

2016年物理海洋学热点回眸

刘传玉^{1,2}, 王凡^{1,2}

1. 中国科学院海洋研究所, 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 青岛 266071
2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 青岛 266237

摘要 物理海洋学是由海洋观测、理论分析和数值模拟共同推动的科学。得益于海洋观测和数值模拟能力的提高, 2016年物理海洋学取得了一系列重要进展。简述了2016年大西洋经向翻转环流变异、西边界流与中尺度涡相互作用、温跃层湍流混合等重要研究成果, 回顾了中国在热带西太平洋及邻近海域海洋观测网的建成、新型Argo浮标投入使用等海洋学热点事件。

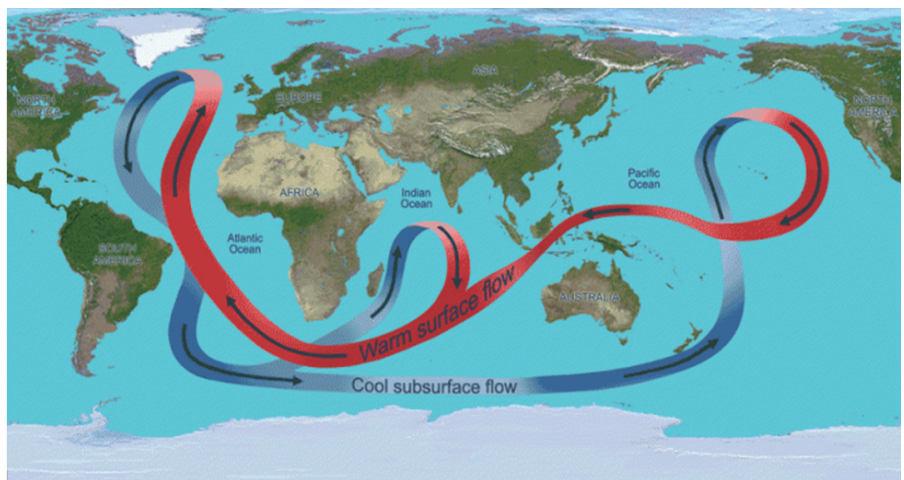
关键词 物理海洋学; 大西洋经向翻转环流; 潜标观测阵列

2015—2016年发生了近20年来全球最强烈的厄尔尼诺现象、创记录的全球表面最高温度、最小的北冰洋海冰面积和最快的南极洲冰盖消融速度^[1-4]等一系列极端海洋和气候事件。这些现象和过程被遍布于各大洋的观测体系完整地记录下来。观测能力的提高, 使人们在实时掌握这些影响人类命运的、大尺度的地球-海洋-大气现象的同时, 对预测其变化趋势的能力有所提高。2016年, 由于气候数值模拟能力大幅提高, 人们可以将海洋-大气系统置于统一的模型, 并在百千米的尺度(中尺度)上研究海洋-大气相互作用^[5]。海洋观测体系的发展和数值模拟技术的进步在2016年物理海洋学的研究中起到了至关重要的作用。本文从大西洋经向翻转环流变异、西边界流与中尺度涡相互作用、温跃层湍流及其影响, 以及中国海洋观测网建成和新型Argo观测浮标启用等几个方面, 盘点2016年物理海洋学研究取得的突出进展及发生的重大事件, 展望新的观测体系和方法在推动学科发展中的作用。

1 北极海冰消融,《后天》情形会否出现

热盐环流是依靠海水的温度和盐度差异而驱动的全球洋流循环系统, 该系统在大西洋表现得最为明显。赤道温暖的海水随着上层的大西洋湾流向北移动, 在途中释放出热量并不断的蒸发, 在使自身变得又冷又咸的同时, 温

暖和滋润着北美和欧洲大陆。在到达北大西洋高纬度时, 因海水密度增大而沉入深海, 并以底层西边界流的形式向南流去, 之后汇入南极绕极流, 最终流向太平洋和印度洋并在那里上翻至上层海洋, 完成整个环流(图1)。这个环流被称为“大西洋经向翻转环流”。热盐环流将低纬度地区多余的热量输送



红色表示上层暖流, 蓝色表示深层寒流

图1 热盐环流示意(图片来源: Climate Science Investigation, NASA)

收稿日期: 2016-12-25; 修回日期: 2017-01-06

作者简介: 刘传玉, 研究员, 研究方向为海洋数据同化和海洋混合, 电子邮箱: chuanyu.liu@qdio.ac.cn; 王凡(通信作者), 研究员, 研究方向为太平洋低纬度西边界流、热带海洋环流、中国近海环流和海洋中尺度过程等, 电子邮箱: qdwanfan@126.com

引用格式: 刘传玉, 王凡. 2016年物理海洋学热点回眸[J]. 科技导报, 2017, 35(1): 47-54; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.01.006

到高纬度地区,维持着全球气候系统的能量平衡。一旦热盐环流停止,全球热量平衡就会被打破,赤道地区和南北半球将陷入一系列极端天气的环境之中。2004年一部灾难电影《后天》即讲述了这种灾难:全球变暖使北极的冰川和海冰融化,过多的淡水注入北冰洋使得海水密度减弱而终止下沉,进而导致热盐环流停止。接着,北美洲和欧洲急剧降温,地球陷入如冰河期一般的严寒中。影片描绘的情节真的可能发生吗?在当前全球变暖的大背景下,这一问题越发引起科学家的兴趣和关注。尤其是近10年来的观测数据显示,北大西洋的热盐环流一直在减弱^[6],人们不禁担心,在不久的将来热盐环流会停止吗?“后天”真会到来吗?

热盐环流是否停止,首先要证实北冰洋区域,尤其是拉布拉多海的海水是否在变淡。2016年,研究人员考察了格陵兰岛冰层融水的影响,在热盐环流领域取得了重要的进展。

Yang等^[7]使用GRACE卫星数据,估算了格陵兰岛的淡水通量,证实了格陵兰岛冰层的加速消融^[8](图2(a)),通过估算注入北冰洋北部的格陵兰冰川融水、加拿大北极群岛冰川融水和北冰洋海冰融水的总和(图2(b))获得了一个重要发现,即注入北冰洋北部的淡水在过去的20年中急剧增加,且这一增加对应着1995年以后拉布拉多海(Labrador Sea)密度急剧下降的现象。

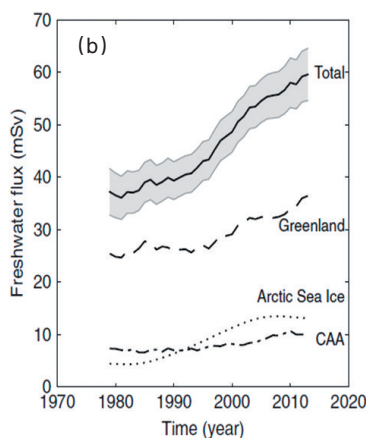
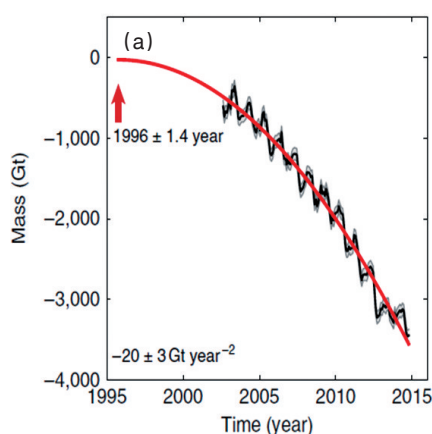


图2 1995—2015年格林兰岛冰层变化(a)及北冰洋北部淡水来源及其分布(b)(图片来源:《Nature Communications》)

研究认为,这可能是导致近10年来热盐环流减弱的原因。

由于格陵兰岛覆盖区域巨大,冰川融水来自岛的四周,因此阐明不同区域、范围和强度的淡水对大西洋经向环流的影响^[9]就显得十分必要。Luo等^[10]利用高分辨率的海洋环流模式,发现了格陵兰岛东南部的冰川融水有50%~60%被向西输送到了拉布拉多海北部,并在那里导致了海水的盐度和密度的变异。与之相反,格陵兰岛西南部的冰川融水,却仅有1%~15%被输送到了拉布拉多海北部。研究还发现,如果在模式中人为增加2倍淡水输入,在拉布拉多海内部的盐度和密度变化幅度将会超过2倍,且能持续到有利于深层水生成的冬季。这意味着,如果气候持续变暖而导致格陵兰岛冰川融水量加大,那么拉布拉多海则会急剧变淡并且形成稳定层结,这将阻碍深层水的生成和热盐环流的流动。

尽管如此,一些科学家认为大可不必担心热盐环流的终止。有的海洋模拟结果显示,在1990年之前,大西洋经向翻转环流经常出现交替性的增强和减弱,因此不能确定过去10多年来大西洋经向翻转环流的减弱是一个持续的现象,亦或是其年代际周期性振荡的一部分。为解决这个问题,2016年Jackson等^[11]利用全球海洋数据同化系统,成功将1995—2015年间所发生的海洋现象准确地置于更长的时间背景

下,证明了这10年来大西洋经向翻转环流的减弱是紧随着上一次大西洋经向翻转环流增强而发生的,且增强和减弱几乎具有相同的周期。因此,近10年来大西洋经向翻转环流的减弱很可能是对其上一次增强的修正和复原(图3)。

因此,依据现有的观测尚不能断言大西洋经向翻转环流会持续减弱甚至终止。在保持持续监测的同时,一方面需要开发新的技术以考察贮存在冰盖、深海沉积等的大西洋经向翻转环流信号,另一方面应增强数值气候模拟的能力,考察其是否存在年代际及更长时间尺度的周期性变异。

2 中尺度涡调制能量传递,大洋环流形态被改变

中尺度涡是海洋中水平尺度为几百千米的涡旋运动,与大洋环流那种可跨越整个洋盆的大尺度海洋运动相比,中尺度涡短暂而强烈。它的“旋转速度”可达每秒数米,比大洋典型洋流的流速高出10倍,而生命周期却只有短暂的几十天。中尺度涡(斜压或正压)从不稳定的大尺度环流中产生并获取能量而不断成长,又能在海底摩擦及与内波的相互作用等过程中将能量串级到次中尺度和小尺度运动中,因此在能量传递过程中起着承上启下的作用。但是,在地球自转和海水密度层化的约束下,中尺度涡旋近似处于稳定的地转

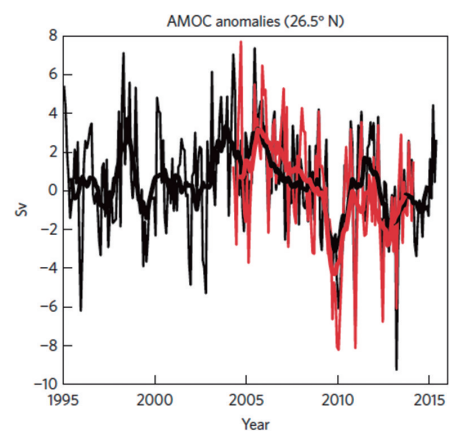


图3 1995—2015年大西洋经向翻转环流强度年际变化特征(图片来源:《Nature Geoscience》)

平衡状态,因此又可与大尺度环流相互作用,实现能量的反向串级^[12]。

经典的大洋环流理论假设大洋环流是由大尺度风场驱动的。对于在百千米尺度上,风场如何具体地影响海洋、两者如何相互影响,以及它们对于大尺度海洋环流影响的问题都没有系统性的答案。由于中尺度涡在大洋中分布极为广泛,而且大量地集中于全球主要洋流的锋面区域,若存在中尺度的海-气相互作用,无论对于海洋还是大气,其热动力影响都是巨大的。2016年,物理海洋学在该领域取得了许多突破性进展,主要表现在以下方面。

1) 阐释了大尺度风场和中尺度涡的相互作用。

Byrne 等^[13]利用高分辨率海洋大气耦合模式证明,中尺度涡能够通过热力学过程从风场中获取能量。由于与周围海洋相比,中尺度涡自身温度具有显著的偏冷(对应的是气旋式涡旋)或偏暖中心(对应的是反气旋式涡旋),在风场由北往南逐渐增强的条件下,该偏差会在海面上形成气旋或反气旋的风场异常,后者能进一步增强海洋中尺度涡

旋,形成相互正反馈机制(图4)。在这个机制下,中尺度涡自身成为了能量从大气输入海洋的通道。在南大洋,这一通道输入的能量占了中尺度涡总机械能的10%。值得注意的是,在南大洋极地锋面以北区域,上述大气和海洋结构非常普遍,意味着这种能量传输机制显得尤为重要。

2) 提出了中尺度涡-大气相互作用对风生大尺度环流的调控作用。

经典风生环流理论的基本框架是风生的表层 Ekman 流和 Ekman 抽吸引起下层地转运动。风生运动和海洋内部过程能很好地解释西边界流及其变异机制。在风生环流理论范畴内,风场都是大尺度的,并没有考虑中尺度的海气相互作用对于环流的影响。基于上述理论的气候模式普遍存在模拟偏差,即模拟的西边界流锋面系统性地偏弱,且西边界流在中纬度的位置不准确。即使将模式的分辨率提高到能够模拟中尺度涡的水平以后,这一问题依然存在^[14]。

2016年, Ma 等^[15]研究认为,中尺度涡和大气相互作用及其对大洋产生反

馈的缺失,是导致气候模式产生模拟偏差的根源。在黑潮及其延伸体区域,如果人为削弱高分辨率气候模式中中尺

度涡和大气的相互作用,会导致黑潮流速减弱 20%~40%,且使得黑潮流轴变得更加蜿蜒曲折,位置也将出现偏移。其中,黑潮强度的减弱是因为,正常情况下超过 70%的涡旋势能通过海气界面的中尺度热力耦合过程耗散掉,而当其中尺度涡和大气的耦合被数值模式错误地减弱后,势能的耗散会相应地显著减弱,而为了维持中尺度涡的势能收支平衡,势能的产生也要相应的减少。这就使得中尺度涡从平均流吸收能量减少,从而必须维持一个平均流速较小的黑潮(图5)。同时,抑制中尺度涡和大气的相互作用,将会导致涡动能的增加,从而引起黑潮延伸体的蜿蜒度增加以及宽度变大。这一发现对于改进气候模式中全球海洋西边界流的模拟精度具有重要意义。

3) 发现了中尺度涡致混合可抵消全球变暖和风场移动对大洋环流的影响。

气候模式显示,全球风系持续地增强并向极地扩展,西边界流增温速率与海气热通量增加速率加快。根据线性动力学理论,西边界流将随之加强并北移^[15]。然而, Beal 等^[16]通过分析印度洋一特定断面上的海流观测数据(图6)发现,印度洋的西边界流安古拉斯流从1990年以来其强度并没有增加。有意思的是,安古拉斯流变得更宽了,而且更加蜿蜒曲折,相应伴随的涡动能也更大(图7)。这些结果表明,气候变化对应着边界流区的涡动能增加,却没有对应着平均流的增加。

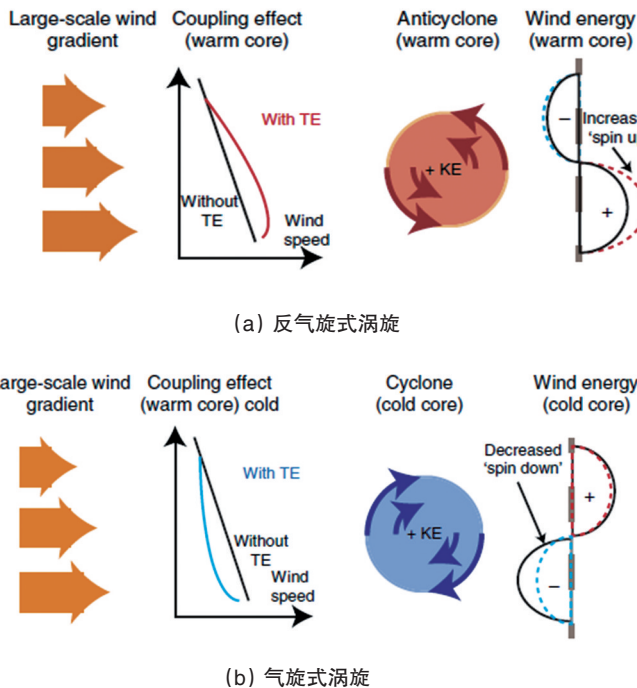


图4 存在水平梯度的大尺度风场与中尺度涡相互作用而增加中尺度涡的能量示意 (图片来源:《Nature Communications》)

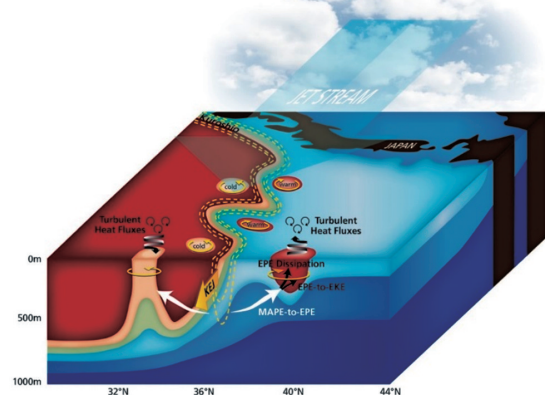


图5 海洋中尺度涡与大气相互作用从而影响黑潮延伸体强度示意(图片来源:《Nature》)

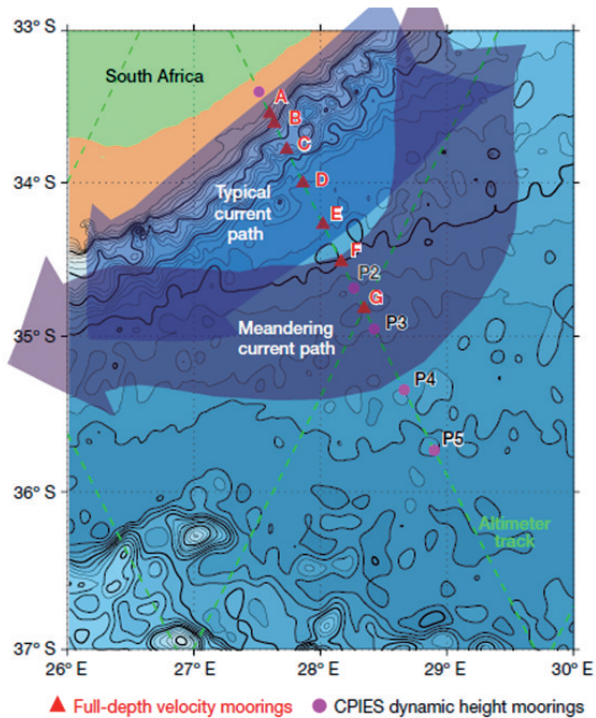
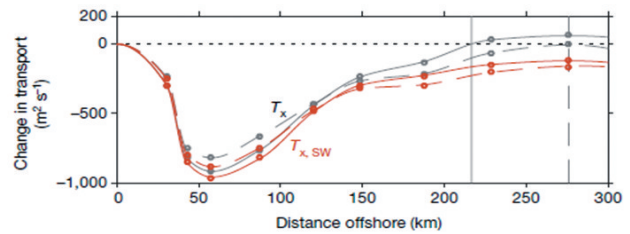
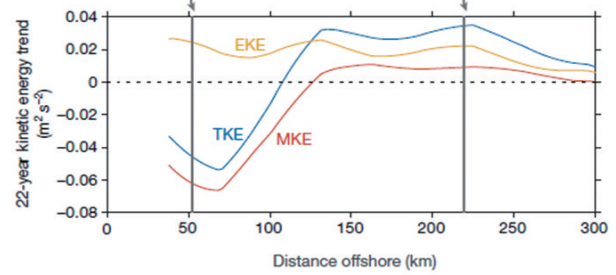


图6 安古拉斯流示意及跨安古拉斯流全水深海流观测站点位置(图片来源:《Nature》)



灰色实线为1993年,灰色虚线为2015年
(a) 跨安古拉斯流的单位长度流量



(b) 总动能、平均动能及涡动能在22年间(1993—2015年)的变化趋势分布

图7 跨安古拉斯流的单位长度流量和动能变化趋势分布(图片来源:《Nature》)

Munk 边界层理论可以较好地解释增强的涡动能与变宽的西边界流这一现象。而依据 Ma^[5]的研究结果,抑制中尺度涡和大气的相互作用也会导致涡动能的增加,黑潮延伸体的蜿蜒度增加及变宽。这一方面说明了中尺度涡在调制大洋环流方面的作用,另一方面也说明了这种调制过程的复杂性。

3 “湍流”充斥海洋跃层,影响厄尔尼诺和气候预报

湍流是发生在海洋中的较小尺度的运动,其特征尺度为 1 m,多由内波通过剪切不稳定或对流不稳定等过程发生破碎而生成。湍流能造成水体的跨等密度面混合与能量耗散,是中小尺度过程的能量完成最终耗散的媒介,在能量级串中也起着重要的作用,因此一般将湍流过程和混合相提并论。温跃层是水下 50~200 m 左右的特定水层,从温跃层顶到底层,温度急剧下降,密度急剧增加,似有跃变,因此称为“跃层”。在温跃层内,温度和密度的层结增强了海水的稳定性,使得温跃层成为上层暖水和下层冷水的分界面。若能

打破温跃层而使得海洋表层的热量向下传输,则通过海-气相互作用而诱导的热动力过程将对气候形态造成极大影响。迄今为止,还没有系统性、长时间跨度的对温跃层内混合过程的直接观测,因而也无法揭示其变异机理。对温跃层内混合过程表征的不准确性被认为是导致当前海洋环流模式、海洋-大气耦合模式及地球系统模式出现模拟偏差的重要因素之一。

2016年,Liu等^[17]通过分析热带太平洋冷舌区所有的Argo浮标观测数据和持续10余年的热带大气海洋观测阵列(TAO)的高分辨率观测数据,确认了在赤道太平洋冷舌区的温跃层的上半部分普遍存在着较强的混合现象,发现了在温跃层的下半部分(也是赤道潜流的下半部分)也存在着强烈的混合过程,而且这些混合过程在热带不稳定波(TIW)发生

期间和在拉尼娜(La Niña)气候状态下发生不稳定的频率更大,发生的层次更深(图8)。因为湍流过程能够改变跃层的结构和强度,而后者又能够决定厄尔尼诺的强弱及其发展过程,这一发现对于厄尔尼诺的发生和变异机理研究及模拟预测具有重要的意义。

上述研究揭示了赤道太平洋冷舌区的温跃层内的垂向混合现象,但是没有给出混合率和混合系数的量值。为了更好地模拟海洋运动以及海洋的质量、热量、碳等的传输过程,在海洋数值模型必需尽可能准确地确立垂向混合系数的空间分布。2016年,Jing等^[18]发

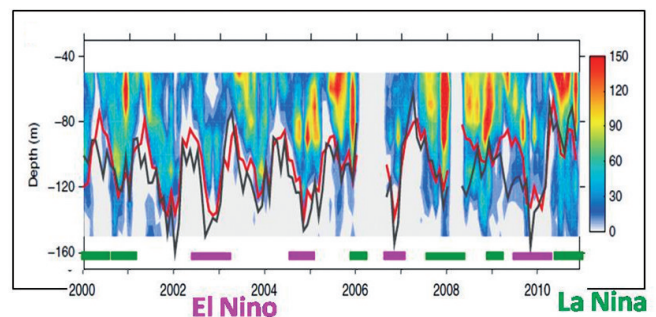


图8 赤道东太平洋冷舌区一站点月均的剪切不稳定发生次数随深度和时间的分布(图片来源:《Nature Communications》)

现了风驱动的近惯性内波在温跃层内的破碎是湍流混合的主要来源,且给出了相应的参数化方案。研究发现,中尺度的风(尺度为百千米)在北太平洋贡献了超过65%的近惯性能量通量,且在温跃层内贡献了55%的湍动能耗散率(图9)。基于上述结果,Jing等提出的新方案成功取得了温跃层混合的时空变异特征。这项成果说明了中尺度风导致的海洋内部混合在气候模式中的缺失(图9),可能是影响其模拟精度的一个原因,为高分辨率海洋环流模型和气候模型的改进提供了依据。

4 600年后下西洋,中国建成西太平洋海洋观测网

《Nature》在2014年发文认为,中国即将建立的热带西太平洋科学观测网(图10)堪比第二次“郑和下西洋”^[19],引起了世界海洋科学界的广泛关注。中国海洋科学观测网的建设在2016年达到了新的高度。2016年12月至2017年1月初,中国科学院海洋研究所完成了对该潜标观测网的维护与升级,目前在位潜标26套、观测设备400余套,并自主解决了潜标数据实时传输的难题^[20]。2016年10月,中国科学院海洋研究所完成了对印尼海潜标和压力逆式回声仪(PIES)阵列的维护和扩充,在印尼海成体系布放潜标10套、PIES成

列1套、观测设备150余套^[1]。2016年8月,中国海洋大学完成了对南海潜标观测网的维护及扩充,成为世界上最大规模的区域海洋潜标观测网^[21]。另外,中国也在西北太平洋、赤道印度洋等海区布设了潜标观测系统。这些观测系统已经产出了众多先进的成果^[22-23]。

中国的海洋观测网获得了世界海洋学界如此大的关注,主要有两方面的原因。

一是因为热带西太平洋-南海区域是海洋科学研究的关键海区,是开展海洋科学研究的天然试验场。热带西太平洋拥有全球海洋中最大的暖水团,是驱动大气环流系统的主要热源地之一,在多种时间尺度上对东亚季风、厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)等气候现象的发生和发展具有重要的影响^[24]。热带西太平洋及其周边海域海洋环流等多尺度海洋过程复杂多变,数支纬向流和西边界流在能量输送和东西太平洋、南北半球水交换过程中起关键作用,直接影响和调制该区域海洋-大气相互作用和海洋多圈层物质能量交换。南海是西太平洋最大的边缘海,具有丰富的海盆环流、中尺度(亚中尺度)涡、中小尺度内波及微尺度混合等复杂的多尺度海洋动力过程。因此,在该海区进行大规模的观测研究,可发现多尺度的海洋及海气过程规律,并解决相互之间

的相互作用等科学问题。

二是可以弥补国际上其他海洋观测体系中中断带来的观测缺失。在热带太平洋海区,最重要的海洋观测网络是“热带大气海洋观测网(TAO)”,但是这个观测体系观测的层次较浅(温跃层以上),且其海流观测在2011年左右已陆续终止。因此,无论是为了数据同化、模式验证,还是为了直接的大洋动力监测,都需要在世界大洋关键海区维持一定数量的连续海流观测。因此,中国构建的热带西太平洋海洋观测网对TAO具有重要的替代意义。

5 新一代Argo浮标逐步启用,深海黑幕即将揭开

Argo浮标是一种专用海洋测量设备(图11)。它可以在海洋中自由漂移,自动测量海面到2000 m水深之间的海水温度、盐度和深度,并可记录自身的漂移轨迹,以获得海水的移动速度和方向。Argo浮标海洋观测的意义在于它是一个由数千个Argo浮标组成的、遍布全球海洋的大规模观测体系。目前,全球共有近4000个Argo浮标在保持工作,每年可提供10余万条剖面数据;从2000年至2016年,Argo浮标共收集了约150万条剖面数据,比20世纪获取的观测资料总和还要多。不仅如此,Argo数据还填补了由于季节因

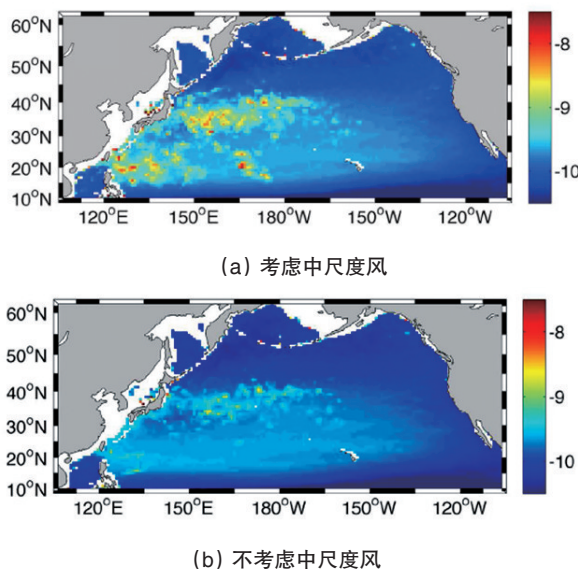


图9 新的温跃层混合方案模拟的250~500 m的湍动能耗散率(图片来源:《Scientific Reports》)

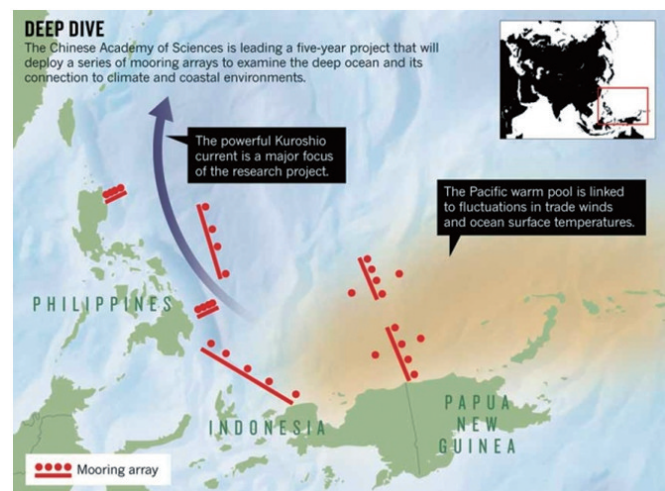


图10 中国科学院热带西太平洋海洋观测网示意(图片来源:《Nature》)

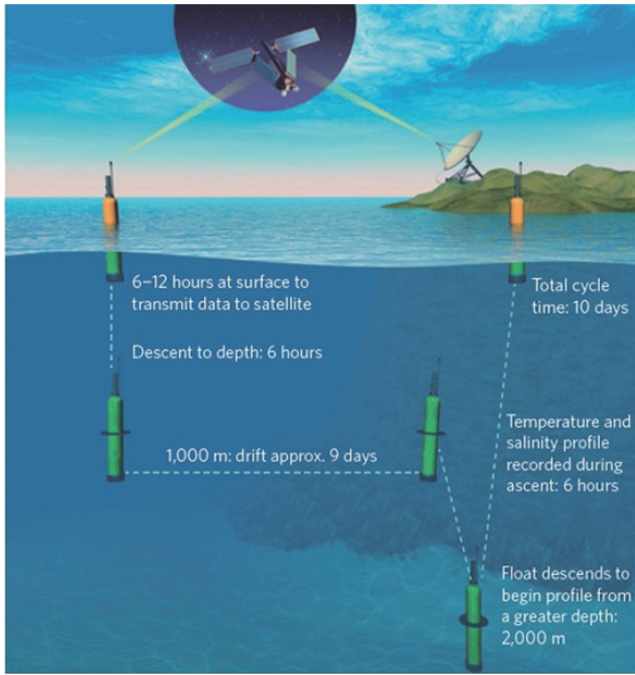


图 11 Argo 浮标典型的工作循环过程
(图片来源:《Nature Climate Change》)

素(如冬季恶劣海况)和海区因素(如遥远的南大洋)造成的船基观测空白。目前基于 Argo 数据进行的研究已经覆盖了物理海洋学几乎所有的领域,而且开拓了新的研究方法^[25]。

Argo 计划当初提出的目标是温度、盐度和压力的测量精度分别为 0.005°C、0.01 psu 和 2.5 dbar(相当于 2.5 m),观测深度 2000 m。这些指标在很多方面已不能满足当前研究的需要。鉴于近年来浮标技术突破,2016 年,大批新一代的 Argo 逐步通过了验证,大量科学问题或因而得到解决^[25-26]:(1) 新的 Argo 传感器的出现,增加了 Argo 的观测内容,溶解氧、硝酸盐、叶绿素、pH、碳吸收等生物地球化学要素同样可以通过 Argo 浮标观测获得;(2) 观测精度的提高,浮标上携带的温度、电导率和压力传感器比标准 Argo 浮标的更加准确,垂直观测的采样密度能加大到湍流尺度(10 cm),可以探测深海中温盐密度近乎均匀的深海以及直接进行全球大洋的湍流观测;(3) 观测深度的革命性拓展,研究发现 2000 m 以下的深海大洋在整个海洋热含量和热比容导致的海平面上升

方面具有举足轻重的地位。为了向深海大洋拓展,国际上已开发出用深水区 Argo 浮标(可达 6000 m,图 12)。目前,使用新技术的几类的浮标已经通过了海上测试,如欧洲和日本开发的碳-环氧纤维缠绕材料壳体浮标,可观测水深达 4000 m;美国开发的玻璃壳体浮标,观测水深可达 6000 m。深海型浮标有望在 2020 年实现系统观测,并在 Argo 观测网中占到约 30% 的份额。深海型潜标

实现系统性观测以后,深达上万米的大洋将不再是漆黑的世界,世人将揭开它古老而神秘的面纱。这无疑是海洋学研究的新的里程碑。

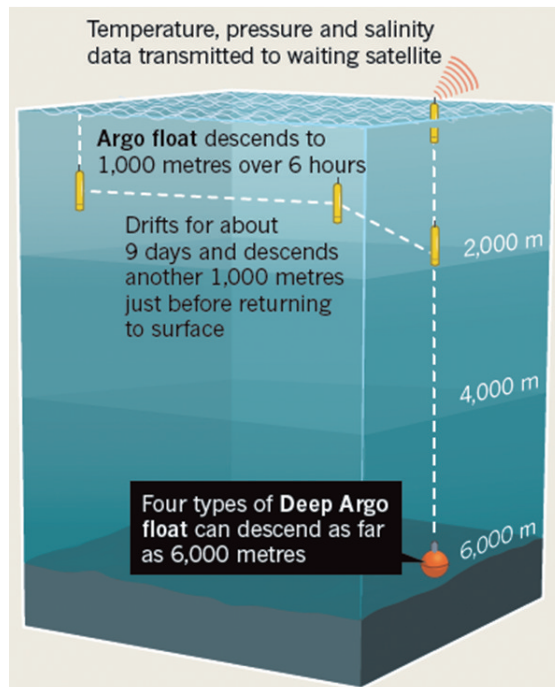


图 12 深海型 Argo 浮标工作流程示意
(图片来源:《Nature》)

6 结论

回顾了 2016 年大西洋经向翻转环流变异机制、西边界流与中尺度涡相互作用、温跃层湍流混合、中国海洋观测网建设以及新型 Argo 观测浮标研发等方面的突出进展。如果说厄尔尼诺现象当下正在强烈地影响着人类的生存环境,那么大西洋经向翻转环流可能在不久的将来影响人类的命运,这两个重要海—气过程的研究仍然是当前重要的方向。中尺度涡是海洋中能量最集中的运动形式,其对大尺度环流和中小尺度运动的影响不断地被揭示出来,正成为研究热点。兴奋的是,伴随着中国海洋观测能力的提高,中国科学家在中尺度涡的结构、生成和消亡机制^[22],以及对于质量输运^[27]、模态水形成^[28]及局地天气变化^[29]等数个研究方向都达到了国际先进水平。另外,对小尺度湍流混合过程的准确表述及其大尺度效应的合理参数化被认为是提高海洋模拟的重要途径之一,也将继续成为物理海洋学研究的热点方向之一。观测是物理海洋学理论进展和数值模型改进的基础,中国在 2017 年将加大对海洋观测的投入,

继续升级相应的观测仪器和设备,逐步建成包括西太平洋-南海-印度洋在内的“两洋一海”海洋观测网。

参考文献 (References)

- [1] 中国科学院海洋研究所. 我国首个“西太平洋深海 PIES 观测阵”建设成功[EB/OL]. (2016-10-08) [2017-01-03]. http://www.qdio.cas.cn/xwzx/kydt/201610/t20161008_4672970.html.
- [2] Climate and Weather. April 2016 was 12th consecutive warmest month on record, NOAA says[EB/OL]. (2016-05-18) [2017-01-03]. <https://weather.com/news/climate/news/record-warmest-april-earth-2016#!/>.
- [3] University of Colorado at Boulder. Sea ice hit record lows in November[EB/OL]. (2016-12-16) [2017-01-03]. https://www.eurekalert.org/pub_releases/2016-12/uoca-sih120616.php.
- [4] Scheuchl B, Mouginot J, Rignot E, et al. Grounding line retreat of Pope, Smith, and Kohler Glaciers, West Antarctica, measured with Sentinel-1a radar interferometry data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(16): 8572-8579.
- [5] Ma X, Jing Z, Chang P, et al. Western boundary currents regulated by interaction between ocean eddies and the atmosphere[J]. *Nature*, 2016, 535(7613): 533-537.
- [6] Smeed D A, McCarthy G, Cunningham S A, et al. Observed decline of the Atlantic meridional overturning circulation 2004-2012[J]. *Ocean Science*, 2014, 10(1): 29-38.
- [7] Yang Q, Dixon T H, Myers P G, et al. Recent increases in Arctic freshwater flux affects Labrador Sea convection and Atlantic overturning circulation[J]. *Nature communications*, 2016(7): 10525.
- [8] Velicogna I, Sutterley T C, Van Den Broeke M R. Regional acceleration in ice mass loss from Greenland and Antarctica using GRACE time-variable gravity data[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(22): 8130-8137.
- [9] Brunnabend S E, Schröter J, Rietbroek R, et al. Regional sea level change in response to ice mass loss in Greenland, the West Antarctic and Alaska[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(11): 7316-7328.
- [10] Luo H, Castelao R M, Rennermalm A K, et al. Oceanic transport of surface meltwater from the southern Greenland ice sheet[J]. *Nature Geoscience*, 2016 (9): 528-533.
- [11] Jackson L C, Peterson K A, Roberts C D, et al. Recent slowing of Atlantic overturning circulation as a recovery from earlier strengthening[J]. *Nature Geoscience*, 2016(9): 518-523.
- [12] Charney J G. Geostrophic turbulence[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1971, 28(6): 1087-1095.
- [13] Byrne D, Münnich M, Frenger I, et al. Mesoscale atmosphere ocean coupling enhances the transfer of wind energy into the ocean[J]. *Nature communications*, 2016(7): 11867.
- [14] Small R J, Bacmeister J, Bailey D, et al. A new synoptic scale resolving global climate simulation using the Community Earth System Model[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2014, 6(4): 1065-1094.
- [15] Cai W. Antarctic ozone depletion causes an intensification of the Southern Ocean super-gyre circulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(3): L03712.
- [16] Beal L M, Elipot S. Broadening not strengthening of the Agulhas Current since the early 1990s[J]. *Nature*, 2016, 540(7634): 570-573.
- [17] Liu C, Köhl A, Liu Z, et al. Deep-reaching thermocline mixing in the equatorial Pacific cold tongue[J]. *Nature communications*, 2016(7): 11576.
- [18] Jing Z, Wu L, Ma X, et al. Overlooked role of mesoscale winds in powering ocean diapycnal mixing[J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 37180.
- [19] 王凡, 汪嘉宁. 我国热带西太平洋科学观测网初步建成[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(2): 258-263.
- [20] 中国科学院海洋研究所. 科学家成功破解深海潜标数据实时传输世界难题[EB/OL]. (2017-01-03) [2017-01-03]. http://www.qdio.cas.cn/xwzx/tpxw/201701/t20170103_4730922.html.
- [21] 青岛海洋科学与技术国家实验室. 海洋国家实验室南海潜标观测网实现南海全覆盖[EB/OL]. (2016-08-22) [2017-01-03]. <http://www.qnlm.ac/page?a=14&b=2&c=37&d=1&p=detail>.
- [22] Zhang Z, Tian J, Qiu B, et al. Observed 3D structure, generation, and dissipation of oceanic mesoscale eddies in the South China Sea[J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 24349.
- [23] Wang F, Song L, Li Y, et al. Semiannually alternating exchange of intermediate waters east of the Philippines[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43 (13): 7059-7065.
- [24] 王凡, 胡敦欣, 穆穆, 等. 热带太平洋海洋环流与暖池的结构特征、变异机理和气候效应[J]. *地球科学进展*, 2012, 27(6): 595-602.
- [25] Riser S C, Freeland H J, Roemmich D, et al. Fifteen years of ocean observations with the global Argo array[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 145-153.
- [26] Tollefson J. Massive network of robotic ocean probes gets smart upgrade[J]. *Nature*, 2016, 531(7595): 421-422.
- [27] Zhang Z, Wang W, Qiu B. Oceanic mass transport by mesoscale eddies[J]. *Science*, 2014, 345(6194): 322-324.
- [28] Xu L, Li P, Xie S P, et al. Observing mesoscale eddy effects on mode-water subduction and transport in the North Pacific[J]. *Nature Communications*, 2016(7): 10505.
- [29] Ma X, Chang P, Saravanan R, et al. Distant influence of kuroshio eddies on north pacific weather patterns[J]. *Scientific reports*, 2015(5): 17785.

Hot topics review of physical oceanography in 2016

LIU Chuanyu^{1,2}, WANG Fan^{1,2}

1. Key Lab of Ocean Circulation and Waves; Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences (IOCAS), Qingdao 266071, China
2. Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China

Abstract Physical oceanography a science driven by the combination of ocean observation, theoretical analysis and numerical simulation. Owing to coordinative observations and advanced numerical simulations, some advances were made in physical oceanography in 2016 This paper reviews some key progresses in the fields of the Atlantic meridional overturning circulation, the interaction between western boundary currents and mesoscale eddies and the turbulent mixing of thermocline. This paper also briefs some hot events of oceanography including the successful construction of a mooring array in the tropical western Pacific by China and the pilot application of new-generation Argo floats.

Keywords physical oceanography; Atlantic meridional overturning circulation; mooring array

(编辑 韩丹岫)