

大洋钻探五十年: 回顾与前瞻

汪品先

同济大学海洋与地球科学学院, 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

现代地质科学产生以来的两百多年里, 二十世纪的六七十年代算得上是个英雄时期: 以板块学说为标志的地质革命, 横扫长期以来的陈旧观点, 开创了地球科学的新纪元, 而大洋钻探就是这场革命中的一面旗帜. 世界各国将科技的精华集中到钻探船上, 半个世纪来在世界各大洋深水底下钻井四千多口(图 1), 取芯四十多千米, 从根本上改变了人类对地球的认识, 扭转了地球科学发展的轨迹. 从组织的角度看, 大洋钻探也是国际科学史上的奇迹: 一项由各国政府出资的基础研究国际计划, 居然能历经 50 年而不衰, 学术上的青春活力不减当年, 相信其中必有缘故.

这缘故就在于海洋的深邃广袤. 深海是地球表面的主体: 全球陆地面积加起来还不到三成, 水深超过 2000 m 的深海却占了六成. 现在的人类 90% 挤在 10% 的陆地上, 奢谈着地球的可持续发展, 而对于决定地球未来环境的深海却往往视而不见. 大洋钻井犹如一枚枚神针穿越深水插入地球, 捅破了深海之谜: 认识了海底扩张, 才懂得大陆山系的由来; 解读了海底沉积, 才找到气候演变的根源. 50 年来, 深海始终是地球科学创新的源泉^[1].

在大洋钻探的国际队伍里, 中国只是个“新兵”. 但是我们赶在 20 世纪落幕前加入其中, 经过砥砺奋进, 集中在南海深水实现了 4 个钻探航次, 使之一举成为海底深部研究程度最高的边缘海, 中国也因而成为国际大洋钻探最为活跃的国家之一. 大洋钻探从 1968 年开始, 中国在 1998 年加入, 2018 年是大洋钻探国际 50 年、中国 20 年的双重喜庆. 值此欢庆之际, 需要对大洋钻探国际合作的曲折道路, 对其科学发现的学术价值, 和我国参加以来的经历进行回顾, 对于大洋钻探的未来和我国进入其领导核心的道路进行分析, 这是撰写本文的目的.

1 一波三折: 大洋钻探的国际之争

科学道上无坦途, 大洋钻探也不是个“顺产儿”. 它的前身是美国的“莫霍计划”, 试图从深海底下打穿地壳, 穿越地壳和地幔之间的“莫霍面”. 从 1960 年开始经过种种试验后, 终于在 1966 年被撤销, 夭折的原因是技术上尚未成熟、经济上不胜负担, 其实莫霍钻的技术难点至今仍未解决. 1968 年“格罗玛·挑战者号”首航墨西哥湾, 开始了美国的“深海钻探”计划(DSDP)(表 1), 实质上就是将钻探玄



汪品先 同济大学海洋与地球科学学院教授, 中国科学院院士. 长期致力于推进我国深海科技的发展. 1999 年在南海主持中国海首次大洋钻探, 现主持国家自然科学基金“南海深海过程演变”重大研究计划.

武岩的“莫霍计划”改变为钻探其上的沉积岩^[2]. DSDP 一路顺利, 从 1968~1983 年, 15 年里完成了 96 个航次, 钻探 624 个站位, 取芯约 95000 m, 并且不断带来新发现. 第一个航次就在墨西哥湾一千多米水深下发现石盐层, 而盐层底下的石油正是今天的勘探对象; 第三个航次在大西洋发现海底地壳的年龄从洋中脊向外变老, 从而证明了板块理论的海底扩张假说^[3]. 深海钻探的成功引起了各国的注意, 1975 年苏联、英国、德国、日本和法国先后加入美国的计划, 使得深海钻探进入“大洋钻探国际阶段(International Phase of Ocean Drilling, IPOD)”, 成为举世瞩目的国际计划. 从此之后, 大洋钻探就超出了科学领域, 成为国际外交上一个新的敏感主题. 比如 1979 年底苏联出兵阿富汗, 1980 年以美国为首的深海钻探计划就剥夺了苏联的参与权利, 直到现在俄罗斯也不是大洋钻探的成员.

1985 年大洋钻探开始了被称为“ODP”的第二阶段(表 1), 美国的钻探船也作了更新: 10500 吨的“格罗玛·挑战者号”, 换成了近 17000 吨的“JOIDES 决心号”, 设备更加先进. 大洋钻探的难度极大, “决心号”钻探船靠的是 12 个动力定位的强力推进器, 和 400 吨的升降补偿装置, 才能保持稳定、进行钻探^[2]. 跨越世纪的 ODP 阶段, 大洋钻探在 20 年里完成 111 个航次, 在 669 个站位钻井, 取回岩芯 223000 m, 发表国际论文 7200 篇. 辉煌的成绩强化了美国领导下大洋钻探的国际地位, ODP 末期参加的国家 and 地区达到 22 个, 成为各国科学家合作与竞赛的深海奥林匹克^[4]. 同时也不难想象, 国际主导权之争也就随之而来.

20 世纪在美国和欧洲联合体之外, 长期发展深海科技的只有日本, 在 80 年代经济达到顶峰的背景下, 海洋上

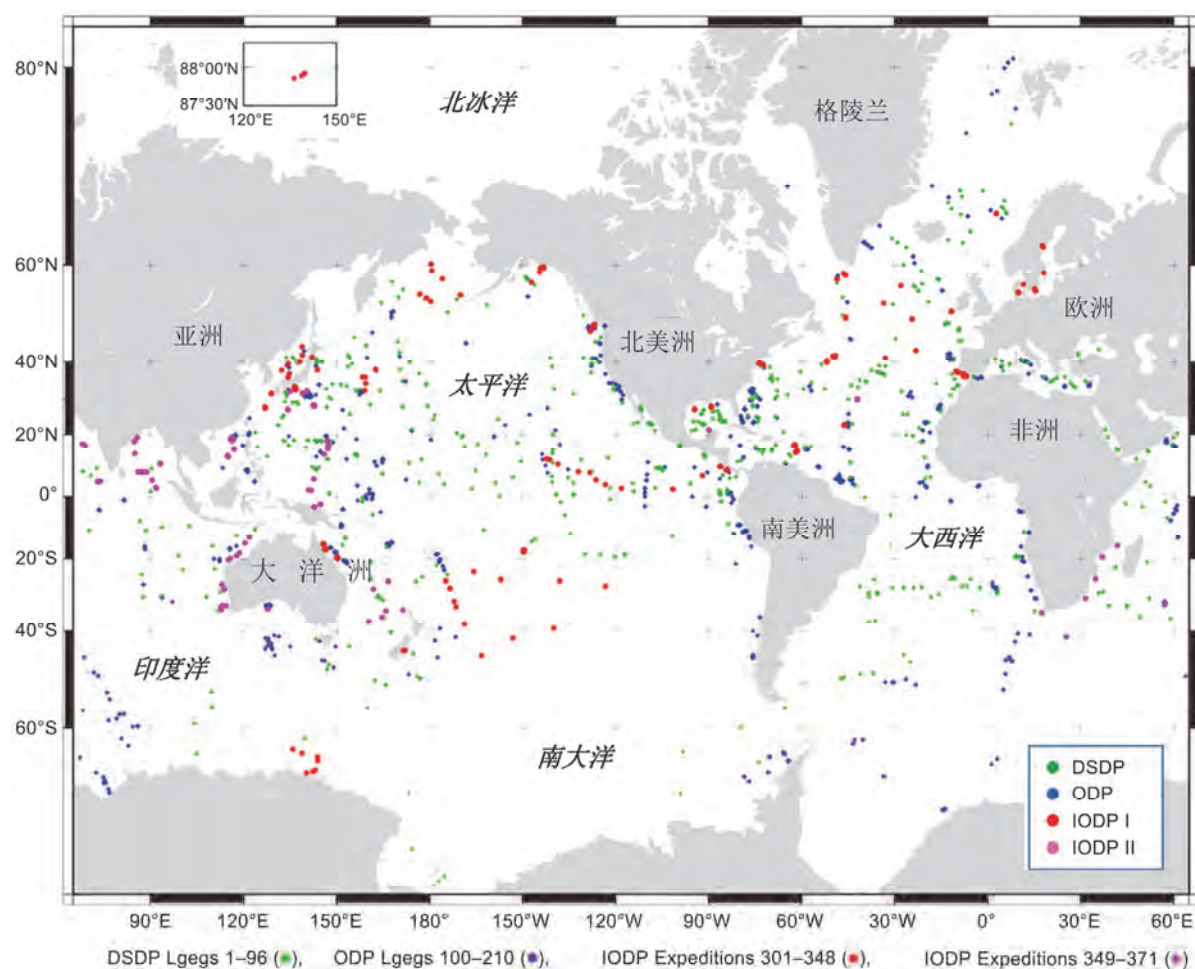


图1 大洋钻探50年钻井位置图。颜色表示不同阶段的钻井(表1)。http://iodp.tamu.edu/scienceops/maps/iodp_odp_dsdp.jpg

Figure 1 Ocean drilling sites over 50 years. Colors distinguish drill sites of different phases (Table 1). http://iodp.tamu.edu/scienceops/maps/iodp_odp_dsdp.jpg

表1 国际大洋钻探的4个阶段

Table 1 Four phases of the international ocean drilling program

名称	年份	钻探平台	参与国家
DSDP 深海钻探计划 (Deep Sea Drilling Program)	1968~1983	美国“挑战者号”	从美国扩展到英国、法国、日本、苏联和德国
ODP 大洋钻探计划 (Ocean Drilling Program)	1985~2003	美国“决心号”	美国主导, 扩展到 22 个国家和地区
IODP I 综合大洋钻探计划 (Integrated Ocean Drilling Program)	2003~2013	美国“决心号”、日本“地球号”、欧洲联合体“特定任务平台” ^{a)}	美国、日本、欧洲联合体 ^{a)} 、中国、韩国、印度、巴西、澳大利亚-新西兰联合体
IODP II 国际大洋发现计划 (International Ocean Discovery Program)	2013~2023		总共 20 多个国家和组织

a) 欧洲联合体目前包括德国、英国、法国、意大利等 17 国和加拿大, 通过租船方式提供特定任务平台

问鼎世界的意图十分强烈。1993 年 12 月, 日本大洋发展委员会正式向首相递交报告, 提议建造大洋钻探船, 挑战国际领导权。1994 年日本制定了“OD21”(21 世纪大洋钻探)计划, 直言“在大洋钻探领域里, 30 年来一直是美国起着领导作用。而 21 世纪的大洋钻探, 应当有别的国家也有兴趣起

这种倡导作用”。接着日本政府决定建造新一代的大洋钻探船, 亦即立管钻探船。美国大洋钻探打的是裸眼钻, 不下套管、不用泥浆, 因此井深不能超过 2000 m。日本船可以进行有泥浆循环的“立管钻探”, 井深可以加到 7000 m, 与此相应船体也加大到 57000 吨(图 2), 总花费远超过 5 亿

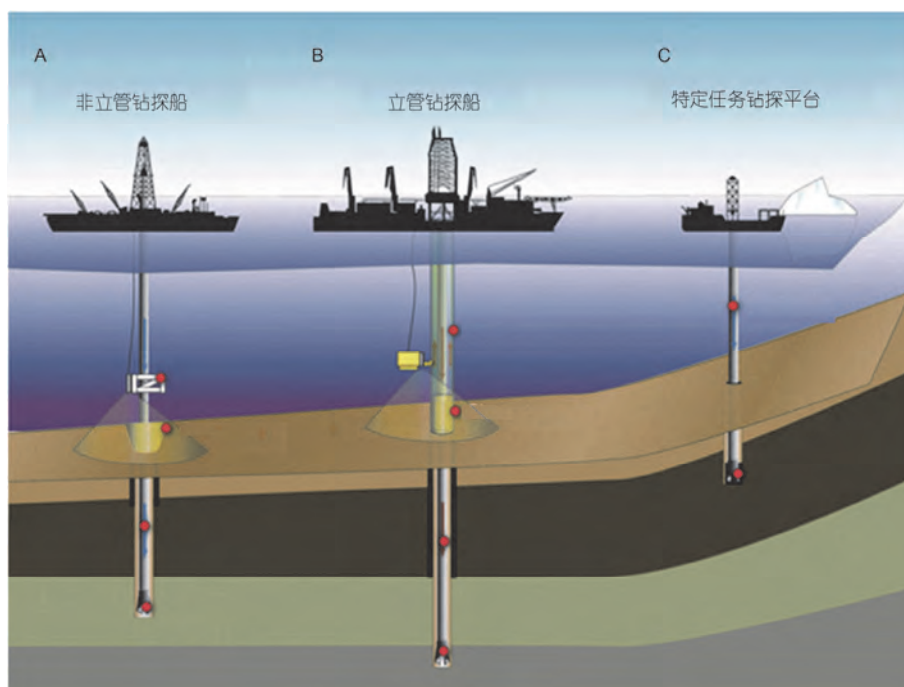


图2 大洋钻探 IODP 阶段的三大钻探平台. A, 美国“决心号”非立管钻探船; B, 日本“地球号”立管钻探船; C, 欧洲联合体租船提供的特定任务钻探平台(据 IODP 网页)

Figure 2 Three ocean drilling platforms in the IODP phases. A, Riserless drillship “JOIDES Resolution”, USA; B, Riser-equipped drillship “Chikyu”, Japan; C, Mission Specific Platforms, European Consortium. Based on IODP website

美元的预算, 实际投入可能高达 8.5 亿美元. 21 世纪出现的日本大洋钻探船, 标志着深海科学钻探能力的更新, 更是日本国际地位的跃升. 2002 年初钻探船下水仪式由日本公主剪彩, 并且向全国征集船名, 最后在收到的 9076 份建议中, 特意选一位小学四年级学生作为“地球号”的正式提名人. 2005 年“地球号”建成交付使用, 2007 年 9 月“地球号”驶向日本东部太平洋海域钻探深海发震带, 向全世界宣布其最终目标是要“打穿地壳”, 学术界也举世欢庆这场海上科学盛典的来临.

与美国、日本不同, 欧洲多国在 21 世纪里是集体参加大洋钻探的, 以德国、英国、法国为首的欧洲联合体 (European Consortium) 是大洋钻探第 3 个核心. 面对着美国、日本的大洋钻探船, 欧洲联合体的对策是另辟蹊径, 采用租船打钻的办法, 专攻大洋钻探大船打不了的海底, 比如北冰洋、珊瑚礁, 这样不用花大钱就能点燃学术亮点, 叫做“特定任务平台 (mission specific platform)”. 于是大洋

钻探进入第三阶段 (IODP, 2003~2013 年, 表 1), 从美国的 1 条钻探船变成 3 个钻探平台, 出现了空前的繁荣期. 可惜事与愿违, 大洋钻探的高潮期没有维持几年, 就逐渐冷落下来. 在 2014~2017 年的 4 年里, “地球号”总共只在 2016 年执行过两个大洋钻探航次, 其他 3 年处于停顿状态, 国际大洋钻探计划几乎全靠一条美国钻探船在执行 (表 2), 与 10 年前“地球号”出航时的盛况大相径庭^[5]. 是什么因素影响了“地球号”在国际大洋钻探计划中的活动?

问题首先来自运行经费. 与“地球号”设计和建造时的 20 世纪 90 年代相比, 原油价格在 21 世纪前 10 年就翻了两番, 航次成本的暴涨使原定的预算计划落空; 而金融危机和财政困难, 又使得政府支持力度大幅度下降, 于是出现了造船容易用船难的局面. 同时发生的是技术问题, 10 年来“地球号”始终在日本东部深海钻探发震带, 但是这些年黑潮的位置也总保持在该区流经, 湍急的海流给钻探带来了多次伤害. 更大的伤害来自 2011 年的日本东北大海啸,

表 2 美国、日本、欧洲联合体三家钻探平台执行国际大洋钻探航次的数目

Table 2 Number of international ocean drilling expeditions implemented by the USA, Japan and European Consortium

年份	美国“决心号”	日本“地球号”	欧洲联合体“特定任务平台”	合计	美国:日本:欧洲联合体组织航次所占比例
2003~2013	30	13	5	48	1:0.43:0.16
2014~2017	20	2	3	25	1:0.10:0.15

灾害发生时“地球号”正抛锚在附近岸外,被撞上码头严重受损。日本是个地震多发国家,建造“地球号”的首要应用目标是钻探海底7000 m处的发震带,以揭示机制、预测地震,但是10年来才打了3000 m,离俯冲板块发震带的目标还十分遥远。至于打穿地壳的“莫霍钻”,“地球号”10年来钻探实践的表明技术条件并不成熟,要实现建造时提出的口号并不容易。

另一方面的问题来自国际关系。大洋钻探是地球科学界规模最大的国际计划,而领导权是任何国际计划不容回避的问题。日本钻探船比美国的大、投入也比美国多,从2003年开始,理所当然地要与美国分享大洋钻探的领导权。先是在华盛顿和东京各设一个国际大洋钻探总部,后来应日方要求,把华盛顿的总部合并到东京。但是美国很快提出两国共同管理的效率太低、费用过高,于2013年突然单方面宣布“分家”——撤销大洋钻探总部,改为两条钻探船由美国、日本两国分头经营,同时保留“大洋钻探”科学总计划不变。此举使日方十分被动,结果世界各国都参加美国“决心号”船的大洋钻探,只有少数成员象征性地缴少量费用参加日本“地球号”的大洋钻探,实际上又回到了原来由美国一家主持的局面。日本20多年前斥巨资造大船、争取国际领导权的计划,陷入了进退两难的尴尬境地。

当然,美国和欧洲联合体也都各有难处。比如在2014年前的10年里,美国国家基金委员会(National Science Foundation, NSF)的预算减少了10%,而大洋钻探(IODP)和海底观测网(OOI)为主的海洋学科重大基本设施的支出,同期里反而增加了18%,使得可供海洋科学研究用的经费大为减少,科学家申请基金的成功率急剧下降。情况告急,美国国家研究理事会(NRC)赶紧请21位科学家加以评审,在2015年提出报告,建议大洋钻探投入减少10%、观测网减少20%,用来填补科研经费的短缺。处在经费危机下的NSF,提出了“匹配性建议项目(complementary proposal project, CPP)”的形式,为大洋钻探的运行谋求外来资助:如果建议国同意补交经费,钻探航次就可以提前安排,于是中国、印度和巴西,都通过CPP的途径实现了各自岸外的航次。至于欧洲联合体,也由于财政拮据,减少其原定组织的航次,也就是减少了投入(表2)。这种局面,其实就是近年来国际经济重心转移,新兴国家实力上升的一种反映,客观上为我国进一步“出手”准备了条件^[6]。

2 石破天惊:大洋钻探的科学发现

尽管道路曲折,大洋钻探半世纪的学术贡献却是历史性的。50年来,大洋钻探作为深海探索的世界航母,始终引领着世界地球科学,以其新发现改变着地球科学各个领域的发展轨迹。人类对深海底下的了解太少,纵然每个航次的效果不一,有的立竿见影、有的要等多年分析,但都为地球科学知识库增添了耀眼的珍宝。大洋钻探早期的

贡献集中在板块学说和古海洋学两大方面,曾被比喻为大洋钻探产生的“双胞胎”^[7],而且至今仍在茁壮成长,值得分别加以说明。

一部大洋钻探史,满载着来自深海底的意外发现。DSDP初期的航次,就在证实海底扩张的同时发现了大洋地壳的年龄新得出奇:地球年龄有40多亿年,大陆地壳平均有20多亿年,而大洋地壳却最老只有2亿年。原来大洋的底板是一边扩张新生、一边俯冲隐没而不断更新着的,于是大洋成因的谜底开始浮出水面^[8]。至于大陆究竟如何裂开变成大洋,大洋钻探进一步瞄准了大陆边缘寻求答案。尤其是在北大西洋欧洲岸外的伊比利亚边缘,21年里组织了5个航次在16个站位钻探基底,终于揭示出地壳破裂、海水下渗、地幔蛇纹岩化的大陆岩石圈破裂过程,发现大陆破裂有着自下而上的“富岩浆型”和自上而下“贫岩浆型”两种模式^[9]。这类发现含有巨大的潜在经济价值,因为世界的大油田主要形成于大陆张裂的早期,张裂过程的认识为含油盆地的勘探提供了理论基础,于是被奉为所有被动边缘的圭臬;直到最近南海大洋钻探的结果,才对其普适性提出了挑战^[6,10]。

地幔是地球的主体,占据地球体积的4/5、质量的3/4,然而人类至今没有能够穿过地壳,一睹原质地幔的真面目,而这正是“莫霍计划”的初衷。时至今日莫霍之梦未圆,而学术界对“莫霍面”的理解已经大不相同。洋壳在大洋中脊产生,但是大洋中脊的扩张速率快慢不一,快速的如太平洋每年10~20 cm,大西洋每年2~4 cm,而超慢速的西南印度洋每年扩张不足2 cm,那里的莫霍面不见得就是地壳和地幔的分界,也有可能是地幔岩蛇纹岩化的下界。因此,大洋钻探一方面积极筹备,在东太平洋选择洋壳最薄的地方实施原来意义上的莫霍钻;另一方面又设立了“慢速莫霍计划(SloMo)”,探索西南印度洋的另类“莫霍面”^[11]。

至于古海洋学,就是利用大洋钻探取得的沉积岩芯,通过分析追溯大洋海水和气候环境的演变历史。最早的戏剧性发现是“地中海变干”事件:1970年DSDP第13航次在地中海的深海底,钻到了石膏和岩盐的蒸发岩层,说明600万年前由于和大西洋的通道切断加上干旱气候,地中海从深海收缩为盐池,水面低于大洋数千米,经过30万年之后才和大西洋恢复联通,重返深海景观^[12]。同样惊人的发现来自北冰洋:2004年大洋钻探用破冰船钻入北冰洋海底,发现北冰洋在五千万年前原来是个湖泊,湖面漂着淡水浮萍满江红,属于亚热带气候,而且湖水肥沃,沉积物里的有机碳含量超过5%,是个理想的生油环境^[13,14]。大洋钻探为重大的地质灾难事件提供证据,比如白垩纪末小行星撞击事件导致恐龙灭绝,大洋钻探先在大西洋深海沉积中找到了撞击事件产生的铱异常,最近又在墨西哥岸外钻探希克苏鲁伯(Chicxulub)陨石坑,直接为撞击事件取得了现场物证^[15]。

在古气候方面,大洋钻探揭示地质历史上暖期气候的情景,在当前全球变暖的威胁下显得尤为珍贵。比如钻探大西洋追溯 5500 万年前海底温室气体溢漏引起的高温事件,在不过 2 万年的时间里,就有 2 万亿吨的甲烷从水合物中释出,使得水温上升 5~9℃,同时引起海水酸化,海底碳酸盐软泥突然变成红黏土^[16]。近期的例子来自加利福尼亚岸外圣巴巴拉盆地的纹层沉积,由于较暖的中层水流入盆地使海底可燃冰溶解、甲烷释出,引起水底缺氧,造成了千年尺度的周期性纹层沉积^[17]。这些不同时间尺度的深海记录,都为未来地球可能出现的暖室气候灾害,提供了预警实例。

在 DSDP 和 ODP 辉煌成就的基础上,2003 年大洋钻探迎来了 IODP 的新阶段(表 1),再度带来了学术上的新意。进入 21 世纪以来,地球科学在跨越圈层研究“全球变化”的基础上,又进一步向地球深部推进,地球表面与内部过程相结合形成新颖的地球系统科学,被称为“行星循环(planetary cycle)或者“地球连接(Earth connection)”,作为鲜明标记贯穿在 2013~2023 年的 IODP 科学计划之中^[18]。如果说板块理论的证明是大洋钻探的早期目标,那么现在又进一步意识到:板块运动其实是地幔环流在地球表面的表现,属于“行星循环”的表面部分。“行星循环”的重点在两方面:一方面是向下的俯冲带,另一方面是向上的洋中脊和可能由地幔柱产生的巨型火成岩省,介于两者之间的板块运动,其实是这大循环中的一部分。俯冲板块将物质、能量从表层带入深部,改变着地幔的成分^[19];地幔物质又通过洋中脊和地幔柱进入地球表面,改变着海水和大气的成分,将地球内部的能量释放到表层^[20],这就是表层与深部的相互作用,也是 IODP 许多航次的主题。

大洋钻探至少有 10 个航次探索过巨型火成岩省(large igneous provinces),这是基性岩浆侵入或者喷发形成的巨大地质体,既可以是陆地上印度德干高原、四川峨眉山之类的溢流玄武岩,也可以是洋底高原,其中最大的一个是西南太平洋的翁通-爪哇大火成岩省,现在面积接近青藏高原、体积超过两个南极冰盖,当时可能更大。这类大火成岩省的根基在地球深部,推测是地幔柱的产物,而其影响遍及地球表层^[21]。翁通-爪哇海底高原的形成,就曾诱发了白垩纪中期全球的海平面上升和大洋缺氧事件,沉积了深海大洋的黑色页岩。再说大洋中脊绵延 6 万千米,是地球上最大的山脉,又是地球内部物质和能量的窗口,数以百计的海底热液系统分布在这里,将地球内部产生的 25%~30%的热量向外输送;海水中多种元素在这里与地球内部发生交换,直接影响到海洋生物骨骼的成分和生物演化的进程。至于大洋的板块俯冲带,不但是地震灾害的源头——发震带的所在,也是地球表面物质返回地球内部的主要渠道,是研究大陆地壳来源和大洋水演变的关键环节。学术界提出了“俯冲带加工厂”的概念^[22],把俯冲带比喻为一个几乎是“零排放”的工厂,原料是大洋壳和大洋沉积,

产品是岩浆和大陆壳,而生产过程的“废品”就是经过脱水和熔融过程后俯冲到地幔深处的板片。

“行星循环”影响地质环境的途径,主要是地球内部和表层的水循环和碳循环,因此构成了大洋钻探新阶段的重点研究方向。现在知道,地球有着内外两个水储库,表层系统以液态的海水(H₂O)为主,地球内部以地幔矿物的羟基(-OH)为主,所以说有“海底下的海洋”,属于大洋钻探的目标之一。对于地球深部的碳循环,我们的知识比水循环更少。与水不同,地球的碳储库主要在其内部:岩石圈的碳比地球表层多出将近 2000 倍,而地幔的碳储库又比岩石圈高出十几倍,因此地球深部碳储库有一点风吹草动,都会影响地球表层的环境^[23]。大洋钻探发现的“可燃冰”和“深部生物圈”,虽然触及的只是地球内部碳储库的顶面,所产生的资源环境效应已经不容低估^[18]。

限于篇幅,本文有意绕开了“深部生物圈”的重要话题,这是个正在成为大洋钻探最新亮点的新领域,有待以后专门讨论,因为生命过程与物理过程的结合,很可能是地球系统相互作用的最顶层。总之,大洋钻探 50 年的科学发现已经渗透到地球科学的各个领域,影响着各个学科的发展方向,产生了巨大的辐射效应。尤其是进入 21 世纪以来,地球表层和深部之间的闸门正在打开,地球科学又以全新的姿态在向前发展,格外凸显出大洋钻探计划科学引领作用的威力。

3 奋起直追:攀高峰进入前沿阵地

1968 年美国开始深海钻探,而当时我国的科学界正深陷在文革灾难之中,对境外的发展一无所知。直到 20 世纪 70 年代文革后期,尽管“文攻武卫”的硝烟未散,板块学说却通过傅承义、尹赞勋、李春昱等老前辈的翻译在中国悄然传开,而随着板块学说又传来了“大洋钻探”的新名词。抚今忆昔,当时这类外国科学的前沿,对于“隔世”数十年的中国人来说就像神话一样遥远。中国参加大洋钻探的意愿,直到 20 世纪 80 年代才产生。随着 ODP 新阶段的逼近,通过海外地质学家许靖华等人的介绍,中国参加大洋钻探国际计划的呼声越来越高,“大洋钻探委员会”被组织起来进行推动。但是在当时严重缺乏外汇的情况下,每年 50 万美元的参与成员费简直是天文数字。又经历 10 年,经过十多位院士上书,终于在 1996 年获得国务院批准参加。接着又克服了美国军方的无理干扰之后,中国才于 1998 年正式加入大洋钻探国际计划,至今正好 20 周年。

值得庆幸的是,我国当时提出钻探南海追溯东亚季风演变的建议书,在 1997 年全球建议书的评比中以第一名的优势脱颖而出,立即被安排为 ODP 184 航次,于 1999 年春在南海实施,于是在中国科学家提议、设计和主持下,实现了中国海域首次的深海科学钻探^[24]。当然,南海首次大洋钻探亦非一帆风顺。按计划,第一口钻井应当打在南沙海域的深水处,就在大洋钻探船进入南海之前,当地出

现了海盗事件。当时美国船长以安全为由向全体宣布，船只改道直奔东沙，放弃南沙井位。全靠当时我国科学家严正交涉、坚持原定计划，并得到我国主管部门的有力支持，发电告知“中国方面将关注你们航次”的情况下，南沙深井终于开钻，并且在开钻时美国船长下令，在船上升起中国国旗。迄今为止，这是南沙唯一的深海井，也是 ODP 184 航次里科学成果最多的一站。20 年前大洋钻探首航南海，采集了 5000 m 的深海岩芯，取得了西太平洋区最佳的长期沉积记录，发现了气候演变长周期等多种创新成果，使我国一举进入国际深海研究的前沿。尽管只是两个月的航次，大洋钻探为我国地球科学注入了新鲜活力，从南海取得了 3000 万年来的深海连续记录，成为西太平洋地区最好的深海地层记录^[25]。大洋钻探也为南海的资源勘探提供了地质基础，为 21 世纪进军深水油气盆地进行了学术准备。

在成功赶上 20 世纪大洋钻探尾声之后，我国对南海深部的研究在 21 世纪里乘胜前进。2011 年初，国家自然科学基金委员会启动“南海深部过程演变”重大研究计划，这项为期 8 年的计划是我国第一次大规模的深海基础研究，动用大洋钻探当然是最有效的探索手段。南海深部最大的奥秘，莫过于其形成机制，而只有穿过几千米海水和深海沉积，才能钻取上岩浆岩的基底，追溯大陆破裂、海盆出现的过程。为此，“南海深部计划”组织了多次国际和国内的研讨会，递交了多份钻探建议，争取大洋钻探船再来南海，揭开其成因之谜。但是国际计划并不按照我们意愿，更何况中国在大洋钻探里涉足不深，缴纳经费也还不及当时国际总预算的 1%，多年来世界各国有多少份已经通过的钻探建议书在等待实施，想要大洋钻探再来南海又谈何容易。

然而我国科技投入的增加和美国 NSF 经费的困境，却从客观方面为我们创造了机会。2013 年 IODP 新阶段开始，中国从大洋钻探的参与成员升级为全额成员，美国 NSF 又推出了 CPP 的新政策，建议国可以通过增加经费投入使得申请航次优先安排。就这样，经过我国学术界在业务上通力协作，在程序上抓住国际机遇，在国家财政的大力支持下，居然接连实施了南海 3 个半大洋钻探航次，集中探索深海盆的基底^[6]。我国先后由 3 位专家担任首席科学家，上船科学家总数达 38 人次，空前增强了中国在大洋钻探中的份量。在 2013~2017 年间，我国参加美国“决心号”和欧洲联合体“特定任务平台”航次的科学家总共 84 人次，占“决心号”上船科学家总数的 15%，人数仅次于美国，高居国际第二位。

经过前后 4 次的大洋钻探，南海正在成为地质演化过程全球研究程度最高的边缘海。进行过大洋钻探的海洋很多，但是大多只钻探沉积层，很少能探索基底。尤其是通过多个航次钻探基底，从裂谷作用开始追踪到洋盆消亡完整历史的，南海是第一个。目前航次后的分析工作正在紧锣密鼓加紧进行，现在谈论研究结论为时尚早。但是从初步结果判断，大洋钻探的结果可望挑战国际学术界关于南

海成因的主流观点，进而为边缘海的演化机制开拓了新视角。总之，中国参加国际大洋钻探的 20 年里，对外不断增强参与力度和国际影响，对内又推动着地球科学界整体向深海拓展。截至 2018 年 9 月，我国已有 34 个单位的 130 位科学家参加了大洋钻探航次，其中包括国家杰出青年科学基金获得者 13 人，优秀青年科学基金获得者 8 人，形成了一支能够直接面对国际竞争的深海科研队伍。他们在国际刊物上发表第一作者的文章超过 420 篇，估计还有近百名研究生以大洋钻探为题撰写论文。可以大胆断言：“近年来，我国已经成为大洋钻探活力增加最快的国家”。

4 展望未来：抓机遇促进科学转型

当世界各国为大洋钻探“知命”之年做寿的时候，不免也会产生一个疑问：大洋钻探还能继续多久？在这里我们不想为一项具体的国际合作计划“算命”，能够推测的是大洋钻探在科技层面的未来。无论是为了资源还是环境，人类必然要向地球深部进军，大洋钻探必定首当其冲。人类在应对“上天、入地、下海”三大科技挑战中，“入地”的成绩最差：相对于地球半径，最深的矿井不及其 1%，最深的钻井不及其 2%。深海海底是离地球内部最近的地方，从深海海底打钻，至今还是人类直接探测地球内部无可替代的高效途径。大洋钻探既下海又入地，面临的是双重挑战，然而正是依靠各国科技界的共同努力，才能在半个世纪里谱写出彪炳史册的科学华章。大洋钻探既然要求长期持续的大量经费投入，始终保持最前沿的科技水平，也只有通过国际合作才能胜任^[4]，这就是我们推测大洋钻探光明未来的依据。

大洋钻探 50 年成功的要诀在于与时俱进。每个阶段的科学计划不但提出新的科学目标，同时还引入新的技术。就当前而言，面对莫霍钻一类的硬岩石钻探任务，科技界正在探索第三代大洋钻探船的技术前景。比如将钻机直接投到海底、将泥浆泵安置海底的新型钻探技术，已经初步实现；而面对高温高压的地质条件，钻具材料都需要从金属更改为碳材料，所有这些是高新技术的发展空间。从战略层面看，年逾半百的大洋钻探计划的内部结构也有待改造。经过 50 年的钻探，大洋钻探初期那种科学目标简单、技术难度不高，可以“一钻定天下”的站位已经越来越少，仅靠钻探单一手段解决科学问题的时代正在消逝，而与深网观测、深潜探索相结合的“三深”技术，正在成为未来大洋钻探的新形式。比如说，多年来在钻井中设置“海底井塞”，对海底下液体流动和地壳运动进行长期实时监测，甚至进行微生物培养实验，就是大洋钻探成功的一例。欧洲几年前提出“深海与海底科学前沿”(deep sea and sub-surface frontiers, DS³F)计划^[26]，体现了“三深”结合的新思路，就值得我们在向深海进军中密切注意。

在做出科学贡献的同时，大洋钻探 50 年也为大型科学国际合作，积累了宝贵的精神财富。就个人而言，每个

航次船上两个月里的同舟共济,为世界各国不同专业的科学家营造了独特的交流空间,给他们留下终生难忘的学术经历。就整体而言,50 年经过 4 个阶段的学术规划,255 个钻探航次的论证和组织,大洋钻探从战略研讨到管理运作的各个层面,都为国际科学史留下了珍贵的经验教训。回顾起来,大洋钻探最重要的特色在于其学术的前瞻性和开放性。大洋钻探航次的选择,由各国科学家共同投票择优录取;大洋钻探的科学计划,必须得到世界公认。这样的计划只能由国际学术界共同制定,在这里任何国家的盲目自大都无济于事。就经费而言,随着世界经济格局的变化,各国对大洋钻探的投入也此起彼伏。然而各国在大洋钻探中投入和产出的相对比例,却大相悬殊,值得指出的是荷兰和澳大利亚,都以少量的投入取得重大的收获。其中澳大利亚得益于地理位置,因为南半球的大洋是国际钻探的热点;而荷兰主要依靠人才,少量人员的参加换来了重大的研究成果。在这场半世纪的国际深海科技竞赛中,中国迟到了 30 年,比美国、日本和欧洲联合体的资历浅得多。但是决心建设海洋强国的中国人,正以初生之犊的勇气和后来居上的雄心,抓住历史机遇试图问鼎大洋钻探的科学顶峰。与此同时,我们又必须脚踏实地、胜而不骄,认真研究和吸取 50 年来的国际经验,避免陷入前人的误区。

围绕“建设海洋强国”的目标,我国必将在国际大洋钻探中发挥更大的作用,当务之急是以平台提供者的身份进入参加国的核心层^[6]。与此同时,我国还需要从战略高度全面考虑在这项国际大计划中所起的作用。比如随着海洋科学的发展,大洋钻探的地理覆盖面必将扩大,越来越多国家的“专属经济区”将成为钻探的对象,其中许多属于发展中国家。长期以来大洋钻探只是个“富国俱乐部”,如何

联合发展中国家的科学家参加深海研究,扩展参与大洋钻探成员国范围,将会是摆在我们面前的任务。大洋钻探规划所采用的是几十年的时间尺度,尤其是其硬件建设,必须有足够的前瞻性。比如作为大洋钻探第二代的“地球号”钻探船,是在日本经济鼎盛、石油低价时期开始设计,等到建成运作时这两大优势尽失,于是陷入难以使用的困境,原定打“莫霍钻”的目标一时也难以实现。将来建造世界第三代大洋钻探船,必须在发展新技术、面对新目标的前提下,凝聚国际科技界的共同智慧,在充分国际研讨的基础上着手建造,才能经得起时间的考验。

我国的各门自然科学中,地球科学起步较早。早在晚清的“洋务运动”中,随着发展矿业就带来了地质学。尤其是改革开放 40 年,在政府的大力支持下,我国已经形成了世界上最大的地球科学队伍。但是在整体上,我国地球科学依然没有摆脱发展中国家“原料输出型”的范畴,有待向发达国家的“深加工型”转变,向地球系统科学的方向转型。只有陆上、缺乏海洋,尤其没有深海,是发展中国家地球科学的一大特征。因此发展大洋钻探为旗帜的深海地球科学,是我国地球科学转型的必由之路。现在国际大洋钻探面临着研讨和制定 2023 年后新 10 年科学计划的任务,我国应当尽早从学术上着手准备,争取主办国际科学大会,为制定计划做出实质性贡献。我们多次说过:“由于历史的原因,中国错过了 19 世纪和 20 世纪地球科学的革命,对于进化论和板块学说的建立愧无贡献。现在地球科学向系统科学的方向发展,势将引来 21 世纪的又一场科学革命,而华夏振兴声中的中国正在经历着科学发展的黄金时期,应当面对国际、朝向未来,将大洋钻探国际合作视作自身发展的重大机遇,争取为全人类做出自己的历史贡献”。

推荐阅读文献

- 1 IODR-China Office, State Key Laboratory of Marine Geology. Fifty Years of Ocean Drilling (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 2018. 1–396 [中国大洋发现计划办公室, 海洋地质国家重点实验室. 大洋钻探五十年. 上海: 同济大学出版社, 2018. 1–396]
- 2 Jin X C, Zhou Z Y, Wang P X. Ocean Drilling Program and Earth Science in China (in Chinese). Shanghai: Tongji University Press, 1995. 1–349 [金性春, 周祖翼, 汪品先. 大洋钻探与中国地球科学. 上海: 同济大学出版社, 1995. 1–349]
- 3 Hsü K J. Thirteen years of deep-sea drilling. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1982, 10: 109–128
- 4 Smith D K, Exon N, Barriga F J A S, et al. Ocean drilling: Forty years of international collaboration. *EOS*, 2010, 91: 393–404
- 5 Wang P X. China's participation in the Ocean Drilling Program: Decade retrospect and future prospect (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2014, 29: 322–326 [汪品先. 我国参加大洋钻探的近十年回顾与展望. *地球科学进展*, 2014, 29: 322–326]
- 6 Jian Z M. Towards the scientific frontier of deep-sea research—Progress of China's participation in ocean drilling (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 3877–3882 [翦知潜. 进军深海科学前沿——我国参与大洋钻探的进展. *科学通报*, 2018, 63: 3877–3882]
- 7 Hsü K J. *Ein Schiff Revolutioniert Die Wissenschaft*. Hamburg: Hoffmann & Campe Verlag, 1982 [许靖华. 何起祥, 译. 地学革命风云录. 北京: 地质出版社, 1985]
- 8 Müller R D, Sdrolias M, Gaina C, et al. Age, spreading rates, and spreading asymmetry of the world's ocean crust. *Geochem Geophys Geosys*, 2008, 9: Q04006
- 9 Peron-Pinvidic G, Manatschal G, Osmundsen P T. Structural comparison of archetypal Atlantic rifted margins: A review of observations and concepts. *Mar Pet Geol*, 2013, 43: 21–47
- 10 Sun Z, Jian Z, Stock J M, et al. South China Sea Rifted Margin. In: *Proceedings of the International Ocean Discovery Program*, 2018, 367/368, <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.367368.2018>

- 11 Dick H J B, MacLeod C J, Blum P, et al. Expedition 360 Preliminary Report: Southwest Indian Ridge lower crust and Moho. International Ocean Discovery Program. 2016, <http://dx.doi.org/10.14379/iodp.pr.360.2016>
- 12 Hsü K J. The Mediterranean Was a Desert: A Voyage of the Glomar Challenger. New Jersey: Princeton University Press, 1982 [许靖华, 朱文焕, 译. 古海荒漠. 北京: 三联书店, 2003. 215]
- 13 Moran K, Backman J, Brinkhuis H, et al. The Cenozoic palaeoenvironment of the Arctic Ocean. *Nature*, 2006, 441: 6012605
- 14 Wang P X. Ice breaking expeditions: The present and past of the Arctic Ocean (in Chinese). *Chin J Nat*, 2008, 30: 247–251 [汪品先. 破冰之旅: 北冰洋今昔谈. 自然杂志, 2008, 30: 247–251]
- 15 Morgan J, Gulick S, Mellett C L, et al. Proceedings of the International Ocean Discovery Program. Chicxulub: Drilling the K-Pg Impact Crater, 2017, 364, <https://doi.org/10.14379/iodp.proc.364.2017>
- 16 Zachos J C, Dickens G R, Zeebe R E. An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics. *Nature*, 2008, 451: 279–283
- 17 Kennett J P, Ingram B L. A 20000-year-record of ocean circulation and climate change from Santa Barbara Basin. *Nature*, 1995, 377: 510–513
- 18 IODP Office. Illustrating Earth's Past, Present, and Future. Science Plan for 2013–2023. Washington DC: IODP, 2011. 1–84 [中国综合大洋钻探办公室, 译. 国际大洋发现计划. 照亮地球过去、现在与未来. IODP 2013–2023 科学计划. 上海: 同济大学出版社, 2011. 1–84]
- 19 Sleep N H, Bird D K, Pope E. Paleontology of Earth's mantle. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2012, 40: 277–300
- 20 Wang P X. Interactions between Earth's deep and surface (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2009, 24: 1331–1338 [汪品先. 地球深部与表层的相互作用. 地球科学进展, 2009, 24: 1331–1338]
- 21 Coffin M F, Duncan R A, Eldholm O, et al. Large igneous provinces and scientific ocean drilling: *Status quo* and a look ahead. *Oceanography*, 2006, 19: 150–160
- 22 Tatsumi Y. The subduction factory: How it operates in the evolving Earth. *GSA Today*, 2005, 15: 4–10
- 23 Wang P X, Tian J, Huang E Q, et al. Earth System and its Evolution (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018. 1–565 [汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演变. 北京: 科学出版社, 2018. 1–565]
- 24 Wang P, Prell W, Blum P, et al. Proceedings of Ocean Drilling Program, Initial Reports. 184. College Station: Ocean Drilling Program, 2000. 1–77
- 25 Liu T S. Significance of ocean drilling and China's paleoceanographic studies. *Chin Sci Bull*, 2003, 48: 2523 [刘东生. 大洋钻探与我国古海洋学研究的国际意义. 科学通报, 2003, 48: 2205]
- 26 Kopf A, Camerlenghi A, Canals M, et al. The Deep Sea and Sub-Seafloor Frontier. Germany: European Commission, 2012. 1–57

Summary for “大洋钻探五十年: 回顾与前瞻”

Fifty years of scientific ocean drilling: Review and prospect

Pinxian Wang

State Key Laboratory of Marine Geology, School of Ocean and Earth Science, Tongji University, Shanghai 200092, China

E-mail: pxwang@tongji.edu.cn

Scientific ocean drilling since 1968 represents the longest-running and most successful international collaboration in Earth science. Over the 50 years, it drilled more than 3700 holes and recovered some 400000 m of cores from the global ocean, offering tremendous new insights into the way our Earth system works and continuing to revolutionize Earth science as a whole. Although China joined this program of international cooperation only in 1998, thirty years after its inception, it becomes one of the most active countries in the recent years largely through the implementation of successive drilling expeditions to the South China Sea.

The present paper is an attempt to briefly review the half-century progress of the international ocean drilling programs and to provide an outlook for its future. As far as the deep-sea remains the science frontiers and drilling provides the unique tool of direct access to the deep sub-seafloor world, the program of international cooperation will continue and develop, yet its structure and performance will change. With the further progress in technology, for example, the long-term sea-floor observation will be incorporated into the program as a major component, and a new generation of drilling platform and tools will be needed. Geographically, ocean drilling program should cover many more new member countries. Driven by its rapidly developing economy, China is going to enhance its input into the international cooperation and to enter the leading core of international ocean drilling as a platform provider.

ocean drilling, deep-sea research, revolution in Earth science, international cooperation

doi: 10.1360/N972018-01162