

第 1 章 前 言

1.1 海洋问题

海洋面积占地球表面的 72%，平均深度达数千米，是巨大的、多变的潜在生存空间。海洋影响气候和天气，控制着全球热量和淡水交换。数以百万计的人口以海洋为生，从事捕捞、能源和矿物资源开发、交通运输、国防和休闲活动。海洋为地球生物多样性做出了巨大贡献。洋底沉积物保存着生命演变、大陆漂移和地球气候史变迁记录。海洋带给人类的并不总是那么光辉灿烂。海洋会突发洪水、风暴、海平面变化和海岸侵蚀，对人类生命财产构成威胁。

人类及其对海洋环境的影响不可避免地威胁着海洋的自然恩赐。过度捕捞导致许多鱼类资源急剧衰退。人类的影响正在改变生物多样性的格局，这种改变可能是不可逆转的。海洋日益广泛地被用来进行油气开采和世界贸易。人口正在不可抗拒地增长，尤其在海岸带地区，居住人口已占世界总人口的一半以上。脆弱的沿海系统和沿海海域所承受的巨大压力日益严重地损害着环境。海洋还被直接和间接地用作废物倾倒场，大量废物最终进入到海洋，影响海水水质，影响环境和人类健康。陆地径流挟带化肥、农药、杀虫剂和日益增长的复杂化学品污染沿海海域。这些污染物以拟态荷尔蒙破坏了生物的内分泌系统。有毒藻华也日益频繁，一些沿海海域正遭受到营养盐富集、过度生产力和缺氧的综合作用，往往导致富营养化。压载舱水排放正把外来物种引入到沿海水域，全球增温正引起珊瑚广泛漂白和死亡。我们未能如期待的那样，成功地保护好人类的地球，维护人类的未来，已引起广泛的关注（Watson 等 1998）。

然而这一切并非在劫难逃。例如，近些年国际海事组织关于油轮航运的有效控制措施，已极大地减少了油轮向海洋泄漏的石油量。渔业已逐渐形成新的管理原则，各国已一致同意控制陆地污染物径流。本书建议，只有有效地解决地方、区域和全球的环境问题，我们才能以可持续方式管理海洋环境。有效管理意味着要以海洋科学技术所能提供的最佳认识 and 手段武装管理者。已形成的部分共识是：我们再也不能采用行业、部门方式处理环境问题。无论人们通常以怎样不同的态度对待环境问题，其间实质上存在着复杂的物理、化学和生物学联系。在未来的综合管理方式中，这些互相关联的问题必须予以解决。在本书策划筹备阶段，我们认为，有必要将涉及海洋的不同科学团体聚集在一起，在海洋科学家和海洋管理者之间开展对话，考虑如气候或海岸等广泛的议题，而不是仅考虑单一科学学科或狭隘的部门问题。

1.2 本书基本内容

本书阐明，随着海洋科学技术的发展和推广应用，哪些主要的海洋环境问题能得到缓解。本书是为决策者、政府官员、资源管理者、科学家、媒体和公众撰写的。书中给出了

关于海洋的明确信息，提出了如何有效地、经济地为多种目的搜集和利用海洋信息的建议。本书还阐述了怎样进行投资才能取得最佳效果；阐明了公众对环境变化的方向、量值和影响日益迫切的关注，这有助于解答如下问题：海洋正在发生变化吗？有哪些变化证据？为什么发生变化？发生了怎样的变化？本书各章以传达重要信息的历史实例阐明了具有重要社会意义和重大科学价值的问题。

为了与推动综合性发展趋势保持一致，本书的重点放在用户集团感兴趣的广泛而明确界定的主要课题方面。本书不是对各海洋科学技术学科的广泛研究，例如，海洋地学只一笔带过。本书以社会广泛关注的问题为基础，各章的核心内容是：基础海洋科学、海岸带研究、气候、渔业、海洋产业、海洋运输和导航。各章以如下交叉问题，如业务化海洋学、海洋仪器、合作框架和能力建设与以上内容相互补充。从第一章“前言”至最后一章“2020年的展望”，穿插安排以上内容。为了突出特别重要的问题，我们不得不忽略若干重要问题，例如，我们有意很少涉及极地冰覆盖的海域以及与此有关的问题。

我们为什么要编写此书呢？有些组织经常需要停下来，审视它们处于何处，考虑它们向哪里发展，并规划前进方向。为了满足复杂世界人类定向的基本需求，政府间海洋学委员会（IOC）和其姊妹海洋组织，国际科学联合会理事会（ICSU）的成员之一——海洋研究科学委员会（SCOR）曾两次合作，共同评价海洋科技的进展。第一次是1969年在意大利蓬察岛（SCOR 1969），第二次是1982年在法国维尔弗朗什（IOC 1984），这两次会议采纳大量科学家的专长，会议报告以其特色指导两个组织的中心工作迈向20世纪末。在新千年向人们走来之际，IOC和SCOR认为，现在是再次审视的时候，这次得到国际科学联合会理事会（ICSU）的另一成员——环境问题科学委员会（SCOPE）的协助。然而，这次审视的重点则有所不同。这次审视将按照满足社会需求，迎接可持续发展的挑战条件进行。为此目的，我们采用Bruntland委员会的可持续发展定义：“满足现代人需求的发展应不牺牲后代人满足自身需求的能力”（UNCED 1987）。

我们的审查与各国政府的同类性质审查相互补充，将从以下3个角度提供一种国际判断力：政治上（向政府提供咨询）通过IOC；环境上（保护海洋环境的需要）通过SCOPE；科学上（国际科学界的需要）通过SCOR。在这一判断力范围内提出的一个问题是：发达国家和发展中国家如何能同样地解决重要的海洋问题。此问题自然涉及知识和技术转让问题，以帮助发展中国家建设开展海洋科技研究的能力，支持本国可持续发展。

本书不想评价海洋健康现状，这种评价需要更长的篇幅、更大的技术容量。想了解以上评价的读者可参阅海洋污染现状专家组（GESAMP 2001）最近的出版物。对于欲了解近20多年来海洋科学进步深入评价的读者，我们推荐美国科学基金会（NSF）主持的海洋科学全面审查的近期成果——《新千年的海洋科学》该报告已全文刊登在互联网上（<http://www.geo-prose.com/decadal>）。《2020年的海洋》与GESAMP和NSF的评价不同，它主要填补迄今其他机构遗留的空档，主要考虑与人类和可持续发展密切相关的海洋科学问题。

1.3 海洋科学预测

在撰写本书科技章节时，作者展望未来，从最近的发展趋势外推到2020年可能发生的事情。之所以选择这些作者，是因为他们所处的地位优越，对当前主流科学发展趋势有

相当程度的把握。他们清楚，我们已经了解哪些海洋科学技术，哪些仍需我们了解。因为他们对海洋和属于海洋部分的地球系统的自然变异了然于胸。他们还考虑了人类的许多期待和海洋环境及其资源所承受的压力。

本书所作的预测能有多大的准确度？1982年4月在法国维尔弗朗什举办了至2000年的海洋研究主要发展趋势的类似研究（详见IOC 1984）。与前次基于学科的研究有所不同，现在本书基本上是以问题为中心的研究。当我们将上次的预测与实际发生的进行比较时，我们发现，从整体而言，我们上次的预测是相当准确的，至少选准了对社会产生巨大潜在影响的两个跨学科研究领域：气候研究和生态系统研究。

在海洋物理学方面，上次讨论会预测的需要，通过世界大洋环流实验（WOCE）全球尺度的水文测量予以满足。上次讨论会预见到，海洋物理学研究可能日益广泛地支持世界气候研究计划（WCRP）的工作，预测通过赤道太平洋热带海洋全球大气（TOGA）实验得到验证，证明了厄尔尼诺事件是可以预报的。TOGA实验于1995年结束，留给我们业务化的热带大气海洋浮标阵，该浮标阵的测量资料用于今天的厄尔尼诺预报。上次讨论会认识到，如果我们要认识全球气候系统，世界海洋需要从整体上加以研究，从而影响了关于10年气候变化与预测（CLIVAR）世界气候研究计划新计划的制定。上次讨论会还认识到，气候研究需要全球监测系统，1991年全球海洋观测系统（GOOS）的诞生就实现了这一概念。当时认识到的若干发展趋势今日仍在继续，如锚系仪器阵、不可回收的仪器、自由漂流浮标、船用多普勒海流剖面仪、声学层析技术和海洋观测卫星等对海洋特性的频繁测量。上次讨论会预见到，为了改善面向海洋作业的海洋服务，海洋习性和性质的模拟和预报需求会日益增长；为了改善天气预报，海洋学家和气象学家之间合作会日益频繁。当时没有预测到的有：现在已广泛应用的剖面浮标的研制和正在成为研究用手段的自治式水下无人潜水器的研制。

上次讨论会预见到了海洋化学领域的需要，这种需要现在由海岸带海陆相互作用（LOICZ）计划予以满足，该计划的重点是海岸带物质通量，以便确定河流对海洋化学收支的影响。后来，联合全球海洋通量研究（JGOFS）测量二氧化碳的运输、归宿和对海洋环境的影响，也可满足以上需要。以上需要通过国际洋中脊跨学科全球实验（RIDGE）协调的主要国家计划予以满足，RIDGE计划调查当时发现的深海海底热液裂口的海洋化学影响。专门示踪实验也非常必要，如后来在WOCE计划中所应用的那样，这些实验可提供有关大洋混合的宝贵资料。

讨论会认识到促使化学发展的技术的重要性，预见到：海洋学以外的仪器进展将推动未来海洋化学研究，尤其有利于以下两方面的改进：气相色谱/质谱分析法，能鉴别单个的有机化合物；机载激光器，将推动需要综合数据的海洋化学研究的进展。讨论会还预见到取样设备改进的必要性，改进的取样设备可采集渐进增大而无污染的样品，同时也预见到以与物理数据相同时空尺度采集化学数据的传感器的改进，这一发展是认识海洋物理控制海洋化学的机制所必需的。

在海洋生物学方面，上次讨论会认识到今天还在继续的若干重大发展趋势，包括重视生态系统的性质和功能，量化通过海洋生态系统的有机碳通量的微生物作用。对物质在海洋生态系统中的结构、动力学和循环，现在至少通过全球联合海洋通量研究（JGOFS）和全球海洋生态系统动力学（GLOBEC）计划已取得深刻的认识。有关大尺度的大量研究的目的在于认识海洋生态系统的功能和结构，现正通过GLOBEC计划进行。

讨论会认为，现在有必要探讨生物过程与过程发生相关的物理系统性质 [例如，现正通过全球有害藻华生态学和海洋学 (GEOHAB) 计划予以实现]。现在认为有必要研究栖息在海底热液裂口的生物群落生态学。热液裂口生物现在采用现场实验进行研究，一些生物在保持原有环境压力的情况下被带到海面，供进行生理学研究。讨论会要求开展底栖边界层过程监测，这需要在近海海域建立长期观测站。

此外，改进近海生物资源的管理，将海洋生物学中的发现应用于水产科学，也有必要采用跨学科方法。这两方面也正在取得进展，但是，开发应用于渔业管理的基于生态系统的方法，还需开展大量工作。

讨论会认为，描述海洋生物学的薄弱环节可归之于两大因素：渔获物分类和鉴别的耗时过程和训练有素的分类学者人数锐减。

许多重大新发现或发展未被预见到是不可避免的，其中包括：

- (1) 开阔海广阔海域铁质贫乏；
- (2) 生物广泛利用化学信号；
- (3) 深海海底地下深层有微生物活动；
- (4) 20 世纪 90 年代末已广泛使用海洋水色卫星，测量浮游生物分布；
- (5) 声标志环和存档标志环能采集远洋动物的环境数据和习性数据；
- (6) 分子探头和 DNA 技术可用于揭示海洋生物和种群的基因结构；
- (7) 海洋生物技术将得到迅速发展。

如果本书所进行的预测如 1982 年的预测一样准确，那将是令人愉快的惊喜。我们的预测所要达到的目的是帮助投资工作确定近期的重点。

1.4 处于政治舞台变革中的海洋科学

科学或技术的进展不是对科学的发展进程产生的惟一影响，社会力量也起着作用。1994 年 11 月生效的《联合国海洋法公约》赋予沿海国家最大限度延伸领土，形成专属经济区的权利，专属经济区的存在对沿海国家研究和监测海洋的方式产生日益巨大的影响。

自 20 世纪 80 年代初以来，政治上突出环境的趋势日益明显。1992 年在巴西里约热内卢召开的“联合国环境与发展大会”发表了《21 世纪议程》，21 世纪的议程呼吁改善海洋管理和海洋可持续利用，包括开发全球海洋观测系统，执行全球海洋观测系统计划。2002 年 9 月在南非约翰内斯堡召开的“可持续发展问题世界首脑会议”将按《21 世纪议程》审议近 10 年所取得的进展。

1982 年末预见到的其他变化包括“冷战”的结束，这些未预见到的变化产生了许多对海洋科学有用的副产品。其中包括民用科学家在北极海冰层下使用核潜艇，以前机密的海洋资料解密，利用美国海军的水下声呐监视系统 (SOSUS) 监测地震，监听动物之间的通讯交流，通过海洋气候声学测温技术 (ATOC) 监测声信号，探测气候变化以及遥控无人潜水器和自治式无人潜水器的广泛开发和应用。

社会变革为科学气候带来积极的变化，促进了海洋科学技术的进展，这些进展是 1982 年的预测不可能预见到的。今后 20 年，我们没有预见到类似变革也可能发生，海洋科学技术因此而取得更大进展。

(Colin P. Summerhayes, John G. Field, Gotthilf Hempel)

第 2 章 海洋研究

地球是一个被蔚蓝色海洋覆盖的行星，卫星照片如此清晰和美丽地证实了这一点。这一事实对于生物进化的速度和方式以及文明的发展产生巨大的影响。水具有易于传递热量和动量的特殊物理特性。海洋吸收热量并在几十年，甚至几百年期间释放热量，而大气的能量释放只有几周的时间滞后。这一非常缓慢的释放过程使海洋起到一种气候变化调节器或抑制器的作用。海水的庞大体积，加上其巨大的热容量，调节着我们的气候并极大地影响着气候。地质证据表明，过去的环流变化伴随着大尺度的气候变化。水的另一个重要特性是其溶解能力，它是大多数元素和化合物的溶剂。海水因此不仅含有盐分，而且密度比淡水大，由于温度、降水量以及蒸发量的巨大差异，其密度因地而异。

生命无疑起源于水介质。许多动植物在进化过程中离开海洋到陆地，但是只有少数成功地在离开水的环境中生存了下来。经过几百万年的进化后，才有了陆地植物或动物。因此，最初的自然选择和物种形成的主要机制一定是起源于海洋。现在甚至可以合理地肯定，地球大气层曾一度充满着大量的二氧化碳。原始的绿色海洋生物进行光合作用，必然消耗了大气中大量的这种气体，并提供了今天大多数生物赖以生存的氧气。在地球大气变化的过程中，海洋浮游生物沉积了大量的有机碳副产品，其中包括现在我们称为化石燃料的物质（Schelsinger 1991）。这种生物驱动的大气化学变化也改变了地球的热量平衡，随后也改变了风系及降水和蒸发的形式。而这反过来又改变了大洋环流。研究各种系统在大尺度上的这种复杂的相互作用已成为一个多学科的海洋学领域。

2.1 海洋学科学

理论海洋学作为一个单独学科领域创建的原因是海洋对于人类福利的重要性、科学问题的丰富性、研究这些问题所需的专门知识以及海洋中过程和事件的实际尺度。今天大多数著名的科研性大学以及许多小的院校均开设了海洋学课程，而且可以授予这一领域的高学位。但是，因为此学科的问题如此广泛，所涉及的范围从大气-海洋热平衡到海洋微生物生理学，同时也认识到分支学科之间的广泛联系，所以专门研究某一分支学科存在着很大的压力。

理论海洋学的目的不仅是为了传授知识和培养从业人员，而且是为了研究新的事实和发展对全球大气-海洋系统的结构和功能的洞察力，如其化学、生物学以及岩石圈、水圈及生物圈的长期历史。

尽管关于活生物的研究对于海洋学是必不可少的，但是该学科的核心是大尺度物理学：水的运动、海流特性以及海水化学。物理海洋学是对支配海洋运动以及与大气相互作用的物理过程的研究。它应用理论方法、模拟及观测技术，如测量海洋特性和海流分布等。

海洋化学研究化学和地球化学过程，包括海水物理学和海水无机化学和基于稳定的化学同位素示踪剂的大洋环流，有机化学和自然产品化学以及碳、硫、氮及其他元素的地球化学循环。

生物海洋学研究有关生物之间及与其物理和化学环境的相互作用。这一领域的研究是在广泛的时空尺度范围内开展的，其研究内容包括营养盐的再生，生物种群动力学、初级生产力和次级生产力、生物地理学以及气候变化对生物系统的影响等。

海洋地质学和地球物理学既利用观测又利用理论方法来了解改变地球地壳的过程，分析海洋及其内涵的长期历史。

古海洋学解释化石及深海沉积物化学成分的变化，以重现海洋和大气的历史状况。

最近，气候科学也已开始在海洋学研究和教学中发挥更直接的作用。对大气和海洋之间的紧密联系的认识日益提高，使人们对这两者的相互作用及其对海洋生物地球化学的重要性有了更深入的理解。研究的焦点放在大范围的海气扰动上，例如厄尔尼诺、拉尼娜、十年涛动以及全球变暖现象。

在过去大约 20 年，理论海洋学的研究已经取得了实质性的进展。我们对海洋为什么会变成现在的样子有了更多的了解，但是，我们现在必须弄清楚海洋是否正在变化；这种变化的方向，速度及大小；以及对地球及其生命系统，包括对人类的影响。这个有组织的观念正在迅速地演变成一种对大尺度地球系统的探索。

以下是对过去 20 年大型基础研究计划的总结。虽然这些计划关注各自不同的问题，但它们有一个共同的主题，即：气候-海洋变异及变化。

2.2 大洋环流

2.2.1 温盐环流

海洋中海水的运动受地球自转、驱动海表层的风以及内部的密度分布影响。在许多方面，很难区分密度型环流的因果。但是，海洋从一个区域到另一个区域的密度变化有着深刻的意义。除了与表层流的水平流有关外，密度分布还与深层海流的全球关系统，即温盐环流（由于其依赖于温度和盐度）有关（彩图 2-1）。温盐环流包含这样一个系统，在该系统中，温暖的表层水在高纬度海区被冷却而下沉，从而以接近 0°C 的海水填补全球海洋的深海盆（见第 4 章）。这一环流的关键是海水的含盐量，它使海水在结冰前密度增大。

温暖的浅层海水转换为温度低的深层海水主要发生在北大西洋、北冰洋以及南极的威德尔海。这一较深的底层水被输送到印度洋，而后到北太平洋，在那里海水缓慢地与上面的浅层水混合，再被风生上层环流送回北大西洋和南极的主要下降流区（彩图 2-1）。这一系统被称之为“传送带”。不过，它实际上是一个变化着的关联的复杂环流系统，其总的功效是绕着地球输送热量、海水及其他物质，并保持地球气候系统的平衡。

下沉的海水还输送其与大气相互作用时所获得的所有物质，如气体、大气颗粒以及生物产生的副产品（Rahmstorf 1999）（图 2-2）。它还输送大量的溶解碳，包括二氧化碳和有机碳。海洋上层的溶解二氧化碳和氧的浓度是平均的，而且与大气平衡。海洋上层浮游植物的光合作用吸收二氧化碳，合成有机化合物。一些浮游植物还分泌出少量的碳酸钙（ CaCO_3 ）壳状或片状体，而当这些植物死亡后，这些物质会离开海洋上层，一部分溶解到中层海水中，其他部分会在海底形成大量的钙质沉淀物（数十亿吨）。因此，这是二氧化

碳从大气进入长期沉没而封存状态的一种机制。浮游植物还产生溶解的颗粒有机物。其中一部分只是简单地扩散下沉，这是将二氧化碳抑制在深海的第二种机制。由浮游植物合成的有机物大部分被小动物即浮游动物吃掉，这些动物也产生溶解的颗粒有机碎屑。许多动物进行昼夜的垂直迁徙，夜间在上层觅食，白天在深水中呼吸。这是二氧化碳从表层消失的第三种机制。随着上层水向北流动，它将变冷，从而密度增大，并在特定区域沉入更深的海洋。当上层水下沉时，它输送了溶解的二氧化碳、有机物、碎屑并沉降或溶解了源自大气的物质。以北大西洋深层水的构成为例，海水沉降速率估计为 1 500 万~2 000 万立方米 / 秒。其他海水下沉区域是把水和其他物质输送到中间水层。海水的沉降是大气中二氧化碳通过海洋消耗的主要机制。有机物质在中间水层通过呼吸过程向微生物提供食物；它们消耗了大量的氧，并增加了中层海水中的二氧化碳。这些海水溶解了过饱和的二氧化碳，因此大洋中层海水、北大西洋深层海水、南极底层海水以及沉积物是地球上最大的碳储藏区。我们目前仍试图测定这些沉降物的沉积时间，但我们已知深层海水已存在了几百年，沉积物的历史更长。下沉的海水必然由上升混合流来替代。这一过程大部分发生在海洋内部，最终通过上升流进入上层几百米水深海域。这样，“旧的”二氧化碳又返回到大气。

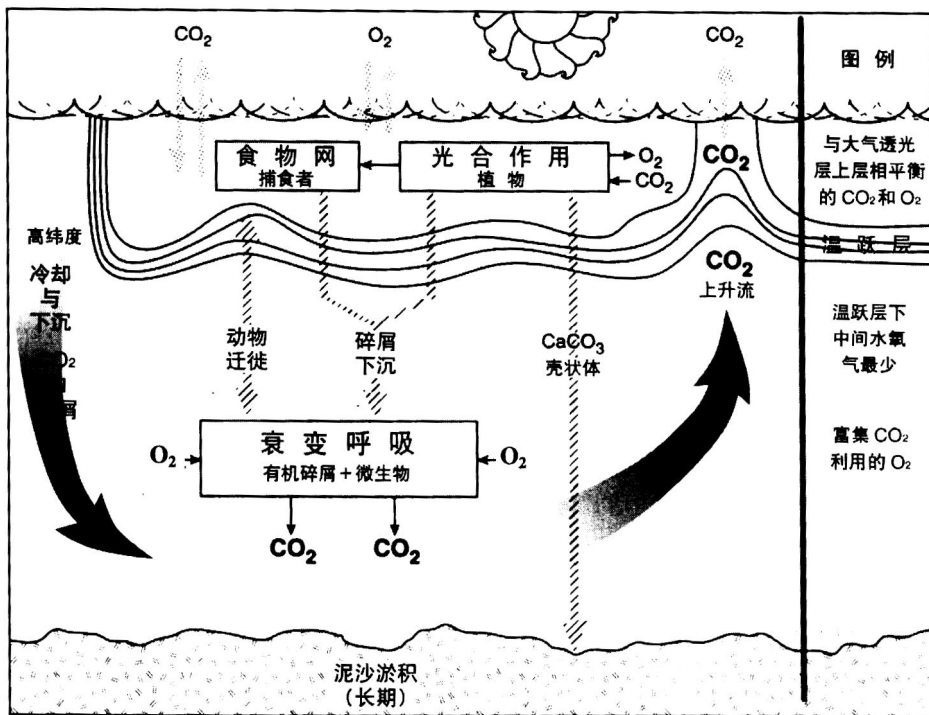


图 2-2 海洋-大气碳循环

由于循环容量大、周期长，尤其因为热量、水及二氧化碳全球尺度的重新分配，所以它对于气候是极其重要的。该“传送带”的年流量相当于 100 多条亚马孙河的流量，它向北大西洋输送的热量相当于大西洋从太阳吸收热量的 25% 左右。

我们现在知道，环南大洋还存在着其他大量海水沉降的区域，但仅下沉到中间深度海域。这里的中层海水也输送大量的溶解无机碳和有机碳，因此，在次表层海水中存在另一个巨大的热量、大气中气体（如二氧化碳）以及生物产生的副产品的储存库。

2.2.2 风生环流

除了温盐环流是水平的之外，世界海洋浅层的风生环流系统也是如此（图 2-3）。这一系统也在水平方向上大尺度输送热量、盐分及其他物质中起着作用。因此，通过热量、气体以及化合物的重新分配，海洋对地球的气候、地球化学和生物学施加了深远的影响。这种影响无处不在，以至于地球地质史及其大气层及生物进化史，在深海沉积物中均有记录。大洋水体运动是地球生物学、化学及物理学的基础。

2.2.3 古海洋学

为了帮助我们了解未来的气候变化，古海洋学家研究了已知的极端温暖和气候激烈变化的远古时代。北大西洋密集海水下沉带下的沉积层中，对气候敏感的表层浮游生物化石

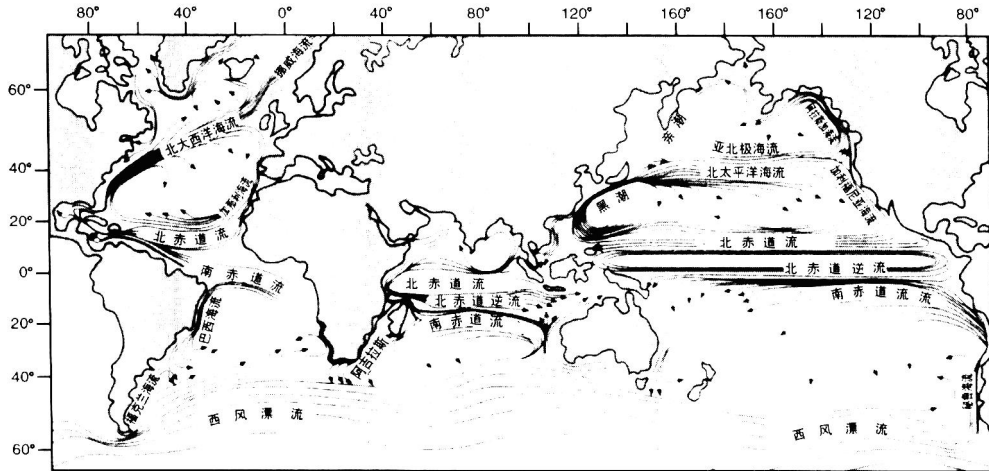


图 2-3 全球海洋平均表层环流的流线图

注：该海流系统图是根据几十年积累的知识绘制的根据导航定位的船舶漂移订正，该图在制作中使用了根

据温度、度分布、风以及海面高度推算等资料图中没有标明这黄海流的相对速度（资料来源：Charnock 1996）。

存在一些变化。这些变化表明，在过去的 13 000 年间“传送带”发生了时间尺度为 10 年的剧烈变化（图 2-4）。在冰和沉积物芯样中较深和较古老的部分，温度和指示化石的同位素测量表明，地球曾发生过激烈的气候变化，这种变化一定与北大西洋深层海水形成速率和温盐热传送带的改变有关。尽管如此，在做出预测之前，我们还需要更多地了解整个气候-海洋-生物系统。

2.2.4 观测技术和仪器的影响

尽管人们多年前就已经了解了许多的海洋过程，但它们的变化尺度从几厘米到几千千米，从几秒到几千年。我们知道这些过程存在，但我们只是刚开始了解这些变化发生的速度。这一领域基础研究的目的在于了解这种时空变化，了解其原因，并预测其变化的结果（Martinson 等 1995）。

我们对上层海洋环流的了解已经比过去 20 年有了很大的提高，这主要是通过新技术的应用来实现的，例如自动化仪器、卫星观测、资料的快速传输、全球定位系统以及高速计算机等。这些技术使过去无法实现的大尺度、长期测量系统成为可能（图 2-5）。学术研究机构对热心于研究的年轻人才的培养也大大促进了知识的普及。

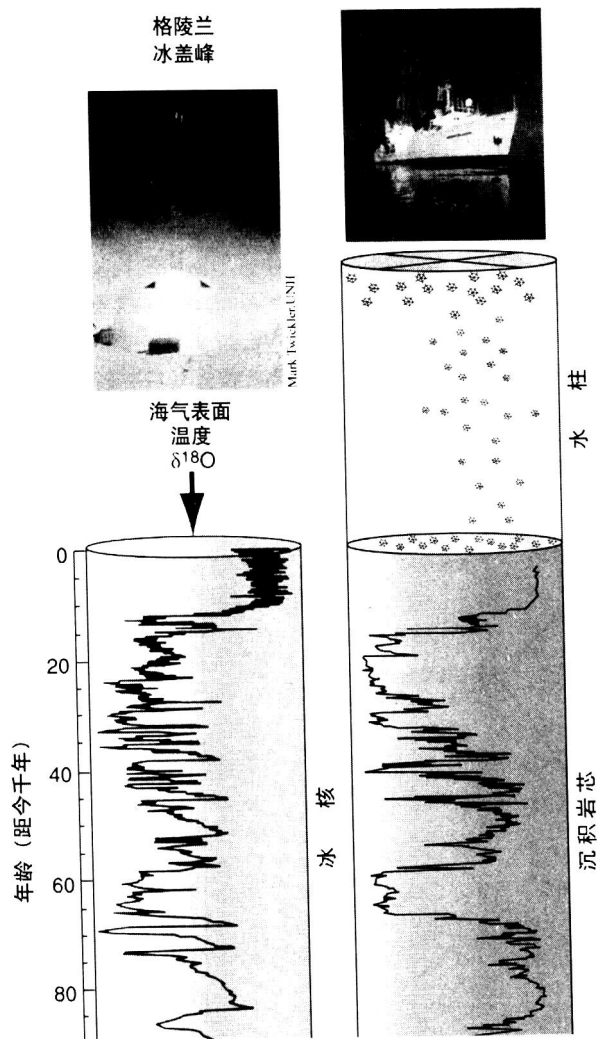


图 2-4 在从格陵兰冰盖（左）钻孔获得的长冰芯样中气泡的氧同位素含量被用来估计北大西洋大气和海洋的温度变化

注：尽管存在着快速的 10 年期海面温度变化，但在过去的 11 000 年中还是相当稳定的。从北大西洋下沉深层水（右）区域附近获取的海底沉积芯样中化石揭示了相当稳定的动物群落，特别是北大西洋表层水体的有孔虫类。在较深、较古老的冰和沉积物芯样中温度和指示化石同位素测量证明，大尺度气候变化一定与北大西洋深层海水沉降速度和温盐热量传送带的变化有关。左上图是冰芯样钻机；右上图是钻探船“Joides Resolution”号及其在海上、在站位处的井架。图中显示一种指示浮游生物物种 *Neogloboquadrina pachyderma* 的壳状体正从水柱中掉到海底的沉积物中（资料来源：Severinghaus, Brook 1999; Bond 等 1997; Bond, Lotti 1995）。

2.2.5 曲流和涡流

目前已经对墨西哥湾流和黑潮——世界上最大的两个洋流系统进行过深入的研究。我们现已知，这两大海流并不像过去许多图表所显示的那样漫长、广阔似河流一般的海流，而是高度动态的和易变的。这两大海流平均每秒从低纬度向高纬度输送 5 000 多万立方米的暖水。但是它们各自都是由一个曲流、涡流及短暂存在的逆流的复杂系统所组成，因此，在任何瞬时时间，它们看起来全然不像是宽阔的河流（彩图 2-6）。

它们最显著的共同特性之一是，当它们离开日本或新英格兰沿海而向东弯曲时，产生许多大的圆形涡旋。这些涡旋的直径约为 300 千米，可持续几个月（图 2-7）。如果一个大的曲流流向洋流主体的南部，拦截洋流主体北部的较冷海水，这些曲流最终形成一个个“环状”冷心。这些“流环”从主要的洋流系统收缩，并渐渐分离，流向西南方，形成海洋中具有独立物理和生物特性的独特水团。这种类似的现象也发生在两大海流的北面，形成了暖涡和冷涡，并向南或向北输送。这些流环通过引入外来成分影响着大片海域的热量、盐

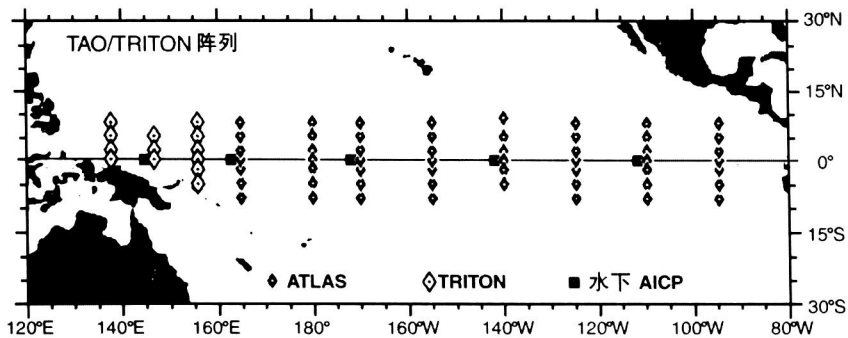
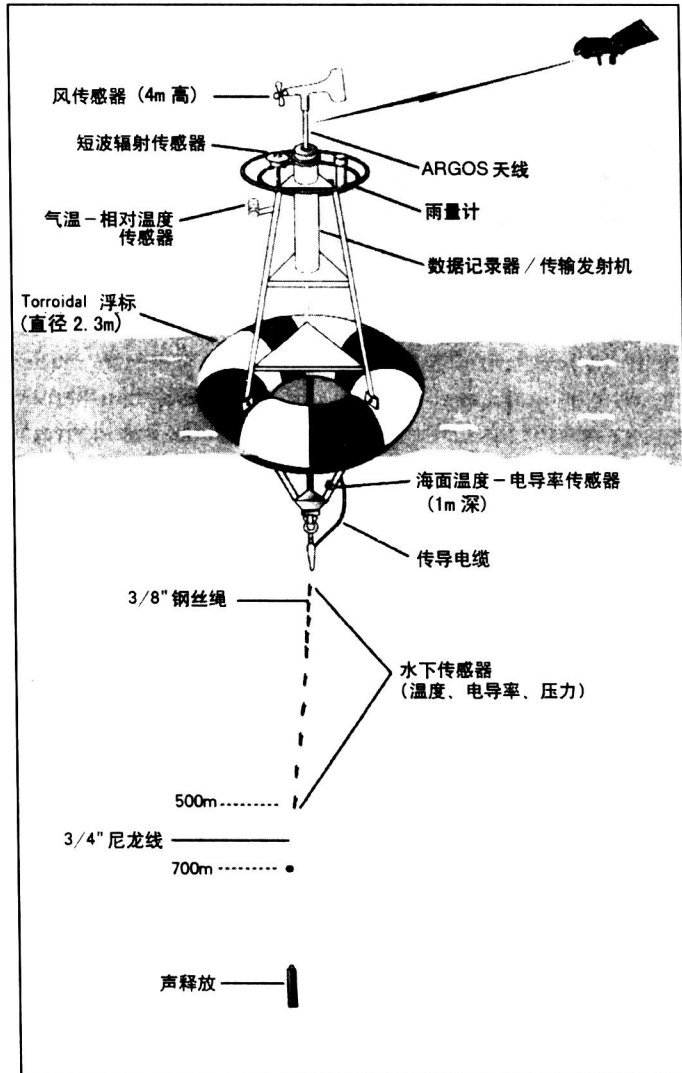


图 2-5 自治式温度线阵式获取系统 (ATLAS)

注: 环境传感浮标被锚定在赤道太平洋, 用来连续监测大气和海洋状况的变化。

这个阵最初是由 TOGA 计划发展而来的。

及生物平衡（环状流研究小组 1981）。

我们现在还知道在世界各大洋存在许多其他的大型涡流。这种特征被称之为中尺度涡，它支配着全球大部分的物理动力学。北半球的旋涡沿着顺时针方向旋转（反气旋式），从而导致海水在其中心下沉，而气旋式旋涡则沿着逆时针方向旋转，在其中心产生上升流。涡旋造成大量热量、盐类、气体（包括二氧化碳）以及生物学产物在海水中上升或沉降。

这类数千个同时发生的中尺度涡所产生的结果是：大量的热量、气体及物质在大气、海洋上层及深度海洋之间相互交换。随海流漂流几个月的卫星跟踪浮标已提供了有关这些中尺度运动的详细资料（图 2-8）（Niiler 2000）。

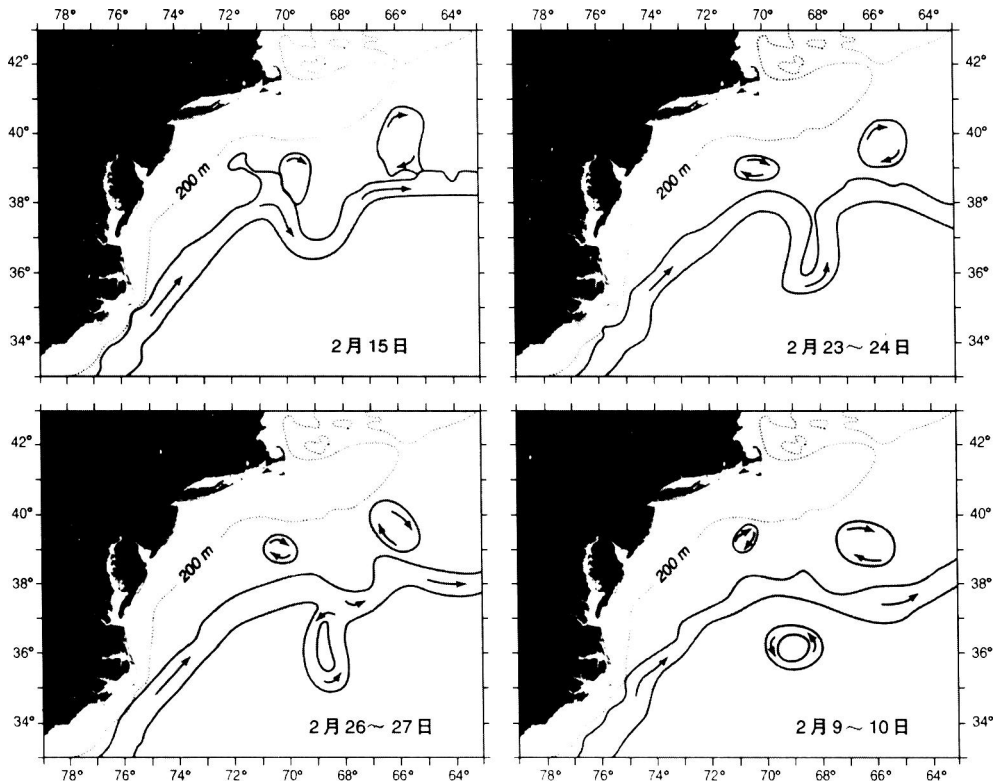


图 2-7 湾流冷涡

注：该图根据海面温度测量值绘制，显示了湾流形成机理。墨西哥湾流（箭头所指）一般都有许多曲流。有时这些北方冷中心水体发生分离，然后漂移，通常向较暖和的西南方漂移。可能同时存在许多这样的“冷中心环”，只不过形成时间不同。同时也会有暖中心环向北移动的暖涡这些流环将外来的生物和化学物质以及海水输送到具有不同环境史的系统。在世界海洋许多其他地方都发现有这样的流环或涡旋

2.2.6 海气耦合和厄尔尼诺现象

直到 20 世纪 60 年代末，人们才搞清楚热带厄尔尼诺现象的实质在于海气耦合相互作用。这些相互作用包含许多大气特征：东部的南太平洋高压带以及西部的印度尼西亚低压带。这两个气压系统之间的气压梯度是造成太平洋大信风带的原因。但是在这一梯度的坡面上存在很大的年际差异。这些变化称为“南方涛动”。

信风驱动赤道表层流系统，导致沿赤道地区冷水上升流的出现（见第 4 章），当信风周

期性减弱时（南方涛动），赤道水域变暖，最终影响到秘鲁渔场和加利福尼亚流系。这一海气相互作用被称做厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）。此现象人们在 20 世纪 80 年代才搞清楚。

1982—1983 年厄尔尼诺事件令科学界猝不及防，因此要求采取适当的对策。1985 年，一项称为 TOGA（热带海洋全球大气）的计划启动，目的是为了更全面地了解热带太平洋和全球大气的变化。该计划旨在一方面了解如何以月至年的时间尺度及时预报该系统，另一方面是了解其潜在机理和过程，以此作为预报的依据（Anderson 等 1998）。其思路是研究建立模拟海气耦合系统可行性，以便最终能够预测其中的变化。

TOGA 研究人员通过其他地区，特别是季风地区与 ENSO 相关的变化进行分析和论证研究。现已清楚，ENSO 现象和中纬度的广大地区之间存在着遥相关。也就是说，气候条件的变化在相距很远的不同地方会同时发生。因此厄尔尼诺现象实际上对全球都有影响。

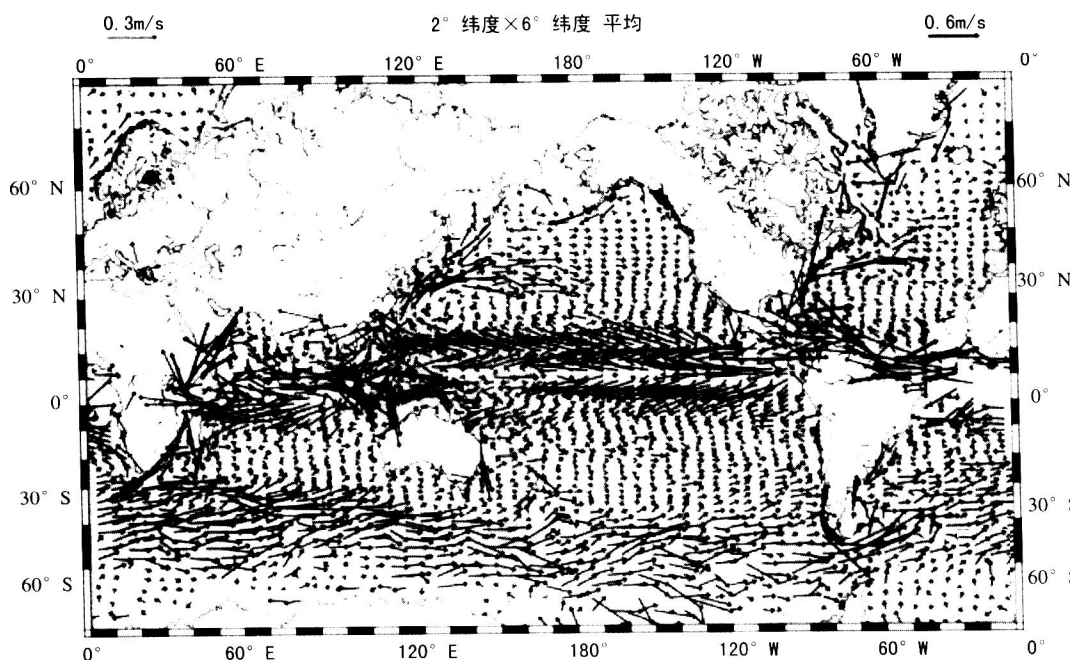


图 2-8 全球环流图

注：这— 现代的全球环流图是根据许多卫星跟踪浮标的路径，求其 20 年运动观测值的平均数而绘制赤道流系以及湾流和黑潮的位置、大小及速度清晰可见。这些暖流向极地输送大量的热量和物质（Niiler 2000）。

实际上，TOGA 研究计划包括在太平洋赤道两侧布放一系列监测浮标。这些浮标记录了海水温度、风速和风向及其他变量。浮标阵用来提供实际上 10 年的连续记录——这是分辨 ENSO 周期的充分时间。该计划在了解和预报 ENSO 方面取得巨大成效。计划表明，ENSO 是一种自动持续的循环，在 ENSO 期间，海面水温异常造成信风加强或减弱。实际上海洋调节功能时间尺度迟缓，为涛动提供了从相位至相位变化的“记忆”。

计划导致了超前 6~12 个月的厄尔尼诺预报。但是关于这些预报的局限性或如何对热带以外地区进行预报，我们知之甚少。该计划只是一个开端。ENSO 是第一个被视为取决于海洋和大气耦合相互作用的气候现象。TOGA 为未来研究提供了一个范例（McPhaden 等 1998；Neeland 等 1998）。

另一个多国参与的世界研究海洋环流的重大计划——世界大洋环流实验（WOCE）是一项旨在帮助我们了解耦合海气相互作用的变化，从而提高我们预报海洋和大气行为的能力的研究计划。尽管这些相互作用发生在多种尺度上，但 WOCE 的目的是调查研究在 10 年尺度上海洋在海气相互作用中所起的作用。这就是需要开展一项全球尺度的现场计划的原因（见背景材料 4.1）。

2.2.7. 水团示踪剂、营养盐及碳循环

海洋中时刻发生着海水大尺度扰动、混合及沉降。为了促进对这些过程的了解，地球化学家们开发了一系列示踪剂，有助于显示海洋是如何迅速地清除大气层气体、污染物及颗粒物，把它们封存在深海，隔绝与大气的联系。其中首要的示踪剂就是碳-14（ ^{14}C ）和氚（ ^3H ）。自然界放射性碳-14 由于稳定的氮受到宇宙射线的轰击而恒定。这种放射性元素在产生的同时，以半衰期约为 5730 年开始衰变为普通氮元素。如果大气中的碳-14 发生了转移，例如溶解于海洋中，那么余下的碳-14 的数量有助于我们估计这种转移发生的时间（图 2-9）。

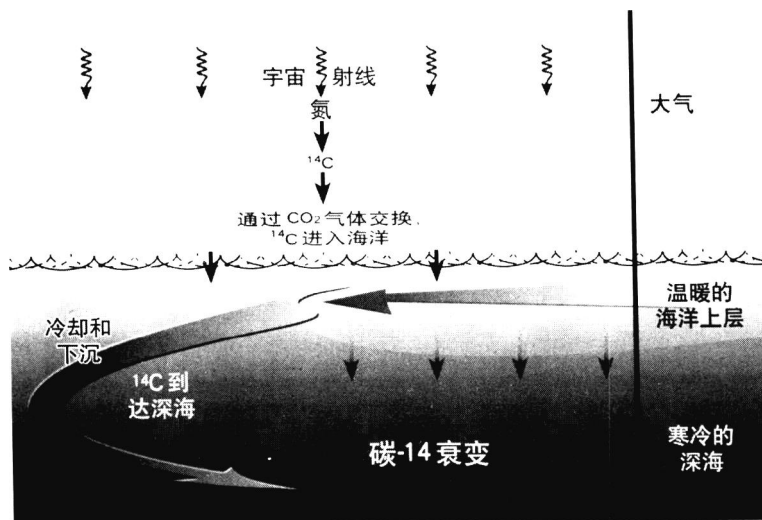


图 2-9 碳-14 显示的深层海水年龄

注：高层大气中宇宙射线轰击氮原子，以相当稳定的速率将其转变为不稳定的同位素碳-14。碳-14 与氧相结合，进入二氧化碳池。此二氧化碳与表层水中的二氧化碳取得平衡。但当表层水体变冷而下沉时，二氧化碳与任何新形成的碳-14 脱离接触。碳-14 以已知的速率衰变成氮。通过碳-14 含量的测量，就可知道水体离开表层的时间。

采用这种方法，有可能估计出二氧化碳溶解在中层水和深层水中的时间以及溶解性颗粒状有机碎屑的年代。从中我们了解到大量有关大气-海洋-生物圈之间碳循环的传递速率。20 世纪 60 年代初期，大气层核武器试验产生了大量额外的碳-14。这次全球性的同位素高峰已经作为时间尺度为几年到几十年海气交换的示踪剂。碳-14 对碳-12 之比率越小，就表示水团的年代越久远。因为氮的半衰期非常短（约 12 年），所以被用于浅水层水体的测量。对于这些区域而言，碳-14 的半衰期太长，所以其用处不大（Schlosser & Smethie 1995）。

含氯氟烃（CFCs 或氟里昂）在世界范围内被广泛用于制冷和喷雾气溶胶。它们是特别宝贵的示踪物，因为它们挥发到大气中，并最终溶解于海洋。它们不像碳-14 没有天然

来源，不会使问题变复杂。而且，我们清楚 CFCs 何时进入大气层和何时建立不同的 CFCs 的公式和模式，因为它们不会被生物所新陈代谢，所以在海水中测量很容易，并保持稳定。不同类型的 CFCs 产生于不同的条件，所以深层和中等深度的海水样品中存在不同的 CFCs，这一点可用来鉴定海水样品何时离开海洋表层（以深层海水为例，Smethie 1993 及图 2-10）。

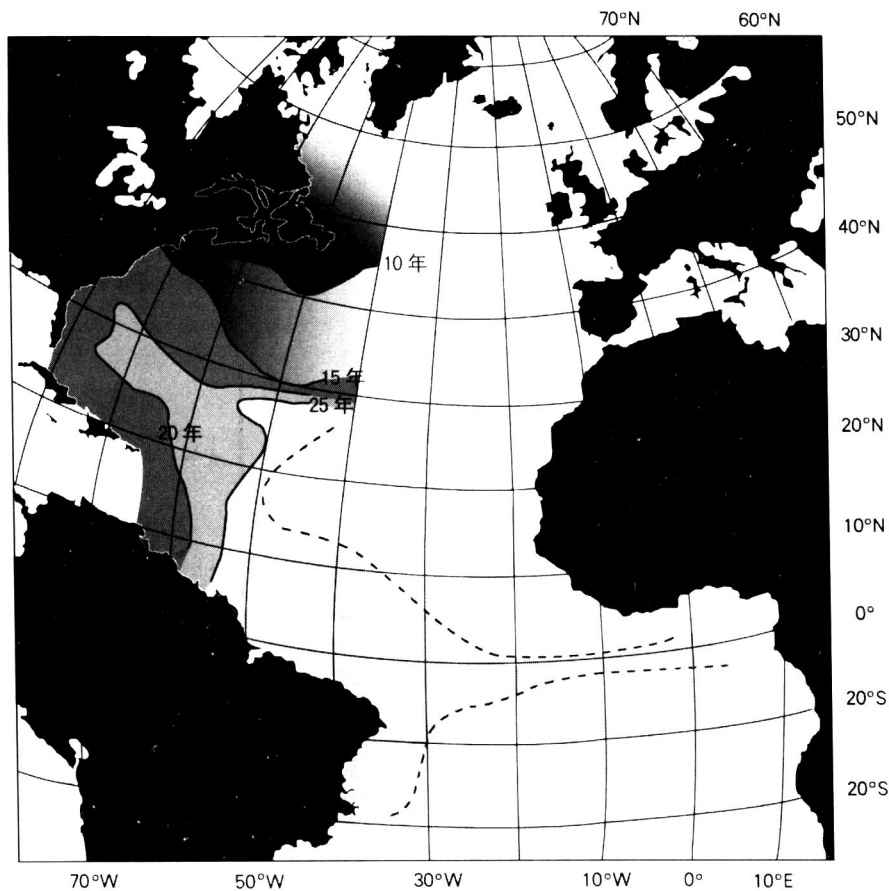


图 2-10 利用 CFC（氟里昂）浓度估算北大西洋深层海水的年龄

注：利用 CFC（氟里昂）浓度估算北大西洋深层海水的年龄，测量北大西洋温盐环流的性质，这些估计值与早期利用不同方法获得的研究结果非常一致（根据 Smethie 等 2000）。

测定中间水和深层水整个水团的年代以及计算其移动速率和滞留时间是极其重要的（Fine 等 2001）。尽管海洋可以容纳大量的物质，如气体和污染物，但不存在永久性的贮存。如果海水在某一地点下沉，它最终一定会在另一个地点上升（见图 2-1）。例如，太平洋中层海水（1500m 以下）的平均滞留时间为 500 年左右。深层水和底层水的年代更长一些。这些水团中二氧化碳的数量在地球上占第二位（占第一位的是深海碳酸盐沉积物）。但是这些海水迟早有一天也会回到与大气接触的表层中，交换其中的二氧化碳和其他气体。问题在于它们会持续多长时间？

表层海水中植物肥料磷酸盐和硝酸盐含量是比较低的。因为表层海水受阳光照射，这

些营养被植物生长迅速吸收。但是表层以下海水中溶解了大量的这样和那样的营养盐。在深海发现的高浓度营养盐是碎屑从表层下沉和历史性沉积所造成的。碎屑被微生物分解，在深海释放矿化营养物质。人们普遍认为，全球海洋生产力取决于海水中营养盐富含程度，表层以下海水混合到日照带，那里的浮游植物通过光合作用产生食物网其他环节所需的食物。在这个过程中，这些植物不仅利用了来自深海的矿化营养物质，而且还利用了溶解在深层海水中的二氧化碳。这些消耗的二氧化碳从大气层得到补充（图 2-2）。光合作用往往被称为“初级生产力”，其速率因地因时而异。对海水的垂直搅拌、混合、扩散及涌升进行研究的另一个原因是：下层海水供应的植物营养盐的速率对生产力速率具有明显的控制作用。这样，营养盐和碳的循环过程便完成了（Sarmiento 1993）。

1984 年召开了一次“专家会议”会议的宗旨是：“观测和了解海洋的生物地球化学循环，以便能够更好地预测海洋、大气及生物学活性元素（如：碳、氮、氧及硫等）的沉积循环的相互作用”（Brewer 等 1986）。这次会议起因于人们对二氧化碳含量上升及对气候变化影响的关注。这次会议及以后类似的会议产生了一项国际研究计划——“全球联合海洋通量研究”（JGOFS）（见背景材料 2.1）。该计划的目的是：“重点研究全球有机碳循环、营养盐循环及生物生产力循环的相互关系”。

我们知道，煤炭、石油、天然气燃烧所产生的大部分碳最终将进入海洋，海洋中复杂的循环和其他过程决定了这些碳的归宿。鉴于海洋极大的缓冲空间，所以约 95% 的碳以二氧化碳的形式存在于海洋中。其中一部分被光合作用所利用，但绝大部分随海水的温盐下沉，从海表层进入中层、深层乃至海底。

在这一循环过程中，氧气通过海表层的光合作用而产生，在深海由于呼吸作用和分解过程被消耗。这一循环持续了数百万年，而最终结果是二氧化碳逐渐从大气中以海底沉积物、石灰石、化石燃料以及大量溶解性二氧化碳和可溶性有机碳等形式进入大洋深处。Roger Revelle 和其他人曾指出，人类现正从事一项大规模的、未加控制的地球物理实验，在这项实验中，通过几百年燃烧化石燃料，我们正在把曾在沉积层中存储了几百万年的碳重新释放到大气中。

背景材料 2.1 全球联合海洋通量研究

全球联合海洋通量研究（JGOFS）于 1987 年由海洋研究科学委员会（SCOR）发起，后来成为国际地圈-生物圈全球变化研究计划（IGBP）的一项核心项目。其目的是：

（1）在全球范围内测定和了解控制海洋中随时间变化的碳通量和相关生命活动所需元素的全球尺度过程，评估其与大气、海底及大陆边界的相互交换。

（2）开发对人为扰动的响应，特别是那些与气候变化相关的人为扰动响应的全球尺度的预报能力。

21 个成员国参与 JGOFS 四大组成部分的一项或一项以上的工作：

（1）在关键海洋生物地球化学领域进行一系列的过程研究，这些领域对气候变化敏感，呈现出较强的碳通量信号。

（2）为重要的生物地球化学、物理学及生态学参数的季节到 10 年尺度的变化提供时序观测站位网（图 BX2-1）。

（3）按照 WOCE 计划，对二氧化碳和相关特性进行了大尺度测量（见第 4 章）。二氧化碳测量第一次揭示了综合性的、高精度全球尺度的表面二氧化碳分压图，从而可以对海洋的碳吸收做出新的估计（见彩图 BX2-2）。

(4) 旨在分析过去 10 年 JGOFS 及相关的观测, 并用公式表示数学模型层次的综合和模拟计划。早期的一项综合活动是海洋碳模型相互比较项目 (OCMP) 其目标是鉴别导致全球碳吸收估计值的集中和发散的三维耦合模型的关键因素。

因此, JGOFS 的目标是了解和预测海洋在全球碳循环中的作用, 阐明物理和生物碳泵的作用。每年在海洋中总共储存约 2 亿吨的碳。图 BX2-1 所示的是对海洋表层吸收的碳的直接观测。通过建立长期时序观测站和发展高精度二氧化碳分析, 可能实现这些观测。现在能探测到在这些寡营养站位存在大的季节性变化背景下的长期信号。彩图 BX2-2 所示的是大气和海洋表层之间二氧化碳净通量的全球分布。该图表明, 赤道太平洋是大气二氧化碳的全球主要源头, 北大西洋和南大洋则是主要的沉降区 (搬运区)。根据 JGOFS 获得的新数据 全球年净通量为 22 亿吨碳 比以前的估计大约大 7 亿吨 自 1995 年以来, 大气中 $p\text{CO}_2$ 增加了约百万分之七。南大洋是一个有效的二氧化碳沉降区。它的面积占全球海洋面积的 10%, 但它吸收的二氧化碳占全球海洋二氧化碳总量的 29%, 南大洋吸收量大的原因是低温和适度的光合作用。大西洋是大气二氧化碳最大的净沉降

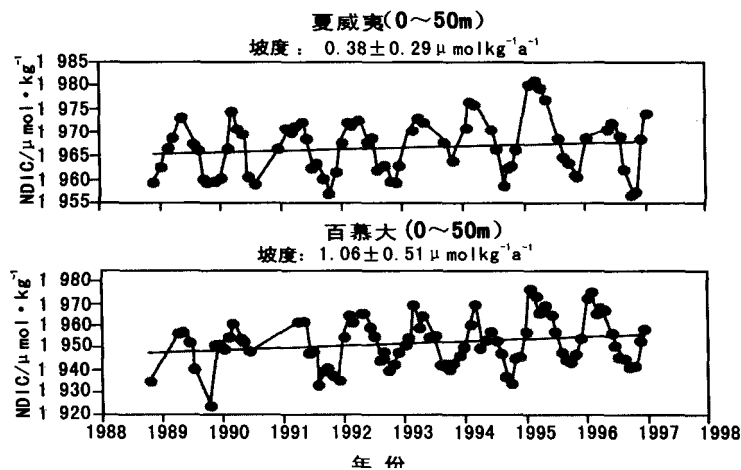


图 BX2-1 夏威夷海洋时序和百慕大大西洋时序站点图

注: 在夏威夷海洋时序 (上图) 和百慕大大西洋时序站 (下图) (1988—1997 年) 上, 海洋上层 50m 处的溶解无机碳 (NDIC) 平均浓度。该水层与大气的二氧化碳交换活跃。趋势线显示由于大气二氧化碳含量和海洋吸收量增加而造成的海洋二氧化碳含量增加。(资料来源: Bates 等 1996; Winn 等 1998)。

区 (39%); 其余依次为南大洋 (22%)、印度洋 (22%) 以及太平洋 (11%)。北部洋区巨大沉降归因于夏季北大西洋和北极海洋中强烈的二氧化碳生物吸收。在厄尔尼诺事件年份, 赤道太平洋的二氧化碳源通量经过厄尔尼诺会完全或部分被清除。单这一结果每年的全球海洋碳吸收通量就会增加 6 亿吨 (相当于全球总量的 25%)。

(Hugh Ducklow)

我们从夏威夷冒纳罗亚山观测站长时序直接观测发现, 大气中二氧化碳含量一直在增加。因此产生一个问题: 海洋能吸收这一超量的二氧化碳吗? 我们尚不能知道深海的二氧化碳是否增加了, 因为我们缺乏揭示这种变化所必需的基线资料。但是通过 JGOFS 的研究, 我们知道, 大量的二氧化碳正在不断地被表层海水大尺度下沉和全球生物“泵”的作用而从海洋表层带走。事实上, 正是缓慢的植物营养盐供应速度及其对生产力的限制, 使生物泵不能清除所有“超量”的人为二氧化碳。

可靠的观测资料使一些海洋学家相信，在海洋的某些海区，除了植物营养盐硝酸盐（ NO_3^- ）和磷酸盐（ PO_4^{3-} ）之外，痕量元素铁（Fe）的缺乏可能进一步限制了植物生长。人们在太平洋和南大洋进行了增铁实验，在一个小范围海域投放大量的铁，结果发现浮游植物大量繁殖。但是由于我们并不清楚次表层水域天然铁元素的数量，所以我们仍然不知道铁元素在大范围内对海洋生产力有多大的调节作用。有人曾提出通过风的作用给海洋施铁肥的设想（Falkowski 等 1998）。

人为地加入铁是否会造成水华的问题对于环境政策具有重要的意义。有人认为，在南大洋海域施加大量铁肥，降低大气中二氧化碳的含量，从而缓解预期的地球温室效应增温。有关这样的气候工程的可行性、合理性及行为准则的争论因我们关于海洋对富营养化的反应的有限了解而大受影响（Carpenter 等 1995）。

海洋广阔无边，海洋生产多变，使得很难提供有关全球生产量的可靠估计数或它如何随着时间而变化。卫星海洋学为我们提供了一种有效方法。由于植物叶绿素浓度所造成的水色可以通过卫星遥感进行大尺度的频繁监测，从而提供判断海洋生物活动的指标。这些遥感测量数据与光合作用实际速率，即二氧化碳的吸收率和生物泵速率之间的关系是当今研究的主要方向。

2.2.8 浮游生物、渔业和海洋生态学

2.2.8.1 浮游生物

漂浮在海洋中和在海洋中漂移的极小生物统称浮游生物，它们是整个食物网的基础，尽管海洋中的生物按个体大小可分为 8 个量级，但微生物占总数的很大一部分。有人估计，海洋中植物部分（浮游植物）每年生产的有机物质总量和陆地的生产能力相当，即数以吨计（Field 等 1998）。但是这些估计极不可靠。全球海洋初级生产力图最初是于 1970 年在单一地图基础上完成的，原图存在很大争议（Koblentz-Mishke 等 1970）。20 世纪 80 年代以来，卫星海洋水色扫描仪对主要的植物色素叶绿素进行了全球性的调查。但是卫星只能探测海洋的表层，因此，观测结果仅仅表示海洋上层数十米，而不是整个水体的情况，对生产力的估算同样存在问题。

现代生物海洋学最重要的任务之一是估算全球海洋初级生产力（即：每单位时间内通过光合作用将二氧化碳转化成有机碳的速率），估算结果准确率高，可用于未来全球碳循环模型之中。在世界上某些地区，海洋生产力随着浮游藻类周期性大量繁殖，表现出很强的季节性变化。

人们已经做出巨大努力，试图揭示这些藻华现象背后的机理。季节性对流或水体混合以及光照区以下的营养盐供应率的变化都是经常发生的。尽管存在海水的季节性混合以及标准营养盐充足供给，但对于一个大生态系统而言，季节性水华现象可能不会发生。这是北太平洋亚北极海域的一个例子。一种得到验证的解释是，虽然海洋植物在春季生长加快，但食草动物也同样增多，浮游植物被浮游动物吃掉，所以海洋中植物生物量没有发生明显的变化。此情此景也可以在春季遍地是幼牛羊的牧场上见到，小牛一到秋季长得膘肥体壮，而此时满眼望去，牧场的草还是那么高，颜色还是那么绿。

另一种解释是，诸如铁之类的微量营养盐（不是硝酸盐或磷酸盐），可能起到一种限制性作用。某些海区的增铁实验也验证了这种解释。

2.2.8.2 海洋生态系统