

深海等深流沉积 研究进展

姜衍文 吴智勇 王泽中 主编

西北大学出版社

P736.2 / 001 - 084467

深海等深流沉积研究进展



200356961

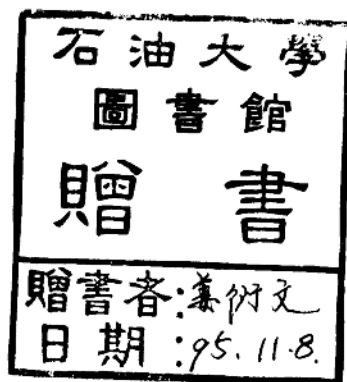
姜衍文 吴智勇 王泽中



5259/07



00757584



西北大学出版社

(陕) 新登字 011 号

深海等深流沉积研究进展

姜衍文 吴智勇 王泽中 主编

*

西北大学出版社出版发行

(西安市太白路)

新华书店经销 江汉石油学院印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 1/16 开本 12 印张 300 千字

1993 年 12 月第 1 版 1993 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1-1000

ISBN7-5604-0670-X/P·39 定价 15.00 元

内 容 提 要

等深流是除浊流以外的又一种深水底流类型。国外在 60 年代后期掀起了研究等深流及其沉积作用的热潮, 80 年代后期, 等深积岩研究引起了我国沉积学界的重视。本书选编了截止 1993 年初国内外等深积岩研究的最新文献。内容涉及等深积岩概念的形成和发展, 等深积岩研究的主要成就、存在的问题及今后的研究方向; 本书收入了大西洋、地中海和西太平洋现代及近代等深流沉积以及 4 个古代等深积岩的研究实例。

等深积岩通常是与生油岩毗邻的一种良好的储集岩类型。因此, 等深积岩的研究为油气资源勘探开拓了新的领域。就象已在浊积岩中发现和采出了可观的油气资源一样, 相信今后也能在等深积岩中发现和采出油气。由于等深积岩的形成与全球气候变化、海平面变化及海陆变迁有密切的关系, 因此等深积岩的研究对于了解古气候变化、古海平面变化及大地构造均有很大的帮助。

本书可供从事沉积学、石油与天然气勘探、古海洋学、大地构造学等专业的科技人员、大专院校师生参考。

序

《深海等深流沉积研究进展》一书即将付梓，我受好友之托，为书作序。

过去 30 年来，地球科学跨入了一个被称为“地学革命”的时代。60 年代末期的全球板块构造理论和 70 年代初期的古海洋学被视为这场地学革命的两大突破口，这两项里程碑式的进展均源于大洋地质和大洋地球物理的成就。历时长达四分之一世纪的科学大洋钻探 (DSDP 和 ODP) 是全新的地学分支诞生的摇篮。

如同科学史上的任何一次重大变革一样，这场新的地学革命的浪潮已经并且还在继续对整个经典地质学理论体系产生着冲击。近代地质学理论的建立、发展和完善经历了差不多两个世纪的历程。由于历史条件的限制，地质科学的先驱科学家们不可能“放眼全球”，特别是大洋深处。地学史上曾经是旷日持久的三大争论，究其缘由，盖出于此。苏格兰高地是以 J. Hutton 为主帅的火成派的发祥地；以 A. G. Werner 为旗手的水成派则产生于萨克森沉积岩分布区；基于对北美阿帕拉契亚山脉的实地研究，J. Hall 和 J. Dana 率先提出了“地槽”的概念；阿尔卑斯褶皱带的壮观的地质现象孕育了以 E. Suess 为代表人物的阿尔卑斯学派；……。这些见仁见智的地质理论产生的背景，都带上了已成为过去的那个时代的强烈印记，即都是以陆地露头的直接观察和描述为基础的。与此成鲜明对照，新地学革命把观察的触角伸入到了大洋深处，并以强调“全球观”为鲜明的特色。当今色彩纷呈的各类地学分支的国际学术讨论会，几乎都以“全球变化”、“全球事件”为主题。因此，在某种意义上，这场地学革命与其说是改变了地质学理论本身，毋宁说改变了地学思维，后者的变革无疑更带有深远的意义。

深海等深流沉积学是最近 30 年才被逐步认识的一个新的领域，国际沉积学界对等深流及其地质作用的研究正如火如荼。及时地跟踪和引进最新的研究成果无疑会产生积极的效应。

《深海等深流沉积研究进展》一书的主编姜衍文同志是我 30 年前大庆会战时期的同事和好友，大约 10 年前他以访问副研究员的身份在美国佛罗里达州立大学作访问研究期间，就把目光投向地学的某些前沿领域，回国后先后为《光明日报》等报刊撰文介绍大洋钻探等地学前沿的成就和动向。《深海等深流沉积研究进展》是他和他的同事们跟踪介绍的一块新园地。

愿本书的问世能给我国地质学科的繁荣和进步产生一点积极的影响。

石宝珩

1993 年 10 月于北京

目 录

导 言	姜衍文 (1)
深海等深积岩的概念	C. D. Hollister (5)
底流控制的沉积作用: 关于等深积岩问题的综述	J-C. Faugeres D. A. V. Stow (12)
赤道大西洋中洋流控制的沉积作用: 几内亚海台南缘和 Romanche 断裂带的实例	F. Westall S. Rossi J. Mascle (19)
大西洋东北部晚第四纪漂积体上的沉积通量	M. Cremer J-C. Faugeres F. Grousset E. Gonthier (35)
北大西洋和南大西洋各盆地等深流漂积体的类型和分布	J-C. Faugeres M. L. Mezerais D. A. V. Stow (46)
Rockall 海槽北部 Feni 漂积体的沉积作用及冰川末期底层水的形成	L. M. Dowling I. N. McCave (59)
北挪威外巴伦支海晚更新世底流沉积特征	S. H. Yoon S. K. Chough (67)
西班牙加的斯湾的地中海潜流砂质等深积岩	C. H. Nelson J. Baraza A. Maldonado (76)
地中海中心地带的漂积体和侵蚀面: 底流活动的地震证据	M. Marani A. Argnani M. Reveri F. Trincardi (101)
日本中部骏河湾和相模湾多变的底流活动的摄影证据	H. Okada S. Ohta (115)
华南古大陆边缘湘北九溪下奥陶统碳酸盐等深积岩丘	段太忠 郭建华 高振中 李增华 曾允孚 (131)
浊流-等深流连续模式和深海环境中的多过程搬运作用: 岩石记录中的一些例子	D. J. Stanley (142)
东澳大利亚拉克兰褶皱带的奥陶系等深积岩	B. G. Jones C. L. Fergusson P. F. Zambelli (155)
Fram 海峡等深流沉积	O. Eiken K. Hinz (167)

导 言

姜 衍 文

当代地球科学正处在重大变革的伟大时代。

从 60 年代末期以来,地球科学领域内新说迭出,突破接踵,划时代的国际合作地学项目——深海钻探计划 (DSDP) (1968~1983)以及它的后继项目——大洋钻探项目 (ODP) (1985~1995)的成功实施,从大洋深部不断获取了连续的深海沉积物长岩心,人们对地球的认识随之也从经典地质学所研究的大陆和陆表海扩展到了大洋。新事实的不断发现和新资料的迅速积累,使近两个世纪以来在陆地露头的直接观察描述基础上建立和完善起来的经典地质学理论受到猛烈的冲击;以强调“全球观”为特色的崭新的地学思想,给地球科学的各个分支学科注入了新的活力。60 年代出现的全球板块构造理论和 70 年代兴起的古海洋学相继成为当代地学革命的突破口。与此同时,沉积学领域中对深海底流和等深流及其沉积作用的研究也不断取得进展,并成为活跃的前沿之一。海洋地质学,特别是深海地质学的进步,正在从根本上使地质学的思维模式和基本观念不断地更新。著名的海洋地质学家 J.P.Kennett 教授在他的名著《海洋地质学》(1982)序言中曾经写道:“按照传统,地质学家们是着眼于大陆来观察地球的;但是,就其主体而言,地球是一个水的星体;巨大的大洋包围着岛屿般的陆块;大洋的构造机理最终控制着地球的地理格局。在地质时期内,大洋古环流的改变对于全球环境特征施加了巨大的影响。”(J. P. Kennett, 1982)。

宏观地看,地球表面的主要特征便是占表面积 72% 的大洋。从“圈层”的意义上讲,大洋是水圈的主体。在地球的动力学演化过程中,大洋不仅起着一种主导的地球化学体系的作用,而且,它和大气圈的交互作用,直接施加其影响给“全球环境体系”(古地理,古气候,古海平面和古地球化学),特别是控制着大洋沉积物分布格局和生物圈。换句话说,可以认为,大洋的动力学演化史是整个地球及其环境体系演化过程的主导因素。

在大洋深处,普遍存在着活跃的地质营力和地质过程,这在今天看来,似乎不过是一个尽人皆知的事实。然而,这一认识的取得,却经历了长达一个多世纪的艰难的探索。人类对大洋的探索,可以追溯到上个世纪 70 年代。早在 1872~1876 年间,英国爱丁堡大学的 C.W.Thomson 爵士领导了由伦敦皇家学会组织的全球深部大洋调查——“H.M.S 挑战者号”探险。这次探险历时 4 年,航程近 70000 海里,完成了 500 次测深和 133 次捕捞作业,从 362 个站位的取样中,描述了 715 个海洋生物新属和 4500 个新种。基于这次调查,1891 年, J.Murray 爵士与 A.F.Renard 编制出了第一幅世界大洋沉积物分布图,奠定了海洋地质学研究的基础。然而,尽管“H.M.S 挑战者号”探险获得了里程碑式的丰硕成果,却并没有改变统治了多年的关于深海的错误观念:深海海域是一个沉积作用从不间断的、稳定的宁静的世界。这一神话,过了几乎又一个世纪之后才被打破。

20 世纪 30 年代,德国海洋物理学家 G.Wüst 率先提出了底流可能具有搬运深海沉积

物的能力的观点,但在当时这一观点并未受到地质学家的重视。他的学生 C.D.Hollister 随后开始了对深海底流的地质作用的执著探索。1963 年,在加州伯克利的 IUGG(大地测深学和地球物理国际联合会)学术年会上,当 Hollister 向与会者们介绍深海底流证据的研究成果时,得到的回报却是严厉的批评(C.D.Hollister, 1993)。直到那时,占统治地位的观念仍然认为深海底是一个单调的枯燥的而且实际上没有水体运动的地方。二战期间及战后年代,深海研究在技术和装备方面取得了长足的进步。50 年代,回声测深技术日臻成熟,可测深度达到 10000m,分辨率超过 $1/5000$ 。著名海洋学家 M.Ewing 所创建的 Lamont-Doherty 研究所在大洋地质和地球物理的研究方面作出了开创性的贡献。Lamont 的科学家们研制了海底摄影浊度仪用于洋底雾状层底流路径和强度的观测,借助于地震反射剖面资料来解释洋底沉积物的形态和分布。美国马萨诸塞州的 Woods Hole 海洋研究所在这一时期迅速发展;加州 La Jolla 的 Scripps 海洋研究所也成为全美最大的海洋研究机构之一。70 年代初,该研究所率先研制出深拖仪器系统进行中等尺度的海洋地貌学研究。这一时期,侧视雷达技术,深潜作业技术以及深海底取芯技术等,在深海地质学研究中均得到长足的发展。技术上的进步带来了新事实、新资料的迅速积累。深海沉积学观念上的变革已经成为势所必然。

1968~1983 年的 15 年间,“格洛玛·挑战者号”完成了 96 个 DSDP 科学航次的深海钻探巡航作业,航程逾 60 万公里,在 624 个钻位上完成了 1092 个深钻孔,采获岩心总长度超过 96km,遍及除北冰洋之外的全球各大洋。多卷集的《DSDP 初步报告》总字数达 7000 万字;1985 年元月,它的后继项目——大洋钻探项目(ODP)的作业船“Resolution”号首航巴哈马海域,编号第 101 航次,开始了更加壮观的大洋钻探的新的 10 年(1985~1995)。历时长达四分之一世纪的大洋钻探给地质学带来了一场真正的科学革命。

1971 年 3 月,美国经济古生物学家及矿物学家协会(SEPM)于美国休斯敦举行了关于“大洋地质历史”的学术年会。提交会议的 10 篇学术论文随后于 1974 年以 SEPM 特刊的形式发表,取名为《古海洋学研究论文集》。文集涉及大洋沉积的碳酸盐补偿过程,二氧化硅的补偿过程等深海沉积学的基本问题。其中,加州 Woods Hole 海洋研究所著名学者 W.A.Berggren 和 C.D.Hollister 合作发表了题为《大西洋古地理,古生物地理和环流史》的重要论文,首次详尽地阐述了大西洋和特提斯海的环流发育史,指出“早第三纪以来,西部边界潜流(简称 WBUC)在控制细粒沉积物的沉积作用方面一直起着重要的作用。在与环南极海盆和北大西洋海盆扩展的几乎同时期,强大的全球规模的深层洋流和底流开始形成,产生了早、中第三纪深海海域广泛存在的不整合以及沉积物的重新分配。”他们进一步断言,环南极的南极底流(AABW)和北大西洋西部的西部边界潜流的形成时间不会早于 50~60Ma.”(W.W.Hay, 1974)。至此,大洋深部不仅存在着强大的全球规模的底流活动,而且存在着活跃的地质过程:沉积作用、搬运作用、沉积间断和深海侵蚀作用(不整合面)的论断,已是无需争辩的事实。

1975 年, Van Andel 等发表了《赤道太平洋中部新生代构造、沉积及古海洋学》。1980 年,美国哈佛大学出版社出版了第一本《古海洋学》教科书,两年后,罗得艾兰大学的 J.P.Kennett 教授的《海洋地质学》一书问世。该书四篇十九章,洋洋洒洒近百万言。书中第八章、第十三章、第十四章及第十五章分别对大洋环流体系、深海沉积物(陆源的、生物成因的及自生的)以及底流的地质作用等,作了精辟的论述。

在探索海底环流同深海大型沉积体形态之间的关系方面,值得一提的是始于1978年的“高能海底边界层实验”项目(简称HEBBLE),这是由美国海军研究所(ONR)和沉积动力学项目资助、历时10年的一项基础性实验研究。来自3个国家24个实验室和大学的90位科学家相继投入了这项研究。根据HEBBLE的研究成果提出了“海底风暴”的概念。这类海底风暴,或者突发性强底流沉积物搬运事件,在实验研究区以每年8~10次的频度发生。每次风暴持续时间平均3~5天(最长可达20天),底流最大实测速度可达40cm/s,风暴期估算的沉积物通量速率达 $20\sim 200\text{cm}^3\text{m}^{-2}/\text{日}$ 。这种频繁发生的强底流可以导致深海泥质沉积物的长距离搬运和在下游海域的重新分配,形成了广泛分布于深海底的被称作“漂积体”或“外脊”的巨大的等深流沉积物(C.D.Hollister, 1993)。这类等深流沉积物覆盖了现代深洋底的广阔地带:大陆坡和大陆隆上,乃至洋盆中的漂积堤和等深岩席,在大洋盆地中形成大片的沉积物砂波,在深海水道则形成不规则漂积物以及出口部位的扇形沉积体。底流与浊流以及远洋/半远洋过程的相互作用,可以对几乎所有深度的沉积物进行改造和再分配。巨大的(公里级)的深海漂积物的全球分布格局正是过去数千万年以来底流活动的产物和证据。这些长条形的漂积体长可达数百公里,宽数十至数公里,构成了深洋底的地貌景观,具可观的地质年龄,其经过筛选的砂质组分具有明显的远洋生物成因的性质,清楚地表明了其非浊流成因(DSDP Leg, 94)。在北大西洋,底流活动贯穿于整个新生代,底流活跃的搬运、沉积及沉积间断以及深海侵蚀作用,导致了广泛分布的巨大漂积体以及盆地级的沉积间断(DSDP Site 605等)。这种情形已使得北大西洋海域成为研究深海等深流沉积学的理想地区。

深海等深流沉积学的研究正方兴未艾,研究范围已经扩展到世界各大洋。正在运行中的大洋钻探项目(ODP)的新的10年计划中,深海等深流沉积仍然是重要的研究目标之一。计划中的ODP第151次航次将于1993年9月26日完成在北冰洋Yermak海台和Fram海峡的钻探取样,大西洋与北冰洋通道形成以来沉积物通量的变迁过程将是这个航次的研究任务之一。另一个计划中的航次——ODP Leg154(1994.1.~1994.3.),将在赤道大西洋的 Ceara Rise 进行钻探,旨在研究新生代古海洋学和底流发育史。ODP Leg156(1994.5.31.~1994.7.26.)将按日程在北巴巴多斯海岭加积棱柱体上进行钻探,以便获取在细粒硅质碎屑沉积背景下洋流与构造变形之间关系的第一手资料。

古代沉积记录中的等深流沉积物的识别仍然是一个有待开展的研究领域。近年来相继在澳大利亚东部的 Lachlan 褶皱带(B.G.Jones等, 1993)和中国湖南(T.Duan等, 1993)鉴别出了奥陶纪的等深流沉积物。这些研究成果,对于研究地质历史时期古洋流、古陆海分布,重建“消逝在山脉之中的古海洋”,无疑具有关键性的价值。

我国古海洋学和深海等深流沉积学的研究尚处在起步伊始时期。为推动这一领域的研究,本书选编了1990年8月在英国诺丁汉举行的第13届国际沉积大会上提交的一部分学术论文,论文作者来自中国、英国、美国、日本、澳大利亚、法国、意大利、德国、西班牙及韩国等不同国家和地区;涉及深海等深流及底流的沉积作用和等深流沉积物的实例剖析,无论从理论模式,还是从实例分析方面,都反映了当代国际沉积学界在深海沉积学研究领域的最新成果和进展。

为本书撰文和参加编译的有：高振中教授、梅博文教授、郭成贤副教授、李建明副教授、段太忠副教授、何幼斌博士以及青年讲师王泽中、翟永红、罗顺社、胡明毅、吴智勇等。本书责任编辑由吴智勇承担，全书的统审和校订由姜衍文和王泽中完成。

本书编译过程中得到中国石油天然气总公司新技术推广中心石宝珩主任的热情鼓励和经费上的宝贵支持；并欣然为本书作序，江汉石油学分析测试中心主任梅博文教授也为本书的出版提供了资助，值本书付梓之际致以衷心的感谢。

深海等深积岩的概念

C. D. Hollister

早在半个世纪以前,德国海洋物理学家 George Wust(1936)就提出过底流可能具有搬运深海沉积物的能力的观点。然而,地质学家们却长期忽略了这种作用的重要性。1958年,Wust 受人鼓励为一家德国地质学刊物撰文以唤起地质学家们对深海流可能具有的地质作用的重视。但是,Wust 用德文撰写的论文显然没有引起人们的注意。地质学界仍然认为:浊流才是能够搬运深海(4~5km)砂和粉砂的唯一营力,而浊流的作用只是在某些特定湖泊、室内水槽实验以及有关海底远程通讯电缆被折断的轶闻记载中得到证实。

然而,Wust 教授的著作对笔者却产生了影响,当时(1969年)笔者还只是教授门下的一名研究生。教授向笔者朗读他 1958 年的论文,停下来从德文原著翻译出来。笔者当时正是怀着一种极大的兴奋,先是师承 Wust 教授,尔后又在 B. C. Heezen 教授的指导下开始了对深海底流的地质作用证据的执著探索。

笔者首先在照片和深海岩心中搜寻底流的证据:笔者发现了与全球环流相关联的底流对深海沉积物的分布具有重要作用的无可争议的证据。这便是当时讨论深海流的地质作用的笔者的第一篇博士论文的主题。

论文的一部分讨论了岩心中所包含的有关深海沉积物搬运的地质学证据。60 年代早期在西大西洋陆隆水深 4~5km 海域获取的活塞岩心,揭示了某些原生沉积构造,这些沉积构造只可能形成于砂和粉砂的牵引搬运作用之下,以及随后形成的波痕。当时,人们认为浊流是由重力驱动的,并且以每小时数十海里的速度跨越等深线流动,将其携带的粗砂质和粉砂质沉积物,包含着大量粘土质基质,沉积在平坦的深海平原上。

然而,大陆隆深海平原岸线部位所获取的岩心中,其原生构造含有暗色的交错纹层,由几乎全部浓缩的重矿物组成。这类交错层沉积物的基质含量极低,从而表明它是清水洋流(流速约 1 海里/时)所沉积的,簸扬掉了细粉砂质,形成类似于砂矿的重矿物浓缩层。

1963 年,在加州伯克利召开的大地测深学和地球物理国际联合会(IUGG)会议上,当笔者向与会者介绍这项资料时,他的关于以温盐环流模式对应运动的强近底深海流的概念却遭到严厉的批评。除 Wust 教授之外,出席这次会议的各国海洋物理学家们都认为,在深海水域,根本就不存在能够搬运沉积物的足够的能量。他们进而认为,对于深度 5km 的深海域还有流速超过 5cm/s 的底流一说,绝少或者全然没有物理学上的理论依据。而且,笔者根据沿海底移动的颗粒粒径,对形成岩心中所见的原生流动构造的底流所作的每秒数十厘米的速度预测,同样也被斥为缺乏理论根据。然而,尽管如此,在北大西洋西部深海(4~5km)海域,沿下部陆隆获取的岩心中,具交错层理的、不含基质的沉积物比比皆是,这依然是铁铸的事实。

判定地质学解释与海洋物理学家的观点孰是孰非的下一个步骤便是检验深海照片,将交错层岩心的古代记录同现代照像记录作空间对比便一目了然。事实上,北大西洋西部和

南大西洋大陆边缘 4~5km 深水海域的全部照片都揭示了洋流的证据, 其中大多数是波痕和擦痕; 而且, 取景框中包含罗盘的每一幅照片都已表明, 洋流平行于等深线流动。

术语“等深积岩”

足以搬运沉积物的强大洋流的照像证据与交错层沉积物位置的相关性, 导致了“等深积岩”这一新概念的产生。“等深积岩”这个术语系笔者与其后来的导师(Hollister and Heczen, 1972)率先提出, 以将洋流沉积物同“浊积岩”加以区别。文章写道:

“……我们业已提出, 等深流搬运沉积物, 并且将其沉积于大陆隆上。已经发现, 这类沉积物同‘浊积岩’(或浊流沉积物)显著不同。因此, 如果我们继续使用‘浊积岩’这个术语的话, 就必须采用另一个术语‘等深积岩’来描述等深流沉积物”。

“北美陆隆上的等深流沉积物, 或等深积岩, 具有以下特征: 既有正粒序, 也有逆粒序; 分选良好至极好; 粒径以细砂、粉砂或泥屑为主; 层厚通常为 0.1~10cm; 上、下界面分明, 丰富的纹层由于重矿物的浓缩而加强; 优先的颗粒指向平行于层面; 孔间基质小于 4%, 微体化石趋向于磨损或破碎。”

自从 1963 年 IUGG 会议以来, 我们对于等深积岩的理解一直在不断地完善。其中很重要的一点便是承认, 平行于等深线搬运了大量粘土粒级的粘合物质, 而且, 在过去几千万年中适应温盐环流的携带能力已经形成了由细粒沉积物构成的大规模漂积层。这些漂积层由等深积岩物质构成, 很可能, 它们是在浊流中开始了向海方向的搬运, 随后, 则被深海等深流“吹”向侧方。

最近, 通过一些深海洋流体系下方深海波痕及线状构造照片、精确的回声测深记录、地震反射剖面以及长活寒岩心等多途径研究, 已经证实了海底环流格局同深海大型沉积体的形态之间存在密切的关系。

继笔者同他的学生们对世界各大洋的等深积岩长达 15 年的描述性研究之后, 华盛顿大学的 Arthur Nowell 加入了进来并于 1978 年共同组织了“高能海底边界层实验”项目, 简称 HEBBLE。这项实验研究的目标是通过实验手段或模拟证实, 来了解深海沉积物对于高能洋流的物理学反应和生物学反应, 并且预测海底对于高应力事件的反应。

海底风暴

HEBBLE 项目的研究者们发现, 高速的近底海流(速度约 20cm/s)、高浓度的沉积物以及具冲刷槽的泥质层等现象都与“海底风暴”的侵蚀和沉积作用相关联。这类海底风暴发生于快速深海均流受到强大间歇性海流影响而增强或削弱的地方。风暴衰退期导致床沙形态发育和泥质层的快速沉积, 这类泥质很快遭受到生物扰动(变粗糙), 并因此变得不稳定, 于是很容易遭到下一次风暴的侵蚀。世界大洋的许多地区都显示了海底风暴活动的照像证据, 在这些地区, 大洋深部朝赤道流动的冷洋流受到加速成为强大的沉积物搬运事件, 正如纵向波痕和冲刷槽所揭示的那样(图 1)。这些扰动事件在大洋底搬运了巨量的沉积物。

特定的环球格局是显而易见的。最引人注目的便是沿大西洋西北部和西南部、南非周



图1 深海床沙形态的全球分布。海底风暴在悬浮状态携带的粘性深海粘土快速沉积下产生了纵向波浪和冲刷槽沟(实心圆表示)。这些间歇性的沉积物搬运事件发生于几个大范围的深海底, 亦即, 主要沿北大西洋和南大西洋的西侧、南非附近和环南极区分布, 上述海域也是通过 SEASAT 实测的海面高度变化最剧烈的海域(见图2)。半实心圆表示非粘性粉砂和砂的底移搬运区, 如同出现新月形波痕、不对称波痕以及具“槽口”和陡滑面的短顶波痕所揭示的那样。这些床沙形态也可能是海底风暴速度峰值时期所形成的。由于海底夷平、附着生物引起的流向偏斜以及具尾砂的钻孔生物丘等, 照片中缺乏显著的洋流证据, 可能系潮汐或温盐环流(十字空心圆)引起海底增厚所致。实心三角形符号示局部强洋流使得沉积物无法在岩石露头上堆积的地区, 小空心圆示没有显示出任何可见的洋流活动迹象的照片。

围、环南极地区以及大西洋北部高纬度地带分布的具有活动性的“热点”。在北太平洋中部、南太平洋以及中印度洋的广大地区，似乎搬运沉积物的底流活动甚少。大西洋中部和东部某些有限的地区也没有底流的证据。

从广义的角度来说，洋底环流的现代地质影响的面貌，也反映了在地震反射剖面上所看到的巨大的(公里级)深海沉积漂积层的全球分布格局，这些漂积层是过去数千万年以来由洋底环境所建造的。因此，在全球规模上，现代的和过去的沉积物搬运活动之间至少存在一种内在的一致性。这种全球格局同摄像浊度计所记录下的悬浮颗粒的现代分布格局之间也呈现出一致性。似乎可以得出结论：数百万年以来，强洋流或“海底风暴”一直并且还继续在幅员辽阔的深海底搅起海底泥质。当前，强大近底洋流的重要地质作用已经是确定无疑的了，但有关海底风暴的起因，却仍在争论之中。

表 1 HEBBLE 项目研究区海底风暴特征

持续时间	2~20 天(大多数持续约 3~5 天)
频 率	8~10 次风暴 / 年
在海底上方 10~50m 实测的最大速度	15~40cm / s
在海底上方 1~5m 实测的最大浓度	3500~10, 000 $\mu\text{g} / \text{l}$
最大湍流动能	5~20 cm^2s^{-2}
最大能量事件的方向	向西，平行于等深线
风暴期估算的沉积物通量速率	20~200 $\text{cm}^3\text{m}^{-2} / \text{天}$

海底风暴的起因

如果反映沉积物搬运的全球照像资料充分指示了相对的底流动能的话，那么人们就会立刻理解，北大西洋和南大西洋的西缘是最强烈的活动区。同样，这些地区也是历史上不断发现最冷的底水的地区、出现最大规模漂积层的地区以及海水中泥质含量最高的地区。

然而，在日本南部的一个重要地区，海底风暴的照像证据与最冷底水的扩张轴之间并没有明显的相关性。这一地区沉积物搬运的海底照像证据同相对较高的深海涡动能分布区之间存在一种不完善的相关性。

海面变化

在冷水与波痕之间的相关性首次提出之后的 30 年间，NASA 出版了一张有意义的彩色的海面高度变化图，如同执行观测海面高度的俯视雷达所观察到的那样。把这张图(图 2)重新标绘于与海底地形图(见图 1)相同的投影上，呈现出有趣的空间关系。例如：事实上，所有数千幅显示了清楚的底流证据的海底照片，全都是在开阔海域两英里以下或更深处拍摄的。这些海底随后当卫星通过时也呈现出海面升高 4cm 或更多的变化。这种空间关系同海底风暴的成因有关吗？海面升高的变化意味着什么？

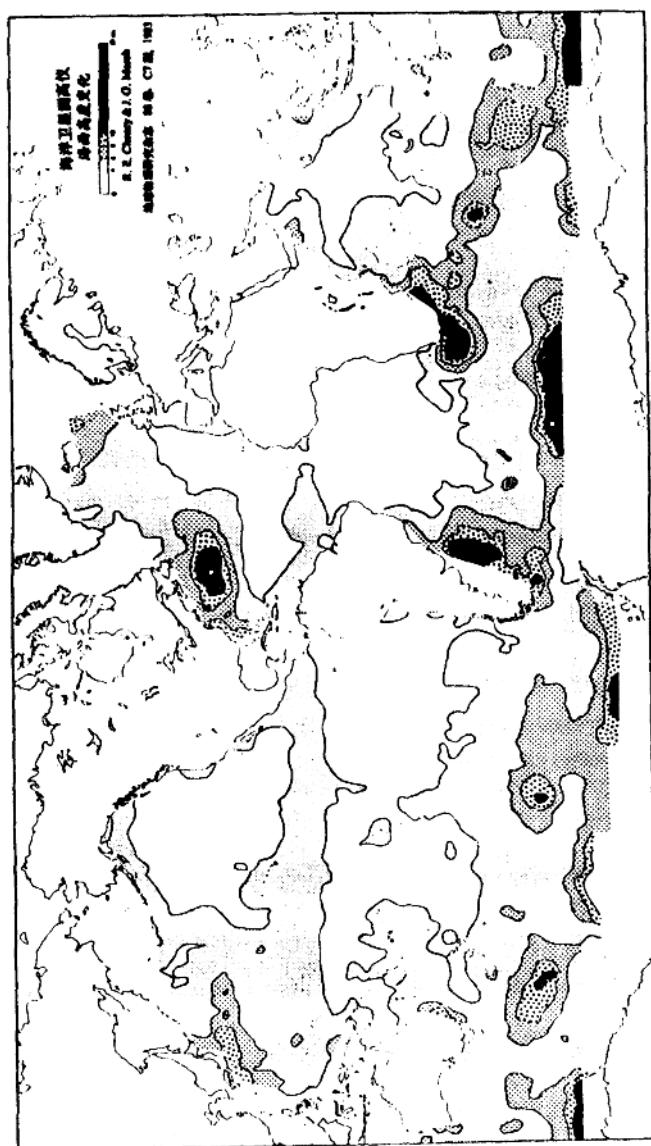


图2 全球海面高度变化图。变化值以厘米计，数据来自 SEASAT。高纬度地区的数据不完全。注意，实际上具有明显的底流影响的全部图像证据均出现于具有显著海面高度变化的海域之下，由此暗示了 Hollister 等(1984)所提出的因果关系。海面高度变化最大的地区亦即海面滑动能过量区，这种过量的滑动能显然可以传送至水深 3000m 以下的深海底，这可能就是能挟带巨量细粒沉积物的海底风暴的主要成因。这些细粒沉积物随后被湍流搬运至洋流的下游海域，最终形成巨大的漂砾层。在北大西洋和北大平洋诸海域，根据实测的洋流变化绘制的深海滑动能分布图同海面高度变化以及海底风暴分布状况之间，具有良好的相关性。

首先,在没有洋流或者地球重力场没有变化的情况下,洋面应当是平坦的。然而,当风吹过洋面时形成波浪并推动海水,从而形成洋流。某些风,亦即信风,非常强劲并且总是发生于赤道的正北或正南方。东面吹来的信风造成一股强大的向西的海流,在北半球,它将海水推向加勒比诸岛和北美,这股洋流称为海湾流(Gulf Stream)。日本近海海域的洋流则称为里黑潮(the Kuroshio);南极周围,信风自西方吹来,则称为西风漂流(West-Wind-Drift)。这些巨大的环流体系产生了大规模高能量的旋转涡流,持续数周乃至数月,这里的海面“隆起”,以适应由旋转的以及风驱涡流所带来的超额涡动能。这种隆起目前可以用雷达高度表测出,高达数十厘米的数量级。SEASAT也能够测量永久性的海面水位,因为地壳和地幔的质量分配,亦即重力场的变化也可以引起海面的微小变化。

海面高度变化同海底风暴活动两种现象在地理上的相关性,可能暗喻着一种因果关系,亦即,海面的动能实际上能够达到深海底。根据流量计实测的底流变化编绘的海底涡动能图对此说也提供了支持性的证据,并且呈现出同海底风暴区之间具有同样的空间关系。换句话说,在全球规模上,海面变化区与过量海底涡动能区以及海底风暴区三者之间具有相关性。

除了日本近海海域之外,所有的海底风暴区都沿着最冷底水区的轴向分布。这一例外的重要性在于,一个强温盐驱动深洋流再增加上超额动能便为海底风暴提供了最佳环境。与北大西洋西部相比,日本近海位于一个具中等能量变化但又是弱均流的海域,具有某些沉积物搬运的证据,但却几乎没有海底风暴的证据。相反,在一些几乎没有海面高度变化因此海底动能也相应较低的地区,也有少数强均流区由于地形的阻塞产生沉积物搬运。

于是,人们试图得出结论:能够搬运沉积物的海底风暴的理想环境位于这样一些海域下面的海底:这些海域具有最冷的因而也是密度最大水体的强均流、具有最大幅度的海面高度变化,因此也是具有最高海底动能的海域。在涡流规模上(数十至数百公里,数周至数月)整个大洋洋面的“搅动”、对于将泥质从深海底搅起可能具有关键性的重要作用。随后,密度驱动的冷水底流的长距离水平搬运(数百公里至数千公里)可能导致泥质在下游海域的再分配,这些泥质沉积物构成了被称为“漂积体”或“外脊”的巨大的等深沉积物的聚集,例如 Blake-Bahama 外脊,以及 Hatton、Gardar、Feni、Erik 和 Hatteras 诸漂积体。

海底风暴的成因,即其精确的起源、频度和方向,可能同强表面环流、涡流场以及内部低频变化等诸因素间的复杂关系相关。

结 论

在实施 HEBBLE 工程的 10 年间,来自 3 个国家 24 个实验室和大学的近 90 位研究者,撰写了近 200 篇与 HEBBLE 工程相关的学术论文,其中包括 4 篇博士论文、21 篇技术报告和三卷论文选辑。这些研究人员当中,有 34 位研究生。美国的参与研究人员由联邦海军研究所(ONR)和沉积动力学项目提供资助。

我们对关于深海流的地质作用的观念作了认真的再思考。我们注意到,等深积岩大部分是由粘土和细粉砂构成的。我们注意到了某些全球的相关性,这些全球相关性表明,底流速度和方向的变化对于最大沉积通量可能是重要的,而对于最大的粘性等深积物漂积体

在下游区的建造而言, 稳定均流则是重要的。这些等深积物漂积体覆于世界各大洋的洋底。

已经发现, 在海面高度变化同海底风暴的分布之间存在着一种有趣的关系。就大规模的运动来说, 大洋似乎是“刚性”的, 而海底风暴的最终原因可能同涡动能的存储以及从大洋顶层至深海底的垂向传递相关。全球泥质含量最高和海底风暴最剧烈的海域, 同时也就是洋流的方向和强度变化最大的那些海域。

古代岩石记录中等深沉积物的识别, 将有助于古环境模拟, 而古环境模拟对于烃类资源的勘探则是至关重要的。然而, 等深积岩的确切特征仍然有待限定, 可能需要一个进行室内大规模实验的过程。

(姜衍文 译)