

文章编号:1000-0550(2017)02-0228-13

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.003

等深流沉积研究进展

李华^{1,2,3}, 何幼斌^{1,2,3}

1.长江大学油气资源与勘探技术教育部重点实验室,武汉 430100

2.长江大学沉积盆地研究中心,武汉 430100

3.长江大学地球科学学院,武汉 430100

摘要 等深流沉积研究已有约50年的历史,其研究成果极为丰富。近10余年,随着科学技术的发展和海洋意识的提高,等深流沉积研究工作开展迅速,涌现出了大量的新成果。简要回顾了等深流沉积研究的历程,结合最新研究成果,对其进展及认识进行了总结。等深流沉积以细粒沉积为主,沉积构造及生物扰动发育,多呈细—粗—细沉积序列。其类型可分为长条形丘状漂积体、水道型漂积体、补丁型漂积体等7类。沉积模式根据地形、水动力、路径等可分为简单路径模式、复杂路径模式以及等深流与重力流交互作用模式。等深流与重力流交互作用是深水沉积研究热点之一。等深流沉积研究面临的问题及发展方向主要有三方面,即,1)完善识别标志,推广研究成果;2)综合运用多种手段和理论,探讨沉积过程与构造演化、古海洋及气候变化的耦合关系;3)加大油气勘探潜力研究力度。

关键词 等深流;等深流沉积;漂积体;底流

第一作者简介 李华,男,1984年出生,博士,讲师,深水沉积,E-mail: hli@yangtzeu.edu.cn

通讯作者 何幼斌,男,教授,沉积学,E-mail: heyoubin@yangtzeu.edu.cn

中图分类号 P512.22 **文献标识码** A

0 引言

自上个世纪60年代 Heezen *et al.* [1]在深水区发现流水波痕进而提出“等深流沉积”术语以来,等深流及等深流沉积研究已有50余年的历史。等深流是由于地球旋转而形成的温盐循环底流,即大致沿海底等深线水平流动的底流,也称等高流、水平流。等深

流沉积分布广泛,在大西洋两岸、墨西哥湾及南海等地极为发育(图1)[2]。近20余年,等深流沉积研究快速发展,围绕等深流沉积开展了一系列国际合作研究项目,如:IGCP432(1998—2001年)、IODP339(2011—2012年)以及IODP349(2014年),并发表了一系列研究成果[3-11]。众多研究之中,挪威海、北海比斯开湾及加迪斯湾的等深流沉积研究最为深

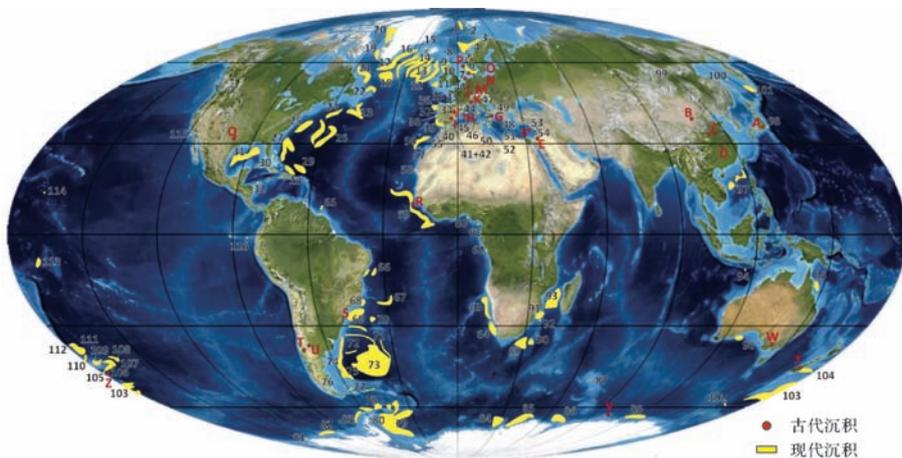


图1 等深流沉积研究实例分布图[2]

Fig.1 The distribution of case study about contourites[2]

收稿日期:2016-09-07;收修改稿日期:2016-12-29

基金项目:国家自然科学基金项目(41472096,41502101);湖北省创新群体基金(2015CFA024);长江青年基金(2015cqn26) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41472096, 41502101; Group Innovation Fund of HuBei Province, No. 2015CFA024; Yangtze Youth Fund of Yangtze University, No. 2015cqn26]

人^[3-5,9],但仍存在一系列问题,如缺乏完整的鉴别标志;研究深度和广度明显低于重力流沉积的研究,这极大阻碍了后续研究工作。在回顾等深流沉积研究历程的基础上,重点结合最近10余年等深流沉积研究进展,总结认识及主要问题,希望有助于提高等深流沉积的认识,加快等深流沉积研究的步伐。

1 概况

1.1 研究历程

1963年,Heezen *et al.*^[1]在国际物理海洋学协会(International Association of Physical Oceanography)和国际大地测量与地球物理联合会(IUGG)举办的第13届联合大会上,通过深海沉积物研究,认为深海存在“底流”,并于1964年在 *Marine Geology* 发表论文,提出了“底流”这一术语^[12],其为等深流的雏形。1966年,Heezen *et al.*^[13]正式提出了“等深流”的概念。随后,等深流及等深流沉积开始为人所认识。等深流沉积研究大致可以分为三个阶段。

初始阶段(1960—1989年):等深流及等深流沉积的提出,开创了一个崭新沉积学研究方向,具有里程碑的意义。本阶段代表性的研究成果主要是 Heezen 及 Lovell 分别领导的团队。Heezen *et al.*^[1]主要开展北大西洋的现代深海等深流沉积,包括深水照片及岩芯等。Stow *et al.*^[14]对现代和古代等深流沉积的产状、结构、沉积构造、成份等方面进行了总结。Lovell *et al.*^[15]总结了古代地层记录中砂质等深流沉积特征,即岩性多为粉砂岩、砂岩,泥质含量极少,生物扰动发育,无典型的垂向沉积序列,常见颗粒定向排列,重矿物富集等。同时,对比分析了浊流和等深流时空关系及相互作用。

发展阶段(1990—2000年):随着等深流沉积研究不断深入,并逐渐受到国际沉积学界的关注。1998年,首次启动了国际地质对比计划432项目(IGCP432,1998—2001年),该项目由 Stow 博士负责,针对等深流沉积进行了详细的研究(Courantites, Courants Profonds et Paleocirculation Oceanique),相继发表了一批重要的研究成果^[3,6-8,16]。此外,北大西洋^[7]、加迪斯海湾^[8,17]、威德尔海^[18]、巴西盆地南部^[19]、中国西秦岭^[20]、湘西^[21]、鄂尔多斯西南缘^[22]等地都陆续见到相关报道,研究内容涉及类型、沉积特征、沉积模式及主控因素等。

综合阶段(2000至今):2000年以后,等深流沉积研究发展极为迅速,等深流沉积研究论文呈明显的

上升趋势(CNKI, Elsevier, GSW),在2008年和2015年呈现两个高峰期(图2)。同时,国际学术会议也增设了等深流沉积专题。2013年,在英国曼切斯特召开的第30届国际沉积学会(IAS),共筛选了10个口头报告,11个展板进行了成果交流。另外,为及时了解、交流等深流沉积研究成果,加快等深流沉积研究步伐,第一届国际深水环流学术会议于2010年6月在西班牙成功召开(International Conference on Deep-water Circulation: Processes and Products)。2014年9月在比利时召开了第二届国际深水环流会议。第三届国际深水环流会议将于2017年在中国地质大学(武汉)召开。同时,国际合作项目也在不断增多,包括IODP339及IODP349的顺利实施,为深入了解等深流及等深流沉积提供了丰富的一手资料。本阶段研究内容除了传统的特征、鉴别标志、沉积过程、模式及影响因素外,还扩展到了等深流相关沉积的形成过程及机理研究,如等深流与重力流交互作用沉积响应,以及沉积与构造相结合的交叉研究,突出沉积过程与盆地构造演化的耦合关系等。研究资料不断丰富,包括高分辨率地震资料、浅剖、浅钻、重力流活塞样及多波束等。研究方法除了传统的地质及地球物理等定性描述研究,逐渐开始结合室内数值模拟手段,具有定性到半定量的趋势^[23-33]。

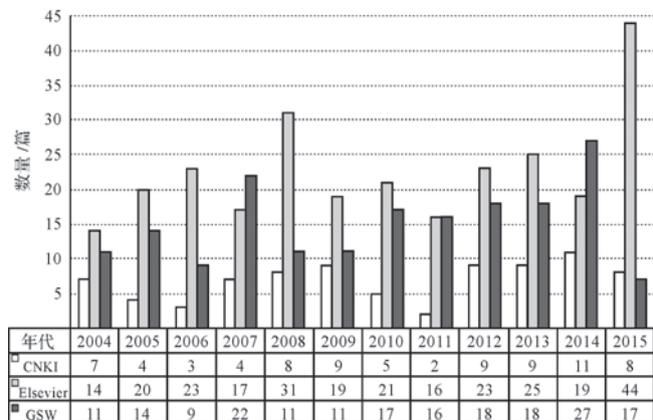


图2 2004—2015年等深流沉积文献数量统计
(检索词:等深流、等深流沉积)

Fig.2 The statistics of references on contourites in 2004—2015
(Index words: contour current, contourite)

1.2 国内等深流沉积研究

我国等深流沉积研究大致始于20世纪80年代。经过30余年的努力研究发现,我国等深流沉积具有平面分布广,涉及层位多的特点。目前,分别在川西震旦系^[34]、湘西—黔东、赣北及扬子周缘寒武

系^[21,35-36],湘北、贺兰山南麓,鄂尔多斯盆地西南缘及塔里木盆地奥陶系^[22,37-40],桂、皖中志留系^[41-42],秦岭西部及南部泥盆系^[20],西秦岭、川西、湘南及闽西南三叠系^[43-44],珠穆朗玛峰地区侏罗系^[45]以及南海北部珠江口盆地、琼东南盆地、台西南盆地中新统一第四系发现了等深流沉积^[33,46-49](图3)。

从研究历史及成果来看,总体而言,我国等深流沉积研究时间比较短,研究成果相对比较少,与国际等深流沉积研究水平还具有一定的差距。但是,我国等深流沉积研究仍然具有自己的优势。其主要体现在以下几个方面:

(1) 我国古代地层记录中的等深流沉积研究相对较多。国际等深流沉积研究多以现代沉积为对象,而加强古代地层记录中的等深流沉积的鉴别标志研究、沉积过程分析、沉积模式的探讨及主控因素的总结,有助于了解古气候、古环境及古构造。

(2) 现代等深流沉积研究成果也在逐渐增多。近年来,随着研究技术和手段的不断提高,南海等深流沉积研究明显增多,包括琼东南盆地、珠江口盆地及台西南盆地。研究资料也日益丰富,如高分辨率地震资料、浅剖、浅钻、重力流活塞样及多波束等,研究内容除了传统的等深流沉积(等深流岩丘、漂积体),还涉及改造砂(等深流改造重力流沉积)及重力流与等深流交互作用沉积等方面。

(3) 随着经济的增长,国家及国人海洋保护意识的加强,围绕“等深流及其沉积响应”为主题的科研

项目资助力度明显加大。以国家自然科学基金资助为例,2000年以前,等深流沉积相关研究资助项目仅1项,而2010年之后,以“等深流沉积过程、形成机制及主控因素”为主题的项目多达10项,层位兼顾现代和古代,且研究区都位于我国油气勘探主要区(鄂尔多斯盆地、扬子地区及南海)(表1)。

综上所述,尽管我国等深流沉积研究起步晚,但是在古代地层记录中的等深流沉积研究仍然具有较大的优势。同时,以南海现代等深流沉积研究为代表,随着技术的提高及资助力度的加强,相信在现代等深流沉积研究方面定也能获得一系列成果。

2 沉积类型及特征

2.1 等深流沉积类型及特征

2.1.1 沉积体类型

等深流能量的差异导致其沉积响应复杂多样,其沉积物粒度、沉积类型及沉积体形态各异。沉积物粒度从泥级到砾级都有,总体以泥级为主。底形类型丰富,如以侵蚀作用为主的水道、沟道、冲刷痕;以沉积作用为主的丘状、席状等深流沉积体及沉积物波(sediment waves)等。在众多研究工作中,典型的等深流沉积体类型及特征是重要研究内容之一。前人基于研究实例和手段的不同,对典型等深流沉积体(漂积体)的类型和特征进行了分类及总结,如 Rebesco *et al.*^[2], Viana *et al.*^[7], Stow *et al.*^[16], Faugères *et al.*^[50-51], Laberg *et al.*^[52], Rebesco *et al.*^[53],

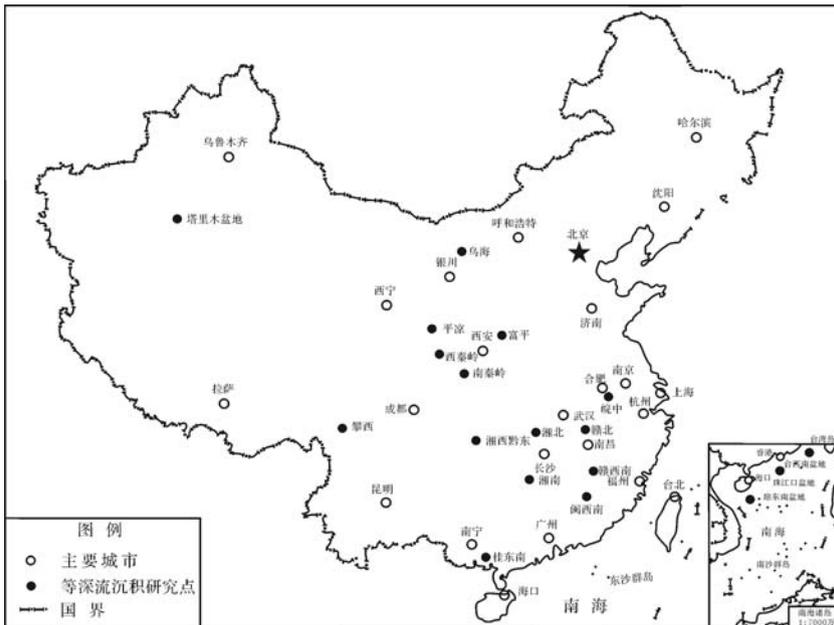


图3 中国等深流沉积研究分布图^[20,22,33-49]

Fig.3 The distribution of the case study contourites in China^[20,22,33-49]

表 1 等深流沉积国家自然科学基金项目统计

Table 1 The statistics of national natural science fund project about contourites

| 序号 | 项目批准号 | 项目名称 | 项目负责人 | 依托单位 | 项目起止时间 |
|----|----------|-----------------------------------|-------|--------------|-----------------|
| 1 | 91528304 | 南海深海沉积过程与机制 | 刘志飞 | 同济大学 | 2016.01—2018.12 |
| 2 | 41502101 | 鄂尔多斯盆地西南缘中奥陶统重力流与等深流交互作用沉积研究 | 李华 | 长江大学 | 2016.01—2018.12 |
| 3 | 41472096 | 鄂尔多斯盆地西南缘中奥陶统等深流沉积及其主控因素研究 | 何幼斌 | 长江大学 | 2015.01—2018.12 |
| 4 | 41372115 | 深水单向迁移水道的成因机理及其内的浊流、内潮流与等深流交互作用研究 | 王英民 | 中国石油大学(北京) | 2014.01—2017.12 |
| 5 | 41172101 | 华北南缘与西缘早古生代等深流沉积特征类比及地质意义 | 屈红军 | 西北大学 | 2012.01—2015.12 |
| 6 | 41172105 | 中扬子台地南侧下奥陶统等深岩丘形成机理研究 | 罗顺社 | 长江大学 | 2012.01—2015.12 |
| 7 | 41072086 | 鄂尔多斯盆地西缘中奥陶统深水牵引流沉积研究 | 何幼斌 | 长江大学 | 2011.01—2013.12 |
| 8 | 41106056 | 南海南部礼乐海区深水底流沉积特征研究 | 郑红波 | 中国科学院南海海洋研究所 | 2012.01—2014.12 |
| 9 | 91028003 | 南海北部陆坡区深水沉积物牵引体的时空分布及形成机制 | 钟广法 | 同济大学 | 2011.01—2014.12 |
| 10 | 40972077 | 深水重力流与底流交互作用的过程和响应,以台湾浅滩陆坡为例 | 王英民 | 中国石油大学(北京) | 2010.01—2012.12 |
| 11 | 49872050 | 下古生界深水牵引流沉积研究 | 高振中 | 长江大学 | 1999.01—2001.12 |

Hernández-Molina *et al.*^[54],高振中等^[55]。

综合各种分类方案,结合外形和等深流沉积形成过程,将等深流沉积体分为长条形丘状漂积体(elongated, mounded drifts)、水道型漂积体(channel-related drifts)、补丁型漂积体(patch drifts)、断控型漂积体(fault-controlled drifts)、席状漂积体(sheeted drifts)、限制型漂积体(confined drifts)、填充型漂积体(infill drifts)及复合型漂积体(mixed drifts)(图 4)^[16,53]。大型长条形丘状漂积体剖面为丘状,平面上成条带状或长条形,大致平行斜坡分布。水道型漂积体多发育

在大型水道或海峡(Gateway),由于限制环境,流体速度较高,能量较强。补丁状漂积体形态各异,规模一般较小,主要受地形控制。断层可以控制底形及底形高低差异,因而控制等深流沉积形成断控型漂积体。席状漂积体外形多为席状,在深海平原较为常见。限制型漂积体为丘状,发育等深流水道(moat),多形成于限制型的低洼底形。填充型漂积体多发育在滑塌处。复合型漂积体为等深流与其他性质(如重力流)的水动力综合作用形成的沉积体。

另外,关于等深流沉积底形及特征研究,不得不

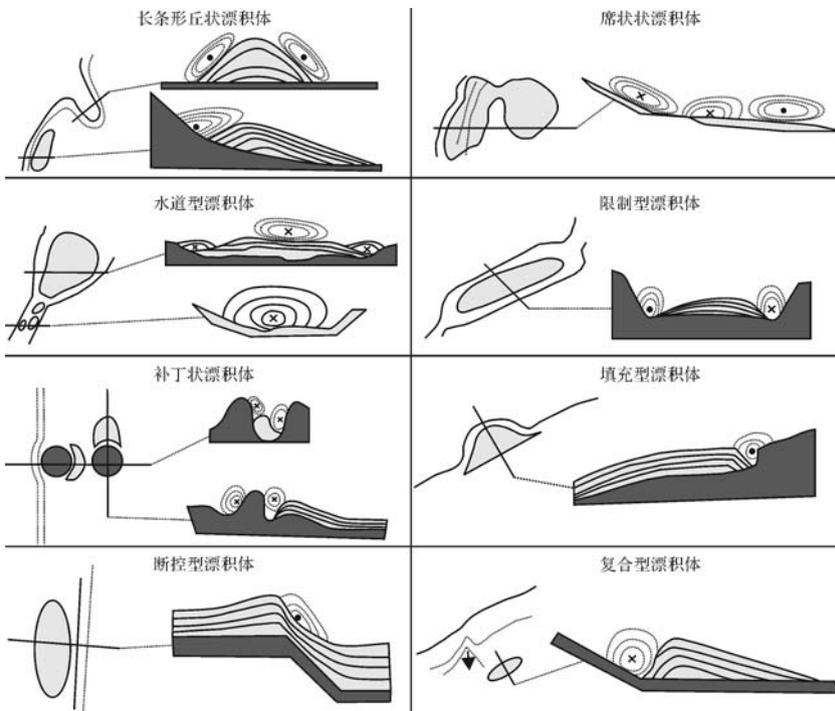
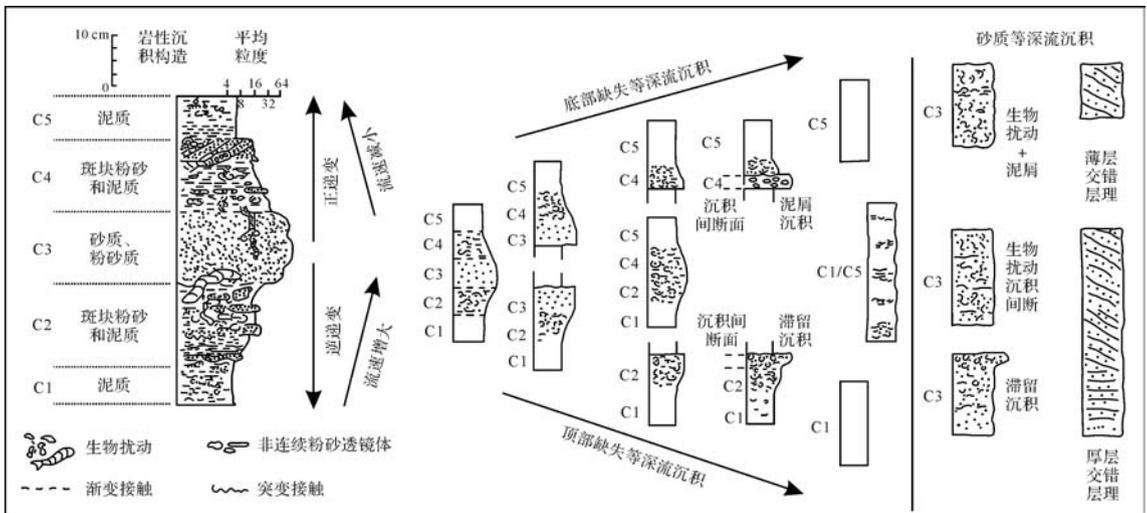


图 4 等深流沉积体类型^[2,5,50-54]

Fig.4 The type of contourites^[2,5,50-54]

图6 等深流沉积序列^[57]Fig.6 The contourite sequences^[57]

表的底流改造砂 (bottom-current reworked sands)^[60-65];二是等深流与重力流同时作用的沉积响应(重力流爆发末期或间歇期能力较弱时,重力流与等深流能量大致相当)^[48-49,65-72]。三是重力流与等深流沉积互层,即在地质历史时期内,探讨重力流与等深流相互作用过程及沉积响应,研究沉积过程与盆地构造演化耦合机制,建立沉积与构造、古气候、古海洋之间的联系^[9]。

底流改造砂岩性以砂和粉砂岩为主。单层厚度小,一般不超过5 cm,以薄层、纹层状为主;沉积构造常见砂纹层理、透镜状层理、波状层理及双泥层等;通常见突变或渐变接触,多为反粒序沉积序列(图7a, b)^[60-65]。

单向迁移水道(峡谷)是重力流与等深流交互作用形成的重要类型之一。其典型的特征是具有明显的单向迁移特征,迁移方向与等深流运动方向相同;水道内部发育侧积体(图7c)。其形成可分为三个阶段。1)重力流爆发初期,能量高,以侵蚀作用为主。2)随后,重力流能量相对减弱,在水道中表现为侵蚀及沉积特征。等深流可将一部分沉积物搬运至水道中沉积并保存下来,侧积体开始发育。水道开始表现出一定的迁移特征。3)重力流末期或间歇期,能量微弱,在水道中以沉积为主。等深流占主导作用,其可搬运大量沉积物至水道中沉积,并得以保存,此阶段侧积体大量发育。目前,单向迁移水道在西非加蓬盆地、巴西坎波斯盆地、格林兰伊尔明厄盆地、中国南海琼东南盆地及珠江口盆地等地区均有报

道^[48-49,66-71]。另外,等深流也可对重力流沉积(海底扇、朵叶)进行改造、搬运再沉积,使得海底扇外形不对称,并具有偏转特征,偏转方向与等深流方向相同^[15]。

等深流与重力流沉积互层在地层记录中极为常见,其代表在地质历史时期内等深流与重力流主导作用的交替变化(图7d)。早期等深流沉积研究多数集中在其沉积标志、特征、形成过程和模式上,较少将等深流沉积形成过程与盆地演化、古地理、古海洋等变化很好的结合起来。2016年, Hernández-Molina *et al.*^[9]将加迪斯海湾的等深流沉积演化与大陆边缘演化、古海洋及海平面升降等进行了综合研究。认为构造运动影响盆地的性质、大陆边缘的形成及等深流沉积响应。研究区等深流沉积可分为初始阶段、转换阶段及发育阶段。构造运动、物源供给、海平面升降和气候可以控制等深流沉积。本成果无论是研究资料 and 手段,还是研究内容和认识上来看都是较为全面的,为今后等深流沉积研究工作的开展提供了一个重要方向。

2.3 沉积模式及主控因素

2.3.1 沉积模式

前人做了很多关于等深流沉积模式的建立工作,提出了不同的模式^[8,15,22,54-55,63]。尽管各种模式都有不同的特色和优势,综合大部分模式方案,笔者认为 Hernández-Molina *et al.*^[54]的等深流沉积模式较为全面,其兼顾了流体及沉积底形的形成和分布,还涉及了等深流与重力流交互作用(图8)。其将等深流沉

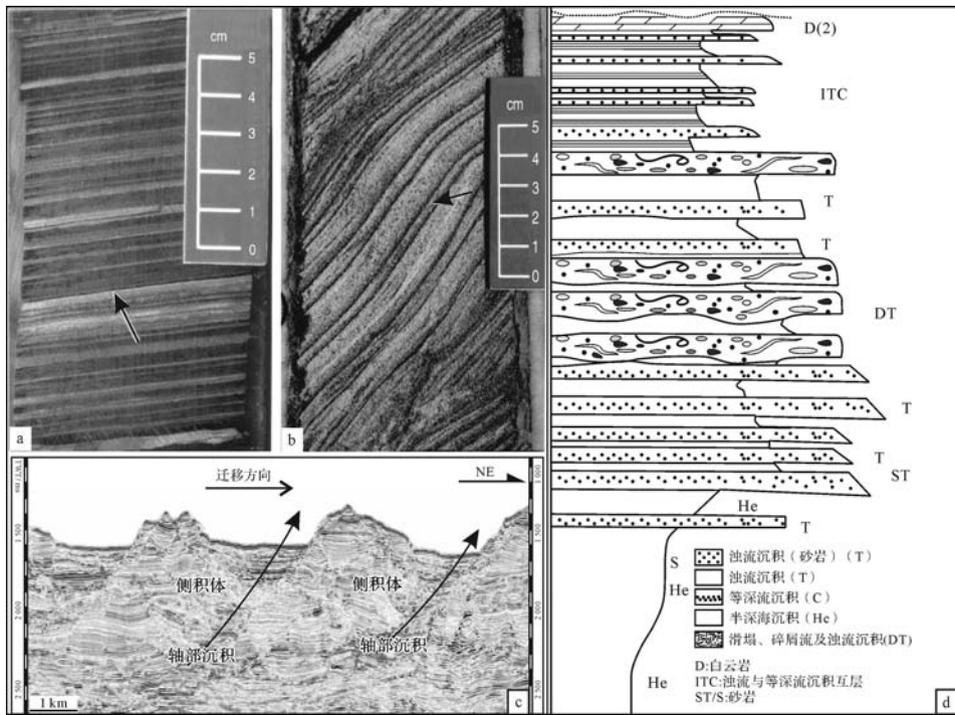


图7 等深流与重力流交互作用沉积实例

a. 砂泥韵律互层,反粒序,向上与砂层突变接触^[63]; b. 双泥层^[63]; c. 南海北部珠江口盆地单向迁移水道^[48]; d. 加迪斯海湾等深流沉积与重力流沉积互层^[9]

Fig.7 The case study of interaction between contour current and gravity flow

a. rhythmic layers sand and mud, inverse grading, sharp upper contact of sandy layer^[63]; b. Double mud layers^[63]; c. unidirectionally migrating channels^[44]; d. interbedded contourites and gravity flow deposits^[9]

积模式分为了三类。

(1) 简单路径模式:本模式等深流运移路径较为单一,底形差异较小,螺旋型水流可形成丘状漂积体,层状水流多形成席状漂积体和沉积物波。其多出现在构造活动较弱,底形多简单地区,如巴西斜坡和欧洲北部大陆边缘。

(2) 复杂路径模式:该模式底形差异较大,等深流主要为螺旋型,次生环流较为明显,可形成丰富的丘状漂积体和沉积物波,如大型长条状漂积体、限制性漂积体等,同时可见侵蚀底形(沟道、沟渠)。多出现在构造活动较强烈,地形较为复杂地区,如主动大陆边缘、加迪斯海湾。

(3) 等深流与重力流交互作用模式:在重力流水道和滑塌区,重力流在沿斜坡向下运动过程中的,等深流可对重力流沉积进行改造、搬运、再沉积。等深流可对水道迎流一侧的堤岸进行改造,在顺流一侧产生沉积,进而形成不对称的堤岸沉积。而在水道内侧积体发育,整体呈现出单向迁移的特征,迁移方向与等深流运动方向相同。本模式在重力流活动活跃地

区较为常见。

2.3.2 主控因素

等深流沉积影响因素众多,主要有运移路径、速度及次生环流、物源供给、海平面升降、气候变化、构造运动、作用时间及其他性质水动力作用等^[51,55]。

(1) 运移路径:海底底形、大陆边缘的凹凸变化等可形成简单和复杂的运移路径,长时间的等深流作用可形成不同类型的沉积底形,进而产生丰富的沉积体(图8)。

(2) 速度及次生环流:等深流运动的速度直接影响其沉积底形,速度快、能量高,以侵蚀型为主;速度低可能形成漂积体和沉积物波。同时,次生环流可形成不同形态的漂积体,螺旋型水流多形成丘状漂积体,而层状水流主要形成席状漂积体。

(3) 物源供给:等深流沉积的类型和规模与沉积速率密切相关。物源供给的多少及有效性直接决定等深流沉积。而物源供给通常为构造运动、海平面升降及气候变化所影响。

(4) 海平面升降:海平面升降主要是影响物源的

次资料研究了等深流沉积与构造运动、沉积演化及古海洋变化之间的耦合关系。其研究认为构造运动影响陆架边缘、重力流和等深流沉积体系的发育。根据构造演化及等深流沉积的特征,将等深流沉积形成分为三个阶段。1)初始阶段(5.33~3.2 Ma),地中海外流(MOW)作用较弱;2)过渡阶段(3.2~2 Ma);3)生长阶段(2 Ma至今),地中海外流作用逐渐增强。

3.2 油气勘探

等深流沉积的油气地质意义主要体现在储层和烃源岩两个方面。等深流的长时间持续作用,可以对早期重力流沉积进行改造,进而提高重力流沉积储集性能(改造砂)。而砂质、砾质等深流沉积本身具有良好的储集性能。1993年,Shanmugam *et al.*^[62]对墨西哥湾两种改造砂的物性进行了对比研究,其含砂率最高达80%,孔隙度25%~40%,渗透率(100~1 800) $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。巴西 Campos 盆地^[4]、西非^[72]、中国南海^[65]等地也见等深流(底流)改造砂作为重要储层。另外,阿拉伯克拉通白垩系等深流沉积也具丰富的油气资源,其已具有数十年的开发历史^[73]。

泥质等深流沉积可作为良好的烃源岩。徐焕华等对贺兰山拗拉槽奥陶系等深流沉积进行了有机碳和氯仿沥青“A”测试分析^[74]。研究结果表明:克里摩里组泥晶石灰岩有机碳含量0.1%~1.08%;总烃含量多大于60%,多数为腐泥型,可作为较好的烃源岩。泥质与粗粒的等深流沉积互层可以形成良好的生储盖组合,可能具备良好的油气勘探潜力。

4 主要问题及发展方向

等深流沉积研究经历了50来年的历史,通过地质学家的不断努力,在鉴别标志建立、类型分类、特征描述、沉积过程研究、主控因素探索以及沉积模式构建等方面已经获得了丰硕的成果,但仍存在一些问题,因此在今后的研究中应在鉴别标志、综合研究以及经济价值等方面重点加强。

(1) 完善识别标志

等深流沉积与重力流沉积研究开始时间相差不大,但是目前重力流沉积无论是国内外的公开文献、专著还是学术会议交流,研究成果远远多于等深流沉积。且等深流沉积主要是针对现代沉积,古代地层记录中的等深流沉积研究实例较少,使得等深流沉积鉴别标志不完善,甚至存在多解性,这极大阻碍了等深流沉积的识别和研究。另外,深水水动力复杂,沉

积响应具有多样性、复杂性和多解性特征。在实际研究过程中,由于等深流沉积的重视程度不够,存在着将等深流沉积解释为重力流或其他水动力沉积的情况。因此,结合现代和古代研究实例,建立和完善一套等深流沉积典型标志尤为重要,这有助于等深流沉积的识别和成果的推广。

(2) 开展综合研究

在综合研究方面,国外比国内做得相对较好,但是综合研究开展极少仍然是全球等深流沉积研究的薄弱环节。在理论储备和研究手段方面,等深流沉积的特征刻画、形成过程、沉积模式和主控因素需要结合沉积学、泥沙动力学、海洋学、构造地质学、地球物理及气候等方面的理论,利用野外露头、高分辨率地震资料、钻井及测井、岩芯、浅钻、多波束扫描、水文测试、地化测试及重力活塞样等。目前,随着科学技术的发展,这方面正在向好的方面发展,特别国内对南海的重视,加大了现代等深流沉积研究的资助力度,相信今后会取得重大的突破。

在研究内容方面,希望在三个方面有所加强。

1)等深流沉积典型标志的建立和完善,形成机制的探讨和主控因素的研究。2)等深流相关沉积响应研究,关注等深流运动过程中,其他性质水动力相互作用(重力流、内波、风暴流等)的沉积现象。3)揭示等深流沉积过程与盆地构造演化、气候变化及海平面升降的耦合关系,进一步探究等深流沉积的形成过程、机制和主控因素。

(3) 挖掘油气勘探潜力

等深流沉积体可以作为良好的储集体和烃源岩,粗细的等深流沉积互层可以形成潜在的地层圈闭。目前,等深流沉积研究重在特征、过程及模式探讨,在油气勘探潜力方面做的很少。加大等深流沉积的理论和实际研究工作的结合力度,不仅能扩大油气勘探潜力领域,还能促进等深流沉积的推广。

致谢 审稿专家及编辑提出了宝贵的意见和建议,研究生王季欣完成了图件清绘工作,在此表示衷心的感谢。

参考文献(References)

- [1] Heezen B C, Hollister C D. Evidence of deep-sea bottom currents from abyssal sediments[C]//Abstracts of Papers, Internal Association of Physical Oceanography, 13th General Assembly, Internal Union Geodesy and Geophysics. 1963, 6: 111.
- [2] Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, et al. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation

- processes: state-of-the-art and future considerations[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 111-154.
- [3] Stow D A V, Pudsey C J, Howe J A, et al. Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series, Seismic and Sedimentary Characteristics [M]. London: Geological Society of London, 2002.
- [4] Viana A R, Rebesco M. Economic and Palaeoceanographic Significance of Contourite Deposits [M]. London: Geological Society of London, 2007.
- [5] Rebesco M, Camerlenghi A. Contourites [M]//Rebesco M, Camerlenghi A. *Developments in Sedimentology*. Amsterdam: Elsevier, 2008.
- [6] Hollister C D. The concept of deep-sea contourites[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 82(1/2/3/4): 5-11.
- [7] Viana A R, Faugères J C, Stow D A V. Bottom-current-controlled sand deposits—a review of modern shallow- to deep-water environments[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 115(1/2/3/4): 53-80.
- [8] Faugères J C, Imbert P, Mézerais M L, et al. Seismic patterns of a muddy contourite fan (Vema Channel, South Brazilian Basin) and a sandy distal turbidite deep-sea fan (Cap Ferret system, Bay of Biscay): a comparison[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 115(1/2/3/4): 81-110.
- [9] Hernández-Molina F J, Sierro F J, Llave E, et al. Evolution of the gulf of Cadiz margin and southwest Portugal contourite depositional system: tectonic, sedimentary and paleoceanographic implications from IODP expedition 339[J]. *Marine Geology*, 2016, 377: 7-39.
- [10] Alonso B, Ercilla G, Casas D, et al. Contourite vs. gravity-flow deposits of the Pleistocene Faro Drift (Gulf of Cadiz): sedimentological and mineralogical approaches[J]. *Marine Geology*, 2016, 377: 77-94.
- [11] Hernández-Molina F J, Soto M, Piola A R, et al. A contourite depositional system along the Uruguayan continental margin: sedimentary, oceanographic and paleoceanographic implications [J]. *Marine Geology*, 2016, 378: 333-349.
- [12] Heezen B C, Hollister C. Deep-sea current evidence from abyssal sediments[J]. *Marine Geology*, 1964, 1(2): 141-174.
- [13] Heezen B C, Hollister C D, Ruddiman W F. Shaping of the continental rise by deep geostrophic contour currents [J]. *Science*, 1966, 152(3721): 502-508.
- [14] 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.
- [15] Lovell J P B, Stow D A V. Identification of ancient sandy contourites[J]. *Geology*, 1981, 9(8): 347-349.
- [16] Stow D A V, Faugères J C, Howe J A, et al. Bottom currents, contourites and deep-sea sediment drifts: current state-of-the-art [M]//Stow D A V, Pudsey J A, Howe J C Viana. *Deep-water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series, Seismic and Sedimentary Characteristics*. London: Geological Society of London, 2002, 22: 7-20.
- [17] Nelson C H, Baraza J, Maldonado A, et al. Influence of the Atlantic inflow and Mediterranean outflow currents on late Quaternary sedimentary facies of the gulf of Cadiz continental margin[J]. *Marine Geology*, 1999, 155(1/2): 99-129.
- [18] Gilbert I M, Pudsey C J, Murray J W. A sediment record of cyclic bottom-current variability from the northwest Weddell Sea[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 115(1/2/3/4): 185-214.
- [19] Massé L, Faugères J C, Hrovatin V. The interplay between turbidity and contour current processes on the Columbia Channel fan drift, Southern Brazil Basin[J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 115(1/2/3/4): 111-132.
- [20] 晋慧娟,李育慈. 西秦岭北带泥盆系舒家坝组深海陆源碎屑沉积序列的研究[J]. *沉积学报*, 1996, 14(1): 1-11. [Jin Huijuan, Li Yuci. Study on the sequence of abyssal terrigenous clastic deposit of Shujiaba Formation (Devonian) in Northern Belt of Qinling Mountains [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1996, 14(1): 1-11.]
- [21] 刘宝珺,许效松,梁仁枝. 湘西黔东寒武纪等深流沉积[J]. *矿物岩石*, 1990, 10(4): 43-47. [Liu Baojun, Xu Xiaosong, Liang Renzhi. Contourites of Cambrian in western Hunan and eastern Guizhou [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1990, 10(4): 43-47.]
- [22] 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): 16-26. [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): 16-26.]
- [23] Kuvaas B, Kristoffersen Y, Leitchenkov G, et al. Seismic expression of glaciomarine deposits in the eastern Riiser Larsen Sea, Antarctica[J]. *Marine Geology*, 2004, 207(1/2/3/4): 1-15.
- [24] Bryn P, Berg K, Stoker M S, et al. Contourites and their relevance for mass wasting along the Mid-Norwegian Margin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(1/2): 85-96.
- [25] Hernández-Molina F J, Llave E, Stow D A V, et al. The contourite depositional system of the Gulf of Cádiz: a sedimentary model related to the bottom current activity of the Mediterranean outflow water and its interaction with the continental margin [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2006, 53(11/12/13): 1420-1463.
- [26] Marchès E, Mulder T, Cremer M, et al. Contourite drift construction influenced by capture of Mediterranean Outflow Water deep-sea current by the Portimão submarine canyon (Gulf of Cadiz, South Portugal) [J]. *Marine Geology*, 2007, 242(4): 247-260.
- [27] Stow D A V, Hernández-Molina F J, Llave E, et al. Bedform-velocity matrix: the estimation of bottom current velocity from bedform observations [J]. *Geology*, 2009, 37(4): 327-330.
- [28] Hernández-Molina F J, Paterlini M, Somoza L, et al. Giant mounded drifts in the Argentine Continental Margin: origins, and global implications for the history of thermohaline circulation [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(7): 1508-1530.
- [29] Wagner B, Aufgebauer A, Vogel H, et al. Late Pleistocene and Holocene contourite drift in Lake Prespa (Albania/F.Y.R. of Macedonia/Greece) [J]. *Quaternary International*, 2012, 274: 112-

- 121.
- [30] Brackenridge R E, Hernández-Molina F J, Stow D A V, et al. A Pliocene mixed contourite-turbidite system offshore the Algarve Margin, Gulf of Cadiz: seismic response, margin evolution and reservoir implications[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 46: 36-50.
- [31] Stow D A V, Hernández-Molina F J, Llave E, et al. The Cadiz Contourite Channel: sandy contourites, bedforms and dynamic current interaction[J]. *Marine Geology*, 2013, 343: 99-114.
- [32] Ercilla G, Juan C, Hernández-Molina F J, et al. Significance of bottom currents in deep-sea morphodynamics: an example from the Alboran Sea[J]. *Marine Geology*, 2016, 378: 157-170.
- [33] Chen Hui, Xie Xinong, Van Rooij D, et al. Depositional characteristics and processes of alongslope currents related to a seamount on the northwestern margin of the Northwest Sub-Basin, South China Sea[J]. *Marine Geology*, 2014, 355: 36-53.
- [34] 文琼英, 李桂林, 焦凤臣, 等. 攀西会理群的碳酸盐滑积岩等深积岩及其构造条件浅析[J]. *长春地质学院学报*, 1987, 17(3): 255-264. [Wen Qiongying, Li Guilin, Jiao Fengchen, et al. The carbonate olistastrome and the contourite in the Huili Group, Panxi area, and their structural control[J]. *Journal of Changchun College of Geology*, 1987, 17(3): 255-264.]
- [35] 吉磊. 赣西南寒武纪—奥陶纪深水沉积[J]. *地质学报*, 1994, 68(2): 173-184. [Ji Lei. Cambrian-Ordovician deep-water deposits in southwest Jiangxi, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1994, 68(2): 173-184.]
- [36] 罗璋, 傅中平. 桂平地区寒武系沉积特征[J]. *广西地质*, 1997, 10(4): 13-20. [Luo Zhang, Fu Zhongping. Sedimentary characteristics of Cambrian system in Guiping region[J]. *Guangxi Geology*, 1997, 10(4): 13-20.]
- [37] 屈红军, 梅志超, 李文厚, 等. 陕西富平地区中奥陶统等深流沉积的特征及其地质意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(9): 1304-1309. [Qu Hongjun, Mei Zhichao, Li Wenhou, et al. The characteristics of Middle Ordovician contour current deposits and its geological implication in Fuping region, Shaanxi province, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(9): 1304-1309.]
- [38] 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 贺兰山地区中奥陶统樱桃沟组深水牵引流沉积的发现及其意义[J]. *地学前缘*, 2015, 22(2): 221-231. [Wang Zhen tao, Zhou Hongrui, Wang Xunlian, et al. Discovery of deep-water tractive current deposits in Middle Ordovician Yingtaogou Formation, Helan Mountain area, and its significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(2): 221-231.]
- [39] 罗顺社, 席明利, 吕奇奇, 等. 湘北沉古坪地区下奥陶统等深流沉积特征研究[J]. *沉积学报*, 2015, 33(4): 641-648. [Luo Shunshu, Xi Mingli, Lü Qiqi, et al. Study on characteristics of Lower Ordovician contour current deposits in Yuanguping, northern Hunan, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 641-648.]
- [40] 李日辉. 桌子山中奥陶统公乌素组等积岩的确认及沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 1994, 15(3): 235-240. [Li Rihui. Identification of contourites in Middle Ordovician Gongwusu Formation, Zhuozishan, and depositional environment[J]. *Oil & Gas Geology*, 1994, 15(3): 235-240.]
- [41] 姜在兴, 赵激林, 熊继辉. 皖中下志留统的等深积岩及其地质意义[J]. *科学通报*, 1989, 34(20): 1575-1576. [Jiang Zaixing, Zhao Chenglin, Xiong Jihui. The lower Silurian contourite and its geological implication in central Anhui province[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1989, 34(20): 1575-1576.]
- [42] 虞子治, 施央申, 郭令智. 广西钦州盆地志留纪—中泥盆世等深流沉积及其大地构造意义[J]. *沉积学报*, 1989, 7(3): 21-29. [Yu Ziyi, Shi Yangshen, Guo Lingzhi. The paleocontourite and its tectonic significance in Qinzhou Basin, Guangxi, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1989, 7(3): 21-29.]
- [43] 李培军, 侯泉林, 孙枢, 等. 闽西南地区早三叠世溪口组深水沉积及其演化[J]. *中国科学(D辑): 地球科学*, 1998, 28(3): 219-225. [Li Peijun, Hou Quanlin, Sun Shu, et al. Deep-water sediments and evolution of the Lower Triassic Xikou Formation in southwestern Fujian, China[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 1998, 28(3): 219-225.]
- [44] 晋慧娟, 李育慈. 西秦岭造山带中三叠系复理石相研究[J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 321-326. [Jin Huijuan, Li Yuci. A study on Middle Triassic flysch facies in west Qinling Orogenic Belt[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 321-326.]
- [45] 刘宝珺, 余光明, 王成善. 珠穆朗玛峰地区侏罗系的等深积岩沉积及其特征[J]. *成都地质学院学报*, 1982, 3(2): 1-5. [Liu Baojun, Yu Guangming, Wang Chengshan. The characteristics and deposits of contour current of Jurassic in Qomolangma Mountain area[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1982, 3(2): 1-5.]
- [46] Shao Lei, Li Xuejie, Geng Jianhua, et al. Deep water bottom current deposition in the northern South China Sea[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50(7): 1060-1066.
- [47] 李云, 郑荣才, 朱国金, 等. 珠江口盆地白云凹陷珠江组深水牵引流沉积特征及其地质意义[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 127-135. [Li Yun, Zheng Rongcai, Zhu Guojin, et al. Deep-water tractive deposition in Zhujiang Formation Baiyun sag, Zhujiang River Mouth Basin and its geological implications[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(1): 127-135.]
- [48] Li Hua, Wang Yingmin, Zhu Weilin, et al. Seismic characteristics and processes of the Plio-Quaternary unidirectionally migrating channels and contourites in the northern slope of the South China Sea[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43: 370-380.
- [49] 李华, 王英民, 徐强, 等. 南海北部珠江口盆地重力流与等深流交互作用沉积特征、过程及沉积模式[J]. *地质学报*, 2014, 88(6): 1120-1129. [Li Hua, Wang Yingmin, Xu Qiang, et al. Interactions between down-slope and along-slope processes on the northern slope of South China Sea: products, processes, and depositional model[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(6): 1120-1129.]
- [50] Faugères J C, Stow D A V, Imbert P, et al. Seismic features diagnostic of contourite drifts[J]. *Marine Geology*, 1999, 162(1): 1-38.

- [51] Faugères J C, Stow D A V. Morphology, geometry and palaeoceanographic reconstructions[M]//Rebesco M, Camerlenghi A. Developments in Sedimentology. Amsterdam; Elsevier, 2008; 259-288.
- [52] Laberg J S, Dahlgren T, Vorren T O, et al. Seismic analyses of Cenozoic contourite drift development in the Northern Norwegian Sea[J]. Marine Geophysical Researches, 2001, 22(5/6): 401-416.
- [53] Rebesco M, Stow D A V. Seismic expression of contourites and related deposits: a preface [J]. Marine Geophysical Researches, 2001, 22(5/6): 303-308.
- [54] Hernández-Molina F J, Llave E, Stow D A V. Continental slope contourites [M]//Rebesco M, Camerlenghi A. Developments in Sedimentology. Amsterdam; Elsevier, 2008; 379-408.
- [55] 高振中. 深水牵引流沉积: 内潮汐、内波和等深流沉积研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 47-86. [Gao Zhenzhong. Deep-water Tractive Current Deposits: the Study of Internal-tide, Internal-wave, and Contour Current Deposits [M]. Beijing: Science Press, 1996; 47-86.]
- [56] Faugères J C, Gonthier E, Stow D A V. Contourite drift molded by deep Mediterranean outflow [J]. Geology, 1984, 12(5): 296-300.
- [57] Stow D A V, Faugères J C. Contourite facies and the facies model [M]//Rebesco M, Camerlenghi A. Developments in Sedimentology. Amsterdam; Elsevier, 2008; 223-256.
- [58] 李日辉, 张光威, 李维群. 等深岩识别标志研究 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(3): 63-70. [Li Rihui, Zhang Guangwei, Li Weiqun. Criteria for recognition of ancient contourites [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997, 17(3): 63-70.]
- [59] 何幼斌, 高振中, 罗顺社, 等. 等深流沉积的特征及其鉴别标志 [J]. 江汉石油学院学报, 1998, 20(4): 1-6. [He Youbin, Gao Zhenzhong, Luo Shunshu, et al. Features of contourites and their discrimination [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 1998, 20(4): 1-6.]
- [60] 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.
- [61] Shanmugam G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20(5): 471-491.
- [62] Shanmugam G, Spalding T D, Rofheart D H. Process sedimentology and reservoir quality of deep-marine bottom-current reworked sands (sandy contourites); an example from the Gulf of Mexico [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77(7): 1241-1259.
- [63] Shanmugam G, Spalding T D, Rofheart D H. Traction structures in deep-marine bottom-current-reworked sands in the Pliocene and Pleistocene, Gulf of Mexico [J]. Geology, 1993, 21(10): 929-932.
- [64] Shanmugam G. Deep-water bottom currents and their deposits [M]//Rebesco M, Camerlenghi A. Developments in Sedimentology. Amsterdam; Elsevier, 2008; 59-81.
- [65] Gong Chenglin, Wang Yingmin, Zheng Rongcai, et al. Middle Miocene reworked turbidites in the Baiyun Sag of the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea margin: processes, genesis, and implications [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2016, 128: 116-129.
- [66] Mulder T, Faugères J C, Gonthier E. Mixed turbidite-contourite systems [M]//Rebesco M, Camerlenghi A. Developments in Sedimentology. Amsterdam; Elsevier, 2008; 435-456.
- [67] Séranne M, Abeigne C R N. Oligocene to Holocene sediment drifts and bottom currents on the slope of Gabon continental margin (west Africa): consequences for sedimentation and southeast Atlantic upwelling [J]. Sedimentary Geology, 1999, 128(3/4): 179-199.
- [68] He Yunlong, Xie Xinong, Kneller B C, et al. Architecture and controlling factors of canyon fills on the shelf margin in the Qiongdongnan Basin, northern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 41: 264-276.
- [69] Rasmussen E S, Lykke-Andersen H, Kuijpers A, et al. Post-Miocene sedimentation at the continental rise of Southeast Greenland: the interplay between turbidity and contour currents [J]. Marine Geology, 2003, 196(1/2): 37-52.
- [70] Biscara L, Mulder T, Gonthier E, et al. Migrating submarine furrows on Gabonese margin (West Africa) from Miocene to present: influence of bottom currents? [J]. Geo-Temas, 2010, 11: 21-22.
- [71] Zhu Mangzheng, Graham S, Pang Xiong, et al. Characteristics of migrating submarine canyons from the middle Miocene to present: implications for paleoceanographic circulation, northern South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(1): 307-319.
- [72] Mitchum R M. Interaction between deepwater current drifts (contourites) and canyon fill-slope valley turbidites, Cretaceous and Tertiary sediments of offshore West Africa [C]//AAPG 2014 Annual Convention and Exhibition. Houston, TX, USA: AAPG, 2014: 06983.
- [73] Bein A, Weiler Y. The Cretaceous Talme Yafe Formation: a contour current shaped sedimentary prism of calcareous detritus at the continental margin of the Arabian Craton [J]. Sedimentology, 1976, 23(4): 511-532.
- [74] 徐焕华, 杨忠芳, 丁海军. 贺兰拗拉谷北段奥陶系等深流烃源岩 [J]. 西部探矿工程, 2008(3): 88-90. [Xu Huanhua, Yang Zhongfang, Ding Haijun. Contourite source rocks of Ordovician in north part of Helan Aulacogen [J]. West-China Exploration Engineering, 2008(3): 88-90.]

Research Processes on Contourites

LI Hua^{1,2,3}, HE YouBin^{1,2,3}

1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2. Research Center of Sedimentary Basin, Yangtze University, Wuhan 430100, China

3. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Abstract: There have been abundant research fruits on contourites for about 50 years. The work on the contourite are developed rapidly with technique and ocean awareness improving in recent 10 years, and hence, lots of new achievements have been emerged. Based on reviewing the research history of contourites in brief, combing the latest research results, the advance and achievement has been summarized. Contourites showing fine-coarse-fine cyclicality is usually fine, whose sedimentary structures and bioturbations are abundant. Based on morphology and sedimentary process, the contourites could be divided into elongated, mounded drifts, channel-related drifts, patch drifts and so on. The sedimentary model includes simple current pathway, multiple current pathway and down-slope and along-slope interaction. Furthermore, interaction between down-slope and along-slope is one of the hot spots of deepwater deposits research. At last, the facing problem and direction of work on contourites in the future were proposed as follows: 1) Perfecting identification marks and popularizing research results. 2) Integrating various measures and theories, discussing the coupling relationship between sedimentary processes and tectonic evolution, paleoceanography, climate changing. 3) Reinforce to work potential of hydrocarbon exploration.

Key words: contour current; contourite; drift; bottom current