

文章编号: 1000-0550(2007) 04-0495-10

深水沉积的动力学机制和响应^①

王英民¹ 王海荣^{1,2} 邱燕³ 彭学超³ 张文明¹ 李文成³

(1. 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室 北京 102249

2. 中国石油大学盆地与油藏研究中心 北京 102249 3. 广州海洋地质调查局区域地质调查所 广州 510760)

摘要 深水环境动力机制极为复杂,重力(流)机制类型多样且可能呈有序演化。底流包括温盐循环驱动的底流、风驱底流,以及顺峡谷上下运动的潮汐底流等;而内波可能也为重要的地质营力。在这些机制或孤立、或互动作用下,深水环境发育的沉积物类型、成因也极为复杂,它们具有重要的古气候、油气意义。

关键词 深水沉积 动力学机制 沉积响应 重力流 等深流

第一作者简介 王英民 男 1954年出生 教授 层序地层学与石油地质学 E-mail wangym@cup.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

深水是指水深数百米至数千米的全球大洋陆坡和海盆,其沉积动力机制和沉积体系与陆相和浅水环境有较大的不同,是全球油气勘探和开发的热点和前景领域,国外在墨西哥湾和尼日尔三角洲都取得了深水油气勘探的巨大成功,面临着日益加剧的能源瓶颈,加强我国领域的深水油气的勘探开发已势在必行。本文旨在介绍全球深水沉积体系的研究史和理论现状,为我国深水油气的勘探研究提供参考。

1 深水沉积的研究概况和研究史

深水沉积体系的研究始于对浊流的认识和相关突破。1948年之前,人们普遍认为深水是一个没有流体活动的宁静世界,只有深海泥在缓慢的沉积。在1948年的第18届世界地质学大会(伦敦)上 M gliorini 讨论了密度流形成的递变层的成因,Shepard 展示了海底峡谷陡峭的块状岩墙的水下照片, Kuenen 讨论了高密度流对海底峡谷形成的侵蚀潜力^[1]。1950年 Kuenen 和 M gliorini 发表了里程碑式的论文,“浊流是递变层理的一个成因”^[2]。从此逐渐确立了浊流机制在深水沉积体系中的重要作用,浊流理论乃至经典的鲍马序列成为解释细粒背景下的粗粒沉积的普适范例。

1959年,Heezen 在吸收了 Wust 等人的深水循环的概念后,提出“深海波痕和底床刻槽看来一定为和大洋总体循环有关的海流作用的结果”,从而揭开了研究深水底流的活动对深水沉积体系的影响的历史。

Heezen 的博士生 Hollister C. D. 通过一系列的开创性研究,和其导师一道于 1972 年首先提出了术语“等深流沉积 contourite”^[3],并创新性改革和利用海洋科学的系列工程成就,提出了深水研究的系列手段和方法。Hollister 因其在等深流沉积研究方面的杰出成就被誉为“等深流沉积之父”^[4]。

1979年,Shepard 通过丰富的实测资料提出,深海峡谷中存在的潮汐成因的底流活动同样是深水沉积的重要机制。此外,内波等也会对深水沉积体系形成大的影响^[5]。

深水沉积体系需要具有先进的研究手段和巨额的研究投入,因此在深水沉积体系的研究历史中,国家、国际间的协作是一个显著特色。譬如大洋钻探计划(ODP)和深海钻探计划(DSDP)等前后有数十个国家的参与,当然深水沉积体系的研究仅是其科学目标的一部分。以下是 20 世纪 70 年代以来西方国家支持的关于深水研究的大型项目的实例和代表:

1979年,美国海军研究办公室(the US Office of Naval Research)资助 Hollister 领导的 HEBBLE(即高能深海边界层实验 the High Energy Benthic Boundary Layer Experiment(1979—1986))。该项目在关于等深沉积的深海风暴、全球边界层的紊流(turbulence in a planetary boundary layer)、雾状层、生物扰动、深海栖息、沉积分选等许多方面取得了突破性进展^[4]。

1995年,美国海军研究办公室资助开展了“大陆边缘地层的形成”项目(STRATAFORM(Strata For-

①国家自然科学基金(批准号:40572067)资助

收稿日期:2006-10-11 收修修改稿日期:2007-02-14

mation on Margins)。这个长期项目集中研究北加利福尼亚和新泽西陆缘的短期和长期的层序,主要有三个目的:第一,使用自长期 ($10^4 \sim 10^6$ yr)层序聚集体的观测中得来的观点以增强对沉积作用的理解。第二,使用这些短期 ($< 10^2$ yr)沉积作用机制如何形成地层的调查结果,以更好的约束层序地层解释。最后,应用数学模拟将沉积作用的尺度和层序地层的尺度予以相关,如此,作用机制和层序的知识方可更好的应用于预测和解释目的^[67]。

在 90 年代早期,欧盟资助了许多针对欧洲陆缘的年青沉积的研究。包括集中在欧洲南部陆缘的“欧洲大西洋陆缘的沉积物输送”项目 (Sediment Transport on the European Atlantic Margin, STEAM)。并随后启动了“欧洲北大西洋陆缘 I”(the European North Atlantic Margin ENAM I)和“欧洲北大西洋陆缘 II”(the European North Atlantic Margin, ENAM II)两个多国协作的大项目。其中 ENAM I 主要集中研究欧洲北大西洋陆缘第四纪以来的沉积作用和古海文的状况和历史演变,以及背后的控制因素^[8]。而 ENAM II 在 ENAM I 研究的基础上,进一步深化和海洋、cryospheric 作用机制有关的陆缘沉积动力学^[9]。这极大深化了对深海作用机制和沉积体系的认识,尤其是欧洲北部这种受冰川强烈影响的所谓冰川大陆边缘。

1999 年,法国启动了名为“法国陆缘计划”(GDR Marges French Margin Program),将深水沉积作用列为其四个科学目标之一^[10]。

2000 年 3 月,欧洲科学界启动了欧洲委员会资助的为期三年 (2000. 3—2003. 2)的 STRATAGEM (the Stratigraphic Development of the Glaciated European Margin (STRATAGEM) project)项目,即“冰川作用的欧洲陆缘的层序演化”项目^[11],设立了四个关键科学目标,即建立一个统一的中至晚新时代的层序框架;确定陆缘的层序构型;梳理形成陆缘的沉积作用机制,以及其和诸如构造作用、气候、海文、海平面等因素的联系;建立新近纪陆缘演化的模式^[12]。同年 4 月,还启动了为期 4 年的“大陆坡稳定性”项目,即 the Continental Slope Stability (COSTA),目的在于促进对大陆坡稳定性的快速的和瞬间失稳的理解,焦点在于研究评估欧洲大陆边缘的相对于自然作用和人类活动的陆坡的稳定性^[13]。

尤其值得注意的是,为了培养深水研究的后备人才,联合国教科文组织 (UNESCO)和欧洲科学基金会

(the European Science Foundation)资助了“融研究项目中的培养工程”(the Training Through Research Programme (TTR)),资助有潜力的青年学生直接参与到由国际知名的科学家领衔的国际协作的大项目中,从而得以直接接触前沿课题。至 2000 年,已举办了 10 期,前后有来自东欧、西欧、北非、亚洲、南美和北美的超过 500 名科学家和学生参与了 10 个航次的实地科研。并于 2004 年于 Marine Geology 期刊上发表了一个青年学生的专辑,充分反映了该项目的效果^[14]。

2 深水具有复杂多变的地貌

深水环境一方面受制于多种作用机制,如重力、多种底流(或等深流)、大洋涡流、水下峡谷中往复的潮汐底流、各种内波、上升流和下降流等;同时深水又具有活跃的构造活动,体现为各种底辟活动、高热流值;且深水陆坡恰处于坚硬的大陆克拉通和大洋地壳之间,是对各种构造活动响应最为敏感的地理位置。因此通常由陆坡(又可划分为上中下几段)、陆隆和深海平原等地貌单元组成的深水环境具有极为复杂的地貌特征,如滑坡坎壁、峡谷底床、谷壁;水道和堤坝;台地、多种形状的扇体、多类型的等深流沉积等。近些年来,新识别的地貌单元亦不时出现,如水道一朵叶体过渡带(channel-lobe transition zone 亦即 CLTZ)就具有沉积学方面的独具特色的意义^[15 16]。

图 1 是苏格兰中央陆坡^[17],其在地史上为受冰川强烈影响的地区。其上陆坡区域地形平缓,为冰期后的海进和高位的充填作用的结果。而在上陆坡和中陆坡的过渡地带,清晰可辨冰川作用遗留在海底的冰川犁痕。中陆坡区域则以成因有所差异的峡谷和谷间岭脊,峡谷内以侵蚀型的峡谷头部、谷内的碎屑流沉积和重力失稳的种种迹象,谷间岭脊上则具有次级的向峡谷谷线的重力成因的冲蚀水道等地貌类型。

近些年来,地学界利用多波束测深技术揭示了全球许多地点的深水地貌的复杂程度及其富含的地质意义。如西加那利群岛的陆坡滑坡事件^[18];Cadiz 海湾西部的精美的多波束地貌图揭示了浊流和等深流的互动所形成的复杂地貌^[19]。

3 深水作用机制和相应沉积体系

3.1 陆坡倾向的重力作用机制和相应沉积作用

在深水陆坡区,基于其相对陡峭的地貌,在重力作用并在其他诱因(如地震、气水合物融解、超压释放、底辟活动、突发海流)的配合下,海床浅表层沉积

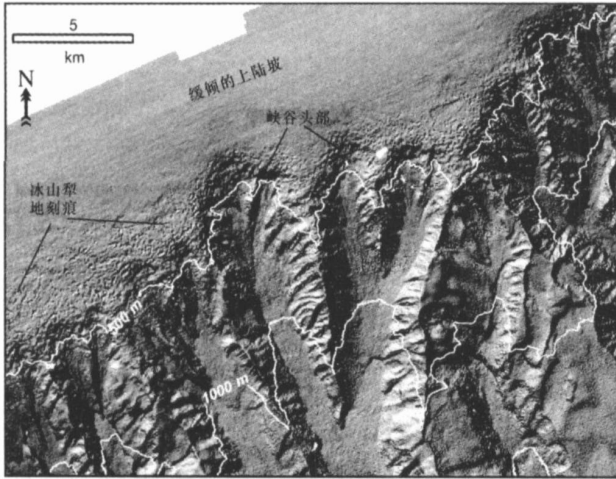


图 1 苏格兰中央陆坡的多波束海底地貌^[17]。

Fig 1 Multibeam sonar seafloor surface render of the upper Scotian Slope, showing the limit of canyon head formation, evidence of iceberg groundings above the canyon heads and gradation into a relatively featureless seafloor further upslope resulting from sea level transgression and infilling^[17]

物极易发生滑动、滑塌等重力活动,并进一步演化为碎屑流、颗粒流乃至浊流。这些均为因重力而发生的陆坡倾向上的深水作用机制,故而称之为陆坡倾向的重力作用机制和相应沉积作用。在多数情况下,这种作用是塑造深水环境地貌的主要因素。

滑坡和滑坡体是深水环境常见的作用机制和响应事件,在全球许多地方均有报道。其中以欧洲大陆边缘研究最为深入。Wilson等 2004年研究了舍得兰群岛西北部的 A fen 滑坡体,研究了其形成的诱因、形成阶段等^[20]; Storegga 滑坡体影响了约 95 000 km²的

面积、沉积物体积介于 2 400 km³和 3 200 km³之间,是目前世界上所识别的、水下曝露的最大滑坡体之一^[21],其可进一步划分为 6 个地貌单元。此外地中海和西北欧亦有针对滑坡体的多处报道^[22~24]。在其它海域,如安哥拉^[25]、加利福尼亚北部海域的 Humboldt 滑坡体^[26,27]。滑坡体自触发、活动直至向重力流转化的全过程,和 gas hydrate、油气渗漏、构造活动有着密不可分的关系,对于海岸地带的可持续发展亦有重要意义,这也是西方国家投入巨大力量研究的缘由。

重力流水道—堤坝沉积体系是深水环境的显著特色(图 2)。水道—堤坝体系在多数大型或中型规模的水下扇上多据主导地位,如密西西比扇^[28]、亚马逊扇^[29]、印度扇^[30]、孟加拉扇^[31]、扎伊尔扇^[32]、富士扇^[33],以及许多小型扇,如 Hueneme^[34]和 Gob 扇等^[35]。其中的水道扮演了碎屑物质向深海输送的通道,而堤坝则在重力流流动过程中起到了将其予以围限和分选以便于沙质组分输送至盆地平原。水道—堤坝体系可为粗粒组分的沉积场所^[28]。

Deptuck 等分析了尼日尔三角洲陆坡和阿拉伯海的水道—堤坝体系(channel-levee system(缩写为 CLS)),并将之与其他地区的典型深水体系和露头剖面进行对比,系统总结了水道—堤坝体系的地貌单元、特征和成因演化^[36]。认为,尼日尔三角洲陆坡和阿拉伯海的上扇区域所发育的水道—堤坝体系,具有构型上的高度复杂性。通常具有数个构型单元:内堤坝、外堤坝、侵蚀通道、水道轴心沉积、滚动块体、物质输送的沉积。尽管单个体系的规模变化很大,第一级别构型元素的相似性和它们的构型意味着,不管规模差异,它们都具有相同的沉积机制(图 2)。

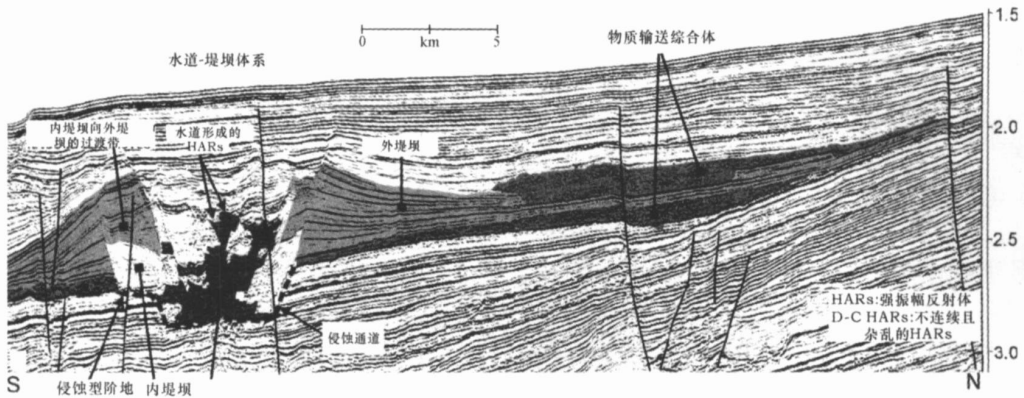


图 2 切穿了水道—堤坝体系的地震剖面,显示了第一级别的构型元素,包括侵蚀通道、内堤坝、外堤坝和种种的对应于水道沉积的 HARS^[36]。

Fig 2 Interpreted seismic profile showing the first-order architectural elements (erosional fairway, inner levees, outer levees,

深水块状沙体的分布规律是深水油气勘探关注的核心问题之一。Stow 定义其为巨厚的 ($> 1\text{ m}$) 的沙层单元, 缺乏原始沉积构造, 且和其他深水沉积相联系。除了极厚层理和无构造的外观外, 深水块状沙体的关键在于发育了普遍的水逃逸构造、细微的加积面和页岩块砾; 并显示了差至中等的分选和组分的非成熟。卷入它们的长距离的输送和就位两个关键性作用机制为沙质碎屑流和高密度浊流^[37]。

深水峡谷或水道是陆缘碎屑和陆架浅水区物质向深水输送的主要途径。Abreu 研究了安哥拉海域的 Block 17 区块 Dalia M9 Upper 油田, 发现该区陆坡峡谷具有类似于陆域曲流河的形态, 将之称为深水曲流水道^[38]。该曲流水道综合体约 40 m 深、2 km 宽, 为单个水道 (该水道约 300 m 宽和 40 m 深) 的侧向迁移和局部撕裂分支所致。其重要特征之一为位于水道边缘的叠瓦状地震反射的存在, 这些叠瓦反射倾向于平行水道, 在多数情况下向水道倾斜, 在某些情况倾向于下游方向。这些叠瓦反射形成了位于水道内湾的特征明显的反射体, 其显然和水道在其演化过程中的连续的侧向迁移有关。水道的迁移导致了水道内侧的增生沉积和水道外侧的侵蚀, 形成了所谓之侧向增生体 (Lateral Accretion Packages (LAPs))。单一曲流水道的侧向迁移产生了侧向加积的水道综合体, 其因水道充填的本质而呈不同程度的内部加积。同样, 牛轭湖 (环) 是绿谷综合体的重要组成部分, 其下部多为水道充填的粗碎屑组分, 而中上部多为自曲流水道漫溢而来的相对细粒的、和半深海的悬浮沉降的细粒组分^[38]。

多数深海扇模式主要是基于对古代沉积的研究, 故而认为沉积朵叶体直接系于它们的补给水道^[39]。但水道一朵叶体过渡带 (CLTZ (channel+lobe transition zone)) 是近些年来所识别的介于水下扇和水道之间一独立单元^[15 16], 其位于水道口的下陆坡方向, 紧邻水道口, 且通常和陆坡坡折相联系。在这一区域, 浊流可能经历了自受限型向开阔型的水力体制的跃迁^[40], 导致了流体的迅速扩散和紊流程度的增加, 进而导致海底侵蚀和沉积物途越作用^[15]。因此, 众多侵蚀型刻槽和线形构造所形成的横向底形是该区域的特征之一^[41]。不过, 大规模的侵蚀刻槽和相关的底形不仅仅局限于发育良好的 CLTZ, 下列位置也可以发育, 水道堤坝后壁陆坡、水道边缘^[42]、水道底床^[43]以及小规模的富沙扇的扇面^[34]。

上陆坡、中陆坡和下陆坡乃至盆地平原均可发育

朵叶体。只要地形发生相对平缓的变化, 在水道、峡谷出口或撕裂分支的决口处均可发生流体行为的跃迁, 从而沉积相应粒径的碎屑物质。朵叶体在沉积的同时, 又相应造成了地貌的渐进性变化, 和水道迁移一道形成了朵叶体的侧向和纵向的迁移, 如此垂向叠加和侧向叠覆, 即可形成规模巨大的陆坡扇或盆地 (地) 扇。

3.2 陆坡走向的等深流作用机制和相应沉积作用

1936年, 德国物理海洋学家 George Wust 首次提出, 由温盐循环控制的底流可能足以影响海洋盆地的沉积通量。一般来说, “底流 (Bottom currents)” 是指作用在深水的、且为大洋和其边缘海中的温盐或风驱循环的部分的那些海流, 它们并不严格遵循等深线, 但等深流依然作为底流的同义词被广泛使用^[41]。慢速的温盐循环主要起源于极地水体的冷却和下沉, 如南极底层水 (Antarctic Bottom Water (AABW))、北极底层水 (Arctic Bottom Water (ABW)) 等。而地中海外溢水团 (the Mediterranean Outflow Water (MOW)) 构成了大洋中层水团的重要来源 (Mougenot and Vanney, 1982 引自 Muller 等 2003)。

不同于纯粹温盐循环的其他底流还有大的风驱海流体系。在一些情况下, 它们的影响水深甚至可达 4 000 m。譬如受科氏效应影响的西边界海流, 如湾流、黑潮和绕南极海流 (Circumpolar Antarctic Current) 等^[44]。这种风力驱动形成的涡旋影响深海海床甚巨, 乃至称之为深海风暴 (Benthic storms)^[44]。

底水速度通常不大于 1~2 cm/s。但是, 它们可因科氏效应、盆地或水道地形的变化而予以极大加强。譬如西边界潜流的速度可达到 10~20 cm/s。在流体特别受限或陆坡特别陡峭的地方, 流速可超过 100 cm/s。在经过深海盆的狭窄出口或海道时, 甚至记录到了超过 200 cm/s 的速度^[44]。可见, 底水是温盐循环的半永久部分, 在许多情况下其强度上足以侵蚀、输送和沉积物质, 特别是粘土、粉沙和细砂粒级, 甚至更为少见的粗沙和砾石。

因此, 底流 (或等深流) 可在大洋深水环境形成独具特色的等深流沉积^[3]。而漂积体 (sediment drift) 是一个概括性术语, 是指不具备明确界定的或独特外观的、但其沉积过程受海流某种控制的沉积聚集, 并不局限于底流沉积。

Stow 等在吸收了 Faugères 等人的观点后, 提出了平流漂积体的模式 (图 3); 并总结了底流作用下的海床的侵蚀特征和沉积底形 (图 4)。

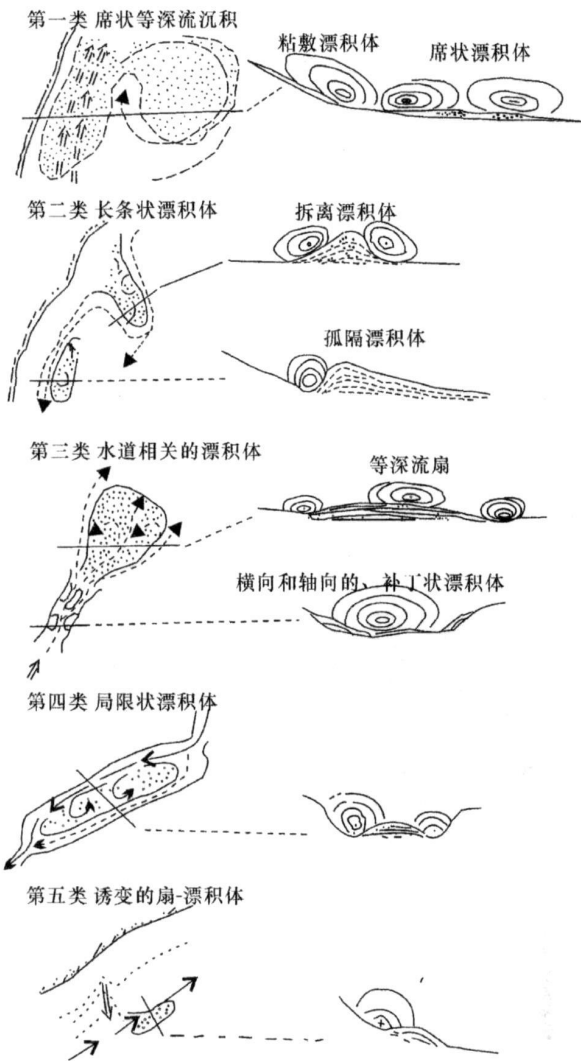


图 3 等深流(底流)漂积体的形成模式和识别标志^[44]。席状等深流沉积 Contourite sheets 粘敷漂积体 Plastered drift 席状漂积体 Drift sheet 长条状漂积体 Elongate drifts 拆离漂积体 Detached drift 孤隔漂积体 Separated drift 水道相关的漂积体 Channel-related drifts 等深流扇 Contourite 'fan', 横向和轴向的、补丁状漂积体 Lateral and axial patch drifts 局限状漂积体 Confined drifts 诱变的扇-漂积体 Modified fan-drift

Fig 3 The formation mode of the contourite drift including the contourite sheets plastered drift drift sheet elongate drifts detached drift separated drift channel-related drifts contourite 'fan', lateral and axial patch drifts confined drifts modified fan-drift

3.3 深水峡谷中的潮汐底流作用和相应沉积作用

Shepard and Marshall在实地测量了众多深水峡谷(包括 Kaulakahi Hueneme Congo Camel Hydrographer Petacalco等)中的海流,发现峡谷中存在

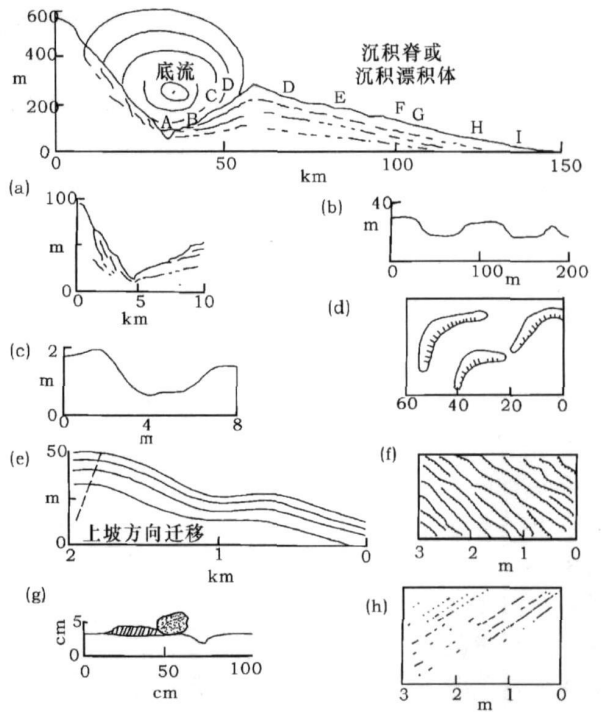


图 4 等深流(底流)作用下的沉积底形和侵蚀特征,注意比较所示的尺度大小^[44]。

Fig 4 The erosional characteristics and sedimentary form controlled by contour current (bottom current). Note the various scale^[44]

着和半日潮周期具有紧密相关的上下往复海流的活动^[5]。判定深水下峡谷有利于形成深水潮汐底流、并有利于其发挥作用。在水深自 46~4200 m 之间进行的海流测量显示,其潮汐底流通常可达到最大流速 25~50 cm/s,足以对粉沙乃至沙质底质产生重要影响^[5]。

Shanmugan 基于对现代和古代深水沉积的岩心和露头研究后提出,砂-泥韵律、双向泥层、爬升波纹、泥覆波痕、平行和交错纹层的交互、具有泥盖层的 S 型交错层理、潮汐内部侵蚀面、豆状层理、压扁层理均可用以解释深海峡谷中的潮汐海流。岩石记录中的这种相组合可被用作识别水下峡谷背景的标志。在峡谷口环境,深水潮汐沉积可能发育出位于水道内的长条状的坝,其平行于水道轴心,而浊流最可能发育出横亘于水道口(垂直于水道轴心)的沉积朵叶体。浊流沉积朵叶体比水道宽度宽得多,而潮汐沙坝比水道宽度则小得多^[45]。

3.4 内波作用和相应沉积作用

高振中等认为单纯的底流及浊流可能无法满足沉积物波形成所需的流动速度及流动层厚度,海底巨

大的沉积物波难以由单一的海底流动(等深流或浊流)来形成^[46]。许多学者探讨了内波作为一种重要甚至主要的深水作用机制,并进而形成重要的深水沉积体系的可能性^[46-50],但内波作用和相应沉积作用依然需要进一步的探讨。

3.5 两种深水作用机制的共同作用

事实上,在深海环境,两种或多种不同方向的深水作用机制常相互影响,形成了具有复杂成因的底形和构造。譬如, Landes 台地的 Aquitaine 上陆坡 (Bay of Biscay) 的沉积物波即为沉积作用和重力作用双重影响的结果,而不仅仅为此前所认为的陆坡坍塌 (slope failure)。

图 5 系统总结了深水环境的多种作用机制和它们彼此间可能存在的转化关系、以及相应的沉积

类型。

4 深水作用机制和相应沉积体系的背景控制因素

4.1 构造运动和地貌对深水作用机制和沉积体系的影响

陆域和海域的构造活动及其形成的(构造)地貌对众深水作用机制的消长乃至进而的沉积响应有着直接和重大的影响。

巴西东南大陆边缘的刚波斯盆地以向海突出的陆缘地貌为特征,这种地貌特征和海流互动是构造地貌影响深水作用机制和沉积体系的极佳实例。

刚波斯盆地位于巴西东南大陆边缘,介于 21° S 和 24° S 之间,以向海突出的陆缘地貌为特征。其

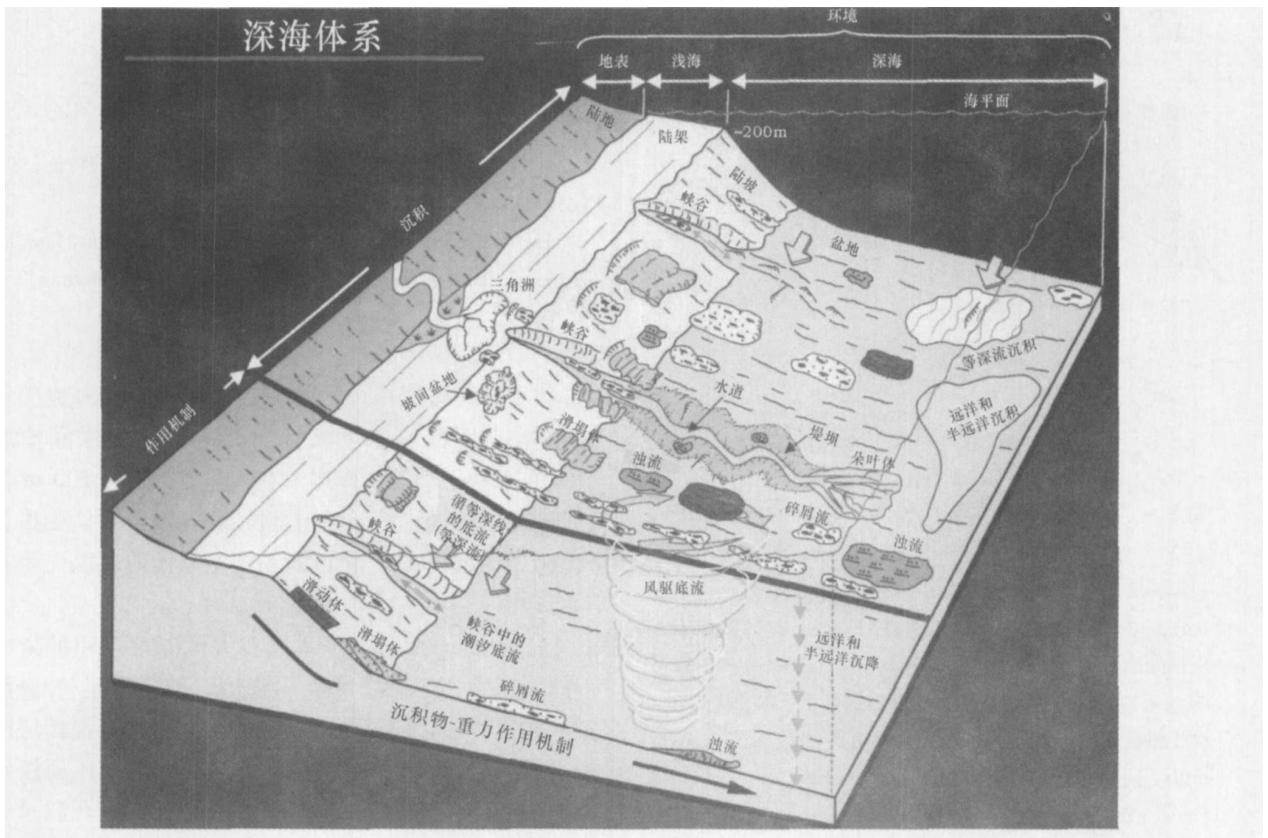


图 5 陆坡和盆地深水环境的示意图^[45]。总体上,浅水陆架环境以潮汐和波浪为主要营力;而深水(峡谷、陆坡和盆地)环境则以块体流(滑动、滑塌、颗粒流和碎屑流)、种种底流和远洋/半远洋沉积为特色。峡谷中浊流罕见,但在盆地中则常见。水下峡谷比较独特,这是因为陆架坡折并不能控制峡谷中的作用过程;更重要的是,峡谷是潮汐底流和块体流活动的场所。注意峡谷中潮汐底流的上下运动(双向红色箭头)。循等深线的底流和风驱底流的环型运动是峡谷外深水环境的重要机制。

Fig 5 Schematic diagram showing slope and basinal deep-marine sedimentary environments occurring at water depths deeper than 200 m (shelf-slope break). In general shallow-marine (shelf) environments are characterized by tides and waves whereas deep-marine (canyon, slope and basin) environments are characterized by mass flows (i.e. slides, slumps, grain flows and debris flows), various bottom currents and pelagic/hemipelagic deposition.

中 the Sao Tomé 峡谷将陆缘分隔为南北两部。北部陆架缩窄, NW-SE 向; 南部陆架宽, NE-SW 向。而东南巴西陆缘的水文学特征比较复杂。其中浅水循环划分为陆架海流和巴西海流 (BC)。陆架海流向东北向前进。巴西海流是一个向南部流动的西边界海流, 其内边缘粗略对应于陆架坡折, 且具有一个北向的逆流成分, 即巴西逆流 (BCC), 其在等深线 350 和 400 m 之下流动^[51]。突出的陆缘地貌和海流发生互动, 导致巴西海流在北部的聚敛和加速, 形成了对应于 A bacora 阶地水流聚集效应。海流在“聚集区域”得以加速, 水深 210 m 处的近底流速超过了 70 cm/s。这种聚集效应对海床形成强烈的侵蚀作用, 发育了平坦的侵蚀型阶地 A bacora Terrace。而在南翼, 出于对陆缘走向变化的响应, 巴西海流加宽并向海移动, 这一区域被称作“扩散区”, 海流速度有所降低, 水深 400 m 处的上陆坡底流的流速超过了 40 cm/s。这些在有关海表温度的卫图有清晰显示。

陆缘地貌诱发出附加的巴西海流的扰动。在“扩散区”, 巴西海流蜿蜒曲流, 并发育了大洋涡流, 其可向陆架进行渗透, 以气旋 (cyclonic) 的方式分离了陆架水体。这说明, 涡流是控制外陆架-上陆坡边界的底流的重要因素, 它们作为一种巨大的旋转刷, 将沉积物自陆架向上陆坡清扫。这种效应称之为“海床簸选”^[51]。

墨西哥东南的韦拉克鲁斯 (Veracruz) 盆地则是构造活动控制 (影响) 深水沉积充填形式的佳例。该盆地中新世和上新世的沉积充填可分为两个阶段。第一个阶段发生在自早至晚中新世, 盆地继承了构造陡峭化的盆缘, 盆缘有深峡谷的切入, 其内有泥岩和薄的粗粒砂岩和砾岩的残余的充填。侵蚀和过路区向厚的、富沙的盆底扇渐变。在第一阶段的后期, 海域发育了水下火山 (其和远处的板块俯冲有关) 从而构成了海底障碍, 阻止了浊流进入古代的墨西哥湾。火山也扮演了不可移动的支撑效应, 作为对区域收缩的响应, 围绕其发育了盆内逆冲带。第二个沉积阶段和盆地内部的收缩构造的发育有关, 也和称之为跨墨西哥火山带的盆地北缘的隆升有关。这个隆升引发了沉积物分散 (dispersal) 体系的强烈重组, 组成了自北部向南部的大的陆架单斜。和阶段 1 的上超型叠加形式相比, 阶段 2 呈强烈的退覆型式^[52]。

4.2 陆域流域体系和陆架浅水区对深水沉积体系的影响

陆域流域体系和陆架浅水区的状况和变化直接

影响着深水环境可能的物质供应情况, 对深水沉积作用和沉积体系有重要的控制 (影响)。巴西东南的桑托斯盆地是陆域构造运动迫使流域体系的物质输送方向发生重大调整, 从而极大影响了该盆地沉积充填样式的实例。桑托斯盆地白垩纪以来的复杂充填史受 Serra do Mar 海岸山脉带在晚白垩世期间的隆升、和随后的平行海岸的 Paraíba do Sul 流域体系的重组的强烈影响。在晚白垩世和古近纪期间, 古代的 Paraíba do Sul 流域体系将碎屑注入北、中桑托斯盆地, 集中的碎屑供应迫使陆架发生规模巨大的前积和深水浊流沉积作用, 压制了同期的海平面高位的效应。南桑托斯盆地则因同一时期缺乏大的河流补给而处于相对的沉积饥饿状态, 盛行沉溺性陆架。这些沉积型式持续至渐新世。此时, Paraíba do Sul 流域因陆地构造运动而被袭夺, 并转向北部的刚波斯盆地 (该盆地此时正具有巨大的可容空间)。在 Paraíba do Sul 被袭夺和转向之后, 北和中桑托斯陆架处于沉积饥饿状态并被淹没, 陆架前缘的后退超过了 50 km。相反, 在漫长时期内已发育了数个大的流域体系, 使得南桑托斯盆地发育了厚的倾泥的上渐新世和新近纪的层序, 其对源岩成熟度有极大的影响^[53]。

印度尼西亚东加里曼丹海域于最近的更新世以来的三个循环 (10~330 ka, 每个持续时间约 110 ka) 的情况则是陆架浅水区的地貌变动影响深水沉积体系的实例, 其陆架上的循环为于全球海平面的高位期和下降期沉积的前积沉积体所主控, 前积沉积体之间为平行反射和海进体系域的碳酸盐建造所分隔^[54]。在最近的两个海平面低位期 (约 18 ka and 约 130 ka), 由于生长断裂和区域沉降阻止了低位扇抵达陆坡, 故而深水环境缺乏粗粒碎屑岩沉积。在约 240 ka 结束的海平面的低位期, 三角洲前积越过以前的陆架边缘, 因而有富沙沉积物倾泄至陆坡。

陆坡和盆底的层序显示了深水沉积体系是如何在一个单一的全球海平面循环中演化的。陆坡上的峡谷连接了 240 ka 的低位三角洲和同期的盆底扇。峡谷具有曲流状的、由更低的加积水道综合体和上部水道堤坝综合体组成的双端元充填, 形成在陆坡坡麓的盆底扇也分为两部分。层序意义的盆底扇下部为具有相对较好的连续反射组成的朵叶体, 高部位则为前积至低位扇的曲流状的水道-堤坝综合体和被输送至最外层的扇体之上的席状朵叶体^[54]。在循环 1 和 2 时期, 该陆架因断裂活动而局部增大了可容空间, 从而阻止了物质的向深水的搬运, 进而极大地影

响了深水沉积体系^[54]。

4.3 海平面波动对深水作用机制和沉积体系的效应

海平面的升降对深水作用机制有着重大影响,在高纬度的冰川大陆边缘(如欧洲西北部),大陆冰川在冰期向海推进,深水环境以重力(流)作用为主;反之,在间冰期,海平面相对上升,重力(流)地位下降,等深流的地位相对突出。

譬如,更新世其间,日耳曼海东南陆缘的沉积序列为下列四个因素所沉积:(1)海洋和冰川海洋作用机制;(2)滑动事件;(3)和快速移动的冰流有关的冰川成因碎屑流(GDFs);(4)犁地冰席。这些沉积机制效具有大的时空变化。该大陆边缘因而可划分为冰流影响的大陆边缘段(北海扇北部)、巨滑动体主导的陆缘段(M re)、半远洋主导的陆缘段(维京(V ring)南部)。在间冰期,盛行底流和沿岸流;在冰期,重力流机制突出^[23]。

此外,在南极洲的 Riiser Larsen 海的东部地区,揭示了水道堤坝综合体,及多种类型的等深流聚集^[55]。顺陆坡向下和沿陆坡走向的作用在冰川大洋沉积过程中相互作用。在盛冰期,冰席推进,向陆架边缘和上陆坡释放了大量沉积物,过于陡峭化和非稳定产生了沿陆坡向下的浊流,形成了水道-堤坝综合体;而等深流聚集最可能形成于间冰期^[55]。

而在鄂霍次克海的西北部,海平面波动对深水作用机制和沉积型式起到了关键性的作用。在第四纪,该地区有强烈的顺陆坡走向的底流作用,它们引起了等深流堆积和沉积物波,集中分布在 Staretsky 海槽、Kashevarov 堤岸的南部和东 Sakhalin 岛的大陆坡。这些底流受控于 Okhotsk 海的海文情况,其可能和北太平洋的中水或深水循环紧密相关。在北萨哈林边缘,沿陆坡向下的机制很重要。包括:①海平面低位期的沉积中心的向盆方向的迁移;②反复的物质坍塌,其可导致起初的向上凸出的外形变为下凹,形成了大量碎屑沉积或浊流。触发机制包括地震、作为快速沉积的结果的过于陡峭和 或孔隙水超压、和气水合物于低位期的不稳定。在冰期,由阿穆尔河(黑龙江)释放的沉积物部分作为低位三角洲楔、部分作为巨大的局限的漂流堆积体得以沉积。在间冰期,阿穆尔河(黑龙江)沉积物的大部作为漂流堆积或扇得以沉积^[56]。

5 结论

深水环境的地质营力非常复杂,研究南海等现代

深水环境的沉积动力学机制,对于此类海盆和古代的深水沉积的油气勘探具有重大意义。

参考文献 (References)

- Shanmugan G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s) deep-water processes and facies models: a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17: 285-342
- Friedman GM & Sanders JE. Dispelling the myths of seafloor tranquility. *Geotimes*, 1997, 42: 24-27
- Hollister C D & Heezen B C. Geologic effects of ocean bottom currents. In: Gordon A L, ed. *Studies in Physical Oceanography: A Tribute to George Wüst on his 80th Birthday*. Gordon & Breach, New York, 1972, 2: 37-66
- McCave IN. Charles Davis Hollister, 1936-1999: A personal scientific appreciation of the father of contourite. In: Stow D A V, Pudsey C J, Howe J A, et al. eds. *Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Seires. Seismic and Sedimentary Characteristics*. Geological Society, London, Memoirs, 2002, 22: 1-5
- Shepard F P, Marshall N E. Currents in submarine canyons and other sea valleys. In: Stanley D J, Kelling G, eds. *Sedimentation in Submarine Canyons, Fans, and Trenches*. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Pennsylvania, 1979, 3-14
- Nittrouer C A, Kravitz J H. Integrated continental margin research to benefit ocean and earth sciences. *Eos*, 1995, 76: 121-126
- Nittrouer C A. STRATAFORM: overview of its design and synthesis of its results. *Marine Geology*, 1999, 154: 3-12
- Mienert J, Abrantes F, Auffret G, et al. European North Atlantic Margin (ENAM I): sediment pathways, processes and fluxes—an introduction. *Marine Geology*, 1998, 152: 3-6
- Mienert J. Preface. *Marine Geology*, 2002, 188: 1
- Ellouz-Zimmermann N, Mascle J. Editorial—Introduction to papers resulting from a conference organized by the French research group “GDR Marges”. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18: 443-444
- Stoker M S, Shannon P M. Editorial—Evolution of the NW European Atlantic margin: Results from the STRATAGEM project. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22: 965-968
- Evans D, Stoker M S, Shannon P M. STRATAGEM Partner: The STRATAGEM project. Stratigraphic development of the glaciated European margin. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22: 969-976
- Mienert J. Editorial—COSTA—continental slope stability: major aims and topics. *Marine Geology*, 2004, 213: 1-7
- Ivanov M K, Kenyon N H, Suzyumov A E, et al. Introduction. *Marine Geology*, 2003, 195: 1-4
- Mutti E, Nomak W R. An integrated approach to the study of turbidite systems. In: Weiner P and Link M H, eds. *Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems*. New York: Springer-Verlag, 1991, 75-106
- Wynn R B, Kenyon N H, Masson D G, et al. Characterization and recognition of deep-water channel-lobe transition zones. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(8): 1441-1462

- 17 Mosher D C, Davil J W P, Campbell D C, *et al*. Near-surface geology and sediment-failure geohazards of the central Scotian Slope. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(6): 703-723
- 18 Masson D G, Watts A B, Gee M J R, *et al*. Slope failures on the flanks of the western Canary Islands. *Earth-Science Reviews*, 2002, 57: 1-35
- 19 Muller T, Lecroart P, Hanquiez V, *et al*. The western part of the Gulf of Cadiz: contour currents and turbidity currents interactions. *Geo-Mar Letters*, 2006, 26(1): 31-41
- 20 Wilson C K, Dave L, Bulat J. Morphology, setting and processes of the Afen Slide. *Marine Geology*, 2004, 213: 149-167
- 21 Hafidason H, Sejrup H P, Nygard A, *et al*. The Storegga Slide: architecture, geometry and slide development. *Marine Geology*, 2004, 213: 201-234
- 22 Leynaud D, Mienert J, Nadin F. Slope stability assessment of the Heland-Hansen area offshore the mid-Norwegian margin. *Marine Geology*, 2004, 213: 457-480
- 23 Sejrup H P, Hafidason H, Hjelstuen B O, *et al*. Pleistocene development of the SE Nordic Seas margin. *Marine Geology*, 2004, 213: 169-200
- 24 Lastas G, Canals M, Urgeles R, *et al*. Characterisation of the recent BE95 debris flow deposit on the Ebro margin, Western Mediterranean Sea, after a variety of seismic reflection data. *Marine Geology*, 2004, 213: 235-255
- 25 Gee M J R, Gawthorpe R L, Friedmann J S. Giant striations at the base of a submarine landslide. *Marine Geology*, 2005, 214: 287-294
- 26 Gardner J V, Prior D B, Field M E. Humboldt Slide—a large shear-dominated retrogressive slope failure. *Marine Geology*, 1999, 154: 323-338
- 27 Burger R L, Craig S, Fulthorpe *et al*. Effects of triple junction migration and glacioeustatic cyclicity on evolution of upper slope morphologies offshore Eel River Basin, northern California. *Marine Geology*, 2003, 199: 307-336
- 28 Bouma A H, Colman J M, & DSDP Leg 96 Shipboard Scientists. Mississippi fan: Leg 96 program and principal results. In: Bouma A H, Normark W R, & Bames N E, eds. *Submarine fans and related turbidite systems*. New York: Springer-Verlag, 1985: 247-252
- 29 Danuth J E, Flood R D. Amazon Fan, Atlantic Ocean. In: Bouma A H, Normark W R, & Bames N E, eds. *Submarine Fans and Related Turbidite Systems*. New York: Springer-Verlag, 1985: 97-106
- 30 Kolla V, Coumes F. Morphology, internal structure, seismic stratigraphy, and sedimentation of Indus Fan. *AAPG Bulletin*, 1987, 71: 650-677
- 31 Emmel F J, Curran J R. Bengal Fan, Indian Ocean. In: Bouma A H, Normark W R, & Bames N E, eds. *Submarine Fans and Related Turbidite Systems*. New York: Springer-Verlag, 1985: 107-112
- 32 Droz L, Rigaut F, Cochonat P, *et al*. Morphology and recent evolution of the Zaire turbidite systems (Gulf of Guinea). *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108: 253-269
- 33 Nakajima T, Sato M, & Okamura Y. Channel-levee complexes, terminal deep-sea fan, and sediment wave fields associated with the Toyama deep-sea channel system in the Japan Sea. *Marine Geology*, 1998, 147: 25-41
- 34 Piper D J W, Hiscott R N, & Normark W R. Outcrop-scale acoustic facies analysis and the latest Quaternary development of Hueneme and Dume submarine fans offshore California. *Sedimentology*, 1999, 46: 47-78
- 35 Bellache G, Droz L, Gaullier V, *et al*. Small submarine fans on the eastern margin of Corsica: sedimentary significance and tectonic implications. *Marine Geology*, 1994, 117: 177-185
- 36 Depuyck M E, Steffens G S, Barton M, *et al*. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 649-676
- 37 Stow D A V, Johansson M. Deep-water massive sands: nature, origin and hydrocarbon implications. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17: 145-174
- 38 Abreu V, Sullivan M, Pimez C, *et al*. Lateral accretion packages (LAPs): an important reservoir element in deep water sinuous channels. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 631-648
- 39 Bouma A H. Coarse-grained and fine-grained turbidite systems as end member models: applicability and dangers. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17: 137-143
- 40 Komar P D. Hydraulic jumps in turbidity currents. *Geological Society of America Bulletin*, 1971, 82: 1477-1488
- 41 Morris S A, Kenyon N H, Limonov A H, *et al*. Downstream changes of large-scale bedforms in turbidites around the Valencia channel mouth, north-west Mediterranean: implications for palaeoflow reconstruction. *Sedimentology*, 1998, 45: 365-377
- 42 Elliott T. Megafault erosion surfaces and the initiation of turbidite channels. *Geology*, 2000, 28: 119-122
- 43 Shor A N, Piper D J W, Hughes C J, *et al*. Giant flute-like scour and other erosional features formed by the 1929 Grand Banks turbidity current. *Sedimentology*, 1990, 37: 631-645
- 44 Stow D A V, Faugeres J-C, Howe J A, *et al*. Bottom currents, contourites and deep-sea sediment drifts: current state-of-the-art. In: Stow D A V, Pudsey C J, Howe J A, *et al*, eds. *Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series: Seismic and Sedimentary Characteristics*. Geological Society, London, Memoirs, 2002, 22: 7-20
- 45 Shamugan G. Deep-marine tidal bottom currents and their reworked sands in modern and ancient submarine canyons. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 471-491
- 46 高振中, 何幼斌, 罗顺社, 等. 深水牵引流沉积——内潮汐、内波和等深流沉积研究. 北京: 科学出版社, 1996 [Gao Zhenzhong, He Youbin, Luo Shunsheng, *et al*. Deep-water Traction Current Deposits: A Study of Internal Tides, Internal Waves, Contour Currents and Their Deposits. Beijing: Science Press, Utrecht and Tokyo: VSP, 1996]
- 47 Nelson C H, Baraza J M, Maldonado A. Mediterranean undercurrent sandy contourites, Gulf of Cadiz, Spain. *Sedimentary Geology*, 1993, 82: 103-131
- 48 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. 沉积学报, 2000, 18 (2): 400-407 [Gao Zhenzhong He Youbin Zhang Xinyang *et al.* Internal wave and internal-tide deposits of the Middle-Upper Ordovician in the Central Taimin Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 103-131]
- 49 Gao Zhenzhong, Eriksson K A. Internal tide deposits in an Ordovician submarine channel: Previously unrecognized facies? *Geology*, 1991, 19 (7): 734-737
- 50 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. *古地理学报*, 2002, 4(1): 83-89 [Zhang Xinyang He Youbin Luo Shunsheng *et al.* Deep-water sediment waves formed by internal waves. *Journal of Paleogeography*, 2002, 4(1): 83-89]
- 51 Viana A R & Faugeres J-C. Upper slope sand deposits: the example of Campos Basin: a latest Pleistocene-Holocene record of the interaction between along-slope and down-slope current. In: Stoker M S, Evans D & Cramp A, eds. *Geological Processes on Continental Margin: Sedimentation, Mass-Wasting and Stability*. Geological Society, London: Special Publication, 1998, 129, 287-317
- 52 Jennette D, Wawrzyniec T, Fouad K, *et al.* Traps and turbidite reservoir characteristics from a complex and evolving tectonic setting: Veracruz Basin, southeastern Mexico. *AAPG Bulletin*, 2003, 87(10): 1599-1622
- 53 Modica C J and Brush E R. Post-rift sequence stratigraphy, paleogeography and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(7): 923-945
- 54 Saller A H, Noah J T, Ruzuar A P, *et al.* Linked lowstand delta to basin-floor fan deposition, offshore Indonesia: An analog for deep-water reservoir systems. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(1): 21-46
- 55 Kuvaas B, Kristoffersen Y, Leitchenkov G, *et al.* Seismic expression of glacial deposits in the eastern Riser Larsen Sea, Antarctica. *Marine Geology*, 2004, 207: 1-15
- 56 Wong H K, Lüdmann T, Baranov B V, *et al.* Bottom current-controlled sedimentation and mass wasting in the northwest Sea of Okhotsk. *Marine Geology*, 2003, 201: 287-305

Process of Dynamics and Its Response of Deep-Water Sedimentation

WANG Ying-min¹ WANG Hai-rong^{1,2} QU Yan³ PENG Xue-chao³
ZHANG Wen-ming¹ LI Wen-cheng³

(1. Key Laboratory of Education Ministry for Hydrocarbon Accumulation Mechanism, University of Petroleum, Beijing 102249;
2. Basin and Reservoir Research Center, University of Petroleum, Beijing 102249;
3. Institute of Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou 510760)

Abstract Various processes operate deep-water environment and interplay in very complex way. Gravity (or gravity current) process may act in a variety of ways and systematic evolution may happen between them. Bottom currents (commonly refer as contour current) include those driven by thermocline circulation, those driven by wind and tidal bottom current running up and down in canyons. Internal wave may be one important geological forces. In all such processes acting either isolate or jointly the type and genesis of sediment of deep-water environment is very complex, and own potential palaeo-climate information and hydrocarbon perspective.

Key words deep-water sediment, process of dynamics, response of sedimentation, gravity current, contour current