D 段交错层理则是底层牵引流沉积产生的;只有浊流的沉积物才能称为浊积岩;“高密度浊流”是指砂质碎屑流而不是浊流;浊流是一种有牛顿流和紊流状态的沉积物重力流;浊积岩没有复杂的颗粒悬浮层和碎石浮层,不发育逆粒序。Sharmugam 等关于“鲍玛序列”这一新解是深海沉积学理论的一个进步。深海牵引流过去数十年取得了较大进步,但理论与实践脱节。深海层序地层是深海沉积理论进展的另一个方面,层序界面类型、体系域沉积有自身的独特性:层序界面至少存在斜坡侵蚀面、低水位下超面和水下沉积间断面三种;当沉积背景以陆源碎屑为主时, LST 主要为盆底扇, TST 和早期 HST 表现为非钙质远洋沉积,晚期 HST 一般不发育;当碳酸盐沉积为沉积背景时, LST 主体为碎屑流和跨塌落沉积或淡水透镜体, TST 和早期 HST 为钙质细粒沉积,晚期 HST 可能存在有较小规模的钙屑海底扇。建议慎重解释“鲍玛序列”,审视“浊积扇”理论,废弃“浊积扇”概念,加强深海牵引流沉积机理方面的研究; LST 浊积砂体、砂质碎屑流形成的块状不规则砂体,深海牵引流砂体可在深海储层预测方面具有巨大潜势,深海沉积作用及其过程的精细研究在指导深海油气勘探方面将会发挥越来越重要的作用。

关键词 鲍玛序列 重力流 牵引底流 深海扇 层序地层 油气勘探 深海沉积

第一作者简介 李祥辉 男 1964 年出生 教授 沉积学 E-mail seanle@nju.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

过去几十年里深海(本文指陆棚/台地坡折之外的海域)沉积理论在沉积学领域取得的进展有目共睹,进入 21 世纪以来有关论文发表数量跨入了一个崭新的阶段(图 1),充分显示了国际上在深海沉积作用研究成果及发展趋势,尽管我国相关方面的学术研究不尽如意。其中,三个方面受到了特别关注:一是与“鲍玛序列”有关的重力流沉积作用,20 世纪 90 年代后期沉积学界展开了大讨论(参见《AAPG Bulletin》1997, 81 卷;1997 年 AAPG 年会;Sharmugam 及其同时系列论著^[1-6]);二是深海牵引流相关的沉积作用^[7-16];三是深海层序地层方面^[17-21]。

随着 20 世纪末期以来全球对能源和有关矿产资源需求的急剧增长,人们把勘探目光开始转向深水区。据统计,全球目前已知发现的与油气相关的深海体系盆地超过 1 200 个^[22],并且在南美巴西、中美墨西哥湾、西非等地区的深海盆地油气勘探中取得了重要进展^[23-24]。进入 21 世纪,我国的油气勘探已经面临着重大调整,一个重要方向就是大陆西部深海复理

石建造和大陆东部陆架深水区沉积,投资过亿钻深超过 7 000 m 的参数井红参 1 并在四川若尔盖高原实施即是一个标志。

然而,目前国内外对深海沉积作用理论的概念和模式还存在较大分歧,甚至在关键术语和概念模式方面还存在认识上的偏差,从而影响人们对深海沉积油气预测与勘探方向的把握。本文旨在评述近期关于深海沉积作用理论的一些进展,重点涉及深海沉积物重力流、牵引流及层序地层理论,并阐述分析其与深海油气勘探的关系及重要意义。

1 深海沉积物重力流

沉积物重力流中的颗粒流和液化流由于地质历史时期的实例少和应用价值不高故不受关注,碎屑流和浊流及其沉积物则是争论的主题。1997 年 AAPG 年会上,Clifton 召集组织了题为“深水碎屑沉积作用与储层关系:我们能预测什么?”(Processes of deep-water clastic sedimentation and their reservoir implica-

¹ 国家重点基础研究发展计划项目 973(批准号:2006CB701401)、中石化科技部重点项目“松潘—阿坝三叠系构造—沉积演化与油气关系”联合资助。
收稿日期:2007-11-05 收修改稿日期:2008-05-05

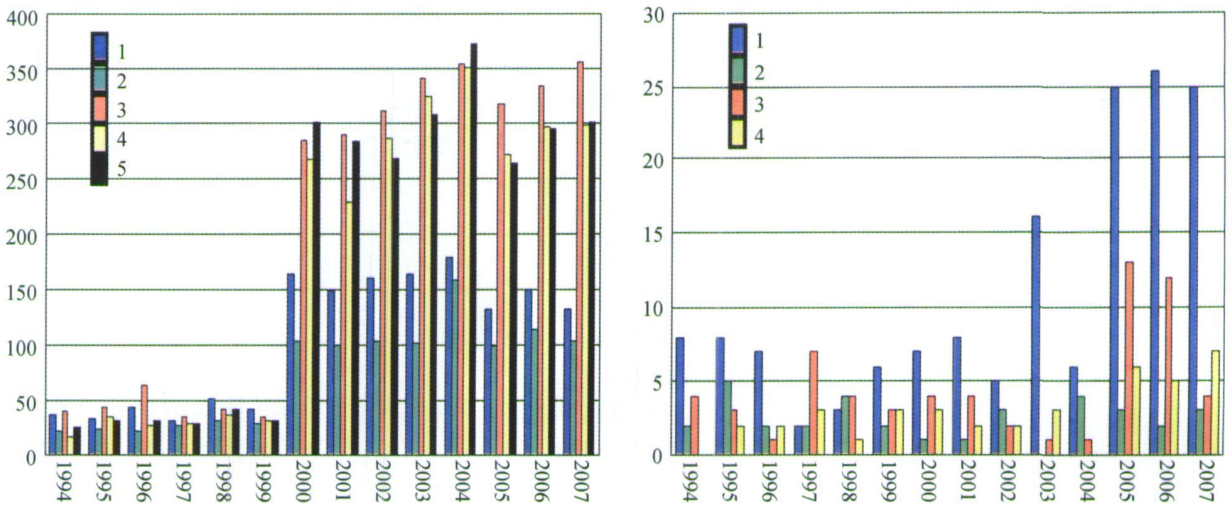


图 1 1994~2007 年期间国际、国内主要刊物公开发表深海沉积作用有关论文数量统计图 (纵坐标为论文篇数)

A. 示 Elsevier Science 和美国 GSW 出版的杂志期刊论文数量分布情况。查询关键词是: 1. Turbidity; 2. Turbidity; 3. Contour + internal tide/waves; 4. Gravity flow; 5. Submarine fan + Deep sea fan; B. 国内全文数据库收录的杂志期刊论文数量分布情况。查询关键词是: 1. 浊积岩 + 浊流; 2. 等深流 + 内波 + 内潮汐; 3. 重力流; 4. 海底扇 + 深海扇

Fig. 1 Statistical diagram of paper publications on deep sea sedimentation and rocks in both China and abroad during 1994~2007 (amount of papers in y-axis)

A. Paper distribution from Elsevier Science and American GSW database with key words searched: 1. Turbidity; 2. Turbidity; 3. Contour + internal tide/waves; 4. Gravity flow; 5. Submarine fan + Deep sea fan; B. Paper distribution from Chinese CSCD database with key words searched: 1. Turbidity + turbidity; 2. Contour + internal tide + internal waves; 3. Gravity flow; 4. Gravity flow; 5. Submarine fan + Deep sea fan

tions what can we predict) 的讨论会, 试图为解决这些争议找出一些关联答案。参加这次讨论会的正是相关领域的著名沉积学家如 Bouma, Damuth, Lowe, Parker, Shanmugam 等, 但双方未能就自己的观点说服对方。那么, 争论的焦点是什么呢? 正是我们熟知的“鲍玛序列”! 此次会议之后, Shanmugam 在其系列文章^[3-6]中阐述了“鲍玛序列”并不都是浊流成因的思想, 矛头直指“鲍玛序列是浊流形成的浊积岩所具有的特征层序”^[25]经典论断, 而该论断和相关的“浊积扇”模式广泛流行于沉积学界, 并在各个时期沉积学论著中大都能看到这种主流观点盛行的体现。

Shanmugam (2002) 在对“鲍玛序列”经典剖面^[25]——法国海事阿尔卑斯 (Maritime Alps) 的始新世—渐新世安诺 (Annot) 砂岩重新解剖研究后认为, 这些砂岩单元代表有多次沉积事件作用, 除了浊流外, 还有更多的砂质碎屑流和牵引层流。这就从根本上否定了“每一个砂岩层 (鲍玛序列) 都是一个正粒序层”的结论, 从而也否定了“鲍玛序列”浊流成因之说。关于对“鲍玛序列”的“批判”可参见其重要论文《浊积岩十大神话》^[4], 这里节选其重要的思想和结论以代表沉积物重力流理论认识进展的一个方面: 1) 由浊流形成的沉积物才能称为浊积岩; 2) “高密度

浊流”是指砂质碎屑流而不是浊流; 3) “鲍玛序列”的交错层理是牵引底流沉积产生的; 4) 浊流是一种有牛顿流 (这一点与我们过去教科书中的提法大相径庭。笔者注) 和紊流状态的沉积物重力流; 5) 浊积岩没有复杂的颗粒悬浮层和碎石浮层, 不发育逆粒序。Shanmugam 得出上述认识, 不仅仅是建立在实际观察中, 另一个重要依据是至今为止没有一个水槽实验能完整建造出“鲍玛序列”。

其实, 自“鲍玛序列”一提出来就曾受到过批评^[25-27], 只是没有引起注意。Shanmugam^[3,4]作为反对派“弱势群体”的一方对“鲍玛序列”的批判只是敢于站出来的一位代表, 诚如 Miall^[28]所说: “因为我们在潜意识中对鲍玛浊积岩都有一个自认为很好的定义, 这样就不难解释为什么许多沉积学描述和解释都偏离了方向, 直到像 Shanmugam 之类的人出现并带来了新看法, 说明深海砂岩并不等于浊积岩”。

关于碎屑流与浊流的关系, Shanmugam^[6,29]的编制的图谱 (图 2) 给予了清楚的表达, 并从流变学角度进行了讨论^[3]。由于人们过去将众多砂质碎屑流放置在“鲍玛序列”中 A 段被当作浊流沉积, 因此在分析沉积相模式时自然而然地会出现偏差甚至错误。对此国内也有人给予了一定关注^[30-33], 并在西藏发

现了实例^[34]。

通过上述深海沉积物重力流新认识及问题解析, 结合近年来对西藏和川西深海沉积研究的经验教训, 对深海重力流沉积有关沉积理论及概念, 我们提出以下建议: 1) 鉴于“鲍玛序列”概念使用的广泛性, 可以继续采用, 但在使用时应当考虑它不仅代表浊流产物, 而通常是砂质碎屑流、浊流、牵引底流共同作用的结果。因此, 可能的情况下提醒读者注意其含义, 并予以引号标注; 2) 浊积岩的使用仅限于浊流作用的沉积产物, 不应与“鲍玛序列”所有的沉积等同起来; 3) 在使用深海环境模式时建议废弃“浊积扇”概念, 采用“深海扇”予以取代, 在环境位置明确时使用“海底扇”概念。这是因为深海扇没有哪一类是由单一浊流形成的, 而是由上述几种深海沉积作用共同作用的结果。斜坡扇概念源于层序地层, 广义上也应属于深海扇, 但其是否存在争议很大(参见 3.3); 4) 在研究深海沉积重力流时, 特别注意区别“鲍玛序列”A 段中砂质碎屑流与浊流沉积成因。

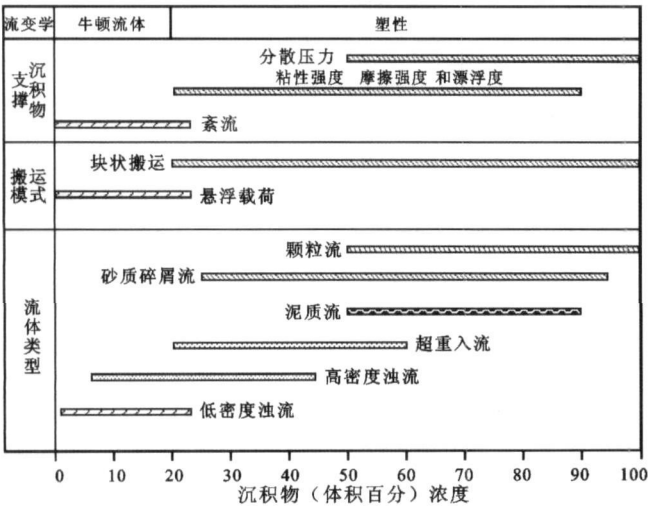


图 2 各种流体模式与沉积物浓度的关系^[3, 6]

Fig 2 Rheology of flows vs sediment concentration^[3, 6]

2 深海牵引流

众所周知, 深海牵引流主要包括等深流、内潮汐、内波, 以及其它未知的一些底流, 在国内外有关研究进展情况业已评述^[35-37], 但总体来看问题认识不足。

等深流从 1966 年发现以来已经 40 余年, 然而, 从目前发表不多的文献情况来看其应用非常有限, 主要存在几个方面的问题。一是根据已经总结的古代和现代等深积岩或沉积物特征^[38, 39]在露头或岩芯识别古代等深积岩还存在困难之处^[40], 而且与正常浅

海和深海的细粒沉积较难区分; 其二, 在几十年来发表的等深流相关文献中, 绝大部分与现代和新近纪有关, 在古近纪之前识别的实例据 Elsevier GSW、CNKI 中国期刊全文数据库不完全统计不超过 20 篇(国内 8~10 篇, 国外少于 10 篇), 而且集中在奥陶系和侏罗—白垩系少数几个层位; 第三, 等深流主要形成于陆隆和斜坡环境, 这些场所以侵蚀作用为主, 客观上限制了等深流沉积的保存。这一特点早在上世纪 80 年代初 Shanmugam 和 Moidla^[41]就指出, “实验室可以完成大量热跃层流、等深流的测速等实验, 浊流沉积的实验较少。野外观察却相反, 可观察到大量的浊积岩, 等深积岩和热积岩却罕见”。

内潮汐和内波从提出以来已有 100 多年, 但真正引入到沉积学还是 20 世纪 90 年代以后的事情。目前对现代已知内波、内潮汐的沉积特征分别有较为详细的描述, 然而, 由于它们经常与远源浊流沉积共生, 加之形貌相似, 以至于彼此间难以区分, 易于混淆。国内从 90 年代初期开始涉入这一领域来, 在综合和实际应用方面取得可喜的成绩^[7, 39, 42-47]。尽管如此, 初步调研国内外近年文献, 我们发现有以下一些现象值得注意: 1) 国外的研究集中在现代海洋实例^[13, 48, 49]和实验模拟^[15, 35, 50]两个方面, 中生代以前的例子屈指可数; 2) 国内的研究重点在综述和内潮汐的实例报道。这种现象说明国内的基础理论研究相对薄弱, 更多地停留在表面描述上; 3) 对于大型内波, 现代海底容易识别发现, 而对古代记录来说是可遇不可求。目前全球关于内波在古代记录中的报道见于塔中地区^[51], 但资料源于地震反射, 可靠性尚待证实。

由此, 深海牵引底流进展由于在理论和实践结合方面脱节, 新认识、新进展较少, 主要问题是等深流、内潮汐、内波在实验室有大量实验和模拟完成, 在野外却难以成功观测和应用, 这就需要野外沉积学家和实验、模拟的研究人员联合起来, 共同促进深海牵引流的研究。

3 深海层序地层

浅海层序地层学从原理和方法两方面来说都较为成熟, 其界面和体系域既可以根据暴露标志识别, 也可以按照跳相或区域地层(平行)不整合来划分。而深海沉积的层序地层在原理^[52-54]和研究方法上^[55]都有所差别。尽管如此, 由于低水位盆底扇被认为是具有吸引力的烃类远景区^[53, 56], 因此, 深海层

序地层研究越来越受到重视。上世纪 90 年代国际上通过露头地质剖面 and 地震层序对深海层序地层进行过探索研究, 并利用岩芯进行了海底扇层序地层分析, 如 Shanmugam 等^[53]对北海白垩系海底扇的研究。同期, 国内也有一些研究实例^[57-58], 遗憾的是, 对国际上的动态了解和理论研究不足。为此, 以下根据作者近期在川西三叠系复理石的层序地层工作经验, 结合分析经典性文献, 试图将深海层序地层的识别划分做简要分析总结。

3.1 深海层序界面

深海层序地层的露头界面并不像浅海层序地层那样容易识别分辨, 这是因为深海特别是海底扇地区少有暴露沉积标识, 可以代表层序界面的下超面由于之上的地层倾角较小往往在露头局部很难判别。尽管如此, 仍然有一些识别方法可循, 表现为:

斜坡侵蚀面 如果不被后期海侵破坏的话还可能保存暴露沉积物。与浅海侵蚀面或暴露沉积的识别差异在于背景是深海沉积。暴露沉积得以保存情况主要发生在沉积背景是碳酸盐质的, 陆源碎屑背景下的暴露沉积因早期成岩胶结作用较弱易于被海侵侵蚀难以保存下来。如四川若尔盖和甘南三叠系复理石即在 2 个深海层序界面上保存有残积角砾和铁质、钙质壳, 皆因先期沉积环境为碳酸盐台地。

跳相面或下超面 与浅海相的 LST 和 HST 不同的是, 这一下超面是低水位海底扇直接下超在盆底(远洋)相之上, 而不是 HST 之上的下超, 因为深海陆源碎屑体系的 HST 往往不发育。另一方面, 在沉积背景为碳酸盐台地时这一下超面之上的 LST 有可能变为灰质碎屑流或钙屑浊流沉积在一侵蚀面之上。

水下沉积间断面 是海平面最低水位时期在层序界面上由水下侵蚀引起的深海沉积间断^[17]。但是, 由于水下间断面较为平整, 难以肉眼观察, 常需要生物地层工作来完成判断。当沉积区在 CCD 面之上且物源区为碳酸盐质(如台地)时, 这一水下间断面就可能转换为硬底, 界面上下都可能是平坦的可含微体生物化石较为丰富的微晶灰岩、泥灰岩、钙质页岩。

3.2 深海层序体系域

如前, 深海层序地层界面难以识别, 同样, 这种环境下的层序体系域也较难区分, 需要考虑沉积背景是碳酸盐还是陆缘碎屑质的。

LST: 在陆源碎屑沉积背景下按照经典层序地层模式 LST 应该是由盆底扇、斜坡扇和低水位楔三部分组成^[59]。其中, 盆底扇(海底扇)是最主要最常见

的^[41-59]。因此, 海底扇是陆源背景下的 LST 主要标志, 岩相识别就显得尤其重要。一般而言, 深海盆底扇在海平面最低水位时期形成深海水道—堤坝体系^[60]。在碳酸盐背景下, 重力流沉积则是识别 LST 的主要标志^[61, 62], 这些重力流以灰质碎屑流沉积为特征, 也可见少量钙屑浊积岩。在层序界面上下的碳酸盐沉积或多或少会受到白云石化、淡水淋滤、交代作用的影响。川西北若尔盖盆地两种沉积背景的 LST 都有较好的例证, 表现为中三叠世晚期以碳酸盐台地为背景, LST 由钙屑浊积岩和碎屑流沉积(扎尔山组中下部)为主组成; 晚三叠世早期转变为陆源碎屑背景(杂谷脑组、侏倭组和新都桥组), LST 基本上为海底扇, 但碎屑组中不乏碳酸盐台地来源。

TST: 无论是碳酸盐还是陆源碎屑沉积背景, 深海环境下的 TST 通常在海平面上升期间碳酸盐溶解加速。当深海环境水深低于 CCD 面时, TST 总体为向上变细变薄的细粒陆源碎屑沉积和(放射虫)硅质岩, 会出现锰质、铁锰质结核和结壳; 当高于 CCD 面时, 碳酸盐背景可能会以钙质细粒沉积为主, 最高水位时期薄层远洋(钙质)沉积会出现并覆盖在扇面之上^[60], 而且最大海泛会使碳酸盐溶解, 并形成沉积间断^[17]。要强调的是, 当 HST 极不发育的情况下, 此间断与前述深海层序地层间断面则可能重叠为一个间断面。

HSE: 海平面上升期间及高水位期早期, 深海碳酸盐溶解加速; 反之, 海平面下降期间侵蚀作用加强^[17]。因此, 这将导致 HST 会由两种不同的岩相构成: 早期与 TST 特征相似难以分开, 晚期则可能形成与 LST 相似的海底扇或其它重力流沉积。对于深海层序 HST 的岩相构成多数学者研究后认为, 碳酸盐背景下发育由钙屑浊积岩组成的海底扇, 特别是当(孤立)台地上碳酸盐生产率较高时, HST 期间发育浊流作用为主的海底扇^[63-64]。在我国云南发育的早三叠世永宁镇组钙屑浊积岩也被认为属于 HST 期间形成而非低水位扇间的产物^[58]。相反, 在陆缘碎屑沉积体系下早期 HST 极不发育, 往往与 TST 重叠难于分开, 只是到了晚期则可能产生与 LST 相似的海底扇。

3.3 深海层序问题与讨论

深海层序地层存在的问题较多, 但这里主要就三个问题做简要讨论。

LST 的斜坡扇和低位楔 自从 Vail 等^[59] LST 构成模式提出以来, 斜坡扇和低位楔在现代和古代未能发现真正实例, 因此被认为只是理论上的概

念^[19 61], 并且这三个单元是等时的^[19], 而不是由向上时间顺序形成的。虽然, Boiano^[18]在意大利南部上新统的一套复理石中提出了可能的斜坡扇和低位进积楔模式, 但未被广泛采纳接受。这表明, LST 的斜坡扇和低位楔的存在基本上被否定, 这从近 10 年来极少有相关文献发表可以得到证明。然而, 国内大量有关层序地层研究论著显示仍然在采用这种模式, 应该引起注意。

海底扇与体系域关系 大量文献成果表明, 陆源碎屑背景下 LST 发育浊流为主的海底扇, 碳酸盐背景下 LST 多为碎屑流建造, HST 仅可能产生少量钙屑浊积岩组成的海底扇。然而, 这只是一般情况, 例外的情况也在不断发现。例如, Pinheiro-Moreira^[20]在研究了巴西桑托斯北部始新世大陆边缘盆地认为浊流沉积作用为主的海底扇同时见于 TST 和 HST 中; 中国南方二叠系碳酸盐沉积背景下的斜坡层序地层研究也有类似的结果, 海平面升降旋回的各个时期均可形成重力流^[66]; 右江地区泥盆—三叠纪深水盆地的 LST 和 HST 也被诊断出“浊积扇”沉积^[57]。这些例外的情况固然与人们判断深海层序地层体系域是否正确有关, 但也应重视其可能性。

深海层序控制因素 层序地层控制因素主要为构造沉降、海平面升降, 物源供给, 碳酸盐生产率。在稳定大陆边缘和克拉通确定背景下, 构造沉降可能不是深海洋序的主要控制因素, 碳酸盐生产可能也不重要, 碎屑物源的供给基本上取决于海平面的升降。这是因为海平面变化控制了沉积作用, 海平面上升期间河流沉积被限制在陆棚之上, 无法到达边缘和海底; 反之下降期间情况正好相反^[41]。因此, 此时全球气候(如冰期—间冰期)下的海平面变化是控制深海洋序地层的关键, 但是可能不会对准层序以下单元产生太大的影响。另一方面, 在活动大陆边缘, 层序地层的控制因素则复杂得多, 构造性质、沉积物供给、海平面变化、地貌背景等都可能起作用。例如, 日本 Boso 半岛更新世 Kazusa 弧前盆地的层序地层的形成主要与地貌背景、沉积物供给和盆地沉降有关^[19]。

4 深海沉积理论与油气勘探

根据 Stow 和 Mayall^[22]统计, 全球在进入 21 世纪前已知发现的含油气深海盆地多达 1 200~1 300 个, 仅在 1970~1998 年期间发现的 29 个大型深海盆地中就获得了 330 亿桶石油 (BBOE)^[67], 2000 01~2004 05 期间又在此基础上仅墨西哥湾深海石油净

增 40 亿桶^[68]。类似数据统计和深海油气勘探的投资与开发^[23 24 69 70]也都显示了深海含油气盆地研究的巨大潜在价值。目前全球油气勘探大多与深海沉积区有一定关系(图 3), 并且已经在南美巴西、中美墨西哥湾和西非三个地区形成了的深海盆地油气勘探中心。国内外都已深刻认识到, 浊积砂体是深海盆地中的重要储集层, 在油气勘探中具有重要潜势^[22 71~74]。在深海重力流沉积方面, 阻碍正确认识深海储层砂体分布规律的可能正是经典的“浊积扇”理论模式, 尽管“鲍玛序列”和“浊积扇”理论堪称上一世纪沉积学最伟大的理论之一。上世纪 90 年代是“鲍玛序列”理论遭遇抨击最为激烈的时期, 这表明“鲍玛序列”和“浊积扇”理论在指导深海油气勘探时未能发挥应有的作用。原因很简单, 如 Sharmugan^[3]总结了五点: 1) 复杂深水沉积过程的解释需要岩芯或露头, 厘米—分米级岩相地震不能分辨; 2) 地震方法能解释的巨厚沉积物通常都不是单一沉积相; 3) 一个单一沉积相能产生多个地震几何形态; 4) 不同的沉积相能产生相似的地震几何形态; 5) 沉积期后压实作用能使地震几何形态随时间改变。因此, 一种新的砂质碎屑流沉积模式被提了出来, 相应的块状砂体被认为是与浊积砂体同等重要的油气勘探储层^[6 29 53 71 73]。

尽管创始人 Walker^[65]本人已经摒弃了经典“浊积扇”模式, 但仍然有许多沉积学家和石油地质学家继续采用。一方面原因可能是对 Walker^[65]自己的摒弃不知道, 另一方面更可能是 Sharmugan^[2]分析的那样, 流行的经典“浊积扇”模式容易使管理部门相信浊积扇砂岩中存在巨大储层并易于预测。诚如 Weimer^[74]在总结 1998 年 EAGE 和 AAPG 共同组办的研究会议“Developing and managing turbidite reservoir case histories and experiences”时反复强调“浊积岩的石油储层预测远比我们想象的复杂, 甚至相反”。甚至 Loizou^[75]指出, 过去深海油气勘探不成功的原因之一是有关的地质概念上存在缺陷, 不点名的批判了经典的“浊积扇”和“鲍玛序列”理论。

迄今为止, 虽然深海沉积还未产生一个像“浊积扇”和“鲍玛序列”那样伟大的理论, 但是, 至少我们应该建立 Sharmugan^[3]提出的概念: 1) 深海砂岩并不等于浊积岩; 2) 浊流不形成“鲍玛序列”; 3) 深水层序的地震相是不真实的; 4) 深水牵引构造(交错层理和有波痕的细粒沉积)解释为深水底层流可能更好, 尤其在海底峡谷中的潮汐底层流成因。

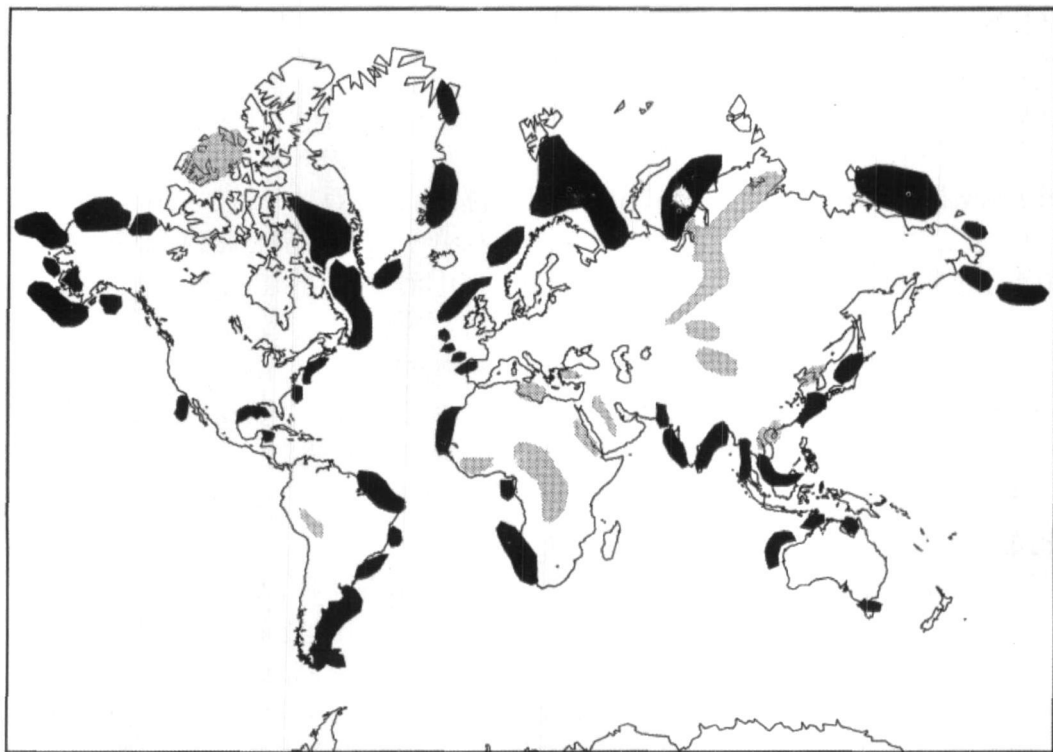


图 3 全球包括深水盆地在内的主要油气勘探区域^[38] (图黑区域示与深海有关)

Fig 3 World map showing principal frontier areas for hydrocarbon exploration^[38], including the main deep-water provinces in black

深海牵引底流在油气勘探方面的重要性虽然不如重力流,但目前已经开始引起了石油勘探领域的重视。作为新的牵引底流内波、内潮汐和等深流一样具有良好的油气勘探意义,它们也都具有油气远景^[8 36 42 75]。这是因为,潮汐、内波或等深流砂级沉积由于深水牵引流的反复淘洗,使得结构成熟度较高,孔隙和储集性能甚至比浊积岩还优,因此是潜在的油气储层,这将吸引沉积学家和石油地质学家更多的注意力。

层序地层学理论源于石油地质和油气勘探,反过来,它又成为当今油气勘探和预测的一个重要方法和手段。层序地层在油气勘探中的重要意义毋庸置疑。可以说,层序地层成功应用于浅海—陆棚边缘甚至陆相环境中的油气勘探例子不胜枚举,但在深海沉积中应用的成功例子尚不多见,如英国北海^[52 75 76]、中国东海盆地^[77]的三级层序 LST 砂体均被视为重要的深海储层。造成这种状况的主要原因是深海层序地层理论本身不够完善,深海层序单元和界面由于方法技术原因无法直接观察,因而识别划分十分困难,以及现有海底扇模式的偏差。然而,海底扇是构成深海层序 LST 的主体,海平面低水位时期形成的深海水

道—堤坝体系^[60]——主要深海储层的识别及其体系域归属也就成为深海层序地层在油气勘探中发挥重要作用的关键。由此不难相信,随着理论的改进及深海探测技术的提高,层序地层在指导深海油气勘探方面将起到越来越为重要的作用。

5 小结

通过深海沉积理论进展、认识及其在油气勘探中的巨大潜能总结分析,作以下小结:

(1) 与沉积物重力流相关的深海沉积作用理论面临新的解释甚至否定,Shanmugam 等的砂质碎屑流理论补充和完善了相关理论。

(2) 浊积岩的使用仅限于浊流作用的沉积产物,不应与“鲍玛序列”所有的沉积等同起来;“鲍玛序列”概念使用时应尽可能提醒读者注意其含义,并予以引号标注;建议在使用深海环境模式时废弃“浊积扇”概念,采用“深海扇”、“海底扇”予以取代。

(3) 深海牵引流(等深流、内波、内潮汐)由大量实验和模拟完成,地质观测和应用却难以成功,二者需要密切联合。

(4) 深海层序地层单元的识别划分是深海油气

勘探的一种重要方法手段。斜坡侵蚀面、低水位下超面和水下沉积间断面可以是划分层序单元的主要界面。通常情况下, 当沉积背景以陆缘碎屑沉积为主时, LST 主要为盆底扇, TST 和早期 HST 表现为非钙质远洋沉积, 晚期 HST 一般不发育; 当碳酸盐为沉积背景时, LST 主体为线状物源的碎屑流和跨塌崩塌沉积, TST 和早期 HST 多表现钙质细粒沉积, 晚期 HST 在碳酸盐生产速率较高条件下可有较小规模的钙屑海底扇。

(5) 深海沉积理论在油气勘探中具有重要意义。LST 浊积砂体、砂质碎屑流形成的块状不规则砂体、深海牵引流砂体可在深海储层预测方面具有巨大潜力。但要想在深海油气勘探取得突破, 沉积作用及其过程的理论体系精细研究是关键。深海沉积承载中国能源之未来^[78]!

参考文献 (References)

- Shanmugan G, Moidak R J. Reinterpretation of depositional processes in a classic flysch sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansas and Oklahoma [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 672-695
- Shanmugan G. High density turbidity currents: Are they sandy debris flows [J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66: 2-10
- Shanmugan 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
- Shanmugan G. Ten turbidite myths [J]. Earth-Science Reviews, 2002, 58: 311-341
- Shanmugan G. A Preliminary experimental study of turbidite fan deposits discussion [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(5): 838-841
- Shanmugan G. Deep-water Processes and Facies Models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs [M]. Elsevier, New York, 2006: 473
- 高振中, 罗顺社, 何幼斌, 等. 鄂尔多斯地区西缘中奥陶世等深流沉积 [J]. 沉积学报, 1995, 13(4): 16-25 [Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, He Youbin, et al. The Middle Ordovician contourite on the west margin of Ordos [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1995, 13(4): 16-25]
- 高振中, 何幼斌, 刘成鑫, 等. 深水牵引流沉积的研究历程现状与前景 [J]. 古地理学报, 2006, 8(3): 331-338 [Gao Zhenzhong, He Youbin, Liu Chengxin, et al. History, status and prospect of study on deep-water traction current deposits [J]. Journal of Paleogeography, 2006, 8(3): 331-338]
- Howe J A, Pudsey C J, Cunningham A P. Pliocene-Holocene contourite deposition under the Antarctic circumpolar current, Western Falkland Trough, South Atlantic Ocean [J]. Marine Geology, 1997, 138: 27-50
- Ray R D, Mitchum G T. Surface manifestation of internal tides in the deep ocean: observations from a limetry and island gauges [J]. Progress in Oceanography, 1997, 40: 135-162
- Ribbe J, Holloway P E. A model of suspended sediment transport by internal tides [J]. Continental Shelf Research, 2001, 21: 395-422
- Knutz P C, Jones E J W, Austin W E N, et al. Glycerine slope sedimentation, contourite drifts and bottom current pathways on the Barra Fan, UK North Atlantic margin [J]. Marine Geology, 2002, 188: 129-146
- Gerken A T, Lam F P A, Maas L R M. Internal tides in the Bay of Biscay: conversion rates and seasonal effects [J]. Deep-Sea Research II, 2004, 51(25/26): 2995-3008
- Gerken A T, Staquet C, Bounie A, Aubertot P. Non-linear effects in internal-tide beams and mixing [J]. Ocean Modelling, 2006, 12: 302-318
- Dohan K, Sutherland B R. Numerical and laboratory generation of internal waves from turbulence [J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2005, 40: 43-56
- Llave E, Schonfeld J, Hernandez-Molina F J. High-resolution stratigraphy of the Mediterranean outflow contourite system in the Gulf of Cadiz during the late Pleistocene: the impact of Heinrich events [J]. Marine Geology, 2006, 227: 241-262
- Haq B U. Sequence stratigraphy, sea level change, and significance for the deep sea [C] // Macdonald D I M, ed. Sedimentation, Tectonics and Eustasy: Sea Level Changes at Active Margins. Special Publication of the IAS, 1991, 12: 3-39
- Boiano U. Anatomy of a siliciclastic turbidite basin: the Gorgoglione Flysch, Upper Miocene, southern Italy: physical stratigraphy, sedimentology and sequence-stratigraphic framework [J]. Sedimentary Geology, 1997, 107: 231-262
- Ito M. Contemporaneity of component units of the low stand systems tract: an example from the Pleistocene Kazusa forearc basin, Boso Peninsula, Japan [J]. Geology, 1998, 26(10): 939-942
- Pinheiro-Moreira J L, Nalpas T, Joseph P, et al. Seismic stratigraphy of the Eocene northern continental margin of the Santos basin (Brazil): relationships between platform and turbidite systems read from depositional sequences [J]. Earth and Planetary Sciences, 2001, 332: 491-498
- Modica C J, Brush E R. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil [J]. AAPG Bulletin, 2004, 88(7): 923-945
- Stow D A V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: new models for the 21st century [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 125-135
- 王春修. 国外深水油气勘探动态及经验 [J]. 中国海上油气 (地质), 2002, 16(2): 141-144 [Wang Chunxiu. Trends and Experiences of deep water oil-gas exploration overseas [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2006, 16(2): 141-144]
- 田洪亮, 杨金华. 全球深海油气勘探开发形势分析与展望 [J]. 国际石油经济, 2006, 14(9): 1-4 [Tian Hongliang, Yang Jinhua. View on global development and exploitation of oil-gas [J]. International

- Petroleum Economics 2006, 14(9): 1-4]
- 25 Bouma A H. Sedimentology of Some Flysch Deposits: A Graphic Approach to Facies Interpretation[M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 168
 - 26 Sanders J E. Primary sedimentary structures formed by turbidity currents and related resedimentation mechanisms[C]// Middleton G V, ed. Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 1965, 12: 192-219
 - 27 Van der Lingen G J. The turbidite problem[J]. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 1969, 12: 7-50
 - 28 Miall A D. In defense of facies classifications and models[J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(1): 2-5
 - 29 Shanmagan 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 (61-67N): Implications for sand distribution[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(6): 910-937
 - 30 黄子齐. 有关海底扇的新观点及其勘探意义[J]. 海洋地质动态, 1998, 7: 7-9 [Huang Ziqi. New insights and exploration significance of submarine fan[J]. Marine Geology Letters, 1998, 7: 7-9]
 - 31 秦建华. 砂质碎屑流和底流改造, 部分传统浊积岩成因新解[J]. 四川地质学报, 1999, 19(4): 266-272 [Qin Jianhua. Sandy debris flow and bottom current reworking: a new interpretation of the formation of a part of traditional turbidite[J]. Sichuan Geology, 1999, 19(4): 266-272]
 - 32 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): 1-4 [Zhang Xinyang, Luo Shunshè, He Youbin. 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): 1-4]
 - 33 庞雄, 陈长民, 朱明, 等. 深水沉积研究前线问题[J]. 地质论评, 2007, 53(1): 36-43 [Pang Xiong, Chen Changmin, Zhu Ming, et al. Frontier of the deep water deposition study[J]. Geological Review, 2007, 53(1): 36-43]
 - 34 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侏罗—白垩系为例[J]. 矿物岩石, 2000, 20(1): 45-51 [Li Xianghui, Wang Chengshan, Hu Xiujian. Sediments of sandy debris-flow in deep-sea environment: verification from massive sandstone of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous in Tibetan Tethys Himalayas[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2000, 20(1): 45-51]
 - 35 Sutherland B R, Hughes G O, Dalziel S B, et al. Internal waves revisited[J]. Dynamics of Atmospheres and Oceans, 2000, 31: 209-232
 - 36 Wynn R B, Stow D A V. Recognition and interpretation of deep-water sediment waves: implications for palaeoceanography, hydrocarbon exploration and flow process interpretation[J]. Marine Geology, 2002, 192: 1-3
 - 37 许文彬, 徐茂泉, 孙美琴, 等. 深流沉积研究现状与展望[J]. 台湾海峡, 2004, 23(3): 394-402 [Xu Wenbin, Xu Maoquan, Sun Meiqin. Research status and perspective of contour current deposits[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2004, 23(3): 394-402]
 - 38 Stow D A V, Lovell J P B. Contourites: their recognition in modern and ancient sediments[J]. Earth-Science Reviews, 1979, 14(3): 251-291
 - 39 何幼斌, 高振中. 内潮汐、内波沉积的特征与鉴别[J]. 科学通报, 1998, 43(9): 903-908 [He Youbin, Gao Zhenzhong. The characteristics and recognition of internal-tide and internal-wave deposits[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(9): 903-908]
 - 40 Faugeres J C, Stow D A V. Bottom-current-controlled sedimentation: a synthesis of the contourite problem[J]. Sedimentary Geology, 1993, 82(1-4): 287-297
 - 41 Shamugan G, Moola R J. Eustatic control of turbidites and winnowed turbidites[J]. Geology, 1982, 10: 231-235
 - 42 高振中, 何幼斌. 中国油气勘探的一个新领域——深水牵引流沉积[J]. 海相油气地质, 2002, 7(4): 1-7 [Gao Zhenzhong, He Youbin. A new exploration field of China deep water traction sediment[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2002, 7(4): 1-7]
 - 43 何幼斌, 高振中, 郭成贤, 等. 石门杨家坪下寒武统杷榔组三段内波和内潮汐沉积研究[J]. 中国地质, 2005, 32(1): 62-69 [He Youbin, Gao Zhenzhong, Guo Chengxian, et al. Study on internal-wave and internal tide deposits of the third member of the Lower Cambrian Baling Formation at Yangjiaping, Shimen[J]. Chinese Geology, 2005, 32(1): 62-69]
 - 44 张兴阳. 深水牵引流形成的床形单元组合[J]. 古地理学报, 2000, 2(2): 28-36 [Zhang Xinyang. Bedform unit assemblages of deep water traction current origin[J]. Journal of Paleogeography, 2000, 2(2): 28-36]
 - 45 张兴阳, 何幼斌, 罗顺社, 等. 内波单独作用形成的深水沉积物波[J]. 古地理学报, 2002, 4(1): 83-89 [Zhang Xinyang, He Youbin, Luo Shunshè, et al. Deep water sediment waves formed by internal waves[J]. Journal of Paleogeography, 2002, 4(1): 83-89]
 - 46 王青春, 鲍志东, 贺萍. 内波沉积中指向沉积构造的形成机理[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 255-259 [Wang Qingchun, Bao Zhidong, He Ping. The generation mechanism of orientating sedimentary structure by internal waves[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 255-259]
 - 47 王青春, 贺萍, 牛传华, 等. 内波与内潮汐沉积作用的方式[J]. 海相油气地质, 2006, 11(3): 39-45 [Wang Qingchun, He Ping, Ni Chuanhua, et al. A review on research of internal-wave and internal-tide deposition in waters[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2006, 11(3): 39-45]
 - 48 Gerken A T, Lan F P A, Maa L R M. Internal tides in the Bay of Biscay: conversion rates and seasonal effects[J]. Deep-Sea Research II, 2004, 51: 2995-3008
 - 49 Katsumata K. Two- and three-dimensional numerical models of internal tide generation at a continental slope[J]. Ocean Modelling, 2006, 12: 32-45
 - 50 Petuncio E T, Paduan J D, Rosenfeld L K. Numerical simulations of the internal tide in a submarine canyon[J]. Ocean Modelling, 2002,

- 4: 221-248
- 51 高振中, 何幼斌, 张兴阳, 等. 塔中地区中晚奥陶世内波、内潮汐沉积 [J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 400-407 [Gao Zhenzhong He Youbin, Zhang Xingyang *et al*. Internal wave and internal tide deposits of the Middle Upper Ordovician in the central Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(3): 400-407]
- 52 Kolla V. Low stand deep-water siliciclastic depositional systems characteristics and terminology in sequence stratigraphy and sedimentology [J]. Bulletin of Centres Rech Explor Prod Elf Aquitaine, 1993, 17(1): 67-78
- 53 Shamugan G. Deep-water exploration conceptual models and their uncertainties [J]. Nigerian Association of Petroleum Explorations Bulletin, 1997, 12/01: 11-28
- 54 Brett C E, McLaughlin P I, Comellis R, *et al*. Comparative sequence stratigraphy of two classic Upper Ordovician successions Trenton Shelf (New York-Ontario) and Lexington Platform (Kentucky-Ohio): implications for eustasy and local tectonism in eastern Laurentia [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2004, 210: 295-329
- 55 Algeo T J, Schwark L, Hower J C. High-resolution geochemistry and sequence stratigraphy of the Hushpuckney Shale (Swope Formation, eastern Kansas): implications for climate-environmental dynamics of the Late Pennsylvanian Midcontinent Seaway [J]. Chemical Geology, 2004, 206: 259-288
- 56 Sprague A R, Lane D K, Faulkner B L, *et al*. Sequence stratigraphy, facies architecture and reservoir distribution, Cretaceous low-stand fan reservoirs southern basin onshore Trinidad [J]. AAPG Bulletin, 1996, 8(8): 13-38
- 57 田景春, 陈洪德, 彭军, 等. 右江盆地深水沉积层序地层学研究 [J]. 沉积学报, 2000, 18(2): 210-214 [Tian Jingchun, Chen Hongde, Peng Jun, *et al*. Study on sequence stratigraphy of deep water sediments in Youjiang Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(2): 210-214]
- 58 章正军, 丁俊, 赵珉. 滇东南地区下三叠统永宁镇组层序地层特征及钙屑浊积岩形成机制探讨 [J]. 云南地质, 1995, 14(3): 238-248 [Zhang Zhengjun, Ding Jun, Zhao Min. The features of sequence stratigraphy of Lower Yongningzhen Formation and mechanism forming the calcic turbidite in SE Yunnan [J]. Yunnan Geology, 1995, 14(3): 238-248]
- 59 Vail P R, Mitchum R M, Todd R G, *et al*. Seismic stratigraphy and global changes of sea level [C] // Payton C E ed. Seismic Stratigraphy: Applications to Hydrocarbon Exploration. AAPG Memoir, 1977, 26: 49-212
- 60 Weinert P. Sequence stratigraphy, facies geometries and depositional history of the Mississippi Fan, Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 425-453
- 61 Tose L A. Sequence stratigraphy of mixed carbonate/volcaniclastic slope deposits flanking the Scilla-Catinaccio buildup dolomites Italy [C] // Bradner R, ed. The northern margin of the Catinaccio Platform: Guidebook Excursion A, 1991: 17-39
- 62 Steinhilff D M. Recognizing exposure drowning and "missing beats": platform-interior to platform-margin sequence stratigraphy of middle Ordovician, east Tennessee [J]. Journal of Sedimentary Research, 1995, 65(2): 183-207
- 63 Mullins H T. Comment on Eustatic control of turbidites and winnowed turbidites [J]. Geology, 1983, 11: 57-58
- 64 Droxler A W, and Schlager W. Glacial versus interglacial sedimentation rates and turbidite frequency in the Bahamas [J]. Geological Society America Bulletin, 1985, 13: 799-802
- 65 Walker R G. Turbidites and submarine fans [C] // Walker R G, James N P, eds. Facies Models: Response to Sea Level Change. Geological Association of Canada, 1992: 239-263
- 66 覃建雄, 曾允孚, 陈洪德, 等. 碳酸盐斜坡沉积层序地层研究 [J]. 石油实验地质, 1999, 21(2): 110-118 [Qin Jianxiong, Zeng Yongfu, Chen Hongde, *et al*. Sequence stratigraphy study of carbonate slope deposit [J]. Experimental Petroleum Geology, 1999, 21(2): 110-118]
- 67 Pettingill H S S. Turbidite giants—lessons from the world's largest turbidite discoveries [C]. EAGE/AAPG 3rd Research Symposium on Developing and Managing Turbidite Reservoirs, 3-9 October 1998, America, Spain, A027
- 68 Richardson G E, French L S, Baud R D, *et al*. Deepwater Gulf of Mexico 2004. America's Expanding Frontier. U.S. Department of Interior, Minerals Management Service, Gulf of Mexico OCS Region, OCS Report M 2004-021, 2004 [C/OL]. <http://www.gomr.mms.gov/homepg/offshore/deepwater.html>
- 69 贾秀明, 岳来群, 韦子亮. 有关我国深海油气资源勘探开发的几点思考 [J]. 国土资源情报, 2005, 7: 5-7 [Jia Xiuming, Yue Laiqun, Wei Ziliang. Several considerations on deep sea petroleum exploration and development in China [J]. Advances of Land Resources, 2005, 7: 5-7]
- 70 岳来群, 韦子亮. 深思深海油气勘探 [J]. 中国石油企业, 2005, 116-119 [Yue Laiqun, Wei Ziliang. Speculation on deep sea petroleum exploration [J]. China Petroleum Enterprise, 2005, 116-119]
- 71 Shamugan G, Moiola R J. Submarine fans characteristics, models, classification, and reservoir potential [J]. Earth-Science Reviews, 1988, 24: 383-428
- 72 周庆凡编译. 浊流沉积体系与油气勘探 [J]. 国外油气勘探, 1994, 6(3): 288-297 [Zhou Qingfan. Turbidite sedimentary systems and petroleum exploration [J]. Petroleum Exploration Overseas, 1994, 6(3): 288-297]
- 73 Stov D A V, Johansson M. Deepwater massive sands: nature, origin and hydrocarbon implications [J]. Marine and Petroleum Geology, 2000, 17: 145-174
- 74 Weinert P, Slatoff R M, Drumgoole P, *et al*. Developing and managing turbidite reservoirs: case histories and experiences: results of the 1998 EAGE/AAPG Research Conference [J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(4): 453-465
- 75 Loizou N. Exploration along the UK Atlantic margin: The story so far [C/OL] // DTI Oil & Gas Maximising Recovery Programme (formerly SHARP) Review, 2004. <http://or.mil.co.uk/issue/8/articles/dt-atlantic>

- 76 Shanmugan G, Bloch R B Basin floor fans in the North Sea sequence stratigraphic models vs sedimentary facies [J]. AAPG Bulletin, 1995, 79 (4): 477-512
- 77 周士科, 徐长贵. 轴向重力流沉积: 一种重要的深水储层——以东海盆地丽水凹陷明月峰组为例 [J]. 地质科技情报, 2006, 25 (5): 57-62 [Zhou Shike, Xu Changgui. One kind of important deep water reservoir: the longitudinal gravity currents sediments—a case study in Minguofeng Formation in Lishui Sag, East China Sea Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25 (5): 57-62]
- 78 安飞. 深海石油承载中国能源之未来 [J]. 中国船检, 2006, 40-43 [An Fei. Deep sea oil exploration promises future of Chinese energy sources [J]. China Ship Survey, 2006, 40-43]

A Review on Deep-Sea Sedimentation Theory: Significances to Oil-gas Exploration

LIXiang-hui¹ WANG Cheng-shan² JIN Wei³ RAN Bo²

(1. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083;

3. Exploration and Development Research Institute, Daqing Oilfield Company Limited, Daqing, Heilongjiang 163712)

Abstract It has been challenged for the sedimentological theories such as “Bouma Sequence” and “turbidite fan”, in the direction of deep-sea oil-gas exploration. This is because, as Shanmugan *et al.* say, the “Bouma Sequence” is not a unique product of turbidity sedimentation, but results from cooperation of several sedimentation, i.e., sandy debris flow, turbidity current, internal tide and wave, contour current. Following the interpretation by Shanmugan *et al.*, it is summarized as: sediments of the “Bouma Sequence” section A could be caused by sandy debris flow besides of turbidity current; those with cross-beddings within the sections B-D be traction current; only those by turbidity current could be called turbidite; so-called “high density turbidity” is not real turbidity but sandy debris flow; turbidity current is Newton current and turbulent sediment gravity flow; there are no suspended layer and reverse grading within turbidite. It lacks linkage for deep-sea traction current between theory and practice although advances have been made. And as an aspect of sedimentation, deep-sea sequence stratigraphy is to some degree different from that in shallow sea: there are at least three types of sequence boundaries——slope erosional surface, downlap surface of lowstand systems tracts (LST), and submarine sediment hiatus surface, when it is dominated by a terrigenous depositional setting. LSTs would be composed of submarine fan sediments, transgressive systems tracts (TSTs) and early highstand systems tracts (HSTs) are probably of non-calcareous pelagic sediments, and few HSTs are found when it becomes carbonate setting. LSTs are dominant of slump and debris sediments, TSTs and early HSTs could spread on submarine fan, and late HSTs could be consisted of calciturbidites. Support remarks and suggestions are proposed by review and experienced works of deep-sea sedimentation: it would be better to invert comma “Bouma Sequence” to make a mark showing a note of not-unique causal turbidite result; it is necessary to use the term “submarine fan” and/or “deep-sea fan” instead of “turbidite fan”; study of both theoretic deep-sea traction currents (e.g. internal tide and wave, contour-rite) and practical field needs to promote in future. It is great potential and prosperous for oil-gas exploration in deep-sea sediment, especially for reservoir prediction of LST turbidite, sandy debris and bottom traction sandy bodies. However, to get a new burst in deep-sea oil-gas exploration, a key is that more precise and detailed study on theory of deep-sea sedimentation and depositional procession would be engaged in future.

Key words Bouma Sequence, sediment gravity flow, bottom traction current, turbidity current and turbidite fan, submarine fan, deep-sea sequence stratigraphy, deep-sea oil-gas exploration