

大洋钻探计划对一些重大地学问题的贡献

翟世奎 范奉鑫

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

到 1992 年底, 大洋钻探计划 (ODP— Ocean Drilling Program) 已执行了 8 a 多的时间。为了解决一些重大的地学问题, 大洋钻探计划的科学钻探船——“JOIDES Resolution”号的航迹已遍及大西洋, 东、西太平洋, 印度洋, 地中海, 加勒比海, 韦德海, 苏禄海, 西里伯斯海, 菲律宾海, 日本海和珊瑚海等。钻探工作的目的包括研究全球环境变化、地幔与地壳的相互作用、地壳内的流体循环和全球地球化学平衡、岩石圈的应力和变形、以及大洋系统的演化过程。本文简单地概述了 ODP 的历史, 总结了 ODP 迄今对一些重大地学问题的贡献。

海洋科学, 1993 年 11 月, 第 6 期

1 深海钻探计划 (DSDP)

ODP 的前身是深海钻探计划 (DSDP)。DSDP 的工作证实了海底扩张、地壳年龄和地磁异常之间的关系, 为本世纪 60 年代地球科学中的板块构造革命提供了关键性的证据。DSDP 的科学家利用生物地层学方法测定直接覆盖在玄武岩基底之上的沉积物的年龄, 结果证明了海底自大洋中脊向外变老。这一“海底扩张”说解释了所观察到的沉积物盖层自中脊顶部向外变厚的事实。深部钻探同时证明了最老的洋底仅有约 170m. a., 支持了大洋地壳在俯冲带“消亡”的理论。

到了 80 年代早期,板块构造理论得以完善,但是对板块运动、洋壳生成和气候变化的许多重要因素仍知道得寥寥。1981 年,在德克萨斯召开了第一次科学大洋钻探的国际会议,这次会议的使命是决定怎样才能最有效地组织大洋钻探和与其有关的计划,以及协调攻克最紧迫的科学问题。这次会议本身就反映了大洋科学的进步,同时确定了以下优先研究的领域。

大洋地壳的成因和演化;大陆边缘和大洋地壳的构造演化;海洋沉积地层的成因和演化;大气圈、大洋、冰圈、生物圈和磁场的成因及其长期变化;实现这些目标所需要的工具、技术和有关的研究工作。

在此后十多年大洋打钻的经验中,科学家认识到了在将来实现 DSDP 目标中新技术的重要性。10a 钻探的科学蓝图是综合性而又集中于下述目标之上的。

有关岩石圈的目标:大洋中脊处岩浆的生成及地壳结构;大洋地壳中热液系统的流体通量、化学成分和动力学。

有关构造方面的目标:被动边缘的早期断裂史;弧前演化动力学;岛弧的结构和火山活动史。

有关沉积历史和全球变化的目标:与海面变化相应的海洋沉积作用;缺氧大洋中的沉积作用;沉积物的全球质量平衡;大洋环流的历史;与行星轨道变化相对应的大气圈和大洋的变化;微生物的演化模式;地球磁场的历史。

为了达到上述目标,并且验证它们所基于的理论根据,大洋钻探计划带着数项技术使命,例如:要钻得更深,在高纬地区打钻,在洋中脊顶部钻透新生成的地壳,以及钻孔内的物理化学测量而诞生了。为了这一事业,ODP 租用了世界上最先进的钻探船之一,JOIDES Resolution 号作为平台。

2 ODP 迎接挑战

这样,勾绘出了科学钻探的新的 10a 计划——即大洋钻探计划诞生了,首钻始航于 1985 年。

ODP 早期的成功已吸引了一些新的成员国。除了欧洲大洋钻探财团之外,12 个欧洲国家又加入这个计划。最近,澳大利亚和加拿大又成双加入,使直接参与计划和实现大洋钻探计划的国家总数达到了 19 个。有关科学大洋钻探的第二届国际会议(COSOD II)于 1987 年夏季召开。在该会议上,所倡议的钻探试验集中在具有内在联系的全球性系统,而且更注重与其他全球性计划的合作。另外,所提出的计划要求把 ODP 的钻探能力推向更深、更不稳定、更热,一般来说也是更为困难的环境。

表 1 第二届科学大洋钻探国际会议的主要目标及技术要求

目的	技术要求
钻取一系列海底之下深达 5 000m 的地壳孔,以确定地壳的成分。	钻深达到火成岩地壳的能力;增加取芯设备和钻头的寿命。
在加积棱柱上打钻,以便研究变形作用和失水机制。	在不稳定和非固结沉积物条件下打深钻的能力。
在有沉积物的大洋中脊上和沉积物柱上打钻,研究成岩作用、变形作用、地球化学循环和富金属矿床的成因。	为收取热而具有腐蚀性的流体而必需的流体取样技术、以及可以承受 300 ℃ 高温的仪器设备。
沿热点轨迹和在破裂的古老洋壳上打钻,以便研究板块随时间的运动。	改进地壳样品回收技术,增加提取具有完好磁性定向而未受扰动的岩芯的能力。

3 ODP 迄今的主要成就

自从 1985 年 1 月开钻以来,ODP 已完成了 40 多次远洋考察,在 250 个钻位钻取了 70 000 多米长的岩芯;来自国际协会的 1 000 多名船上科学家从岩芯中分取了 400 000 个单样,带回各自的研究所进行进一步的研究。这些工作已经为我们了解众多的具有全球意义的地质作用做出了贡献,可以概括为 7 个方面:

3.1 全球气候演化

在当今地球上,冰川含有相当于海面上升 30 m 的水体。除了格陵兰冰川和小型山区冰川外,大部分冰川见于南极大陆。南极上最大的冰体由两个主要的冰盖组成,即较小的南极西冰盖(仅相当于海面上升 6m 的水体)和南极东部大得多的冰盖。南极冰影响着表面反射率、地表高度以及地球的热梯度。因此,认识大洋-大气圈-冰圈系统这一主要特征的历史是我们认识新生代全球气候体系的关键。

113 号钻和 119 号钻的部分科学目的是提供直接的有关南极东、西冰盖演化的沉积学证据。113 号钻位于韦德海之内,两个冰盖存在对这里的沉积作用都有影响。钻探结果表明南极西部冰盖在晚中新世(大约在 $6 \times 10^5 \sim 8 \times 10^6$ a 之前)经历了主要的发育期。南极半岛外的钻探表明该冰体的早期历史是强烈不稳定期,冰川的范围波动很大,而自从上新世以来情况要稳定得多。

MARINE SCIENCES, No. 6, Nov., 1993

113号钻结果的初步解释表明南极东部冰盖的主要发育期稍微早于南极西部冰盖而出现在中新世。这一南极主要冰体的发育年龄与以前对其他地质证据的解释是一致的。然而,其他对海洋稳定同位素记录的解释表明南极冰的主要发育期要早得多。为了得到南极东部冰盖的沉积记录,119号钻布设在南极大陆外的普赖兹海湾。与韦德海不同,位于印度洋最南部的普赖兹海湾接受的是仅仅起源于南极东部的陆源沉积物。因此,应该明确地记录着南极东部冰盖的冰川历史。

在普赖兹海湾取得的沉积物所提供的最直接的证据表明南极冰的发育要比以前所预料的老得多。取到了年龄自早渐新世到始新世的冰川海洋沉积物,还采到了可能老至 $42 \times 10^6 \text{a}$ 的冰川沉积物。其他沉积物证据表明南极东部冰盖在它的早期可能比现在要大得多。显然,这一新的证据将使我们重新研究我们先前对中生代气候演化的解释,并大大增进我们对全球气候演化的认识。

热带地区大气环流的主要特征是东赤道大西洋和北印度洋的季风环流。气候系统的这一重要特征的地质历史反映了热带地区日照情况的变化,这种变化起因于地球轨道参数的变化和喜马拉雅山脉的演化。当今喜马拉雅山脉的高度和有关冰盖的高反射率导致了亚洲大陆的变暖,与印度洋之间形成明显的季节性差异,这种差异导致了大气环流明显的季节性循环,在夏季为非常强的西南风,而在冬季为东北风。

这种风向的完全倒转对北印度洋的大洋环流和大洋生产力有着深远的影响。从某些意义上讲,设计在印度洋中打钻是为了研究季风环流许多重要的方面。

位于 Bengal 冲积扇上的 116 号钻的钻探结果表明在早新世之前大量的粗粒沉积物排泻在该冲积扇的末端部分。这说明喜马拉雅山脉的主要隆起出现在比通常所认为的中中新世还要早的时期。

117 号钻专门设计用于验证关于印度洋夏季季风的成因和演化,及其对全球气候变化的影响的假说。该钻不论是在沉积物取样的数量(岩芯回收超过 4300m——新记录)还是质量上都获得极大的成功。该钻最杰出的成就是得到了唯一的、保存完好的季风上升流和风成搬运的记录,该记录既连续又具高的分辨率,可以追溯到 $10 \times 10^6 \text{a}$ 之久。所发现的沉积参数变化的频率正如假说所预言的那样,该假说把季风的强度与地球绕太阳轨道的变化联系在一起。该记录还显示了一些与季风上升流的出现有关的长期变化,这可能是反映喜马拉雅山隆起的事件。初步结果表明上升流生物群和植物群出现在 $10 \times 10^6 \text{a}$ 之前的晚中新世早期。对该连续

海洋科学,1993年11月,第6期

剖面内浮游生物群的详细的定量分析将确定出季风上升流出现的真正日期。

3.2 加积复合体内的流体

在主动边缘,由于构造压实作用,流体自俯冲的沉积物和加积物中又回到大洋中。对流体流的大小和溶解物质的搬运以及流体对全球地球化学平衡的影响却所知甚少,它们可能可与大洋中脊相比美。特别是水和挥发性组分的循环受到这一新发现模式和搬运途径的影响。

在加积棱柱内,流体、流体压力和沉积物之间的相互作用控制着汇聚边缘的变形作用。例如,自循环流体内沉淀出的胶结物可使积契发生成岩作用;流体压力的分布可把加积沉积物和俯冲沉积物分开;最后俯冲流体蚀变了岩石的强度,因而导致了深源地震的分布。俯冲沉积物的成分,不论是富有机质、富陆源碎屑、还是富大洋火山组分都会影响流体的化学组成,并决定着流体的生成和弧前地区的气体压力。加积棱柱内的流体流有两个基本的机制。通过含水层向海方向上的重力驱动流是水力学机制,其重要性和水源均不同于构造驱动流的机制。重力驱动流典型地发育在被动型边缘,但也见于主动型边缘环境。因此,在研究加积复合体时也应加以注意。

过去 3a 的钻探对加积棱柱体发育的机制提供了透彻的了解。钻透加积复合体并进入俯冲沉积物的第一个钻孔是位于小安的列斯前弧的 110 号钻。在此处所得到的资料确定了两个性质不同的巴巴多斯加积棱柱体失水的水文地质体系。来自钻探的孔隙水化学,温度异常和构造观测表明流体正主要通过断层有关的裂隙渗透性所控制的地带活动,其次是沿着由粒间渗透性所控制的地层界面流动。加积契和俯冲沉积物含有不同的流体储集层,它们被平行于滑脱构造带的渗透屏障所分开。

由 110 号钻和 112 号钻(秘鲁边缘)所得到的资料表明来自动型边缘沉积物中的流体比正常的海水可以“淡化”得多。这一证据支持了先前 DSDP 的观察结果,并且发展了关于流体来源的几个概念,如富水沼气水合物的分解、在流经富粘土夹层时海水的极度过滤、以及粘土和其他含水矿物的脱水作用。来自俯冲板块、流经大陆地壳断裂前缘的流体流是汇聚型边缘水文学中另一个令人感兴趣的现象。地球化学录井,结合其他的流体化学测量首次证明了地下流体的“淡化作用”。

在秘鲁加积棱柱体,阿曼边缘和非洲西北部外海的钻探还证明了广泛的地下卤水。盐的向上扩散已形成了异乎寻常的地球化学环境,在这一环境中还原硫酸盐细

菌继续分解有机质,在沉积物中可达数百米深。因此,在这些边缘环境中,对流和密度驱动的水文流强烈地影响着这些沉积作用的地球化学相和沉积物相。

3.3 大洋地壳勘探

钻到大洋地壳深层是大洋钻探计划中高度的科学重点。岩石圈钻探的总目标就是要了解大洋地壳、岩石圈和下伏地幔的成因和演化,这一钻探的两个最高重点是:(1)确定地壳的结构、成分和蚀变历史;(2)研究与大洋地壳形成有关的岩浆生成作用、地壳建造作用和热液循环过程。

106号钻首次尝试采用由ODP工程人员设计的硬岩导座(Hardrock guide base—HRGB)以便把钻孔的定位桩固定在裸岩上。该钻在大西洋中脊断裂谷中采用HRGB获得了成功,并打了一个钻孔。109号钻返回这一钻位继续钻探。在109号钻,离扩张轴仅数公里的大西洋中脊断裂谷内采集到了蛇纹岩和部分蛇纹岩化了的方辉橄榄岩。这些被认为是下地壳或上地幔典型的岩石存在于远离任何断裂带的非常浅的地壳深度内,表明缓慢扩张的大洋中脊以非常浅的岩浆供应和/或普遍的构造变薄为特征。研究橄榄岩本身对于了解缓慢扩张大洋中脊之下的上地幔的成分变化和熔融历史就是极为有用的。

ODP迄今一项重要的成就是完成了在102、109和111号钻的井下录井计划,这3口井是由DSDP所钻的3个最深的地壳钻孔(395A、418A和504B号孔)。在这些钻孔所做的现代化录井测量和专门的钻孔试验提供了有关年轻和古老洋壳物理性质的特有资料。在504B号钻孔有些意外地发现在该孔1000m深之下,是由第二层部分隐伏的枕状熔岩和席状岩脉组成,普遍具低的渗透性。如此低的渗透性不可能有热液循环存在于更下部的地壳内。因此,在该孔内地壳唯一高渗透性的部分是上部100~200m深的枕状玄武岩层。这些结果对于把大洋中脊处的热液作用模式化和了解大洋地壳的蚀变历史是极为重要的。

迄今最令人兴奋、也是最出乎意料的岩石圈钻探的成就无疑是在南印度洋中脊上的118号钻位的735B号钻孔所获得的500m长的辉长岩岩芯。从技术上讲,该孔是ODP所发展的裸岩钻探新技术的重大胜利,既创造了在地壳钻孔中钻进深度的新记录(60m/d),也创下了采样率的新记录(底部400m的采样率为95%,总采样率为7%)。在这里所获得的辉长岩代表了第一个在大洋盆地中所取到的原位第三层岩类物质的连续剖面。研究该剖面内地球化学和岩石学上的变化将使得在真正的地层学意义下研究古大洋岩浆房内的岩浆演化。在

735B号孔内所做的录井和钻孔实验还首次提供了有关第三层物理性质(孔隙度,地震波速度和岩浆作用)的现场资料。

3.4 热点演化及真极游移

与热点有关的火山地貌是所有大洋盆地的特征,它们突出的特征是取向与所在板块的运动方向一致,并且远离热点火山作用的年龄逐渐递增。因此,沿热点轨迹打钻可以提供有关板块运动历史的一级资料,这正是我们认识全球构造的基础。

目前仍在争论这些热点在地幔中是固定的还是在某种上地幔对流机制内移动?印度洋115号钻的目的就是研究这些供选择的假说。

115号钻研究印度洋内两个重要的热点地貌之一,它始于西印度洋的德干溢流玄武岩,继续向南是拉克代夫,马尔代夫和查戈斯岛链,然后结束在马斯卡林海台和年轻的毛利求斯和留尼汪火山岛。这一近于南北向的直线型热点地貌平行于奈恩蒂斯特中脊,两者共同显示着印度在过去100多百万年中离开冈瓦纳超大陆向北的运动。该钻的结果明确地确定了火山的喷发年龄向北增加,与热点模式一致。另外,在平行热点轨迹方向上的几何学和年龄也支持了上述观点,即至少这些热点在很长的时期内,在地幔中是稳定的。

德干溢流玄武岩,已与在白垩纪和第三纪之间生物的大量灭绝联系起来,目前可以肯定地说这些玄武岩与留尼汪热点活动时突发性的火山作用有关。

由于热点在地幔中似乎是固定的,它们的火山轨迹为途经它们的岩石圈板块的运动提供了适当的记录,古地磁测量也确定了相对于地磁偶极轴的位移(假定偶极轴与地球的自转轴一致)。因此,在给定热点之上喷发的所有火山都应在磁化的玄武岩中记录着相同的磁纬度。然而,在115号钻发现沿热点轨迹所记录的古纬度有规则性的漂移。留尼汪热点似乎在 55×10^6 a之前位于现在位置以南相距8度的地方,而自那以后便向北移动。如果对时间平均地磁场假定一地心轴偶极子模式,这便证明热点并非固定,除非所有的热点都一起移动以保持其轨迹的一致。另外,这一结果支持了来自太平洋海盆的资料,资料表明具有类似规模的夏威夷热点在相同的时间内曾向南移动。两项研究都与老的真极游移说是一致的。也就是说,地球整个外表相对旋转轴曾有过转动,这可能对应于地球主惯性矩的变化。因此,在古地磁参考系内太平洋地幔似乎曾向南运动,而在同一时期印度洋地幔则向北运动。

3.5 板块发散

板块发散或板块断裂的结果被普遍认为与大洋盆

MARINE SCIENCES, No. 6, Nov., 1993

地的形成有关。但是,断裂的过程和方式仍然是有争议的。另外,断裂边缘可有、也可无大的火山活动区。尽管几种情况的结果存在有极大的矛盾,钻探仍有助于认识特殊断裂边缘的实质。

ODP 在 Voring (挪威外海)的钻探证明一些大陆边缘最外部地区所特有的向海倾斜的反射地层确实可能是大量的火山物质。然而,这些火山岩整个范围内的成分仍然是未知的,打钻不能穿透它的整个深度,因此这些火山地层之下的基岩的成分,例如是变薄了的大陆地壳还是大洋地壳仍然是未知的。但是,作为 ODP 钻探的结果,新的大陆断裂的模式已经提出。

在伊比利亚半岛的加利西亚边缘近海,象地幔一样的超基性岩见于浅层地壳内,在沿该边缘的其他地方发现橄榄岩在海底的露头。对某些地质学家来说,这证实了包括切割整个地壳的低角度分离的简单剪切断裂模式。然而,另外一种解释认为这些橄榄岩质岩石是更老的来自晚古生代海西造山运动的增生蛇绿岩的残余。山脉和地壳的隆起并非只限于汇聚型边缘环境。象横贯南极的山脉和加利福尼亚的塞拉内华达这些典型的山脉被认为是由于更大一块拗陷的岩石圈的破碎而抬升的地壳的碎片。最近在印度洋破碎洋脊上的钻探已提供了这种构造形式的另一可能的例子。对这种回弹形式的构造知道很少,尤其是在地壳下沉之后通常都跟随有断裂事件。

在过去几年中,一个很重要的认识就是发现在同一个造山带中既可以有发散型构造,也可能同时存在有汇聚型构造。在第勒尼亚海的钻探提供了一个这样的例子。钻探结果清楚地证明弧后张裂的年代是在晚中新世之后,而大洋地壳的形成则从上新世至今。这些年轻的年龄恰恰对应于第勒尼亚海向海槽一侧的亚平亚褶皱带中逆冲断层的年龄。

在埃克斯默思高原(澳大利亚西北部)的北部边缘,ODP 钻取到含有已知最古老的超微化石的海洋沉积物,并且在先于印度洋断裂的边缘处发现了更上部的三迭纪的礁杂岩。

3.6 钻探和岩芯取样技术

ODP 和 DSDP 已导致但也已受益于许多技术的发展,这是科学大洋钻探所特别需要的。DSDP 起初主要基于标准的石油工业技术,例如旋转式钻井,电缆岩芯取样,以及动力定位。然而,为了获取更为有用的科学资料,还必须发展技术。更深的钻探需要再入孔技术,以便更换旧的、用坏的钻头。DSDP 开始两年之后,首次在深海底实现了再入孔。DSDP 的工程人员和科学家同时认识到标准的旋转式钻探损坏了大量固结沉积物的细微

构造。经过 10a 的努力,成功地使用了液压活塞岩芯取样(HPC)。HPC 的发展导致了推进式活塞取样(APC)以及 ODP 目前以最小的扰动获取未固结沉积物样品的技术。

ODP 的其他使命,例如钻进零龄地壳导致了进一步的技术进步。当在无沉积物的玄武岩上打钻时,为了稳定钻具,研制了硬岩导座。3 次使用 HRGB 技术已证明在海底裸露基岩上打钻的可行性。这项新技术不久将被再次用于东太平洋隆起顶部的钻探,以便进一步研究大洋地壳的生成和热液循环。ODP 还和工业系统合作,试图通过研制金钢石岩芯取样系统,改革陆上矿床岩芯取样系统,使其适合大洋钻探,以改进在比如断裂玄武岩、疏松破碎岩石、未固结砂、燧石、松软粘土和页岩这种“困难建造”中的取样。由采矿工业发展起来的金钢石岩石取样技术采用更小的岩芯钻头以及高得多的钻头转速。金钢石岩芯取样系统曾在 JOIDES Resolution 上试用过一次,得到了令人鼓舞的效果。

3.7 井下测量的科学受益

在大洋钻探计划的科学成就中,井下测量的作用一直在日益增大。井下测量在 3 个关键性研究领域产生了令人振奋的新成果。这 3 个领域是:地壳性质及地壳演化的研究、古气候和古海洋学的研究与岩层流体成分的变化。

在深达地壳深层的钻井所做的井下测量项目已提供了对玄武岩质地壳演化的新的了解。象速度,密度,孔隙度和磁化率这些地球物理性质通常是根据对拖网样品的测量或海面地球物理调查结果加以估算。原位井下测量不仅提供了这性质的连续记录,还对它们的成因提供了新信息;如流变、断裂、渗透性以及由蚀变所引起的裂隙冲填。在 ODP 钻孔所做的主应力方向测量表明可以对不同的板块驱动力的相对重要性的模式加以验证,但是需要在有可能的钻孔中做更多的测量和一些专门的实验。

井下测量保证了一定水平的分辨率和连续性,可以从中得到古气候和古海洋学资料,而这在以前只能在最好的岩芯情况下才能得到。在几个站位已经发现了同一性质的信号频率,例如众所周知的气候变化频率,它们与轨道驱使气候变化的假说是一致的。当轨道驱动力的证据不能很好地确认时也能见到许多这样的信号。这一资料对于更好地了解气候和大洋在地质时间内是怎样变化的是必不可少的。地球化学录井,特别是氯指标和氢指标的应用首次证明了汇聚型板块边缘地下水的“淡化”作用。这样的资料对于评价流体在加积复合体内的作用是最为重要的。