

# 科学大洋钻探回顾与展望<sup>\*</sup>

刘志飞<sup>①</sup> 拓守廷<sup>②</sup>

①教授, ②博士生, 中国综合大洋钻探计划办公室, 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

\* 国家高技术研究发展计划(863 计划)“大洋钻探技术预研究”资助(批准号: 2004AA615030)

关键词 深海钻探计划 大洋钻探计划 综合大洋钻探计划 地球系统科学

本文回顾了科学大洋钻探 40 多年的发展历程, 综述了大洋钻探计划的重要科学成就, 展示了新世纪 IODP 大洋钻探将使用多个钻探平台, 采用新的以地质作用为导向的研究方法, 着重研究三个大的科学课题: 深部生物圈与洋底下的海洋; 环境变化, 过程和结果; 固体地球循环和地球动力学。地球正在“变小”, 人类要改善与她的关系。IODP 将为我们提供可能的信息。

## 1 发展历程

大洋钻探在当今地球科学研究和教育中成为一项基本能力, 并用于涵盖从地球气候变化到大陆运动过程的调查。钻探是从被大洋覆盖的 70% 的地球表面获取沉积物和岩石的主要工具, 也是从海底以下数米深处采集样品的唯一手段。今天的大洋钻探计划是建立在 40 多年科学大洋钻探和研究的深厚基础之上。

故事起源于“莫霍计划”(Mohole)提出的一项钻穿大洋地壳的梦想。1957 年 3 月, 在美国科学基金会(NSF)地学部召开的一次研究项目评审会上, 海洋学家芒克认为, 这些项目中没有一个能导致地球科学的重大突破, 应当有一项研究计划能真正解决地球科学的根本问题, 他提议打一口超深钻井, 穿透地壳的底面——莫霍面。当时在座的有后来的海底扩张说创始人赫斯教授, 他正为地球科学家在申请基金时提不出气魄宏大的项目深感烦恼, 而此前物理学家已获得了亿万基金建造了大型加速器。芒克的一席话使赫斯深受启发, 他开始为钻穿地壳的“莫霍计划”奔走游说<sup>[1]</sup>。

由于大洋底的地壳最薄, 从洋底穿透地壳、钻进地幔看来要容易一些。1961 年, 美国启动“莫霍计划”, 派出“卡斯 1 号”钻探船在东太平洋钻了五口深海钻井。钻机穿过了 3 558 m 深的海水, 然后从洋底往下钻, 最大井深 183 m。这是有史以来第一次在深海大洋打钻成功, 当“卡斯 1 号”船返航回到洛杉矶时, 美国总统肯尼迪专门致电祝贺, 称此举是科学史上划时代的里程碑。

当钻头穿过海底沉积层遇到玄武岩基底时, 钻头被迅速磨坏, 但在当时起钻更换钻头后, 在茫茫大海里就

再也找不到原来的井孔了。NSF 当时对其技术上的难度和经费上的尺度均估计不足, 1962 年 2 000 万美元的计划到 1966 年发现一亿一千万还拿不下来。于是 1966 年“莫霍计划”遭到众议院投票否决, 莫霍钻(Mohole)变成了“乌有钻”(Nohole)。

当时的另一种主张不赞成在一个点上打这么深的钻, 而是在洋底打数量众多而进尺浅的钻井, 认为这样不但现实可行而且意义更大, 比如 20 世纪 60 年代刚产生的海底扩张假说就有待藉此检验。1966 年, 美国四大海洋所组成了“地球深部采样联合海洋研究所”(JOIDES), 由 NSF 出资于 1966 年委托斯克里普斯(Scripps)海洋研究所创办“深海钻探计划”(DSDP)。1968 年 8 月 11 日, 120 m 长的“格罗码·挑战者号”深海钻探船首航墨西哥湾, 一项地球科学历史上最大规模的国际合作计划就此揭幕。

DSDP 的顺利进行, 不仅在美国扩展到更多的海洋研究所, 而且在国外吸引了许多国家的地质界队伍“下海”。1973 年, 莫斯科 PP Shirshov 海洋研究所有幸成为 JOIDES 的第一个非美国成员。到 1975 年, 美国国内的成员增长到 9 个, 英、日、西德、法四国相继加入 JOIDES, 使 DSDP 进入“国际大洋钻探”(IPOD)阶段。从 1968 年到 1983 年 DSDP 结束时, “格罗码·挑战者号”共完成 96 个航次, 航程逾 60 万公里, 在 624 个站位钻井 1 092 口, 取芯累计长达 98 km(图 1, 见彩插)。不仅其近百卷的“DSDP 初步报告”巨著成为地球科学的宝库, 更为重要的是其研究成果证实了海底扩张, 建立了板块学说, 同时导致古海洋学新学科的诞生, 为地球科学带来了一场革命。

1980 年, 美国曾一度成立“大洋边缘钻探计划”

(OMD), 由 NSF 与十家石油公司联合出资进行, 打算使用 70 年代初美军为打捞沉在太平洋的苏联潜艇而造的“格罗码·探险者号”船, 对大洋边缘作技术要求更高的科学钻探。此项计划由于石油公司与政府的矛盾, 于 1981 年告吹, 使 DSDP 执行到 1983 年方才结束。

1985 年 1 月, “大洋钻探计划”(ODP) 正式开始执行, 由原来的石油钻探船 SEDKO/BP471 改造的“乔迪斯·决心号”(图 2A, 见彩插) 接替退役的“格罗码·挑战者号”, 以更大的能量活跃在世界大洋。ODP 实施过程中, 美国国内和国际的参与科研合作单位的数目持续增长, “联合海洋研究所”(JOI) 作为新钻探计划的联系方, 到 ODP 接近结束时已发展壮大到 18 家美国国内成员和 22 家国际伙伴。

我国于 1998 年 4 月正式加入 ODP, 成为大洋钻探第一个“参与成员”。随后, 中国大洋钻探学术委员会成立。1999 年 2~4 月在南海成功地实施了中国海的首次深海钻探航次 ODP 第 184 航次, 在 6 个站位的 17 个钻孔获取约 5 500 m 岩芯。中国科学院院士、同济大学汪品先教授任首席科学家, 这是根据中国学者提出的钻探建议书, 按照中国学者设计的井位和思路, 在中国学者的主持下, 由海内外和海峡两岸 9 位中国优秀科学家积极参加而实现的。

从北极大洋到南极威德尔海, ODP 覆盖了整个世界大洋, 采集沉积样品和岩石标本, 记录钻孔地球物理和地球化学信息, 建立长时间尺度的岩芯观测。到 2003 年 9 月, “乔迪斯·决心号”共完成 111 个航次, 在 669 个站位钻井 1 797 口, 取芯累计长达 222 km, 最深的钻孔是 504B 孔, 这个孔曾通过几个航次的持续钻进, 总深约 2 km, 最后一次钻进是第 148 航次(图 1, 见彩插)。

早在 20 世纪 90 年代初, 世界各国就在考虑 ODP 之后的 21 世纪新型计划是什么? 1994 年, 日本制定了“OD21”新世纪大洋钻探科学计划, 改组日本国内的深海科研机构, 欲与美国争夺大洋研究的领导权。为此, 日本加大资金投入, 斥资 5 亿美元制造“立管钻探船”——“地球号”, 长 210 m、重 5.7 万吨, 比美国现有大洋钻探船大几倍, 其设备更为先进, 具有钻穿地壳的潜力。1997 年 7 月, “合作大洋立管钻探国际会议”(CONCORD) 在东京举行, 讨论日本提出的“OD21”计划, 即利用日本正在建造中的配有“立管”钻探系统的新型大洋钻探船可以达到的学术目标。1999 年 5 月, 以美国和日本为首的各国科学家在加拿大温哥华市举行更大规模的会议, 会议名称为“多平台勘探学术大会”(COMPLEX), 以期与 CONCORD 会议的讨论结果相衔接, 开展新世纪大洋钻探的总体计划讨论, 指出 21 世纪初用

多种平台探索的新一轮科学问题。

为了与美、日在新世纪大洋钻探中处于同等的位置, 欧洲 15 国于 2001 年 1 月成立了“欧洲大洋钻探倡议联合体”(JEODI), 召开“另类钻探平台: 欧洲是综合大洋钻探的第三条腿”工作会议, 5 月在葡萄牙里斯本召开了“综合大洋钻探计划的另类平台”(APLACON) 会议, 论证欧洲提供第三类“特定钻探平台”(MSP) 的必要性。2002 年 7 月宣布成立“欧洲大洋钻探联合体”(ECORD), 计划利用现有多种平台, 如在极地和内陆架实施钻探。“另类钻探平台”是指除大型深海钻探船之外的各种钻探平台, 包括有破冰船支持的极冰钻探平台、能在 30 m 水深钻探的浅水平台等, 统称为“特定钻探平台”(MSP)。

2001 年 5 月, 新世纪科学大洋钻探“综合大洋钻探计划”(IODP) 最初十年(2003—2013) 的学术计划《地球、海洋与生命》正式出版, 这是人类迄今为止最为雄心勃勃的大洋钻探和开发计划<sup>[3]</sup>。与人类致力于太阳系内从月球到火星的地外太空探索一样, 地球科学家们在这一新的科学计划里将要探索的是地球的“内部世界”。

2003 年 10 月 1 日, 新世纪大洋钻探计划 IODP 正式启动, 该计划以“地球系统科学”思想为指导, 计划打穿大洋壳, 揭示地震机理, 查明深部生物圈和天然气水合物, 理解极端气候和快速气候变化的过程。IODP 深水作业最重要的部分是由“日本海洋科学和技术中心”(JAMSTEC) 提供的配有立管、动态定位的“地球号”钻探船(图 2B, 见彩插); IODP 还配备美国提供的一艘现代化的、非立管、动态定位的钻探船, 来接替 ODP 时期的“乔迪斯·决心号”; 欧洲则提供“特定任务平台”(图 2C, 见彩插), 美、日、欧“三方争雄”的激烈场面正式拉开帷幕。

2004 年 1 月 18 日, 日本立管钻探船“地球号”命名、下水仪式在冈山县隆重举行, 日本皇室 Sayako 公主剪彩, 3 200 人参加盛典, 命名小组从提名“地球号”的 248 人中选择了一位四年级小学生作为正式命名人, 并由他为新船揭幕。此后, “地球号”紧张地进行装备钻探设备、实验仪器、试验航行和预钻探等一系列准备工作。从 2007 年 9 月开始, “地球号”将正式实施 IODP 科学钻探, 将在国际竞技场上一显身手。

2004 年 4 月 26 日, 国家科技部代表中国政府以“参与成员国”正式加入 IODP, 年付 1 百万美元成员费, 这既为我国地学界开辟了参加国际竞争的途径, 也使我国地学面临新的挑战。为及时开展相关研究规划和组织工作, 在 2004 年 2 月即成立了中国 IODP 委员会, 同时组建了中国 IODP 专家委员会和中国 IODP 办公室。

在我国科学家的积极努力下,2005年9月我国大陆学者向IODP提交了第一份航次建议书,以“追索东亚地形东倾与季风演化历史”为主题,建议在东汉盆地、苏北盆地、东海陆架、冲绳海槽共5个站位钻取大约3000万年以来的连续沉积记录,计划开展长江演化、地形变迁、及其伴随的古环境研究。

从2003年10月至2007年8月是IODP的过渡阶段,日本的立管钻探船“地球号”在建造和试验中,但美国的非立管钻探船“乔迪斯·决心号”继续服役。从2004年6月至2005年12月,“乔迪斯·决心号”在大西洋和东太平洋实施了10个航次,而欧洲“特定任务平台”在北极和赤道太平洋完成了2个航次,取得IODP初始科学计划实施的初步成功(图1,见彩插)。由于美国财政预算的变化,接替“乔迪斯·决心号”钻探船的计划改变,而是将目前的“乔迪斯·决心号”改装,扩大船上实验室空间,并将重新命名这条美国科学大洋钻探船(SODV)。

2006年,韩国正式加入IODP,成为一个“参与成员”。至此,IODP成员增加至5个(美国、日本、欧洲联合体、中国、韩国)。

从2007年9月开始,IODP进入全面实施科学计划的第二阶段,日本的立管钻探船“地球号”首先实施钻探,首钻选在日本南海海槽,进行发震带试验钻探(NanTroSEIZE),这是一个大型多航次的钻探计划,到2010前年“地球号”都将捆在这个计划上;美国改装后的非立管钻探船(SODV)将从2008年1月开始进行钻探,以是从发震带试验钻探(NanTroSEIZE)开始,到2008年之前还将开展赤道太平洋和北太平洋白令海的航次;欧洲“特定任务平台”将在2007年开始新泽西近岸的钻探计划。

## 2 重要科学成就回顾

新世纪的IODP科学钻探计划正在如火如荼,供此机会有必要回顾一下过去钻探计划所取得的重大进展。以下重要科学成就多选自于IODP Highlights一书<sup>[3]</sup>。

### 2.1 打穿屏障

天然气水合物是在深海高压低温的条件下,由水和天然气结晶而成。这些天然气的潜在储藏量可能达到其它所有形式化石燃料的总和,但这些气体水合物还不被人们所熟知。

大洋钻探研究范围的扩大和安全性能的不断提高,使得在原来认为包括有气体水合物的区域在内的危险

区域钻探成为可能。30年前,科学家在深海发现了被称为“基底模拟反射层”(BSR)的不规则海底边界。它被认为形成于含有气体水合物的沉积物之间的、阻止气体自由挥发的屏障。人们普遍认为钻穿BSR是十分危险的,在19世纪80年代中期之前,人们都避免在那些区域打钻。直到在秘鲁岸外进行的ODP第112航次,人们首次安全地打穿了BSR。从那时起,又有几个其它ODP航次也打穿了BSR,包括太平洋卡斯卡底古陆加积边缘的第146航次和大西洋北卡罗莱纳州岸外布莱克洋脊的第164航次。

打穿BSR使ODP直面气体水合物的研究。这些早期的钻探活动使我们对气体水合物的流动性及其基本的形成机制有了初步了解,对将来可能进行的工业化钻探和开发打下了良好的基础。

最近,ODP第204航次在俄勒冈州岸外的名叫气体水和物洋脊的地区进行考察。此次考察最大的发现是气体水和物在海底形成的速度很快。科学家同时也对沉积物的一些重要特性有了一定了解,例如颗粒组成和大小,气体水和物在沉积物中的分布,这对我们寻找气体水和物带来很大帮助。

在危险的钻探过程中我们成功地进行了钻探,这与我们采取的安全措施有很大联系,这也体现了专家组成员对钻孔安全性进行论证的必要性。在突破BSR的过程中,ODP安全及污染预防部门对每个站位进行了评估,最终同意并支持了这些航次。

### 2.2 南极冰盖的历史

二三百万年以前,地球上唯一的巨大冰盖是在南极洲。然而,由于人们主要采用冰量的低纬度替代性指标(海平面和底栖氧同位素)不一致性和模糊性,而对南极冰盖历史缺乏了解。冰盖、海平面和氧同位素这三方面的知识对于了解全球古气候至关重要。

1998年,ODP开始钻取被浮冰搬运至南极边缘海区的沉积物,因为该沉积物记录了南极冰盖的历史。科学家们利用冰川学模型在南极边缘确定了4个打钻站位。该模型能显示基于温度的冰盖体积以及冰盖曾经没有覆盖过的区域。根据此模型,冰盖最先沿兰伯特地堑谷开始扩张,之后到达南极大陆边缘的浦让湾。北部狭长的南极半岛是最后被冰覆盖的大陆边缘,并且有高分辨率的记录。

ODP第178航次对南极西部进行了首次考察,提供了过去1000万年的结冰详细历史。第二次是针对浦让湾的ODP第188航次,那次冰盖发展的历史追溯到3500万年前。然而3500万年前到1000万年之间冰盖发

展又是怎么回事呢? 替代性指标的剧烈变化不仅发生在始新世末、中渐新世、渐新世—中新世界线处和中中新世都有记录。在这些时间段, 冰盖发展的程度又如何呢? 模型指示, 要回答上述问题, 需要在威尔克斯地边缘打钻, 可能也需要在冰原覆盖的南极东部和罗斯海东部打钻, 以获取南极西部冰盖历史的记录。

值得一提的是, 第 178 航次的研究结果产生了新问题。南极半岛的冰盖在发生重大气候变化的 1 000 万年里已经有足够大的体积, 并且在向大陆架边缘规则地移动。这说明那时的冰盖像现在一样对海平面变化很敏感, 而不是对温度变化很敏感。而且, 冰川学模型指示整个南极冰盖似乎都不太敏感。唯一可能促使海平面规则变化的因素只有南极冰盖。南极冰盖的发展真的曾一度与地球上气候变化无关吗? 正如在这几位科学家所说, 问题的解决需要更多的研究。

### 2.3 南极洲的全球变暖线索

南极洲洋盆 ODP 第 198 航次在帕默尔海渊的钻探结果, 促进对南大洋的现今气候和海洋的快速变化有了直接了解。历史上南极半岛地区迅速变暖, 引发冰盖的灾难性坍塌和区域生态系统的变化, 钻探记录对此方面的研究至关重要。帕默尔海渊最深处达 1 400 m, 地处靠近终年厚厚积雪的山岳海岸线, 在此钻探位置独特。同时, 帕默尔海渊还面临广阔的南大洋, 毗邻南太平洋的水体。帕默尔海渊地区的气候背景非同寻常, 经历了从极区干旱到温暖融冰气候的转变。因此, 帕默尔海渊的底部沉积物得以记载地质历史上这些环境的变化。

从帕默尔海渊 1098 站获取的 50 m 厚沉积物中, 有一段独特的硅藻软泥和砂质泥沉积层序, 记载了过去几千年的气候变化。沉积记录的早期一万多年记录了富含硅藻的海洋生产力勃发和富含泥砂代表冰川融水注入的相互叠置的年际变化。

这些年际的沉积层并没有持续多久, 随着沿南极洲海岸线的水道和海峡相继打开, 沉积物逐渐富含由冰川融水或冰山带来的碎屑物。直到几千年以前, 帕默尔海渊才恢复了高生产力, 表现为硅藻软泥和含有暖水种硅藻(单细胞藻类)和大量的有机碳的泥质薄层。

之后, 冰雪覆盖加剧, 生物沉积减少, 沉积物里有机质减少, 冰屑碎屑物增加。这一事件发生在大约 3 200 年前, 标志着冰期的复苏或者新一轮冰期的开始。正是在这一期间, 沉积物组成显现出明显的 200 和 400 年旋回变化。这些变化与太阳活动 200 年周期的频率同步。沉积物特征对这一变化的响应过程, 我们还不能完全了解, 但很有可能与西风带的强弱变化有关。南大洋中高

纬度大气和海水表面属西风带主导, 因此在面临广阔的南大洋和风力驱动环极洋流的帕默尔海渊有它们的记录并不奇怪。还有其它类似于帕默尔海渊的站位等待着我们去探索, 可以为我们了解南极洲的海洋—冰盖气候系统提供进一步的证据。

### 2.4 巴拿马的崛起

大多数人把板块运动和地震、火山联系起来, 其实板块运动和海洋环流、气候变化之间也紧密联系。海陆分布和地形变化, 特别是海道的开启关闭以及相应的温盐环流, 对全球气候变化有重要决定作用。最近两次的 ODP 航次将钻位定在巴拿马附近和巴拿马近南极处, 目的就是弄清楚海道开关及板块运动对气候的影响作用机制。

过去几百万年以来, 地球气候系统发生了很大变化。地球从两极无冰的极端温暖时期演变为两极有冰和陆地覆盖大规模冰盖的时期, 这种长期演化可能和板块运动有关。一般认为, 板块运动通过海陆分布来改变大气环流, 地球气候随之发生变化。距今约 3 百万年以前, 地球气候系统从上新世显著的温暖状态开始过渡为北半球冰盖迅速增长的状态, 很有可能正是中美海道的最终关闭导致了这一变化。

通过大洋钻探研究, 科学家发现在整个上新世中美海道逐渐变浅, 改变了全球海洋的水热平衡。大约距今 4 百万~2 百万年, 板块运动导致中美海道关闭, 使各个洋盆之间的表层水交流受阻, 这样大西洋、太平洋和北冰洋之间的表层水及深层水环流模式相应发生变化。中美海道的关闭导致墨西哥湾流增强, 从而将很多水汽输送到高纬度地区。海道的关闭起先使距今约 4 百万年的气候变暖, 称之为“上新世暖期”。然而, 诸多临界条件的改变注定了北半球冰盖增长为特征的地球气候系统的形成。

### 2.5 探测地震

大洋板块在离开大洋中脊并向前推进了很长一段距离后, 最终消失在洋底海沟。经过足够长的地质时期之后, 这一过程便在位于海沟的大陆一侧形成了造山带。对于这一过程, 我们可以通过地震活动窥见其中极小的部分。板块俯冲带通常容易发生大规模地震, 但是海沟很难保存大规模地震活动的记录。由此可见, 当板块消减作用进行时, 地震活动可能发生也可能不发生。在实际过程中, 消减作用可能会通过这些复杂的时间和空间模式, 在脆性岩石的海沟与海岸带之间进行。为了理解这种过程的发生机制, 我们必须了解地球在消减过

程中是如何拉张与松弛的。仅仅研究地震活动是无法勾画出完整的图像。

由于洋底海沟离海岸线 100 km 以上,因此单从陆地上是不可能准确感知这一过程。这样,锁定目标并尽可能的接近它是非常重要的,这也正是 ODP 第 186 航次在日本东北部海岸所成功完成的任务。在 2 000 m 水深海域“乔迪斯·决心号”科学考察船上的科学家们把两个地壳变形的探测器安置在海底以下 1 000 多米。这种探测器具有与陆上使用的最尖端的传感器相近甚至更优良的高灵敏度、宽广的频率范围以及宽大的动力学范围,能够通过一个宽大的观察窗探测到地震的波动、倾斜与张量。这些传感器被固着在钻孔底部,以保证最大限度地感受周围岩石的震动。

两个探测器位于距俯冲板块边界 10 km 以上,相距 50 km。就在这么小的区域里,两处的地震性质却完全相同:一处是地震活跃区,而另一处则是无震区。问题是:如果一个正在俯冲的板块以每年 9 cm 的速度向前推进,并长期保持这一速度,比如说 100 年,那么又是什么造成了上述的不同呢?是俯冲板块在无震区没有摩擦阻力,还是它暗暗的聚积着张力,用来在未来的一次大地震中将其释放出来?或者,它已经以一种目前还不可探测的方式,将能量释放出来了,而地震活跃区的经常性滑动是由地震引起的吗?对上述任何一个问题回答是或否,都将会形成各自不同的解释,来说明俯冲板块潜入上覆板块的机制。

地震极具破坏力,但是这仅不过是板块消减区域所储存和释放总能量中的一部分。遗漏任何一个重要的应变事件,不管它是平稳的还是突发的,要想企图在这种情况下预测未来,其结果就像下棋时不顾全局而贸然出招。ODP 所安装的探测仪将帮助我们看到整盘棋局,从而更好的预测这些自然灾害。

## 2.6 大洋地壳的形成

一亿四千万年之前,欧洲和北美大陆之间还仅是一条窄而浅的海道。但是,此后一个大裂谷开始将欧洲和北美板块分裂开来,并导致了大西洋的形成。在这个过程中,通常厚 35 km 的地壳被拉张变薄并形成断点,裂开的空间被在大西洋中脊扩张形成的洋壳充填。不过,与其他大陆边缘不同的是,几乎没有任何证据表明在这一大陆地壳分裂的过程中伴有强烈的火山活动。长期以来,人们一直对这个本身就是火山活动的海底扩张作用是怎样进行的而深感困惑。它是瞬时运动还是渐变的?如果是,那是怎么变化的?

通过地球物理的工作和在葡萄牙岸外的 10 个 ODP

站位的研究,这个难题已经被解开了。地球物理学家根据声音在大陆边缘传播速度的变化测定了洋壳的厚度,结果发现:尽管陆壳像预料中的那样向大洋的一面变薄,但是当地壳变薄到 7 km 时就开始断裂。向大洋的一面,有一个宽达 170 km 的无壳带,下伏的大陆地幔层被暴露在海底。在这个带的大陆一边,其他的地球物理证据表明一些独立的相对较小的熔岩拉长体首次侵入地幔。随着这个变形带向大洋方向移动,越来越多的熔岩侵入,直到最后这种岩石的连续的层形成为止,这样就形成了洋壳。

最后的问题在于如何解释如此之宽的地幔带是怎样在薄的陆壳和洋壳之间暴露出来的。一系列次水平的转换断层形成一个类似的大陆边缘,就像现在暴露在阿尔卑斯的那样,可以提供为什么在没有重大垂向偏移的情况下,可以产生如此大面积地幔岩出露的机制。图中显示了这种向下凹陷的断层,以及大陆边缘在葡萄牙岸外是如何演化的。许多岩芯现在已经用同位素定年,研究集中在地壳的拉张和地幔从大陆向海洋的移动,结果表明这些运动的速率显然是在增加的。

## 2.7 地球气候的化石温度计

冷血的爬行动物生活在北极圈之内,红树林沿着英格兰南部海岸被淹没,这些现象使我们知道地球的气候在白垩纪和早新生代时要比现在温暖许多。但是,一直困扰地球科学的问题,就是如何准确计算当时地球表面温度到底温暖多少。结合过去的温度变化和估计的大气  $\text{CO}_2$  浓度,从事模拟的研究人员可以预测将来的全球变暖。过去一亿年以来,全球温度变化的最好记录在深海大洋中,因为在深海中季节变化和其他短时间尺度的“噪音”可以被识别出来。

直到最近,深海温度变化的记录几乎全部来自于底栖有孔虫化石方解石壳体中的  $^{16}\text{O}$  和  $^{18}\text{O}$  的比值。底栖有孔虫是一种生活在海底的单细胞动物,大约有针头那么大小,可以在大洋钻探计划采集到的深海沉积物中得到。这种方法很有效,这是因为化石壳体中这两种同位素的比值由当时有孔虫生活的温度所决定。但是,这其中也有一个问题。有孔虫化石所记录的氧同位素的比率对于海水中  $^{16}\text{O}$  和  $^{18}\text{O}$  的比值同样敏感,它随着全球冰量的变化而变化。这种变化是因为较轻的  $^{16}\text{O}$  优先从海水中蒸发,并被搬运到两极地区形成降雪,从而被固定在冰川中。通过这种方式,大冰帽的生长吸收海水中的  $^{16}\text{O}$ ,造成  $^{18}\text{O}$  的相对富集。

在最近的研究中,我们重新测定了底栖有孔虫壳体中含量极少的 Mg 元素。有孔虫生活在现今各大洋的许

多地方,我们知道有孔虫壳体中 Mg 含量的增长与有孔虫生活的水温是有规律可循的,更为重要的是它不受全球冰量变化的影响。利用由现代有孔虫壳体和化石壳体建立的温度与 Mg 的关系式,我们可以计算过去 5 000 万年以来的深海大洋的温度。

用 Mg 计算得出的温度与现有的有孔虫壳体的<sup>16</sup>O 和<sup>18</sup>O 比较,来计算过去 5 000 万年以来海水中这两种氧同位素的比值。这种方法可以使我们第一次可以计算过去 5 000 万年以来的全球冰量。我们发现了大洋突然亏损大量<sup>16</sup>O 的三个时间段。这些时期都发生了大规模地冰盖的快速增长。实际上,这些事件的时间与其他冰盖增长证据的时间也是吻合的,例如海平面的下降以及深海沉积物中大块岩石的出现,这些岩石是由于远离陆地的冰山带来的。有趣的是,在 3 300 万年以前的冰期时,有孔虫壳体镁元素记录的深海温度并没有变冷,可能的解释是当时南极大陆已经变冷到足以形成冰盖,但是因为气候一直干燥而未能形成;直到在 3 300 万年前,由于某种原因才开始形成降雪,大规模的冰盖得以形成。

## 2.8 看海底下的世界

近年来,ODP 投入了相当多的时间和精力去观测地壳的深部来研究地壳活动的动力学系统。有些系统发生在俯冲带上,这些地区的特点是有世界上最大规模的地震发生。最近关于发生在俯冲带过程的研究已经确信,流体在物理和化学演化中起了重要的作用。在巴布亚新几内亚附近马纳斯盆地实施的第 193 航次中,ODP 试图研究流体和金属元素怎样来自于下伏的岩浆源,并怎样通过循环水从岩墙中浸出。科学家们同样也致力于识别可能的流体通道和在热液系统中的化学梯度来建立一个水文学的模型。在日本岸外南海海槽实施的第 196 航次中,科学目标集中在理解板块边界断层的构造和水文演化,以及确定变形的程度和时间。在这两个航次中,钻探测井技术(LWD)帮助我们理解地下的结构。

LWD 技术被引入 ODP,成为获取连续地球物理数据的关键技术。在过去,取芯率非常低,而无线测井又几乎是不可能的。到 2002 年 4 月,ODP 已经采用这种技术实施了 7 个航次,钻探了 22 个 LWD 钻孔。技术的进步同样也提供了更多在 LWD 钻探中得到的数据类型的选择。最近采用了钻井成像的电阻系数法(RAB),这种方法提供了钻孔的图像,垂向分辨率为几个英寸。当钻管和 RAB 工具旋转的时候,使用地球的磁场作为一个参照,3 个 1 英寸的纽扣电极提供了浅层、中层和深层电阻率和图像的测量。LWD 图像的形成对连续图像的

变化需要准确的时间和电阻率值。

第 193 航次描绘了可能的流体路径系统,并提供了一个在 LWD 图像中观察到的水文模型。这些图像同样也显示了在佩克马纳斯热液系统中火山学的、构造的和热液特点之间的相互关系。与在大洋中脊相似的热液系统相比,第 193 航次的结果表明了岩浆事件间的截然不同的构造关系,并且提供了一个解释古矿石形成环境的基础。第 196 航次的 LWD 结果提供了岩石物理性质的分布和南海加积棱柱体前端附近的压力。区域压力范围的观测直接来自于 LWD 图像,可以对板块边界的沉积物加积提供模型。这一信息同样可以有助于指导将来在南海海槽的钻探。在活动系统中使用改进的 LWD 技术,已经被证实对于理解环境是非常有用的,而过去由于钻探和无线测井技术的局限很难做到这一点。

## 2.9 南极洲与澳大利亚的分离

距今 3 700 万年到 3 300 万年前,澳大利亚脱离南极洲向北漂移,这就使塔斯曼尼亚海道张开,环南极洋流从而形成。环南极洋流使南极大陆与北方来的温暖的表层洋流隔绝,南极大陆上开始形成小型的冰帽。最后,深海水道使南印度洋与太平洋之间形成深部环流,最终形成大洋传送环流。由大陆分离造成的南极洲的持续热隔绝,对全球气候由早新生代时相对温暖的“温室地球”转变为晚新生代的“冰室地球”起了极为重要的作用。

Kennett 和 Houtz 等人根据 DSDP 的研究结果提出,由于环南极洋流使得南极大陆热隔绝,从 3 300 万年前开始,气候开始变冷并形成南极大陆的冰盖。他们认为南极大陆冰冻圈的发展,导致了冷的深水洋流的形成,从而加强了热盐环流。ODP 第 189 航次的结果支持这一假说。

第 189 航次在曾经是澳大利亚和南极洲陆桥的塔斯曼尼亚海道,钻取了连续的海洋沉积物。这个陆桥将西部的澳大利亚—南极海湾与东部的初始太平洋分隔开来。这一地区的钙质微体化石保存良好,可以用来进行准确的定年,这在南大洋是很少见的。Exon、Kennett 和 Malone 等人根据第 189 航次的沉积层序提出过去 7 000 万年以来综合的动力学演化系统,包括了岩石圈、水圈、大气圈、冰冻圈和生物圈。

这一地区最引人注目的变化发生在始新一渐新世过渡期间(距今约 3 300 万年前),当时,澳大利亚与南极大陆彻底分离。在分离之前,南极由于气候温暖,地形多为大陆丘陵,再加上相当强的降雨和剥蚀,造成洪水泛滥,这些洪水中含有大量的硅质碎屑(硅酸盐矿

物:主要为粘土矿物和石英),浅海的沉积物与地壳的下沉保持一致。在澳大利亚与南极分离后,气候转冷,逐渐远离大陆以及降雨量和剥蚀的减少,从而切断了硅酸盐的供应。深海碳酸盐沉积不能与地壳沉降保持一致,因此大洋快速变深。

第189航次使我们确信,新生代南极洲与澳大利亚的分离造成了许多变化。区域性的变化包括:气候由温暖变为寒冷,沉积由浅水变为深水,封闭的海盆变为开放大洋,黑色的三角洲泥岩变为白色的深海碳酸盐沉积,沉积物由富有机碳变为贫有机碳。

## 2.10 微生物:海底下的深部生命

1875年,Eduard Suess首次系统地提出了生物圈的概念。在此前10年,Jules Verne在他的经典作品《地心之旅》中描绘了生活在地球内部的奇妙生物。这两个人会惊喜地发现他们的思想,会在一个世纪后交汇于深海洋底的深处,有趣的是他们一个来自于科学,而另一个来自于幻想。大洋钻探计划所取得的岩芯得到一个令人难以置信的结论:生命存在于海洋沉积物的深处。

尽管Verne想象在洋底下有巨大的怪兽,实际上在这一区域是微生物的王国,他们的新陈代谢能力有着巨大的差异。从根本上来说,生命实际上是一系列的氧化还原反应,在这个过程中从电子的提供者到接受者间的电子流能量,被用来支持基本的新陈代谢作用。微生物在捕捉能量方面非常能干,甚至是最小的氧化还原反应都可以维持生命。大多数生活在表层上升流的生物依赖于氧,而微生物在缺氧的洋底下则以硫、镁、铁的化合物和 $\text{CO}_2$ 为生。这些活动在沉积物的地球化学记录中有清楚的反映(例如,以硫化物为生的细菌的变少使得硫酸盐由上到下减少,甲烷的形成来自于可产生甲烷的细菌的生长,或者在浅水中细菌活动造成的甲烷氧化)。最近,ODP已经开始关注深部生物圈中生命的研究,从某种程度上来说,ODP在该领域的研究已经有了一段较长的历史。广泛分布于全球的钻井的地球化学资料,使得我们可以预测微生物属种的变化,并且计算它们新陈代谢的速率。

目前,微生物已经在海底800多米以下的沉积物中被发现,并且没有理由相信我们已经到达了生物圈的底部。如此深的深度是令人惊奇的,然而更令人惊讶的是微生物的数量。通过已获得的岩芯来推算全球微生物的丰度,结果表明:地球上生物总量约10%集中在海洋底下。

微生物学已经成为大洋钻探不可或缺的一个组成部分。“乔迪斯·决心号”拥有一个与化学实验室结合

的装备良好的微生物学实验室。船上的科学家们可以从钻取的岩芯中采集到无污染的样品进行船上的实验(例如细菌培养和放射性示踪研究),或者保存样品以供岸上研究(例如核酸分析和生物标志物描述)。这些研究将会对我们探索地球及其居民的共同演化提供有益的帮助。

## 2.11 地中海与地球轨道

取自于东地中海的ODP岩芯提供了一个与天文周期密切相关的气候变化记录。这些岩芯展示了由富含有机质的黑色沉积层、硫化物以及重金属组成的腐泥层,表明东地中海在过去的五百万年以来频繁地转变为缺氧盆地。这些缺氧时期是由21000年的地球轨道岁差周期和地中海的特殊盆地构造控制的。东地中海是一个与西地中海之间只有一个浅水通道(西西里海峡)相连的半封闭海盆,它包含一些深水次级盆地(深达4000多米);这些特点决定了表层海水密度对东地中海环境的变化非常敏感,海水的大量蒸发导致了盐份和表层海水密度的增高。在腐泥层形成时期,东地中海由于大量淡水的输入而导致由盐份驱动的深层流动速度大大降低,同样也造成表层海水密度的下降。与此同时,由于海底的营养物质得到更有效的循环,使得海洋浮游生物加速生长。

ODP967站位于东地中海盆的东南部,它的最重要的淡水源自于尼罗河。每当北半球夏季与地球绕太阳运行的近日点重合时(换句话说就是每年地球最靠近太阳的时候,北半球达到夏季最大太阳辐射量),东非季风比现在强盛得多。这一过程导致埃塞俄比亚丘陵地区的蓝尼罗河洪水泛滥,随后大量的尼罗河水注入东地中海。

每21000年,从干旱、贫营养条件到湿润、富营养条件的频繁转变并不总是以腐泥层或者生物生产力增加的形式表现。但是每一次循环都被东地中海陆源沉积物的化学成分所记录。元素Ti和Al的比值,作为一个特殊的地球化学指标,提供了一个极好的几乎与北半球夏季太阳辐射量线性相关的周期性记录。这一元素比反映了撒哈拉风尘和尼罗河物质相对供应量的变化。像Ti/Al比这样的定量的气候指标记录使我们第一次有可能在地质记录和不同的天文方案之间进行一个统计上的对比。这种新方法在地中海晚新生代沉积物建立天文时间标尺时起了极为重要的作用。

## 2.12 利用CORK观测板块运动

在世界洋底的许多地方,流体在火山岩地壳和上覆

的沉积物间循环,在地球内部和外部转移交换热量和化学物质。“先进钻后防流装置”(CORK)最初被研制用来在钻探结束后通过观测温度、压力和流体的组成来记录这种流体的变化。在 CORK 监测设备被安装在许多 ODP 钻孔中的第一个十年中,其中一些观测器的作用已经超过了理解流体循环的最初目标。

CORK 的一个尤为令人惊喜的成果就是意外地提供了板块变形(拉伸、压缩、剪切和断裂等等)和伴生地震方面的信息。CORK 记录表明流体的压力和温度对构造变形有所响应,而构造变形经常发生在地震中,不过也可以发生在无震带。流体压力是怎样响应海底潮汐负荷(CORK 的另一个观测成果)的理论稍加修改后可以被用来解释对于构造变形的响应。实际上,早先的观测为后来提供了一个很好的标准。从 CORK 获得的数据同样也显示了力学和水文学的长期持久的变化,这是由形成压力对海底潮汐负荷的响应、板块的拉张得到的推论,在那些与地震接近的站位是尤其显著的。

流体压力的变化已经在距胡安·德富卡洋脊约 120 km 沉积洋壳中相对较小的地震中被观测到。这表明用 CORK 观测区域板块拉张的灵敏度要大于仅仅由地震活动观察到的板块活动。在洋脊中轴发生的一系列的大于 4.6 级的小地震中,4 个 CORK 站位的观测可以告诉我们板块的拉张是由稍大一些的 6 级地震所造成的。许多扩张事件被证实是由于板块拉张和地震肯定在无震带发生过。因此,CORK 观测的研究可以帮助我们解释间断性的板块运动和变形与地震能量释放之间的关系。

CORK 监测继续在胡安·德富卡洋脊的中轴和侧翼实施,在那里最近刚发生了大量的地震活动,还有哥斯达黎加裂谷的侧翼、南海和马里亚那俯冲带。最近刚在哥斯达黎加俯冲带完成了新设备的安装。我们希望所有这些站位的长期水文监测可以为我们理解地震破裂和板块拉张的过程,以及水在这两者中的作用等提供新的知识。

## 2.13 深入大洋地壳

在 20 世纪 70 年代早期,科学家们通过比较洋壳的地震图像和陆地上发现的各种洋壳岩石的碎片(蛇绿岩),明确了洋壳的结构。自从 20 世纪 60 年代早期,科学大洋钻探的最初阶段以来,钻穿大洋地壳就一直是一个挑战。在 1979~1993 年间,ODP 504 B 孔向海底下钻进了 2 111 m,成为在大洋中最深的科学钻井。通过钻探我们已经得到地壳上部的样品,但是地壳下部的样品依然很难得到。不过现在已经取得了相当大的进步,数百米的岩芯已经在太平洋和大西洋中脊由于构造活

动而暴露的洋壳中得到。

在洋壳硬岩石中第二深的钻孔位于西南印度洋脊的阿特兰斯斜坡上,在阿特兰斯转换断层东部的一个平台的平顶上。在 1987 和 1997 年的两个航次中共钻探了 1.5 km 深的岩石,取芯率达到了 86.5%,这在硬岩石的钻孔中是非常罕见的。以橄榄辉长岩为主的 735 B 孔在许多方面都有其独特的特点。这一段地壳底部的长岩芯包含两个主要的侵入体,他们被分成几个包含许多层段的小单元,并且常常伴有高温剪切带。

这些岩芯显示了所有类型的变形结构。它展示了一个连续的变形特征,从岩浆流到低温的韧性和脆性流,这些表明了构造活动在低速扩张洋脊的加积过程中的基本作用。

洋壳在低速扩张洋脊的不连续增长已经通过挖掘、深潜器研究和早先在大西洋中脊的钻探所证实。735 B 孔提供了下部地壳强烈不均质的证据,同时揭示了变形的内部相互影响,以及在低速扩张洋脊的变质和火山过程。这与采自快速扩张洋脊的样品和研究程度很好的蛇绿杂岩体的结果大不相同。这些发现强调了海洋中地壳增长构造环境所具有的显著多样性。

## 2.14 窒息的大洋

白垩纪的沉积记录(距今一亿四千万年至六千五百万年前)揭示出了几个黑色薄层富含碳的层段,这就是大家熟悉的黑色页岩,表明当时大洋处在一个缺氧的环境。

从深海钻探计划和大洋钻探计划得到的数据表明这些页岩在世界各大洋是同时沉积的。这种全球范围内的黑色页岩沉积称为“大洋缺氧事件”(OAEs),以白垩纪中期最为典型(距今一亿二千万年至八千五百万年前)。

白垩纪大洋缺氧事件时期,大量的碳埋藏使得大气  $\text{CO}_2$  下降,在白垩纪中期的温室气候中,有许多例子表明它们造成了生物的重大转折。多数的大洋缺氧事件被归结为高的海洋生物生产力和碳的输出,导致黑色页岩中富含有机质。然而,导致大洋缺氧事件的最根本原因依然不得而知。在佛罗里达岸外的亚热带大西洋的 ODP171B 孔,钻探获得了中白垩纪的黑色页岩。科学家们发现了一段连续的厚 46 cm 的薄层黑色页岩,这代表了一次大洋缺氧事件。这种事件首次被认为是由于海水分层的加强而导致的大洋缺氧事件的发生。

尽管大洋缺氧事件与地中海的腐泥沉积有很多相似之处,但大洋缺氧事件在地理范围上更大。这一特点再加上一个 46 000 年长的沉积,特别是至少 4 倍长于任



何第四纪的腐泥沉积,表明整个北大西洋和西特提斯洋组成了一个相当大的碳汇。

## 2.15 失去的世界:巨大火成活动区形成时的环境效应

当极大量的地幔岩浆进入地壳区域时就会形成巨大火成活动区(LIPs)。在他们形成时,强烈的岩浆活动使得地幔中的物质和能量在短时间内大量涌入地壳、水圈、生物圈和大气圈,可能伴随着许多全球环境效应。

巨大火成活动区形成了典型的地质意义上的短暂事件。在大陆岩石圈上,巨大火成活动区就是研究相对较好的大陆玄武岩流,其中几个事件伴随着有生物的大灭绝和环境的变化,尽管我们还不理解他们之间的因果关系和反馈机制。在过渡地壳和洋壳上,发散火山边缘和海底高原的研究程度还很低,这是因为钻探是采样的基本手段。通过对地球上两个体积最大的巨大火成活动区——印度洋南部的 Kerguelen 高原/Broken 洋脊和位于西太平洋的翁通—爪哇海台的大洋钻探,为我们提供了巨大火成活动区形成的过程以及他们潜在的环境效应。

Kerguelen 海台和 Broken 洋脊最上部的地壳都是以大规模岩浆活动的产物为主。LIP 火成岩的物理特征与覆盖在火成岩之上的浅水沉积物中的木屑、碳屑、孢子、花粉和种子的变化特征,表明 Kerguelen 海台和 Broken 洋脊的大部分当时形成了岛屿,之后,这些岛屿缓慢下沉了几千米而达到现在的水深。

Kerguelen 海台和 Broken 洋脊的大量和长时间的地表火山活动,结合高原的高纬度特征,对诸如气候、海平面、大洋缺氧、海水成份、生物辐射和灭绝等一系列全球环境变化产生重大作用。在他们形成时,大量玄武岩浆的喷出释放出大量挥发性的气体,如:  $\text{CO}_2$ , S, Cl 和 F 等。因为 LIP 在高纬地区形成,而在高纬地区的对流层顶相对低一些,这些喷发的效应可能会加强因为大规模的玄武岩喷发可以将  $\text{SO}_2$  和其他易挥发性气体转移到等温层中去。这种喷发作用形成于等温层中的硫酸气溶胶颗粒,可以在大气中停留更长的时间,并且比滞留在对流层具有更大的全球扩散性,因此对气候及大气化学具有更大的作用。在海底高原形成的最后时期,长英质矿物的猛烈爆发很可能将细小颗粒和易挥发性气体( $\text{SO}_2$  和  $\text{CO}_2$ )直接注入等温层。直到 1999 年才发现的地表长英火山作用的大规模喷发,将会对全球环境变化起到重要作用。

## 2.16 喜马拉雅何时隆升?

喜马拉雅数百万年的剥蚀已经在孟加拉湾形成了

一个巨大的沉积体,这就是孟加拉扇。孟加拉扇是世界上最大的沉积物堆积体,据估计它的体积是现在喜马拉雅在海平面之上部分的 5~10 倍。ODP 第 116 航次从孟加拉扇取得了代表大约二千万年以来的沉积物,为我们提供了喜马拉雅隆升剥蚀和风化过程的独一无二的宝贵档案。

这些 ODP 的数据可以用来检验关于喜马拉雅造山带形成及其对海洋化学风化影响的假说。这些岩芯揭示出喜马拉雅至少在二千万年以前就开始隆升了,比科学家们原先认为的要早一千万年。

ODP 第 116 航次取得的最有趣的一段岩芯之一,是发生在距今大约七千四百万年以前沉积速率、粘土矿物、有机碳同位素等数据都显示在当时的喜马拉雅地区发生了重大的环境变化。

沉积物在孟加拉湾的快速堆积,导致了有机物质的大量储存,其中绝大部分来自于陆地源区。从晚中新世开始,一大部分来自于冲积平原地区的 C4 草原。这种草含有的碳与高风化的粘土密切相关,似乎表明在前陆盆地新生成的草原地区风化在加强。沉积通量的降低和在前陆盆地中更长的滞留时间,说明季节性加强的环境。尽管阿拉伯海区其他 ODP 站位的研究表明了加强的季风及其与隆升的可能联系,孟加拉扇却记录了沉积物供给在减弱,但在前陆地区的沉积物化学风化作用在加强。直到几百万年以后,高的沉积物供给速率和低的风化作用才出现。

## 2.17 正在生成的海底宝藏

“乔迪斯·决心号”实施 ODP 第 193 航次是对未来找矿前景光明的古代大型硫化物沉积体进行钻探,硫化物在陆地上是诸如铜和金之类金属的主要矿物资源。在巴布亚新几内亚北部的马纳斯海盆有一个热液区,就是通常所说的佩克马纳斯热液区,也许将来有一天这里会成为第一个深海金属矿。就其迥异于其他大洋中脊的地质背景来讲,这个站位的钻探就尤为让人倍感兴趣,这是由于热液区的表层是由铜和金含量极其丰富的烟囱组成(并包括锌和其他金属)。同时,对于烟囱的研究还会揭示出其中含有极高的岩浆流体性质。第 193 航次不仅研究矿体本身,而且有助于理解在陆上主要采矿目标的地质背景。

第 193 航次的主要成果是展示了佩克马纳斯的火山层序,在其上覆盖了厚约 30 m 的新生熔岩层,这些火山层序遭受了极其强烈的物理和化学风化作用(常为 100%),但是,我们通过保存较好的原生火成结构来恢复其建造全过程。这些风化产物主要包括粘土和其他

层状硅酸盐矿物、硅质矿物和硬石膏。风化后的岩石质的柔软,颜色较浅,从白色到浅灰色和绿色,与坚硬的黑色母岩形成强烈的对照。我们通过与上覆的烟囱开展对比分析,来评价岩浆和海水来源的热液流体的相对重量,初步结论认为海底以下矿化和风化作用主要取决于海水来源的成分。岩浆源的流体经过岩石基底的时候可能只有很小的变化,这是可能通过大的张裂谷的原因。从海底喷发形成真正的碎片熔岩地壳,到原地极其强烈风化、局部流体化和共生条件丧失的热液角砾岩,这种由破碎的岩石碎片组成的角砾岩含量极为丰富。第 193 航次的岩芯首次回答这些过程,这种与“热液侵蚀”有关的作用可能为硫化矿物从热液流体中沉淀出来创造了必需的空间。

我们就在富含烟囱的“罗马废墟”正下方钻探(1189 B 孔),但没有钻取脆性烟囱本身。在新生成的流纹岩盖层之下,我们获得极快的钻进速度(8 小时钻进了 87 m),但是取芯率却只有大约 1%。这些样品是一些小的块状硫化物碎片和硫化强烈的火山岩。所有这些资料都表明这种岩石是不和协的,可能是大量圈捕的流体矿囊造成的。具体来说,可以有多种可能性。根据这些观察和测井资料,不和协的硫化物—硬石膏—硅质集合体可能交代了原生的火山层序,保留了流纹岩的残余体。另一种更加使人激动的可能性是“低价硫化物”块体构成了这些层序的前身,表明这一过程可能对古代层序是“巨大矿体”的形成起了很大的作用。我们的这次钻探可能是在佩克马纳斯矿化之前,但不管怎么说,我们的结果为将来陆地矿产资源开发提供新的途径。

### 3 未来 10 年科学计划展望

科学钻探计划已经解答了很多关于地球的难题。例如,当前关于板块学说的新的模式就给予地球的运行方式以极大关注,包括更好地理解诸如地震和火山等自然灾害;对于海洋沉积物的研究,有助于更好地理解自然气候的变化,也有助于人类在对未来进行规划时把全球变化的因素考虑进去。

值得一提的是,如此众多的成果让人类明白,我们对于海底沉积物和岩石的了解多么缺乏。到目前为止,钻孔总共有 1 700 多个,这就意味着每一个钻孔就要代表科罗拉多那么大的地区或者 75% 的日本。查阅一下钻孔的站位图,就可以发现还有很多海底正待探测。有很多地区我们能够探索,而且也必须探索。

面对未来 10 年的科学计划展望,IODP 以“地球系统科学”思想为指导(图 3,见彩插),将着重研究以下三

个大的科学课题:

#### 3.1 深部生物圈和洋底下的海洋

新的证据显示大量的微生物可能生活在大范围的温度和压力下,似乎是由沉积物和岩石提供维持生命的能源。处于这些极限环境的微生物现在被普遍认为是一种新的生物物质的潜在来源,具有新的生物技术应用潜力,如水处理技术和利用微生物方法提高石油采收率。现在我们还不太了解巨大的洋底下的海水流体系统的结构和动力学特征,这一系统中的流水改变岩石成分,影响大洋的化学组成,润滑诱发地震的活动断层,聚集经济矿物沉积,并与生命紧密相连。IODP 将在全球范围内对此进行研究,提供有关洋底下海洋的综合特征。

#### 3.2 环境变化、过程和结果

大洋沉积物在四个时间尺度上提供了地球气候波动的唯一记录并使探知气候信号成为可能,四个时间尺度分别为:构造的(大于 50 万年);轨道的(2 万到 40 万年);大洋的(几百到几千年);和有关人类的(季节性的到千年期的)。岩心的研究显示气候变化的速度随时间发生从渐变到突变的变化。而需要彻底探究的是,什么引起这些变化,这些变化是怎样发展的,什么条件会扩大或缩小各类事件对气候的影响,以及什么作用会导致地球环境的变化。IODP 将从迄今为止还很少取样的环境中获取更多的岩心,例如从北极洋盆、环礁、暗礁、碳酸盐台地、浅水大陆架和沉积物快速堆积的地方(尤其是缺氧盆地)。结合全球各大洋的钻探结果,这些新的沉积物样品可以更精确地分析出所有时间尺度上地球系统变化的原因、速率、序列和严重性。还可以更彻底地考察生物学演化中极端气候、气候变化和重要突变之间的关系。

#### 3.3 固体地球循环和地球动力学

我们通常注意到地球内部所蕴藏的巨大能量的释放,是通过如地震,火山爆发和海啸等短暂的、经常是破坏性的事件来进行的。这些标志性事件是固体地球循环的一部分,后者包括洋壳的形成和老化、俯冲带的物质再循环、大陆的形成和演化。物质和能量从地幔迁移到地壳,再从地壳迁移回地幔,其速率是随时间变化的。对于变化的原因和它们对全球环境的影响现在我们还了解得很少。利用新的 IODP 技术,研究者们将对那些现今或者几百万年前物质和能量迁移最多的海底区域实施取样并进行监测。IODP 对地壳进行钻探,将超出

以往的深度, 这样可以用新的视角来看待那些长期以来未解决的问题并可能找到答案。在 IODP 的第一阶段, 将有史以来第一次在俯冲板块边界的深源发震区采集岩心, 进行实地测量和监测。这项试验将十分有助于我们了解地震产生的基本机制, 从而提出全球性计划以减轻地震带来的危害。

(2007 年 5 月 21 日收到)

- 1 金性春. 穿地之梦[J]. 百科知识, 2005, 2: 5-8.
- 2 Integrated Ocean Drilling Program (IODP) Planning Sub-Committee (PSC), ed. Earth, Oceans and life: integrated ocean drilling program initial science plan 2003-2013[M]. Washington D C: International Working Group Support Office, 2001.
- 3 Joint Oceanographic Institutions. ed. ODP highlights[M]. Washington D C: Joint Oceanographic Institutions, 2003.

## Scientific Ocean Drilling Programs: Review and Prospect

LIU Zhi-fei<sup>①</sup> TUO Shou-ting<sup>②</sup>

(上接第 130 页)

斯韦方程组是描述光和电磁波的行为的。这样在 Maxwell 写下该方程组 150 年之后, 两种理论偶然地结合在一起了。这还没完, 他们发现所提出的模型还能自然地产生出其他基本粒子, 如组成质子和中子的夸克, 以及一些承担基本力的粒子, 如胶子、W 和 Z 玻色子。

从这里出发, 两人又进行另一次跨越: 那么整个宇宙是否可以用相似的方法模拟出来呢? 文晓钢说: “突然, 我们明白了, 也许我们整个宇宙的真空就是一个弦网液体(string-net liquid), 这也许能提供一个对光与物质统一的解释”。因此, 在他们的理论中, 基本粒子不是组成物质的基本构件, 而是来自时-空的非-空(non-empty)真空之更深层次的结构。

他们理论中预见的新物态下原子特殊的分布方式, 也就是所谓的“弦网液体”。可能已被麻省理工学院的 Joel Helton 小组发现了。Helton 明白文晓钢的工作, 并且决定去寻找这种物质。在对地质期刊地毯式的排查之后, Helton 小组终于发现了一个候选者——一位地质工作者于 1972 年在智利的一处矿山中偶然发现的一种暗绿色的晶体。后来

该晶体被以尊敬的矿物学家 Herbert Smith 的姓名冠名为 Herbertsmithite(以下简称“H 晶体”)。小组的成员 Young Lee 说: “然而, 多少年过去了大家都没有发现这块晶体潜在的物理研究价值”。

H 晶体之所以与众不同是因为它的电子排列在一-三角形的三个顶点上。通常, 电子基本上成行地排列且相邻电子的自旋方向相反, 但在三角形的情况下这显然是不可能的, 总要有相邻电子的自旋是同一方向的。文晓钢和 Levin 的模型显示这样的物态是弦网液态。

由于天然的 H 晶体内含有杂质, 其弦网特征难以显现出来, 故 Helton 小组拟在实验室内制造出一个纯 H 晶体样品。Lee 说, 那是一件很费力的工作, 制备样品、分析其特性各花了近一年的时光。小组测定它在外加磁场下的磁化反应, 他们认为若 H 晶体与普通物质相似, 则在温度约低于 26°C 时, 其电子的自旋应停止起伏, 一个被称为磁序(magnetic order)的状态, 但小组发现, 即使温度降到绝对零度以上几分之一度, H 晶体的电子之自旋仍有起伏。小组还测量了该晶体的其他性质, 如热传导, 一般固体的热传导能力与温度的关系在低于一定温

① Professor, ② Ph. D., candidate, IODP China Office, State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092

**Abstract** This paper reviews the history of the scientific ocean drilling programs over the past 40 years and reports selected important scientific achievements obtained by the programs. Using the new multiple-platform approach to scientific ocean drilling and a new process-oriented approach to research, the Integrated Ocean Drilling Program (IODP) will focus on three broad scientific themes: The deep biosphere and the seafloor ocean; Environmental change processes and effects; Solid earth cycles and geodynamics. As Earth grows smaller, mankind's relationship with it must improve. IODP will help to provide the information that can make that possible.

**Key words** deep sea drilling program, ocean drilling program, integrated ocean drilling program, earth system science

(责任编辑: 方守狮)

度时有变化, 这是因为那时物质的结构有所改变, 但对于 H 晶体, 小组未发现转变的痕迹。这表明该晶体与常态的物质确实不一样, 其最低的能态没有可察觉的磁有序。

小组拟向 H 晶体射入中子, 从观察中子束被散射的情形来显示个别电子的位置和寻找相距较远的电子之间的纠缠状况。Lee 说: “我们希望看到自旋的动理学; 如果掐住了一个电子, 便能见到别的电子是如何受到影响的”。这些引起弗吉尼亚大学量子计算专家 Paul Fendley 的兴趣, 他预期利用这种新奇的物质可以制成量子计算机储存信息的元件。

“也许 Herbertsmithite 不是新的物态, 但不久的将来定能找到, 因为已有许多小组启动去寻找这种东西了”, 另一位量子计算专家加利福尼亚大学的 Michael Freedman 如是说, 他还说: “人们错误地认为只有用高能粒子加速器才能制造出新的物质, 现在看来, 在实验室内, 人们能创造出比宇宙中任何场所更冷的条件, 必然会偶然地遇到前所未有的宇宙中之某些事物”。

[ 许霖据 New Scientist, 2007-03-17 ]

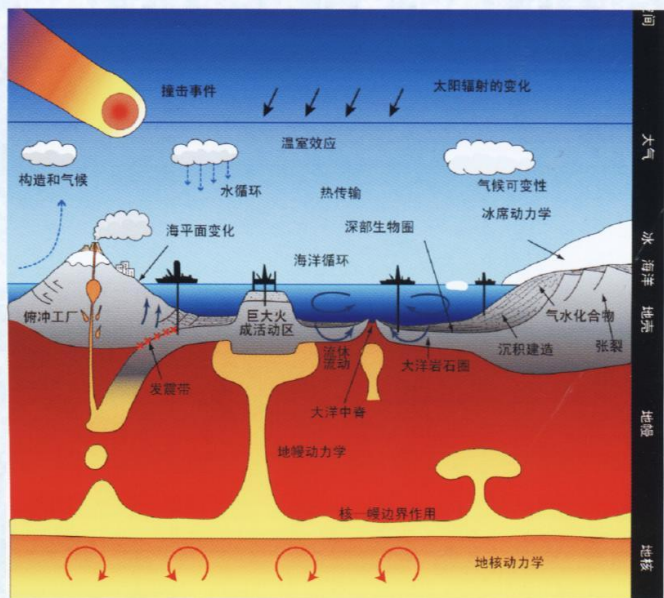
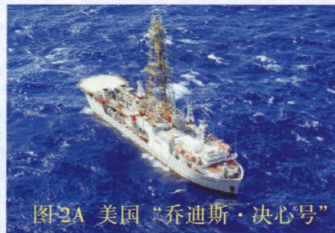
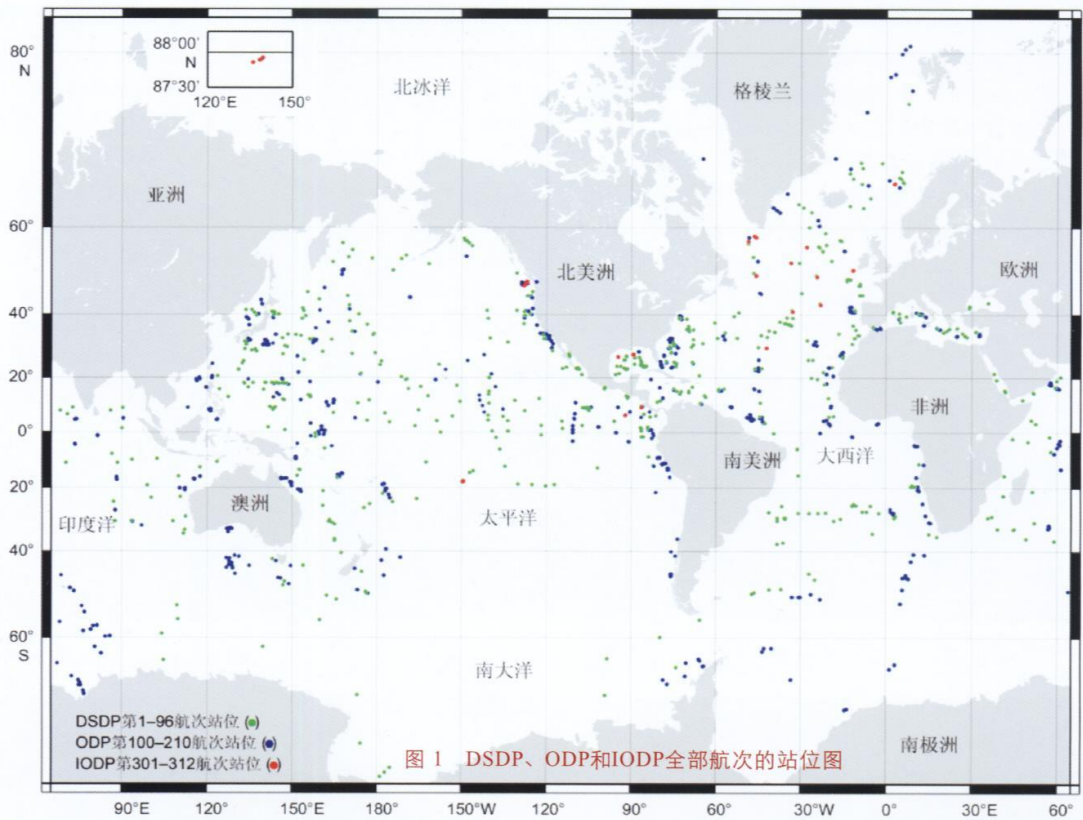


图3 地球系统的组成、作用和现象

参见本期“科学大洋钻探回顾与展望”一文