

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2009.04001

# 深海沉积与地球系统

汪品先

(同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海200092)

**摘要:** 20世纪50年代以来深海沉积学的一系列突破性发展, 打破了沉积学的长期静寂, 也推动了地球系统演变中一系列相关学科。从几个方面回顾了国际深海沉积学的发展历程: 从浊流到等深流, 从深海风暴到沉积牵引体, 从沉积捕集器到海底边界层的定点观测, 从沉积过程的时间序列到海底联网观测系统, 以至连接现代沉积过程和层序地层的“从源到汇”, 和深海沉积过程在碳循环中作用的研究。由于这种种发展, 深海沉积学成为地球系统科学的一个关键环节。回顾半个多世纪来的深海沉积学, 其重大进展都是和海洋的现场观测紧密相连, 都得益于与相关学科的结合, 也都有大型国际计划作为依托, 可惜这些计划几乎全在欧美海区。我国当前出现了发展深海沉积学的良机, 建议除了增加投入和设备外, 要尽快启动深海大型科研计划的实施, 并对我国深海沉积学的研究方向提出了三点具体建议。

**关键词:** 浊流; 等深流; 从源到汇; 碳循环; 深海沉积

**中图分类号:** P736.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0256-1492(2009)04-0001-11

如果把板块学说和古海洋学比喻为深海钻探(DSDP)的一对孪生姊妹<sup>[1]</sup>, 那么深海沉积, 就是孕育她俩胎盘里的血浆。板块学说的支柱是海底扩张, 离开扩张轴越远的磁异常条带年龄越老; 但是这年龄的证据却是来自直接覆盖在洋壳上的沉积物, 因为海水蚀变下的玄武岩测年并不可靠<sup>[2]</sup>。至于古海洋学, 本身就是深海钻探(DSDP)沉积样品分析的产物。虽然深海沉积的取样早有尝试, 但正是深海钻探在各大洋采集大量岩心的分析, 揭示了驱动冰期旋回的地球轨道周期, 证明了板块运动使洋流改道能够改变气候<sup>[3]</sup>。从深海钻探到大洋钻探(ODP)以至今天的综合大洋钻探(IODP), 以及“国际海洋全球变化(IMAGE S)”等深海航次, 都为深海沉积学的发展提供了丰富的材料, 为追踪地球表面的变迁、研究表层和深部交流的历史, 提供了物质依据。在大陆之外加上了深海, 使人类在空间域里进入了地球系统; 地球表层过程加进了深海记录, 又在时间域里推进地球系统科学向纵深发展, 成为探索地球系统演变的科学, 而这正是预测人类未来生存环境的前提。因此, 深海沉积学不仅是20世纪地学革命的支柱, 也将是21世纪发展地球系统科学的重要依靠。

近二十年来, 我国的古海洋学研究有了显著的

进步, 相比之下作为古海洋学基础的深海沉积学发展却十分缓慢。我国在深海沉积的化学和矿物分析方面, 在深海油气勘探中的沉积相研究方面, 都做出了许多成绩; 但是严格说来, 建立在过程观测基础上、探索动力机制的深海沉积学, 在我国还没有形成, 惟有台湾高屏峡谷高密度流的研究, 堪称南海的一枝独秀。回顾近三十年来国际深海沉积学之所以能快速发展, 关键就在于以现代过程的观测作为起点。而我国大陆学术界在深海沉积学上的欠缺, 不仅不利于古海洋学等海洋学科的进步, 也已经成为深入发展地球系统科学的一种障碍。在此期间, 我国有的学者曾经试图通过文献引进的途径, 将国际深海沉积学的新进展直接用于陆上的古老地层。但是事实证明缺乏海上实践的环节, 在国外海底与国内山区之间架设“直通车”的努力, 不容易取得预期的效果。

鉴于此, 本文试图通过半个多世纪以来国际发展历程的回顾, 探讨深海沉积学的前沿所在和今后走向, 为我国在“十二五”期间深海研究和地球系统科学的发展提供参考。

## 1 从陆到海: 深海沉积物的搬运

1872—1876年英国“Challenger”号的环球航次, 是海洋科学创业史上的第一次“长征”, 当时从深海底采集了大量的沉积和生物样品, 标志着深海沉积研究的开始。由于采到的沉积物不是深海黏土

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB815902)

作者简介: 汪品先(1936—), 男, 教授, 从事古海洋学和古环境研究, E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

收稿日期: 2009-07-31; 改回日期: 2009-08-03. 张光威编辑

就是生物软泥,产生了陆架之外全是细粒沉积、深海海底一片静寂的错觉。按当时的概念:沉积颗粒从海面上掉下去,像雨水那样到达海底后,就不再有任何运动,深海是地球上一切过程的终点。

打破 20 世纪前半叶沉积学沉闷局面的是浊流和浊积岩的发现。虽然 1929 年纽芬兰地震切断海底电缆之后,已经知道有海底浊流,但还是要再等 20 年,当 Kuenen & Migliorini<sup>[4]</sup> 将海底沉积与意大利亚平宁山脉的岩层相比较,发现深海浊流沉积和地槽的复理石具有同样的结构,递变层理就是浊流的标志之后,方才引起地质界的广泛注意,掀起了沉积学的“浊流革命”,开创了现代海洋沉积学<sup>[5]</sup>。自此之后,浊积岩相分析和鲍马序列在沉积学研究中红极一时。有趣的是发现浊流使沉积学重振雄威的,是当时看来与沉积学关系不大密切的构造地质学和海洋学,因为它证明了地槽沉积的深海成因,证明了深海也有沉积搬运的动力<sup>[6]</sup>。

海底滑坡,是沉积物从陆地跨过陆坡进入深海的基本机制之一,它不仅会切断海底电缆,还会引起海啸,是一种海底灾害的根由。滑坡造成的沉积搬运,无论泥石流还是浊流,都是依靠重力向下流动<sup>[7]</sup>。已知规模最大的是挪威岸外的 Storegga 滑坡,体积 3 000 km<sup>3</sup> 的沉积物,移动距离 800 km,受影响的陆坡面积达 95 000 km<sup>2</sup><sup>[8]</sup>。对浊流的了解,起先仅限于砂质沉积,随着以后的发展,尤其是 20 世纪 90 年代被动大陆边缘(如巴西、墨西哥湾、西非、北海)海底油气的勘探,发现细颗粒浊流沉积广泛构成海底扇的储集层<sup>[9]</sup>,于是认识到除粗粒浊积岩以外,还有富含泥质的细粒浊积岩发育<sup>[10]</sup>。

其实海洋沉积的重力搬运,并不一定要求滑坡、坍塌一类的突然事件。入海河水如果悬移物浓度达到一定限度(如 36~43 kg/m<sup>3</sup>),就会产生超密度流

(hyperpycnal flow, 亦译高密度流),这种浓度界面对流不稳定时还可以大大降低<sup>[11]</sup>。湖泊里的超密度流早在一百多年前已经报道,海洋里最先是 20 世纪 80 年代在黄河流入渤海处发现<sup>[12-13]</sup>。山区中小型河口的洪水季节,最容易造成这种超密度流,属于陆源沉积物由河口输入海洋的一种重要途径<sup>[11]</sup>。入海以后,还会造成海底峡谷(submarine canyon),成为向深海输送沉积物的通道<sup>[14]</sup>,法国南岸外 Var 峡谷,在洪水期的超密度流便是一例(图 1)<sup>[15]</sup>。台湾南部的高屏溪集水盆地高差达 3 000 m,年雨量逾 3 000 mm,平均年输砂量 3 500 万 t,洪水期河水入海后成为超密度流,切割陆坡形成的高屏峡谷(Kaoping Canyon),深度从起点的 166 m 增到陆架外缘的 400 m,在洪水、台风和地震时快速输送沉积,是超密度流的典型<sup>[16-17]</sup>。可见,经典的浊流决不是陆地沉积物向深海运输的惟一形式,广泛出现的是悬移物浓度超过一定阈值的超密度流,只要有微小的坡度、甚至陆架内的缓坡,就可以向海盆运送沉积,所以,细颗粒重力流是深海沉积过程的一种常见形式。

以上所述,都是重力作用下陆源沉积进入海洋的各种途径;在进入海洋后,还会有依靠水流而不是重力的搬运,这就是等深流(contourite)的沉积作用。20 世纪 60 年代中期,在深海海底照片和沉积柱状样中都发现有海流的踪迹,而深海海底观测到的雾状层(nepheloid layer)也无法用浊流解释,于是提出了深海沉积物可以由地转流沿着等深线搬运,亦即等深流的概念<sup>[18-19]</sup>。但是,直到 60 年代末,沉积学的主流意识还以为重力流是深海沉积搬运的惟一机制,何况等深线流的物理海洋学解释也没有重力沉积搬运那样简单,因此,通过现场观测检验深海海流是否存在,成为解决问题的惟一出路。

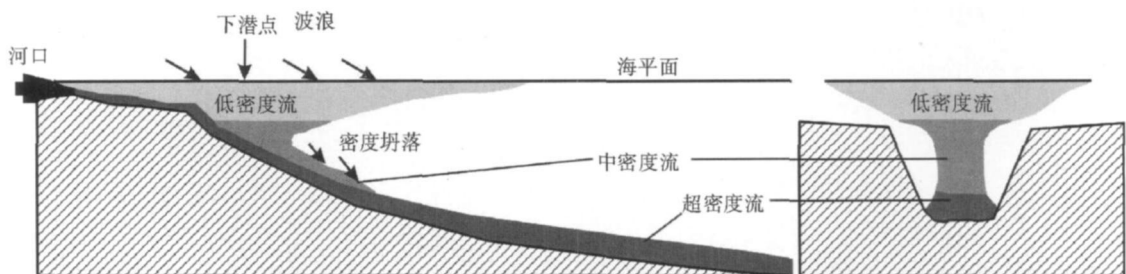


图 1 地中海 Var 峡谷高密度流示意图(左—纵切面,右—横切面)

法国南部 Var 河入海后形成的海底峡谷,洪水期形成超密度流,将泥质沉积物输入深海扇(据[15]改)。

## 2 从描述到观测: 现场试验与时间序列

为了检测深海海流的存在, 1978 年起执行了将近十年的 HEBBLE 即“高能底部边界层试验”计划, 在加拿大新斯科舍 (Nova Scotia) 岸外的北大西洋深海区, 设计了 SeaDuct 等专门的仪器设备进行观测(图 2)<sup>[20]</sup>。7 年现场试验中最突出的成绩是发现了深海“海底风暴”(deep storm): 海底以上 10 m 处的最大流速可达 15~40 cm/s, 悬移物浓度高达 3 500~12 000  $\mu\text{g/L}$ , 平均每年发生 8~10 次, 每次延续 2~20 天<sup>[21]</sup>, 证实了深海海流的存在, 从根本上改变了深海动力学的概念。“等深线流”的发现, 是继“浊流”之后深海沉积学的又一场“革命”<sup>[22]</sup>。同时, 这又是深海地质学第一次真正意义上的现场试验, 是从地质学出发探讨物理海洋学理论问题的一次试验。

与从大陆搬运沉积物到海洋的浊流不同, 等深流本身不带来沉积, 而是把海底原有的沉积物重新搬运和堆积, 这种底层洋流的搬运、堆积过程, 可以延续几百万年, 形成沉积牵引体 (sediment draft)<sup>[23]</sup>。研究最好的还是北大西洋, 20 世纪 70 年代晚期以来, 北大西洋是等深流研究的起点, 也是典型研究区的所在<sup>[24]</sup>。现在知道, 牵引体在深海广泛分布, 包括南海在内。如东沙东南南海北陆坡的牵引体具有南海深海泥质沉积最高的堆积速率, 并

有典型的沉积波发育(图 3)<sup>[25]</sup>。关于牵引体和沉积波, 国内已有综述<sup>[26]</sup>, 此处不再重复。

除了重力流和等深流之外, 深海沉积的另一种基本形式就是远洋 (pelagic) 沉积过程, 早先的概念是浮游生物尸体和悬移颗粒像雨点一样垂向降落海底。20 世纪 70 年代晚期发明的沉积捕集器, 定期收集海水中的沉积颗粒、测定表层大洋的输出通量, 发现远洋沉积并非均匀发生, 而是一种脉冲式的“事件”过程。早期的捕集器只能一次性采集数十天到百余天积累的大洋沉降颗粒, 发现生源颗粒占 70%~90%, 并且从上而下向深处递减<sup>[27]</sup>; 后来的捕集器装有一系列收集杯和定时装置, 每隔若干天采集一次, 能提供远洋沉积过程的时间序列。比如墨西哥加利福尼亚湾 Guayamas 盆地的 7 年记录, 揭示出从晚秋到春季硅藻勃发, 夏季陆源物大量输入, 分别在海底堆积起浅色与暗色沉积, 从而形成纹层(图 4)<sup>[28]</sup>。现在, 沉积捕集器已经在全世界各大海洋广泛应用, 不仅根本改变了海洋沉积缓慢均匀下落的错误概念, 而且为海洋过程变异的认识和古海洋学标志的检验, 都做出了重要贡献。

上述观测的共同之处, 都是记录了原位采集的时间序列。人类生活于海洋之外, 历来的海洋考察也只是从船上或者岸边, 对海洋作“蜻蜓点水”式的短暂访问, 而把深海海底留给神话世界。近三十年来的技术发展提供了进入深海现场观测的可能, 结果否定了深层“大洋水体只有缓慢而被动的变化, 几乎是个体地质系统”的陈旧观念; 恰恰相反, 大洋水体

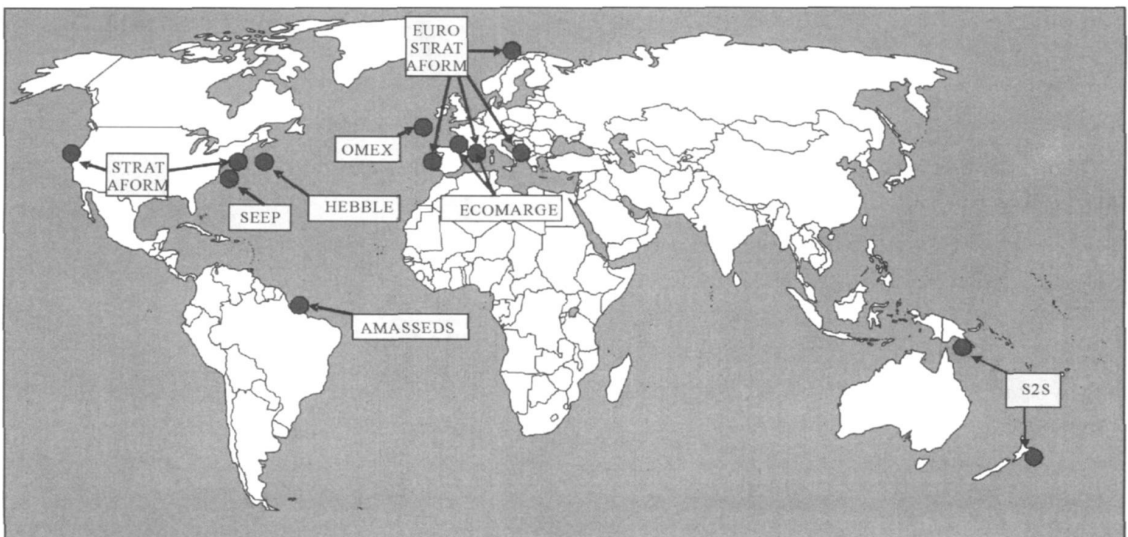


图 2 海洋沉积过程大型计划实例(见表 1)

基本上属于湍流性质,在动力学上十分活跃,其主要组成部分都在经历着时间与空间上的变化<sup>[29]</sup>。几十年来的深海沉积学,就是证实这种论断的过程;HEBBLE 试验,就是从沉积学角度揭示的深海动力学过程。当前正在发展的一系列新技术,又在为深海沉积学发展的新阶段开辟新途径,其中最突出的就是海底观测系统。

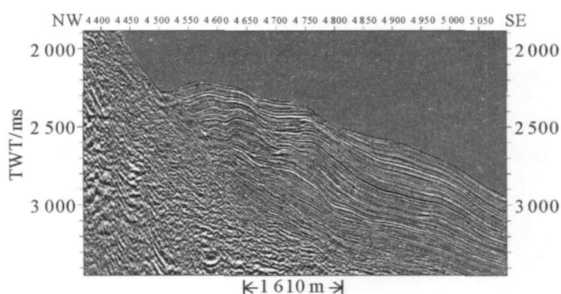


图3 南海北陆坡位于东沙东南的牵引体及其沉积波<sup>[25]</sup>

Fig. 3 A sediment draft with sediment waves in the northern slope of the South China Sea, southeast of Dongsha<sup>[25]</sup>

理解沉积机制的直接途径,就是原位的长期连续观测。深海沉积作用观测中的一大难题是细颗粒的聚合作用:深海沉积的主体是细颗粒物,而采样分析的办法必然破坏聚集体,使得粒度信息失真,只有原位测定才能解决。在执行 HEBBLE 计划中,建立了用光学或者声学原理原位测定悬移物的方法,

才能做到实时提供沉积颗粒浓度、甚至于粒度分布的信息<sup>[30]</sup>。依靠水体浊度的测量,最先在大西洋发现了近海底的雾状层<sup>[31]</sup>,近年来的观测越来越多,不仅海底有近底雾状层,海面有浮游生物造成的表面雾状层,两者之间还会有“中间深度雾状层”<sup>[32]</sup>。比如加利福尼亚 Eel 河口外的陆坡上,一年四季有中间深度雾状层发育,其中以 400~700 m 水深处为最盛,推断是内潮和地形相互作用的产物,是沉积物侧向搬运的重要机制<sup>[33]</sup>。

研究深海沉积作用,不仅要观测水层,更要在海底进行长期连续的原位观测。为此,将各种探头用三脚架固定在海底进行各种原位测量和海底摄像,可以大大推进对底部边界层(BBL)动态变化和海底沉积过程的了解<sup>[34]</sup>。随着技术的不断改进,三脚架上安装的设备愈益先进,已经成为各个海区海底过程的常用观测设施。例如在 Eel 河口外,通过三脚架装置 5 年的观测,揭示出泥质再悬浮主要发生于冬季,侧向搬运主要朝向陆坡,而沿陆坡搬运并不显著等特征<sup>[35]</sup>。

当前,海洋科学正在经历着从外来“考察”到原位“观测”的重大转折。一种将传感器设在海底、用光缆联网供电和传递信息的海底观测网,正在开始建设。这种联网的海底观测系统将能对海底以下的岩石、流体和微生物,对大洋水层的物理、化学与生物过程,进行实时和连续的长期观测。这是一场从海洋采样回实验室分析、发展到“把实验室设到海里

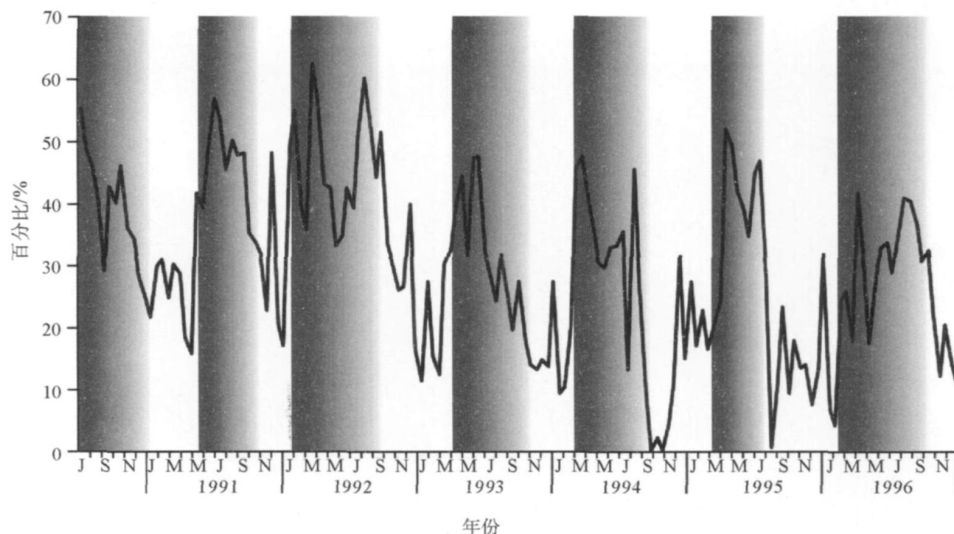


图4 加利福尼亚湾 Guaymas 盆地的纹层形成机制:7年的沉积捕集器记录显示陆源与生源颗粒的重量比例的季节变化,形成夏季的暗色层(灰色)和冬季的浅色层(白色)(据[28]绘)

Fig. 4 Formation of laminated sediments in Guaymas Basin, Gulf of California, Mexico  
The sediment trap sequence over 7 years has recorded seasonal alternation of predominantly

terrigenous (dark) vs biogenic (white) material (data from [28])

去”的转折,是把深海大洋置于人类的监测视域之下的重大创举<sup>[36]</sup>。包括深海沉积学在内的海洋科学,都将相应发生革命性的变化。以中国现在的科技实力,绝不当再次错过海洋科学历史性变革的机遇。

### 3 从源到汇: 深海沉积系统的研究

从全球圈层相互作用的地球系统看来,海洋沉积学就是物质流从陆壳到洋壳的中间环节,也可以叫做“沉积过路系统(Sediment Routing System)”<sup>[37]</sup>。与此相应,新一代的沉积学是一个“从源到汇”的大系统,从山区剥蚀、河流输送入海开始,到最后形成海底地层为止,其中包括现代过程的观测、地层记录的分析 and 过程的数值模拟等内容。此类大型研究在 20 世纪 90 年代初已经开始,进入新世纪后大规模发展,成为当前海洋沉积研究的主流方向。

早期的如美国和巴西的“亚马孙陆架沉积研究”AMASSEDS 计划(1989—1991),通过不同季节 4 个航次的重复观测,从物理海洋、海水化学、沉积化学、沉积与地层 4 个角度,研究这世界最大河流输出的沉积颗粒与海洋过程之间的关系<sup>[38]</sup>。接下去的计划规模更大,这就是 90 年代美国在加州北部和新泽西州岸外开展“(大陆)边缘的地层形成”STRAT-AFORM 计划(1994—2000),西欧各国在地中海和北大西洋的“欧洲边缘的地层形成”EUROSTRAT-AFORM 计划(2002—2005),和美国在巴布亚湾和新西兰北岛外的“从源到汇”MARGIN S2S 计划(2001—)。这些计划研究的海区不一,但是有着共同的特点:(1)都在大陆边缘,因为海洋沉积主要来自大陆,因此,都是针对海陆之间物质交换立题;(2)都有跨时间尺度、跨学科的特点;(3)都是通过整体研究(从河流流系到洋底)揭示机理,从现场观测到数值模拟的系统研究。

20 世纪 60 年代之后,从现代海洋学方面已经发展了陆架沉积的数值模拟,而从地质学方面也有借助于“地震地层学”发展起来的古大陆边缘“层序地层学”模型,但是两者之间时间尺度相差太大,难以相互衔接<sup>[39]</sup>。90 年代提出把现代沉积学、地层学和数值模拟的专家组织到一起,利用短期沉积过程( $< 100$  年)的研究,去求取长期地层记录( $10^4 \sim 10^6$  年)的解释。为此,将沉积搬运与堆积的详细观测,沉积物的长期堆积,地层的地震呈像,以及古(百万年)今沉积的取心结合在一起<sup>[40]</sup>;在沉积观测与层序地层学之间出现的缺口,可以利用数值模拟加以联结,——这就是 STRATOFORM 计划。这项计

划包括美国东、西海岸的被动与活动大陆边缘,前者选新泽西州岸外,后者选加利福尼亚北部 Eel 河口外,都是从陆架到陆坡(图 2)。这种整合研究的特点就在于跨越尺度:时间上从秒级的波浪周期,到  $10^7$  年的地层周期。采用的手段包括装有各种探头的三脚架和沉积捕集器的锚系,Chirp 浅地层剖面和多波束条带制图,直到多道地震和 大洋钻探<sup>[41]</sup>。目前,新泽西州岸外新的大洋钻探 IODP 313 航次正在实施中,而加利福尼亚北部计划的完成,第一次提供了大陆和 大洋之间不同时间尺度上沉积过程的具体图景,实现了陆架与陆坡的整合,现代过程与地层记录的整合,以及观测结果和数值模拟的整合,像当年将古埃及和古希腊文字连接起来的罗赛塔石碑(Rosetta Stone)一样,在现代沉积学和层序地层学之间架筑桥梁<sup>[42]</sup>。

在美国计划成功的鼓舞下,西欧各国在欧盟主持下组织了“欧洲边缘的地层形成”EUROSTRAT-AFORM 计划(2002—2005),选择地中海的亚得里亚海、利昂湾和北大西洋的挪威和葡萄牙大陆边缘 4 个海区(图 2),也是定量研究沉积物从河口到深海的搬运途径和机制,及其由此造成的地层层序<sup>[43]</sup>。将美洲的研究思路用到欧洲不同环境的海区,通过两者比较闪现出了不少学术亮点,比如内波在沉积搬运中的作用<sup>[44]</sup>等等。

进入新世纪,美国在 STRATOFORM 计划完成的基础上,冲出美国走向世界,2002 年起开展大陆边缘“MARGINS”计划中的 S2S,即 Source to Sink 的“从源到汇”研究计划。计划前五年选择的两个研究对象,一是新几内亚被动边缘的 Fly 河与巴布亚湾,从 2002 年开始;一是新西兰北岛活动边缘的 Waipaoa 河与陆架,从 2004 年开始。尽管两者都是西南太平洋山区的中小河流,但相互间有重大区别:Fly 河的集水面积是 Waipaoa 河的几十倍,形成的沉积地层前者呈楔状前积,后者为盆地充填<sup>[45]</sup>。MARGIN S2S 计划至少研究 10 年,使用的方法与 STRATOFORM 相似,目前在巴布亚湾的研究,已经取得从季节到冰期旋回中沉积冲刷与堆积的历史<sup>[46-47]</sup>等多项成果,十分令人鼓舞。在这里,深海沉积学与一系列学科相结合,从陆地水文、地貌到海洋的地层与构造,从大陆剥蚀追踪到海洋沉积,再到地层层序的形成,这正是地球系统科学的研究途径。

### 4 从物理到生物地球化学: 深海沉积与碳循环

以上讨论,集中在沉积物质向海运输与沉积的

物理过程,而深海沉积还有生物地球化学的方面。这里既有海陆相互作用中的碳循环问题,还有海洋生源沉积的埋葬问题。20世纪80年代全球变化中的“海洋通量(JGOFs)”计划,研究大陆与大洋物质交换中的碳循环,其中沉积作用和陆源物的向海输运都是必不可少的内容。于是,以生物地球化学为目标的海洋沉积研究计划应运而生,如美国东岸的“陆架边缘交换过程”SEEP计划(1983—1989),法国岸外的“大陆边缘生态系”ECOMARGE计划(1984—1991),和西欧岸外北大西洋的“大洋边缘交换”OMEX计划(1993—2000),一直延续到90年代(表1)。这类计划在物理和地质成分外,还包括沉积过程中的生物作用,比如观测浮游生物颗粒在雾状层中由陆向海的搬运,有机碳由陆向海的输运通量、埋葬速率和在海底的矿化<sup>[48]</sup>等等。

深海沉积除陆源颗粒外还有生源物质,尤其碳酸盐是深海沉积中的主要成分之一,其相对丰度的变化曾经是深海沉积学的先声。J Murray等早在百年前就提出了红黏土与抱球虫软泥的分界,即“海底雪线”;60年前热带太平洋沉积柱状样中发现碳酸盐丰度有周期性变化,Arrhenius<sup>[49]</sup>提出可以与冰期旋回对比。如果说搬运机制是碎屑矿物沉积学的关键,那么,深海碳酸盐沉积学的机制研究集中在溶解与堆积。从60年代延续到80年代的争论,在于太平洋的深海碳酸盐旋回,究竟是由生产力变化造成,还是深海溶解作用的结果。针对钙质浮游壳体的深海溶解作用,60~70年代进行了许多试验,也提出了种种衡量溶解程度的定量标志。经过岁月的积累,终于认识到海洋系统里溶解作用和生产力有着密切的关系,两者的结合才是碳酸盐旋回的原因<sup>[50]</sup>。然而,深海碳酸盐溶解之谜远还没有破解。不仅是今天大洋碳酸盐沉积的收支难以平衡<sup>[51]</sup>,碳酸盐在冰期旋回中的沉积和溶解变化更难解释。大洋的碳酸盐沉积是大气CO<sub>2</sub>浓度变化的缓冲剂,冰期时CO<sub>2</sub>浓度下降,深海碳酸盐溶解作用是否减弱?为了回答这个问题动用了各种方法,甚至测量了单个有孔虫壳体的重量<sup>[52]</sup>,然而,不同地质证据得出的结论就是不同,看来离谜底还有相当路程<sup>[53]</sup>。

如果进一步考察地质历史,可以看到无论是有机碳还是无机碳(钙质壳体)的沉积,都随着海水物理化学特征而变。大洋的钙质化石,自从“寒武纪生命大爆发”确立浅海底栖生物为主的局面以后,大约2亿年前大洋化学成分发生了“中生代中期革命”,变成了以深海浮游生物(颗石藻和浮游有孔虫等)为主的格局,从此,海洋才能充分发挥大气CO<sub>2</sub>浓度变

化的缓冲和调控作用<sup>[54]</sup>。海洋生源沉积的生物类别、碳酸盐沉积覆盖的面积和深海碳酸盐的补偿深度,在显生宙都经历了巨大的变化(图5)。自从1977年在东太平洋中隆发现深海热液作用以来,意识到深海存在着由海底自下而上的物质输运,可以使海水中Mg/Ca离子比值等化学成分发生改变;而蒸发盐里的包裹体,又为海水化学成分的地质演化提供了直接证据<sup>[55]</sup>。海水化学成分的变化,也必然影响生物的演化。比如以方解石为骨骼的钙质超微化石,在白垩纪时极度繁盛,以致大面积形成以超微化石为主体的白垩沉积;新生代以来Mg/Ca急剧回升,海水化学逐渐变得对钙质超微化石不利,其中盘星类从中新世开始骨骼退化,到上新世末最终灭绝。今天的海水富SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>,Mg<sup>2+</sup>,Na<sup>+</sup>,而贫Ca<sup>2+</sup>的特征,就是白垩纪以来洋底扩张减慢所导致的结果<sup>[56]</sup>。

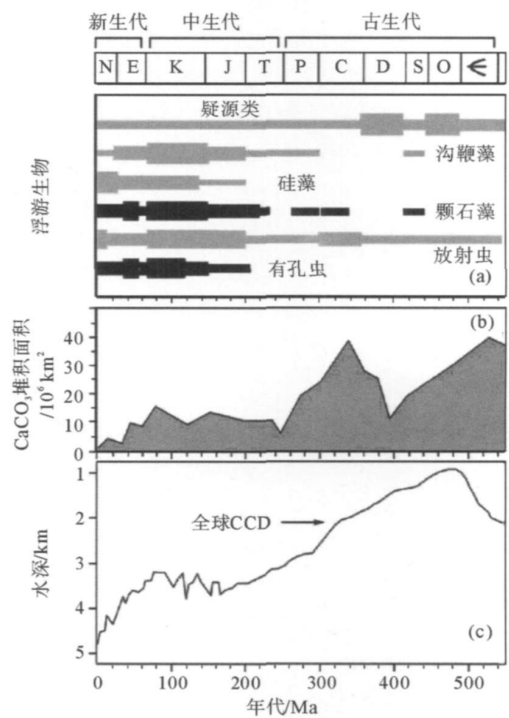


图5 显生宙大洋碳酸盐沉积的变化  
(a) 主要浮游生物类别; (b) 碳酸盐堆积面积;  
(c) 全大洋碳酸盐补偿深度<sup>[56]</sup>

Fig. 5 Evolution of oceanic carbonate sedimentation in the Phanerozoic  
(a) major plankton groups; (b) area of carbonate accumulation; (c) oceanic CCD<sup>[56]</sup>

与此同时,世界大洋各海区产生的差异,也会造成生源沉积的区域变化。以蛋白石为例,海洋沉积的蛋白石主要来自硅藻,新生代以来硅藻成为海洋浮游植物竞争的优胜者,凡是高营养元素的海区,

表 1 海洋沉积过程大型计划实例(参见图 2)

Table 1 Cases of major research programs on marine sedimentation processes (see Fig. 2)

项目	全名	海区	年份	立项机构
HEBBLE	High Energy Benthic Boundary Layer Experiment	加拿大岸外 新斯科舍陆隆	1978—1986	美国能源部
SEEP	Shelf Edge Exchange Processes	美国东部 Mid-Atlantic Bight	1983—1989	美国能源部
ECOMARGE	ECOsyst mes de MARGE continentale	法国里昂湾和 Bay of Biscay	1984—1991	法国科研 中心(CNRS)
AMASSEDS	AMAZON Shelf SEDIMENT Study	亚马孙陆架边缘	1989—1991	美国科学基金会
OMEX	Ocean Margin EXchange	Bay of Biscay 北部, 和西班牙西岸外	1993—2000	欧盟委员会
STRATIFORM	STRATIFORMATION on Margins	美国加州北部和 新泽西岸外	1994—2000	美国海军研究署
EUROSTRATIFORM	EUROPEAN STRATIFORMATION on Margins	西欧北大西洋与 地中海特定海区	2002—2005	欧盟
MARGINS2S	Source-to-Sink	巴布亚湾和新西兰 Waiapoa 陆架	2002—	美国科学基金会

只要硅的供应有保证,一定是硅藻蛋白石的大量沉积区。随着大洋营养元素和硅质分布的变化,世界大洋蛋白石的沉积区也在不断转移。大洋蛋白石分布的高值区今天在南大洋,270 万年以前在北太平洋,而 450~700 万年前在热带太平洋<sup>[57]</sup>。海洋的蛋白石沉积还可能与陆地植被的演化相关:始新世末地球系统从“暖室期”转向“冰室期”,使得陆地植被中草本植物大为繁盛,而草本植物干重的 15% 是蛋白石质的植硅石,草本植物的繁盛加速了溶解硅从大陆地壳向大洋的输送,始新世末海洋硅藻的突然发展,很可能是与陆地草本植物的一种协同演化<sup>[58]</sup>。但是上述推论,并未得到硅藻种数演变的支持<sup>[59]</sup>,可见这类探讨还处在起步阶段,离真正的结论还相当遥远。

进入新世纪以来,微生物海洋学的发展和深部生物圈的发现,向深海沉积学提出了新的挑战。长期以来,微生物研究集中在致病细菌一类,海洋微生物未受重视,因为它们多数都不能用光学显微镜识别,又不能作为微生物培养。随着近三十年来技术的改进,发现微生物在大洋有惊人的丰度:一毫升海水有上百万个原核生物,在海洋生物量中可占 90%<sup>[60]</sup>;发现微生物也能进行光合作用,并且能利用溶解有机碳(DOC)构成海洋食物链里的“微食物环”<sup>[61]</sup>。而海水里的有机碳有 90% 是溶解有机碳。

尤为惊人的是海底以下的微生物世界即“深部生物圈”。据估计,全世界大约 55%~85% 的原核生物生活在海底以下深达成千米的沉积物和岩石里,占据全世界活生物量的 30%<sup>[62-63]</sup>! 主要由原核生物组成的大洋微生物,不仅是地球系统中碳循环的重要组成部分,也是深海沉积作用的关键性因素。人类对深海微生物知识过于贫乏,有可能这正是许多深海未解之谜的谜底所在。近年来,已经开始研究深海病毒对于深部生物圈的袭击及其对深海碳循环的影响<sup>[64]</sup>,开始探讨海底微生物在底栖生物碳酸盐沉积中的作用,即所谓“碳酸盐工厂”的演变<sup>[65]</sup>。毋庸置疑,深海微生物的研究必将为沉积生物地球化学谱写新的篇章。

## 5 发展中国的深海沉积学

回顾深海沉积学的发展历史,既有长期的停滞,又有快速的飞跃。而 20 世纪 70 年代以来深海沉积学的几次快速发展、几番重大突破,却有着引人注目的共同特点,这就是:

- (1) 都和海洋的现场观测紧密相连;
- (2) 都有来自与相关学科结合的推动力;
- (3) 都有大型计划、尤其是大型国际计划作为依托。

深海研究对人力物力的要求都比较高。个人、个别实验室可以出成果、可以写文章,但是要解决重大科学问题就非得有一定规模的合作不行。比如 HEBBLE 计划,由 3 个国家、24 个实验室花了将近十年时间,参加的科学技术人员将近 90 位,其中包括 34 名学生,完成了将近 200 篇论文(包括博士论文和技术报告)<sup>[21]</sup>,结果改变了深海沉积的根本概念。回顾 20 世纪的深海沉积学重大计划,全部都在欧美海域,最近几年才开始有 S2S 在大洋洲的选区,而作为世界大洋最大沉积物源区的亚洲大陆,居然至今没有一项重大研究计划(图 2),应当引起我国科技决策层的高度注意。没有做大项目的决心,我国的深海研究尽可以奢谈创新,但其结果至多只能做到跟踪尾随。

深海是地球表面人类了解最少的部分,因此,其研究必然是地球系统科学的突破口,深海沉积也必然是地球系统演变的最珍贵的信息载体。长期以来,我国学术界在困难的条件下,从深海碳酸盐沉积、深海黏土矿物、深海雾状层、深海沉积搬运和深海浊流和储层等众多方面都做出了大量成果,不在此逐一列举。然而,我国深海科学起步太晚,深海沉积学的弱势已经成为地球系统科学发展的瓶颈。如今要加速发展深海研究,当然首先要加强经费与设备的投入;但在争取客观条件的同时,也不应当忘记主观层面的问题。目前在深海研究的学科发展上,至少有三方面要求密切注意的问题:

(1) 偏重室内分析,缺乏现场观测。受海上装备条件的限制,我国深海研究长期以来偏重室内。以深海沉积而言,表现为偏重化学分析而忽视除粒度以外的物理方面的研究,因为化学分析主要在实验室,而物理过程的研究通常要求亲临现场。特别是 20 世纪 70 年代以来,国际深海沉积过程研究的重大计划我国都极少参加,主要依靠文献翻译和个别出国进修人员的引进。缺乏现场实践的结果,一方面是严重缺乏有现场依据的深海沉积搬运和沉积机制的成果;另一方面深海沉积学新进展在陆上古老地层中的应用也难以深入。近来我国海洋界力主建设海底观测网等现场新技术,应当是扭转局面的重要举措。

(2) 方法比较单调,尤其细粒沉积的研究方法亟待更新。深海沉积以细颗粒为主,而在我国除了化学和黏土矿物分析以外,极其缺乏多样化的分析方法。比如对于海底未固结的泥质沉积,除 X 光照相外,还可以采用快速冷冻切片的技术,研究毫米尺度的显微结构<sup>[66]</sup>识别微细的纹层和生物搅动<sup>[67]</sup>。再

如测井中的微电阻率扫描成像技术(FMS imaging),可以达到半厘米的分辨率,是在井下分析泥质沉积的先进技术,可喜的是我国已经开始运用。只有采用新型技术,我国的深海沉积学才可能深入发展。

(3) 跨学科研究趋于简单化、形式化。前面说过,深海沉积学是在与相关学科结合中发展起来的,而我国的学科交叉往往着重表面,缺乏相互渗透、相互理解的过程。实际上学科交叉要求“你中有我、我中有你”,并不是“我加你”就能奏效的。交叉过程要求双方互“入虎穴”,共同探讨,因而具有相当的难度,绝不是不同学科的人分担一个项目、同出一个专辑,就算交叉成功的。不仅深海沉积需要与其他学科的结合点上获得发展动力,其他学科也需要或者说更需要结合深海沉积学去开拓新视域。无论是浊流还是等深流的发现,都是从海洋沉积出发,推进了深海的物理海洋学。时至今日,深海动力学的机制远未认识。“大洋传送带”的假说虽在教科书里奉为经典,但在物理海洋学上缺乏证明<sup>[68]</sup>;潮汐和海底地形可以引起深海水体的混合,但它在深海动力学里所起作用的研究还刚刚开始<sup>[69]</sup>。这些在基本理论问题的新挑战,正是深海沉积学的用武之地;而相关学科的融合,是应战的起码条件。

当前中国的海洋事业,正在经历着郑和下西洋后六百年不遇的良机,如何抓住历史机遇、利用经费和技术条件的改善,快速发展深海科学,是当前我国科学界面对的历史任务。对于海洋界来说,则需要把握方向,认真反思多年来习惯了的研究方法和思路,促使深海沉积学尽早进入国际前沿的轨道,适应我国地球系统科学整体发展的要求。

致谢: 本文的撰写得益于和 C Nittrouer、B Haq 的讨论,田军协助作图,在此一并致谢。

#### 参考文献 (References)

- [1] 许靖华. 古海洋学的历史与趋势 [J]. 海洋学报, 1984, 6(6): 830-842. [Hsu K J. Paleooceanography: history and perspectives [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1984, 6(6): 830-842.]
- [2] Maxwell A E, Von Herzog R P, Andrews J E, et al. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project [M]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1970, 3: 1-806.
- [3] 同济大学海洋地质系. 古海洋学概论 [M]. 同济大学出版社, 1989: 1-316 [Department of Marine Geology, Tongji University. Introduction to Paleooceanography [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1989: 1-316]
- [4] Kuenen Ph H, Migliorini C I. Turbidity currents as a cause of



- graded bedding [J]. *Journal of Geology*, 1950, 58: 91-127.
- [5] Reading H G. *Sedimentary Environments and Facies* [M]. Blackwell Sci. Publ., 1978: 1-557.
- [6] Selley R C. *An Introduction to Sedimentology* (2<sup>nd</sup> edition) [M]. Academic Press, 1982: 1-417.
- [7] Masson D G, Harbitz C B, Wynn R B, et al. Submarine landslides: processes, triggers and hazard prediction [J]. *Phil. Trans. R. Soc.*, 2006, A. 364: 2009-2039.
- [8] Haflidason H, Sejrup H P, Nygard A, et al. The Storegga Slide: architecture, geometry and slide development [J]. *Marine Geology*, 213: 201-234.
- [9] Stelling C E, Bouma, A H, Stone C G. Fine-grains turbidite systems: Overview [C]//*Fine Graines Turbidite Systems. AAPG Memoir 72/ SEPM Spe. Publ.* 68, 2000: 1-8.
- [10] Bouma A H. Fine-grains, mud-rich turbidite systems: Model and comparison with coarse grained, sand-rich systems [C]//*Fine Graines Turbidite Systems. AAPG Memoir 72/ SEPM Spe. Publ.* 68, 2000: 9-20.
- [11] Mulder T, Syvitski J P M, Migeon S, et al. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20: 861-882.
- [12] Wright L D, Wiseman W J, Bornhold B D, et al. Marine dispersal and deposition of Yellow River silts by gravity-driven underflows [J]. *Nature*, 1988, 332: 629-632.
- [13] Wright L D, Wiseman W J, Yang Z S, et al. Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River) [J]. *Continental Shelf Research*, 1990, 10 (1): 1-40.
- [14] van Weering T C E, Weaver P P E. Canyon processes; an introduction [J]. *Marine Geology*, 2007, 246: 65-67.
- [15] Mulder T, Savoye B, Piper D J W, et al. The Var submarine sedimentary system: understanding Holocene sediment delivery processes and their importance to the geological record [C]//*Geological Processes on Continental Margins: Sedimentation, Mass-wasting and Stability. Geological Society of London, Special Publication*, 1998, 129: 145-166.
- [16] Liu J Y, Lin H L, Hung J J. A submarine canyon conduit under typhoon conditions off southern Taiwan [J]. *Deep-Sea Res. I*, 2006, 53: 223-240.
- [17] Chiang C S, Yu H S. Evidence of hyperpycnal flows at the head of the meandering Kaoping Canyon off SW Taiwan [J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 28(3): 161-169.
- [18] Heezen B C, Hollister C D, Ruddiman W F. Shaping of the continental rise by deep geostrophic contour currents [J]. *Science*, 1966, 152: 502-508.
- [19] Heezen B C, Hollister C D. *The Face of the Deep* [M]. Oxford University Press, 1971: 1-659.
- [20] McCave I N, Chandler R C, Swift S A, et al. Contourites of the Nova Scotian continental rise and the HEBBLE area [C]//*Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series, Seismic and Sedimentary Characteristics. Geological Society, London, Memoirs*, 2002, 22: 21-38.
- [21] Hollister C D, Nowell A R M. Prologue: Abyssal storms as a global geologic process [J]. *Marine Geology*, 1991, 99: 275-280.
- [22] Stow D A V, Lovell J P B. Contourites: their recognition in modern and ancient sediments [J]. *Earth-Sci. Reviews*, 1979, 14: 251-91.
- [23] Hollister C D. The concept of deep-sea contourites [J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 82: 5-11.
- [24] Marani M, Argnani A, Roveri M, et al. Sediment drifts and erosional surfaces in the central Mediterranean: seismic evidence of bottom current activity [J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 82: 207-220.
- [25] Wang P, Li Q (Eds.). *The South China Sea: Paleogeography and Sedimentology* [M]. Springer, 2009: 1-506.
- [26] 钟广法, 李前裕, 郝沪军, 等. 深水沉积物波及其在南海研究之现状 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(9): 907-913 [ZHONG Guangfa, LI Qianyu, HAO Hujun, et al. Current status of deep-water sediment waves studies and the South China Sea perspectives [J]. *Advances in Earth Science*, 22(9): 907-913.]
- [27] Honjo S, Manganini S J, Cole J J. Sedimentation of biogenic matter in the deep ocean [J]. *Deep-Sea Res.*, 1982, A 29: 609-625.
- [28] Thunell R C. Seasonal and annual variability in particle fluxes in the gulf of California. *Deep-Sea Res. I*, 1998, 45: 2059-2083.
- [29] Wunsch C. The past and future ocean circulation from a contemporary perspective [C]//*Geophysical Monograph Series 173, AGU*, 2007: 53-73.
- [30] McCave I N, Gross T F. In-situ measurements of particle settling velocity in the deep sea [J]. *Marine Geology*, 1991, 99: 403-411.
- [31] Biscaye P E, Eitrem S L. Suspended particulate loads and transports in the nepheloid layer of the abyssal Atlantic Ocean [J]. *Marine Geology*, 1977, 23: 155-172.
- [32] Moun J N, Caldwell D R, Nash J D, et al. Observations of boundary mixing over the continental slope [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2002, 32: 2113-2130.
- [33] McPhee Shaw E E, Sternberg R W, Mullenbach B, et al. Observations of intermediate nepheloid layers on the northern California continental margin [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 693-720.
- [34] Cacchione D A, Sternberg R W, Ogston A S. Bottom instrumented tripods: history, applications, and impacts [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 2319-2334.
- [35] Ogston A S, Guerra J V, Sternberg R W. Interannual variability of nearbed sediment flux on the Eel River shelf, northern California [J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 117-136.
- [36] 汪品先. 从海底观察地球——地球系统的第三个观测平台 [J]. *自然杂志*, 2007, 29(3): 125-130. [WANG Pinxian. Seafloor observatories: The third platform for Earth system observation [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2007, 29(3):

- 125-130.]
- [37] Allen P A. From landscapes into geological history [J]. *Nature*, 2008, 451: 274-276.
- [38] Nittrouer C A, DeMaster D J, Figueiredo A G, et al. AmasSeds: an interdisciplinary investigation of a complex coastal environment [J]. *Oceanography*, 1991, 4: 3-7.
- [39] Hill P S, Fox J M, Crockett J S, et al. Sediment delivery to the seabed on continental margins. [C]//In: Nittrouer C A, Austin J A, Field M E, et al. (Eds.), *Continental Margin Sedimentation: from Sediment Transport to Sequence Stratigraphy*. Blackwell Publishing, 2007: 49-99.
- [40] Nittrouer C A. Strataform: overview of its design and synthesis of its results [J]. *Marine Geology*, 1999, 154: 3-12.
- [41] Nittrouer C A, Kravitz J H. Strataform: A program to study the creation and interpretation of sedimentary strata on continental margin [J]. *Oceanography*, 1996, 9(3): 146-152.
- [42] Nittrouer C A, Austin J A, Field M E, et al. Writing a Rosetta stone: insights into continental-margin sedimentary processes and strata [C]//*Continental Margin Sedimentation: from Sediment Transport to Sequence Stratigraphy*. Blackwell Publishing, 2007: 1-48.
- [43] Weaver P P E, Canals M, Trincardi F. Eurostratiform special issue of marine geology [J]. *Marine Geology*, 2006, 234: 1-2.
- [44] Cacchione D A, Pratson L F, Ogston A. The shaping of continental slopes by internal tides [J]. *Science*, 2002, 296: 724-727.
- [45] Crockett J S, Nittrouer C A, Ogston A S, et al. Where rivers and oceans collide [J]. *Eos Trans. American Geophysical Union*, 2005, 86: 25-32.
- [46] Slingerland R, Selover R W, Ogston A S, et al. Building the Holocene clinothem in the Gulf of Papua: An ocean circulation study [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113: F01S14, doi: 10.1029/2006JF000680
- [47] Slingerland R, Driscoll N W, Milliman J D, et al. Anatomy and growth of a Holocene clinothem in the Gulf of Papua [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, F01S13, doi: 10.1029/2006JF000628.
- [48] Oliveira A, Vitorino J, Rodrigues A, et al. Nepheloid layer dynamics in the northern Portuguese shelf [J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 52: 195-213.
- [49] Arrhenius G. Foraminifera and deep-sea stratigraphy [J]. *Science*, 1950, 111: 288.
- [50] Berger W H. Pacific carbonate cycles revisited: Arguments for and against productivity control [C]//*Centenary of Japanese Micropaleontology*. Terra, Tokyo, 1992: 15-25.
- [51] Milliman J D, Drozler A W. Calcium carbonate sedimentation in the global ocean: Linkages between the neritic and pelagic environments [J]. *Oceanography*, 1995, 8: 92-94.
- [52] Broecker W S, Clark E. Glacial-to-Holocene redistribution of carbonate ion in the deep sea [J]. *Science*, 2001, 294: 2152-2155.
- [53] Elderfield H. Carbonate mystery [J]. *Science*, 2002, 296: 1618-1621.
- [54] Ridgwell A. A Mid Mesozoic revolution in the regulation of ocean chemistry [J]. *Marine Geology*, 2005, 217: 339-357.
- [55] Lowenstein T K., Timofeeff M N, Brennan S T, et al. Oscillations in Phanerozoic seawater chemistry: evidence from fluid inclusions [J]. *Science*, 2001, 294: 1086-1088.
- [56] 汪品先. 大洋碳循环的地质演变 [J]. *自然科学进展*, 2006, 16(11): 1361-1370. [WANG Pinxian. Geological evolution of oceanic carbon cycling [J]. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(11): 1361-1370.]
- [57] Cortese G, Gersonde R, Hillenbrand C D, et al. Opal sedimentation shifts in the World Ocean over the last 15 Myr [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 224: 509-527.
- [58] Falkowski P G, Katz M E, Knoll A H, et al. The evolution of modern eukaryotic phytoplankton [J]. *Science*, 2004, 305: 354-60.
- [59] Rabosky D L, Sorhannus U. Diversity dynamics of marine planktonic diatoms across the Cenozoic [J]. *Nature*, 2009, 457: 183-187.
- [60] Azum F, Malfatti F. Microbial structuring of marine ecosystems [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2007, 5(10): 782-791.
- [61] Pomeroy L R, Williams P J, Azam F, et al. The microbial loop [J]. *Oceanography*, 2007, 20(2): 28-33.
- [62] Whitman W B, Coleman D C, Wiebe W J. Prokaryotes: The unseen majority [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1998, 95: 6578-6583.
- [63] Jorgensen B B, D'Hondt S. A starving majority deep beneath the seafloor [J]. *Science*, 2006, 314: 932-933.
- [64] Danovaro R, Dell'Anno A, Corinaldesi C, et al. Major viral impact on the functioning of benthic deep-sea ecosystems [J]. *Nature*, 2008, 454: 1084-1087.
- [65] Pomar L, Hallock P. Carbonate factories: A conundrum in sedimentary geology [J]. *Earth Science Reviews*, 2008, 87: 134-169.
- [66] Crevello P D, Rine J M, Lanesky D E. A method for impregnating unconsolidated cores and slabs of calcareous and terrigenous muds [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1981, 51: 658-660.
- [67] Kuehl S A, Nittrouer C A, DeMaster D J. Microfabric study of fine-grained sediments: Observations from the Amazon subaqueous delta [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1988, 58: 12-23.
- [68] Wunsch C. What is the thermohaline circulation? [J] *Science*, 2002, 298: 1179-1181.
- [69] Garrett C. Internal tides and ocean mixing [J]. *Science*, 2003, 301: 1858-1859.

## DEEP SEA SEDIMENTS AND EARTH SYSTEM

WANG Pinxian

(State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A series of breakthroughs in deep-sea sedimentology since the 1950s brought the long-term stagnation in sedimentary studies to an end, and meanwhile gave an impetus to the development of various research fields related to the Earth system science. The present paper briefly reviews the international development of deep-sea sedimentology, covering a broad spectrum of aspects ranging from turbidite to contourite, from deep storm to sediment drift, from sediment trap to on-site observation of the BBL, from time series of sedimentation to cabled sea-floor observation, as well as the “source to sink” studies connecting the modern process to sequence stratigraphy, and the role of deep-sea sedimentation in carbon cycling. All the progress has made deep-sea sedimentology a crucial link in the Earth system science. In the half-century history of deep-sea sedimentology, all the major advances were achieved with offshore on-site observations and benefited from interdisciplinary approaches with neighboring sciences, and were associated with large international research programs which were almost all focused on areas off the American and European coasts. At the present, China is experiencing its golden age to develop deep-sea sedimentology. Aside from the enhancement of research budget and equipment, an urgent need in China is to launch large-scale deep-sea research programs. The paper concludes with three suggestions concerning the future directions of deep-sea sedimentology in the country.

**Key words:** turbidite; contourite; source-to-sink; carbon cycling; deep-sea sediment