探知海洋七十载

——2010年 Crafoord 奖获得者 Walter H Munk 教授成就解读

陈朝晖^{①*}, 吴立新^①, 荆钊^{①②}

① 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室, 青岛 266003;

② Texas A&M University, TX 79260, USA

* E-mail: chenzhaohui@ouc.edu.cn

收稿日期: 2016-07-18; 接受日期: 2016-09-02; 网络版发表日期: 2016-10-26

摘要 2010年 Crafoord 奖授予了著名物理海洋学家美国 Scripps 海洋研究所的 Walter Heinrich Munk 教授, 以表彰他在海洋环流、海浪和潮汐及其在地球动力学中的作用等领域所做出的卓越贡献. 本文通过介绍 Munk 教授七十多年的科研工作经历, 解读他在物理海洋研究中所取得的部分卓越成就(如揭示了西边界流强化的物理机制, 奠定了海浪和潮汐的预测技术, 阐明了深海大洋混合的能量来源, 提出了描述海洋内波特征的普适谱等), 希望能够为中国科学家在科研求索之路上提供一些借鉴和启示.

关键词 大洋环流, 海浪, 潮汐, 内波, 海洋声学

1 引言

Crafoord奖是由瑞典著名企业家Holger Crafoord及其夫人Anna Greta于1980年设立的一项国际性科学奖, 于1982年正式开始颁发. 授奖学科包括数学、地球科学、天文学和生物科学各个领域, 每年颁发一次, 奖励其中一个学科的杰出成就. 由于Crafoord奖评选过程与诺贝尔奖一样, Crafoord奖也被学界誉为数学、地球科学、天文学和生物科学领域的“诺贝尔奖”. 2010年的Crafoord奖授予了一名从事海洋科学研究70多年的老人Walter Heinrich Munk, 以表彰他在海洋环流、海浪和潮汐及其在地球动力学中的作用等领域所做出的卓越贡献(颁奖词原文: for his pioneering

and fundamental contributions to our understanding of ocean circulation, tides and waves, and their role in the Earth's dynamics). 这些卓越的贡献包括: 揭示了西边界流强化的物理机制, 建立了行星风应力涡度, 行星涡度和高阶水平湍流摩擦力涡度三者间平衡的大洋环流模型; 奠定了海浪和潮汐的预测技术, 建立了海浪坡度的统计模型(Cox-Munk模型); 指出潮波对于驱动大洋混合具有潜在的重要作用, 阐明了深海大洋混合的能量来源; 建立了内波研究的里程碑式的普适谱(GM谱)等等.

2 生平和荣誉

Munk于1917年10月19日出生在奥地利首都维也纳

中文引用格式: 陈朝晖, 吴立新, 荆钊. 2016. 探知海洋七十载——2010年 Crafoord 奖获得者 Walter H Munk 教授成就解读. 中国科学: 地球科学, 46: 1555–1563, doi: 10.1360/N072015-00582
英文引用格式: Chen Z H, Wu L X, Jing Z. 2016. Seventy years of exploration in oceanography—Achievement interpretation of 2010 Crafoord prize winner professor Walter H Munk (in Chinese). Scientia Sinica Terrae, 46: 1555–1563, doi: 10.1360/N072015-00582

纳。他的家庭背景显赫, Munk的外祖父是一位杰出的银行家和政治家, 他的母亲受过良好的教育, 在英国剑桥大学攻读过植物学, 他的继父是当时奥地利盐矿集团的董事长。为了帮助家族的事业, Munk 15岁的时候即被家人送到了纽约一所寄宿制学校学习。毕业之后, Munk顺利进入了与家族有密切生意往来的Cassel & Co公司从事银行方面的工作。在此期间, Munk参加了哥伦比亚大学的夜校, 并在那里学习了解析几何和初等微积分等简单的数学知识。

三年的银行工作让Munk倍感无聊与乏味。与此同时, 夜校的学习却让他对科学研究产生了浓厚的兴趣。一番深思之后, Munk毅然放弃了成为一名银行家的机会, 只身一人来到位于美国西海岸的加州理工学院求学, 先后在那里取得了物理学的学士学位(1939年)和地球物理的硕士学位(1940年)。

在加州理工读书期间, Munk于1939年夏天申请到了美国斯克利普斯海洋研究所(Scripps Institution of Oceanography)的一份暑期工作, 随后成为时任研究所所长的著名物理海洋学家Harald Ulrik Sverdrup教授的博士生, 他的海洋研究生涯从此开始。经过不懈的努力, Munk最终在1947年获得了加州大学海洋学博士学位, 毕业后被聘为助理教授留在斯克利普斯海洋研究所从事科研工作, 并于1954年晋升为教授。

Munk一生获奖无数, 1956年当选为美国科学院院士, 1976年当选伦敦皇家学会会员。在他获得的众多奖项里, 比较重要的几个包括: 1965年获得美国地质学会的Arthur L. Day奖章; 1966年获得美国气象学会的Sverdrup金质奖章; 1968年获得英国皇家天文学会的金质奖章; 作为第一位获奖者, Munk于1976年获得美国地球物理学会和美国海军共同设立的Maurice Ewing奖章; 1985年获得由罗纳德里根总统颁发的美国国家科学奖章; 1999年获得日本稻盛财团设立的国际京都奖; 2007年获得美国机械工程师学会的终生成就奖; 2010年获得瑞典皇家科学院颁发的Crafoord奖(von Storch和Hasselmann, 2010)。

为表彰在海洋声学 and 海浪研究领域做出卓越贡献的海洋科学家, 1993年由美国海洋学会、美国海军研究办公室和美国国防部海军海洋办公室共同设立了Walter Munk奖, Munk也理所当然地成为了首位获此殊荣的学者。

3 成就解读

作为海洋科学的基础学科, 物理海洋学关注的是海洋中动量、能量与物质输运过程、变化规律及其变化机制, 基本的研究对象是海水的物理运动。传统或者狭义的物理海洋可以高度概括为六个字: 温、盐、深(压)、流、浪、潮。温度、盐度和深度是描述海洋基本状态的物理参量, 海流、波浪和潮汐则是海洋最基本的运动形式。下面我们以这几种海水基本运动形式来解读Munk从20世纪40年代至今在物理海洋学研究中所取得的成就。

3.1 风生大洋环流理论(20世纪40年代至50年代)

作为一门以观测为基础的学科, 物理海洋学在其发展史上任何一次理论上的重大突破都离不开海洋观测与探测技术的革新。由于早期海洋观测数据的严重匮乏, 直到20世纪初科学家才开始对海水的物理运动, 尤其是大尺度的海洋环流进行科学上的探索。Vagn Walfrid Ekman(Ekman, 1905)提出了Ekman螺旋的概念, 在物理上解释了冰山的运动方向与风向不一致这一难题。在随后的40年的时间里, 人们对大尺度海洋运动的动力框架仍旧非常模糊。直到Sverdrup(1947)发现了大洋内区的Sverdrup关系或Sverdrup平衡, 才第一次将大洋内部的经向输运与风应力旋度联系在一起。

然而, Sverdrup平衡无法解释在洋盆西部存在强西边界流这一海洋上特有的现象。事实上早在1777年Benjamin Franklin便绘制了世界上第一份湾流图(the Gulf Stream)以提供给航行于英美之间的油轮使用, 湾流起始于佛罗里达流进入大西洋后与安德烈斯流汇合处, 向北到达哈特拉斯角又离岸向东直到45°N, 宽度只有100~150km, 而湾流表层的最大流速可达 2 m s^{-1} , 影响深度可达海底。同样在世界其它大洋都存在类似于湾流的强西边界流, 如北太平洋的黑潮(Kuroshio)、南太平洋的东澳大利亚流(East Australian Current)、南印度洋的厄加勒斯海流(Agulhas Current)等。因此, 风生大洋环流理论急需完善以解释西边界流的强化现象。

1948年, Stommel研究了一种平底矩形大洋的全流, 其海面上有正弦式行星风系作用, 海底有底摩擦存在, 科里奥利参量随纬度的变化被简化为线性函数。Stommel首先证明了大洋环流西向强化现象是由

于科里奥利参量随纬度发生变化(beta效应)造成的. 1950年, Munk进一步考虑了海洋实际行星风应力和水平湍流摩擦力, 建立了行星风应力涡度, 行星涡度和高阶水平湍流摩擦力涡度三者间平衡的全流模式. Munk所提出的新的风生大洋环流理论模型, 与Stommel模型都揭示了摩擦和beta效应是引起西边界流强化的根本因素, 被一并公认为风生大洋环流研究的经典(Stommel, 1948; Munk, 1950). 然而相比于Stommel的模型, Munk模型的解不仅可以得到西边界强流, 还可以解出回流区, 这与真实的风生大洋环流更为相近(图1). Munk在这篇经典文献中首次提出了海洋流环(ocean gyre)的概念, 此概念也一直沿用至今.

3.2 海浪研究(20 世纪 40 年代至 60 年代)

物理海洋的初学者对Munk的了解都是从他经典

的风生大洋环流理论开始的. 然而在Munk七十多年的海洋研究中, 大洋环流研究只是其中很小的一部分, 其研究成果也只占Munk所有正式发表成果中不到5%的比例.

实际上Munk最初是以海浪预报正式开始海洋研究的. 所谓时势造就英雄, 当时正值第二次世界大战, Munk参与了盟军在北非登陆作战的准备工作, 并为海军作海浪预报. 在艰难的战时情况下, 一方面, 北非海域海浪的观测数据严重缺乏, 另一方面, 冬天北非沿岸的海况异常恶劣, 浪高远超两栖登陆艇所承受的高度. 面对这样的困难条件, 加之海浪的相关研究领域还未曾尝试对海浪进行精细化预报, 当时只有25岁的Munk在Sverdrup的大力帮助下巧妙地通过尺度分析形成了一套非常粗略的预报方法, 通过这套方法最终为盟军找出了最适合登陆的海况平静的两天时间, 并最终为登陆的成功提供了重要

图1 Munk 模型得到的北太平洋流函数分布

引自 Munk(1950)

的科学保障。随后Munk回到克利普斯海洋研究所所在地拉荷亚(La Jolla), 在那里专门为海军和空军文职官员开设海浪预报的培训班, 期间通过不断改进海浪的预报方法, 最终为诺曼底登陆(Normandy Landing)提供了重要的海洋环境信息保障。

到了和平年代, 可谓是英雄造就时势, 20世纪50年代末Munk将工作重心回归到海浪的理论研究中。他同合作者John Tukey率先将能量谱应用到波浪统计上, 这一系列工作一直持续到1963年, Munk研究发现南太平洋冬季的风暴产生的波浪能够远距离传播到加利福尼亚外海。为了追踪大洋中涌浪(Swell)的传播及衰减规律, Munk沿着新西兰到北美阿拉斯加这一路线, 通过设立观测站来测量岛屿和海上的波浪情况(图2)。这项专门研究涌浪产生、传播和衰减的横跨半个地球的实验, 连同20世纪60年代末英、荷、美、德数国“联合北海波浪计划”的波浪成长实验, 为第三代海浪预报模式的开发奠定了坚实的基础。

20世纪50年代起, Munk和他的合作者Cox建立了海浪坡度的统计模型, 即著名的Cox-Munk模型。当时国际上对海浪波高和能量谱的认识大多建立在长波的基础上, 而对短波(如小于1m波长的海浪)的认识非常有限。事实上, 这些波长更短的海浪是构成海浪谱斜率变化的重要组成部分, 被认为是影响风阻的主要因素。Cox和Munk(1954)创新性地将太阳光斑图像反演技术应用到海浪观测中, 建立了Cox-Munk海浪坡度统计模型。该模型认为海面呈现一定的粗糙度, 这种粗糙度可以认为是由许多小波面构成, 这些小波面的坡度应服从某种统计分布。此模型直到今天还广泛应用在海面反射特性、海面粗糙度、白冠覆盖率和太阳耀斑图像溢油处理等方面的研究中。

Munk的海浪理论以及他所提出的诸多相关概念至今仍广泛应用在工程环境海洋研究中。以“有效波高”为例, 在波列分析中最常用的方法是将波浪记录按顺序排列, 然后选择最大的三分之一的波浪, 所选波浪的平均波高值被定义为“有效波高”(significant wave height)。Munk和Sverdrup以此定义的“有效波高”, 将以往船舶观测资料与实测资料很好地联系起来, 即使当今波浪观测一般都是通过自动测量实时输出波高值, 但“有效波高”这一概念在描述海浪统计特征时仍然受到优先公认。

3.3 潮波研究(20世纪60年代至今)

潮汐是指海水在天体(主要是月球和太阳)引潮力作用下所产生的周期性运动。早期(20世纪初)潮汐研究主要关注潮位的变化, 主要工作集中在潮汐的分析方法研究。与Doodson潮汐调和分析方法不同的是, Munk与其合作者(Munk和Cartwright, 1966)提出了著名的潮汐“响应”分析法。相对于调和分析方法, 该方法所需的数据量更少, 但精度和分辨率更高, 极大地提升了潮位预测的准确性。此外Munk和Snodgrass还研制出深海压强传感器, 从而能够观测大洋内部的潮汐变化。该仪器的研制与使用有效推动了潮汐研究的发展, 并通过仪器观测发现了在加利福尼亚州和夏威夷之间的半日潮无潮点。

Isaac Newton是第一个利用力学原理研究潮波运动的人。他从引力势出发, 解释了海面涨落的物理机制。其学说被Bernoulli等人进一步完善, 形成了平衡潮理论(Cartwright, 1999)。然而, 由于平衡潮理论忽略了海水的惯性及摩擦作用, 其预测的潮位与真实的水位仍有很大不同。Pierre-Simon Laplace于1776年首次将流体力学的原理引入到潮波的研究当中(Cartwright, 1999), 并提出了著名的Laplace潮波运动方程并一直沿用至今。到20世纪中叶, 人们利用Laplace潮波运动方程, 已经可以较为准确的预报海水的潮位变化, 此时不少海洋学家认为海洋潮汐的理论研究已经达到完备了。

正当潮波的研究即将陷入沉寂之时, Munk指出潮波对于驱动大洋混合具有潜在的重要作用(Munk, 1966)。海洋混合控制着海水中热量、淡水和溶解物质的运输, 影响着整个气候系统的变化。通过和Wunsch的合作研究(Munk和Wunsch, 1998), Munk指出驱动大洋深层混合大约需要2TW的能量, 其中有将近三分之一到一半的能量来自于海洋潮波(图3)。由天体引潮力所驱动的正压潮与底地形相互作用, 激发出具有三维结构的内潮波, 后者进一步通过非线性相互作用, 将能量向更小的尺度串级, 最终引发波的破碎从而驱动海洋混合。Munk这一观点的提出引起了学术界的巨大反响, 也使得海洋潮波的研究焕发了新生。自此, 海洋潮波的研究主流从传统的二维正压潮变为三维内潮波。直到今天, 正压潮向内潮波的能量传递机制以及转化效率仍是物理海洋研究的热点之一。

图 2 涌浪观测实验站点示意图

引自 Snodgrass 等(1966)

图3 潮汐能通量收支概念图

修改自 Munk 等(1998)

3.4 内波研究(20 世纪 70 年代至 80 年代)

海洋内波是海洋内部的一种高频运动,其频率在科氏频率和浮力振荡频率之间。人们最早意识到内波的存在是在1893~1896年北极探险过程中,挪威海洋学家南森(Fridtjof Nansen)发现船只莫名其妙地减速。经研究得知,船只航行在很浅的密度跃层上方时,其动力造成在跃层处产生内波,船只的动能被消耗,因此显著减速。这种现象在航海上称为“死水”。

由于内波的频率远高于气候系统的变化频率,在早期的研究中,内波被视作气候系统中的高频噪声而未加以重视。然而,从20世纪60年代开始,海洋学家们逐渐意识到内波对于驱动大洋混合有重要作用,从而使得内波成为海洋学研究的一个重要分支。

由于内波的随机特性,如何得到普适的海洋内波谱便成为了内波研究的一个首要问题。1975年, Munk与Garret应用随机过程理论(Garrett和Munk, 1975),通过引入一些理想化的假设并结合海洋调查资料,提出了第一个内波谱模型,即我们现在所熟知的GM谱(图4)。在GM谱中,内波谱满足水平各向同性,垂向对称分布,并且与背景层结有关。虽然GM谱是一个非常简单的内波谱模型,作为现象的统计描述,并不能揭示出内波的物理机制,但是它仍然成为了内波资料分析的准绳,近50多年来的全球海洋观测也表明其具有非常好的普适性。同时, GM谱的出现也成为物理海洋界进一步开展内波理论研究的出发点,因而被誉为内波研究的里程碑。此外,波湍动理论证

图4 内波能量谱模型

引自 Garret 和 Munk(1975)

实GM谱是非线性作用下的静态谱, 从而为GM谱的合理性提供了理论支持. 时至今日, GM谱已经被广泛应用于海洋内波和混合的研究中.

3.5 海洋声学(20 世纪 70 年代至今)

海洋声学是研究声波在海洋中传播规律和利用声波探测海洋的科学. 1978年Munk与Wunsch共同开创了海洋声学层析法(Ocean Acoustic Tomography) (Munk等, 1995), 能够利用大洋中远程脉冲声传播来反演大尺度海洋运动及其变化规律. 这种方法能够让人们得到大范围海域海水的物理状态以及变化规律等相关数据资料, 甚至能够研究大洋更长时间尺度的变异. Munk和Wunsch提出的这一开创性的声层析方法可以实现大面积、同步、连续的观测, 其费用低、数据获取量大、空间分辨率高, 与传统测量方法如利用温盐仪和海流计观测相比体现了极强的优越性.

20世纪90年代初, Munk开始构想利用远程声传播监测由于温室效应所引起的海洋变暖的趋势, 并于1991年进行了赫德岛可行性实验(Heard Island Feasibility Test)(Baggeroer和Munk, 1992)(图5). 此计划发射低频声波并在相距16000km以外的地点接收, 这样研究人员就可以有足够的时间进行分辨. 该声波能够分别传到美国的东岸与西岸, 其信号清晰度恰如从其他临近岛屿传来一样, 因此这个实验别称

“世界各地传来的声音”(the sound heard around the world). 此计划的后续工作是海洋与气候声学探测计划(Acoustic Thermometry of Ocean Climate, ATOC), 该计划通过成立国际组织来开展国际合作研究, 首先在太平洋建立观测网, 进行为期十年的海温变化监测, 这为将来解释海洋对全球变暖的响应提供重要的观测依据. 然而该实验有可能对海洋中的大型哺乳生物造成伤害, 最终在公众的反对之下停止了. 不过Munk提出的声层析技术和之后的一系列实验仍被视为海洋观测发展史上的里程碑.

4 一点启示

无论是在战争时期还是和平年代, 无论是正当壮年还是年逾花甲, Munk对科学的执着与热情始终如一. 我们通过回顾Munk长达七十多年海洋研究生涯所取得的成就, 从中得到了一点启示, 希望能够对当今的科研工作者有一定的帮助.

(1) 执着持久的科研热情. 从发表第一篇研究论文至今, Munk在探知海洋七十多年的历程中始终保持着高涨的研究热情, 而且涉及的领域涵盖海洋学研究的各个方面, 截至2013年已正式发表论文和报告近300篇(图6). Munk饱满的科研热情激发了他的研究潜力, 使他更加积极地面对科研上的难题. 他可以为了追溯涌浪的来源, 不辞劳苦横跨整个太平洋

图5 赫德岛可行性实验示意图
引自 Baggeroer 和 Munk(1992)

图6 截至2013年 Munk 发表的论文或报告的数量统计

设计观测实验,也可以在99岁高龄站在海洋科学大会的讲台上激情演讲,这种科学热情已牢牢植根于 Munk 心中,是任何外部力量都无法干预的。当前我

们身处前所未有的优良科研环境中,同时也会面对更加浮躁的氛围和诸多名利的熏诱,作为科研工作者尤其是年轻的学者应当胸怀对科研的热情,以科

学研究本身为初衷,把握机遇,开拓创新,这才是推动基础科研发展进步的根本保证。

(2) 简单快乐的科研态度。Munk有属于自己的科研哲学。在他的办公室黑板两侧分别写着“Keep it simple. Make it fun”,这或许就是Munk从事海洋研究能够不断产生很多原创成果和思想的科研哲学。科学研究本身就是一个将问题化繁为简的过程,最终将事物的本质以直观明了的形式展现给世人。在解决问题的过程中进一步享受探索的乐趣,这更是科学研究的一种高境界。兴趣是成为大师的必要条件,如果科研人员既定的方向和目标符合实际情况,工作会不断取得进展,研究兴趣自然而生,不断的成功会令这种兴趣长久保持并越来越浓。假如科研方向和目标不正确,开始时的深厚兴趣也会在不顺利的情况下逐渐消磨殆尽。因此,作为科研工作者需要将兴趣作为从事科学研究的第一动力,其他诸如社会和家庭方面的种种因素都不应成为“功利性”科研的挡箭牌。我们对待科学研究需要摒弃杂念,尽情地在科学研究中释放自己,获取快乐。

(3) 合作共赢的科研模式。贯穿Munk七十多年的科研生涯每一个阶段都有重要的合作者。比如早期他的海洋研究引路人,著名的海洋学家Sverdrup,同Munk一起解决了当时很多的海洋学难题。在潮汐研究中,他同擅长工程技术的Snodgrass一起研制出深海压强传感器,利用此仪器他们发现了在加利福尼亚州和夏威夷中间的半日潮无潮点。在后期的内波研究和声学研究中,Garret以及Wunsch都同Munk在相关领域取得了开创性的成果。因此,Munk在其一生的科研生涯中始终体会到“1+1>2”带来的回报。科研本身是个集体项目,当今的科学研究早已跨越了单枪匹马独闯江湖的时代,这需要我们打破当前科研合作的种种壁垒,开启合作共赢的科研模式。壁垒易破,思想难破,对于有些科研工作者来说,如果固守他所学习的知识、获得的经验或拥有的资源,这将会对他们的科研工作产生消极的作用。长此以往,其他科学家也不会愿意跟你开展合作。科研上的同行不是冤家,而是朋友,是积极合作、互利共赢的伙

伴。当今的科研工作者应当像Munk教授这样有一位或几位“科研闺蜜”,在各自的科研领域上通过深入合作不断产生新思想,开拓新思路,实现新突破。

致谢 感谢郑永飞院士提供这次机会使我们深入了解Munk教授的科学成就。美国夏威夷大学的Bo Qiu教授、中国科学院大气物理研究所罗德海研究员和中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室侯霞女士对本文提出了宝贵的修改意见。

参考文献

- Baggeroer A, Munk W. 1992. The Heard Island feasibility test. *Physics Today*, 45: 22–30
- Cartwright D E. 1999. *Tides: A Scientific History*. Cambridge: Cambridge University Press
- Cox C S, Munk W. 1954. Statistics of the sea surface derived from Sun glitter. *J Mar Res*, 13: 198–227
- Ekman V W. 1905. On the influence of the Earth's rotation on ocean currents. *Arch Math Astron Phys*, 2: 1–52
- Garrett C, Munk W. 1975. Space-time scales of internal waves: A progress report. *J Geophys Res*, 80: 291–297
- Munk W. 1950. On the wind-driven ocean circulation. *J Meteorol*, 7: 79–93
- Munk W. 1966. Abyssal recipes. *Deep-Sea Res Oceanogr Abstract*, 13: 707–730
- Munk W, Cartwright D E. 1966. Tidal spectroscopy and prediction. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 259: 533–581
- Munk W, Worcester P, Wunsch C. 1995. *Ocean Acoustic Tomography*. Cambridge: Cambridge University Press
- Munk W, Wunsch C. 1998. Abyssal recipes II: Energetics of tidal and wind mixing. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 45: 1977–2010
- Sverdrup H U. 1947. Wind-driven currents in a baroclinic ocean: With application to the equatorial currents of the eastern Pacific. *Proc Natl Acad Sci USA*, 33: 318–326
- Stommel W H. 1948. The westward intensification of wind-driven ocean currents. *Trans Amer Geophys Union*, 29: 202–206
- Snodgrass F E, Groves G W, Hasselmann K F, Miller G R, Munk W, Powers W H. 1966. *Philos Trans R Soc A-Math Phys Eng Sci*, 259: 431–497
- von Storch H, Hasselmann K. 2010. *Seventy Years of Exploration in Oceanography: A Prolonged Weekend Discussion with Walter Munk*. Berlin: Springer-Verlag