

曹勇,赵进平. 2011—2014 年中国北极物理海洋学的研究进展[J]. 海洋学报, 2015, 37(11): 1—10, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.001

Cao Yong, Zhao Jinping. Progress in Arctic physical oceanography in China during 2011—2014[J]. Haiyang Xuebao, 2015, 37(11): 1—10, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2015.11.001

2011—2014 年中国北极物理海洋学的研究进展

曹勇¹, 赵进平¹

(1. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 过去十几年北极的快速变化以海冰变化为主要特征。然而,在冰-海-气变化系统中海洋起着关键性的作用。海洋是北极变化的关键因素,不仅影响着海冰的融化与冻结等过程,而且是大气变化的主要能量来源。在北极海冰快速变化的背景下,北冰洋的海洋特征也发生了一系列的变化。第四次国际极地年之后我国在北极科学研究中取得了一系列的进展,本文从北冰洋水团、锋面、海流等主要水文现象,以及上层海洋结构等方面,总结了 2011—2014 年我国在北极物理海洋学方面取得的一系列成果。

关键词: 北极; 物理海洋; 水团; 锋面; 海流

中图分类号: P733

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2015)11-0001-10

1 引言

近十年北极正在发生快速变化,北极气温升高、海冰减退、气候剧变,对全球气候产生重大的影响。北极区域已经成为全球变化最关键的区域,促使我们将物理海洋学、海冰物理学、海洋与海冰光学、海气相互作用联系在一起,从不同的侧面和多学科交叉的方式研究北极的变化,形成与海冰变化相应的物理科学研究体系。其中,物理海洋学是这个体系的基本,旨在研究极地海洋的基本物理特性、海水的运动,以及海水在特定时间和空间的变化规律。Cao 和 Zhao 总结了我国北极物理海洋学在 2007—2010 年期间,以第四次国际极地年(International Polar Year, IPY, 2007—2008)为契机所取得的一系列研究进展^[1]。相比于 2007—2010 年,我国的北极科学研究又取得了一系列长足的进展。利用我国的 5 次北极科学考察数据,并参考其他国家的数据,我国在北冰洋上层海

洋温盐结构、北冰洋和白令海海盆区水团的特性、北极中层水的增暖、北冰洋海流及楚科奇海域潮流的结构与变化、北极浮冰区太阳辐射和热收支等方面取得重要的研究进展。本文总结了 2011 年以后,我国在北冰洋的水团、锋面、海流等几个方面取得的重要研究成果。

北极海冰快速变化极大的改变了北冰洋上层海洋的结构。首先,海冰减少导致进入上层海洋的太阳辐射增加,从而改变了上层海洋的热含量^[2-3];另外,海冰的融化使得上层海洋的淡水含量增加并主导着淡水含量的变化趋势^[4-6],进而影响着海洋的层化和对流等重要过程。加拿大海盆是海冰覆盖范围变化最大的海域,其上层海洋的热含量的变化、淡水含量变化,以及热含量对上层海洋结构和海冰的影响是人们关注的热点。北欧海各个海盆的热通量时间变化揭示了北欧海海洋对北极涛动核心区海平面气压的变化,有助于我们更好地了解北欧海在气候系统中所

收稿日期:2015-04-16;修订日期:2015-06-26。

基金项目:全球变化研究国家重大科学研究计划(2015CB953902);国家自然科学基金基金(41306196,41330960);极地专项(CHINARE-04-03)。

作者简介:曹勇(1978—),女,辽宁省黑山县人,从事极地海洋学研究。E-mail:caoyong@ouc.edu.cn

起的作用^[7-9]。融池在海冰表面的热量平衡和水量平衡方面起着重要的作用^[10-11],融池的分布特征和定量研究在冰-海-气能量分布中具有重要的意义。

次表层暖水是我国科学界首先注意到的海洋现象。在海冰密集度较低的海洋,容易发生次表层暖水现象。利用多年的数据研究次表层暖水的长期变化规律,人们对次表层暖水的特征和形成机制有了较为全面的认识^[12-17]。次表层暖水发生在季节性密度跃层之下,密度跃层的强层化导致垂向湍流非常弱,形成事实上的障碍层,使得跃层之下的热量不能到达海表面,在太阳加热的作用下,跃层之下海水的温度逐渐升高^[18]。在次表层暖水的形成过程中,层化特别重要,没有层化就没有次表层暖水。层化所需的淡水通量除了部分来自海冰融化之外,主要来源是大河的径流。近年来,受北极涛动负位相的影响,大量河流淡水积聚在加拿大海盆,成为形成强层化的自然因素^[19]。北极中层水从大西洋方向向北冰洋纵深扩展,一直扩展到全部深水区域。盐跃层的存在使得北极中层水远离海洋上层,基本不受其上方天气过程和季节交替的影响。北极中层水的水团特性与北极环极边界流相联系,体现了北极系统多年尺度的演化过程,也反映了北极上中水层的转换^[20]。中层水增暖是北极 20 世纪 90 年代以来的重要现象,我国的 5 次北极考察观测到中层暖水,并通过大范围观测,基本搞清了中层暖水的扩展范围和东部边缘^[21]。双扩散阶梯是影响北冰洋内部热量传输的重要机制。大西洋中层水通过双扩散阶梯向上输运热量和盐分,对北冰洋水体有着重要的影响。赵倩和赵进平^[22]分析了发生在北冰洋的双扩散结构,后来研究对双扩散阶梯的热通量给出了详细的评估^[16,23-24]。

当人们的注意力还集中在海冰快速变化中时,北极更多的变化正在发生,其中最重要的是北极上层海洋环流发生了变化。海冰减退使得北冰洋的海冰结构越来越脆弱,更易受到环境变化的影响^[25-26],海冰的漂移速度也在加快^[27-29]。来自太平洋的入流的加强,将更多的热量输入到北冰洋,也是北极海冰变化的重要因素^[30]。楚科奇海开阔水域的水体主要是来自太平洋的水体,我们研究了太平洋水在北冰洋的扩展范围,深入探讨太平洋水对北冰洋的影响^[31]。上层海流变化与海冰变化的关系正在浮现出来,并受到人们的关注^[32]。通过这些研究,我们对北极大尺度海洋循环有更深刻的理解。通过对北极海冰漂流场的研究,发现北极上层环流正在发生着显著的变化。

总之,通过对北极的现场考察、国际合作考察、卫星遥感、浮标和潜标考察,我国北极的物理科学研究正在全方位展开,多种技术手段并用,研究的目标逐渐集中,正在努力解决北极的若干重大科学问题。

2 北冰洋物理海洋学研究的重要进展

2.1 上层海洋的研究

2.1.1 加拿大海盆上层海洋热含量及淡水含量变化的研究

在北极海冰变化的背景下,海水热含量发生了显著的变化,分析其变化规律及趋势能够加深人们对于北极快速变化的认识。Zhong 和 Zhao^[33]采用 2003 年和 2008 年的北极考察数据,研究上层海洋热含量的变化情况,揭示加拿大海盆夏季上层海洋热含量总体变化特征。总体上看,2008 年 200 m 以上的水体以升温为主,太平洋入流水的深度下移,这两个变化及其空间差异与海冰大面积的融化密切相关。观测表明,2008 年海冰的融化使得上层海洋淡水含量增加,整个水柱盐度和密度降低。在这种情况下从南部进入加拿大海盆的太平洋入流水将潜入到更深的地方,造成太平洋入流水温度跃层下移。同时本项研究也证实前人关于次表层暖水现象的研究结果,即次表层暖水现象不仅呈现增加的趋势,而且强度也有所增强。

北极海冰近年来快速减少,北冰洋淡水含量也出现了急剧变化。加拿大海盆作为北冰洋淡水的主要存储区域,研究其淡水含量变化对于认识北冰洋淡水收支有重要意义。北冰洋淡水一部分来自海冰的融化,一部分来自北冰洋周边的江河径流。Guo 等^[34-35]利用 2003 年、2008 年中国北极考察以及 2004—2007 年加拿大考察数据计算了加拿大海盆上层的淡水含量,并利用海冰密集度分布数据和北极涛动(Arctic Oscillation, AO)资料分析了不同因素在淡水含量变化过程中的作用并讨论了白令海峡入流水、径流以及净降水的作用。研究发现,除 2006 年以外,夏季加拿大海盆淡水含量在此期间每年厚度增加超过 1 m。增加主要发生在冬季太平洋水以上的上层海水中,而在冬季太平洋水以下,淡水含量维持在 3 m 左右,年际差异不大。海冰的减退对加拿大海盆上层淡水含量的增加起着重要作用,同时 AO 正负相位变化也是控制其淡水含量变化的一个重要因素,AO 正位相时的环流场促使淡水流出北冰洋,而负位相时则造成淡水在加拿大海盆积聚。20 世纪末至今 AO

以负相位为主,有利于加拿大海盆上层淡水含量的累积,而个别年份的 AO 负位相会破坏淡水的累积。2003 和 2007 年的 AO 正位相造成淡水输出的增加,在一定程度上抵消了海冰减少造成的淡水增加。

2.1.2 北欧海海面热通量的多年变化和海冰边缘线的研究

北欧海(Nordic Sea)是连接北大西洋与北冰洋的海域,由格陵兰海、冰岛海和挪威海组成,也称 GIN 海。中国科学家以往很少涉足北欧海的研究,但随着北极的快速变化,全球气候发生了显著的变化,中国的气候亦受到了影响,北欧海的研究受到越来越多中国科学家的关注。在研究中国气候与北冰洋的联系中,科学家们发现北欧海是不容忽视的海域,并开展了对北欧海的水团、对流、海冰变化、热通量等一系列的研究^[36-37]。北欧海是北大西洋涛动/北极涛动(NAO/AO)的关键海域^[8-9],在气候系统中起到重要作用。NAO 明显与系统性的风场距平变化、潜热和感热通量的变化以及海面温度场变化有关^[38-39]。赵进平和 Ken^[7]通过研究各个海盆热通量变化的差异,以研究获取对北欧海海气相互作用区域差异的认识。北欧海的热量来源夏季以太阳短波辐射为主,冬季来自海洋的长波辐射、感热和潜热通量为主。而北欧海对北极涛动的贡献主要是格陵兰海的感热和潜热释放通过冰岛低压区的上升气流影响冰岛低压的云量,从而影响到达的太阳辐射而导致大气环流的变化。

大西洋亚极区的海表温度、海冰范围与气压十年尺度变化几乎是同步的^[40],来自格陵兰岛的下降风减弱有助于抑制蒸发,改变了海冰的分布,导致海冰与气压场变化呈正相关关系^[41]。格陵兰海作为北冰洋的边缘海之一,容纳了北极输出的海冰,其海冰外缘线的变化既受北极海冰输出量的影响,也受局地海冰融化和冻结过程的影响。牟龙江和赵进平^[42]利用 2003 年 1 月至 2011 年 6 月 AMSR-E 卫星亮温数据反演的海冰密集度产品,对格陵兰海海冰外缘线的变化特征进行了分析。结果表明,格陵兰海海冰外缘线不仅存在一年的变化周期,还存在比较显著的半年变化周期,与海冰在春秋两季向岸收缩有关。此外,夏季格陵兰岛冰雪融化形成的地表径流对海冰外缘线有一定的影响。对海冰外缘线影响最大的是弗拉姆海峡(Fram Strait)区域的经向风,它直接驱动了北冰洋海冰向格陵兰海的输运,进而对格陵兰海海冰外缘线的分布产生滞后的影响。

2.1.3 夏季北极融池表面辐射特性的研究

融池是夏季海冰表面的一个重要现象,它广泛存在于一年冰、两年冰和多年冰上。融池以不同的方式影响了海冰表面的热量平衡和水量平衡,融池表面的辐射特性和热学性质与周围的海冰明显不同,对海冰表面反照率的改变起关键性的作用。2010 年夏季中国第四次北极考察(7—9 月)中在北极中央区选择一个长期冰站(起始位置是:86°30'N,172°24'W),对融池深度、融池温度、融池盐度和融池表面辐射特征等进行了综合考察。Zhang 等^[11]利用此次考察获得的融池表面辐射数据定量研究了融池表面热量收支和向下太阳短波辐射能在融池中的分配。融池表面温度与气温之间存在显著的线性关系。融池以净长波辐射和湍流热通量的形式失去热量,其中湍流热通量是主要形式。进一步研究发现在结冰条件下湍流热通量是净长波辐射的 2 倍多。虽然融池表面新结冰吸收的向下短波辐射可以忽略(小于 1.0%),但是新结冰改变了太阳短波辐射能在融池表面和融池内部的分配。融池表面结冰对净长波辐射的影响不大,在 5.5%左右。超过 50%的向下太阳短波辐射能被融池水吸收,引起海冰的融化。在北极中央区域,融池广泛存在于海冰表面,因此,深入研究融池的分布特征和定量研究太阳短波辐射在融池—海冰—大气中的能量分布具有重要的意义。

2.2 北冰洋主要水团的研究

2.2.1 白令海水团特性的研究

白令海峡贯通流是白令海水进入北冰洋的唯一通道,作为北冰洋的上游,白令海的物理海洋学状况对北冰洋的影响很大。我国对白令海的研究始于 1999 年的北极考察,此后一直在研究白令海的海洋状况^[43-47]。王晓宇和赵进平^[48]利用 1983—2008 年北白令海陆架的水文数据,研究了北白令海陆架的水体分布结构和冷水团多年变化特征。研究发现北白令海陆架的水体在温度上的差别比较明显,通过 -1°C、2°C 和 4°C 温度等值线指示水体的分界可以很好地夏季北部陆架上的水体区分开来。61.5°N 以北的 30 m 以深直至底层盘踞着以低温为显著特征的陆架冷水团,其冷中心在温度上很大程度上保留了冬季水的特征;61°N 以南则是以高温高盐为显著特征的陆坡流水。冬季残留水在所有观测的年份中都存在,且大多数年份水温接近冰点。而对冷水团边缘最低温度的分析表明,1989、1994、2002、2003、2004 和 2005 年相对于多年平均水平为“暖相年”,夏季冷水的

分布范围小于多年平均,其中 2003 年又是最暖的一年。最近十年白令海陆架夏季底层水的这种冷暖相位的变化在整个陆架具有一致的变化趋势,这与白令海海洋气象条件的整体异常变化有关。

2.2.2 次表层暖水的研究

次表层暖水是我国科学家首先注意到的北极海洋现象,并且一直是我国科学家关注的热点。曹勇和赵进平^[16]利用 ITP 数据对次表层暖水进行分析,认为次表层暖水的发生、生长、消亡是季节性现象。春末夏初,海冰融化,海冰厚度变薄,密集度变小,使得太阳辐射能够穿透海冰或通过冰间水道直接加热海洋。海洋吸收的热量大部分用于融化海冰,或者直接进入大气,季节性盐跃层(深度 30 m 左右)以上的海水仍保持较低的温度。在季节性盐跃层之下,湍流运动微弱,热量得以积累,出现次表层暖水的温度峰。一旦海冰大量融化以至消失,大风直接搅拌海水,暖水峰变得不稳定,随时会因混合而消失。一旦太阳辐射加热使海表温度升高,也会导致次表层暖水的温度峰不再显著。进入秋季,海表温度降低,海冰开始形成,海洋发生对流,不断将次表层暖水的热量输向海面,导致次表层暖水完全消失。

Zhao 和 Cao^[18]研究了次表层暖水的年际变化。总体来看,在 2002 年以前,只有 1993 和 1997 年有较大范围的次表层暖水,而其余大部分年份,发生次表层暖水的海域集中在楚科奇海陆坡、巴罗海谷和波弗特海等靠近大陆坡的海域。这是由于 2002 年以前加拿大海盆海冰密集度和厚度都比较大,只能在海冰边缘区形成次表层暖水。近年来情况发生了变化,2004—2008 年加拿大海盆全面出现次表层暖水。2004 年几乎所有深水站位都有发生次表层暖水,而 2008 年最高纬度的站位达到 85°N,仍然观测到次表层暖水。次表层暖水大范围出现与这些年夏季海冰大规模融化,冰厚度和冰密集度减小,导致进入海洋的太阳辐射能增加有关。由于海冰与海水对太阳辐射的反照率相差近 10 倍,海冰密集度的降低,减小了地球表面对太阳短波辐射的反射,增大了海水对太阳辐射能的吸收。以往的观测表明,在厚冰覆盖的海域,夏季穿透海冰进入大气的太阳辐射能大约在 2~3 W/m²,而无冰海域进入海水的太阳辐射能可以达到 300 W/m²以上。因此,海冰密集度的降低是导致次表层暖水大量产生的原因。

2.2.3 北极中层水的研究

北极中层水,也叫大西洋水,是位于北冰洋 250

~900 m 深度范围内的重要水体,来源于北大西洋表层水。北大西洋表层水进入北冰洋后逐渐冷却下沉,形成高温高盐的北极中层水。由于北极表层水整体向大西洋方向输送,作为补偿,北极中层水从大西洋方向向北冰洋纵深扩展,一直扩展到全部深水区域。北极中层水自 20 世纪 90 年代初开始在弗拉姆海峡附近增暖,暖水一直向北冰洋深处扩展,1993 年暖水开始进入加拿大海盆。温度的增加表明中层水蕴藏了更多的热量,必将改变海洋的垂向热平衡状况,增加向上的热通量,使北冰洋海冰厚度减薄、范围缩小,进而对海气相互作用过程产生重要影响。我国科学家一直跟踪中层水增暖的研究,并作为每次北极考察的研究重点^[49-50],研究发现,北极中层水增暖呈脉冲式发展,进入 21 世纪后中层水增暖放缓,甚至开始出现降温的趋势,同时还揭示了北冰洋增加的热量有复杂的再分配形式。

Li 等^[20]采用 2008 年中国第三次北极考察的数据研究了加拿大海盆北极中层水深度的空间分布和扩展的方式,对北极中层水在加拿大海盆的扩展规律和可能的上升运动形成新的认识;加拿大海盆中北极中层水的上升运动与上升流有关,是上层北极穿极流海水向大西洋输出后形成水体亏空的补偿运动。从中层水深度变化的特征看,由海台北部开始一直到阿尔法海脊的上升运动是主要的补偿方式。文章还分析了楚科奇海陆坡处北极中层水的抬升现象,认为该处水体有可能来自楚科奇海台内部,输送到陆坡附近,不存在显著的上升流。结果表明,北极中层水在加拿大海盆不仅有冷却下沉的输送方式,而且有冷却上升的输送方式。发生在加拿大海盆的水体上升运动是北极中层水的主要运动形式之一,对北极环极边界流及加拿大海盆的水体质量平衡有重要作用。

Zhong 和 Zhao^[21]研究发现,2003—2011 年在加拿大海盆中的北极中层水核心层深度呈现逐渐加深的过程,中层水核心层温度在 2003 年达到极大值,随着时间推移相对冷的中层水逐渐进入海盆中。1997 年以来,加拿大海盆海冰发生了剧烈的衰退,海冰的流动性加强,波弗特流涡呈现出增强的趋势。波弗特流涡的增强导致上层海洋艾克曼泵加强,改变了上层海洋的动力学性质,进而在中层水的加深中起到了重要的作用。该研究揭示出在海冰快速变化的背景下,中层水深度的变化不仅受控于其热力学性质的改变,还受控制于加强的波弗特流涡所带来的动力学性质的变化。2007 年之前核心层深度主要受控于核心层

密度的变化,而从2008年之后海冰减退所导致的表面应力加强和核心层密度共同决定了波弗特涡旋中层水核心层的深度。与波弗特涡旋联系下的中层水核心层深度的加深和扩展正影响着海盆中的环流。

2.2.4 北冰洋双扩散阶梯的研究

北冰洋是海洋双扩散现象的典型海域。由于北冰洋常年被海冰覆盖,实际观测数据稀少,尤其是能够体现双扩散现象的低速下放的温盐深仪(CTD)数据非常少,导致对北冰洋双扩散的研究不多。在2008年中国第三次北极科学考察中,对所有可能发生双扩散阶梯现象的深度采用低速下放,对温度与盐度剖面进行精细观测。赵倩和赵进平^[22]利用这些数据,对北冰洋加拿大海盆双扩散阶梯结构的特征及其时空分布差异做出分析。双扩散阶梯结构在深度分布、阶梯的形状和高度上有显著的空间差异。双扩散阶梯主要发生在加拿大海盆中部和北部的深水海域,深度范围在100~500 m,其中,100~300 m之间存在的主要是厚度比较均匀的阶梯,阶梯高度在1~5 m之间,位于盐跃层所在深度;300~500 m之间存在的主要是复合阶梯,即大阶梯中夹杂着小阶梯。虽然大阶梯的频数少,但由于大阶梯的高度大,其在双扩散阶梯中占有的空间份额并不小。双扩散阶梯发生的深度大体上自南向北抬升,这与大西洋水核心层的深度自南向北抬升有关。

双扩散阶梯是影响北冰洋内部热量传输的重要机制。大西洋中层水通过双扩散阶梯向上运输热量和盐分,对北冰洋水体有着重要的影响。宋雪琬等^[23]基于锚定剖面仪、冰基剖面仪和微结构剖面仪的数据,对温盐廓线中的阶梯进行研究,分析阶梯的热通量。研究发现由经验公式得出的上、下两界面的热通量差,与混合层内热量的变化有较好的相关性。利用微结构剖面仪数据,计算阶梯界面通过分子热传导输送的热通量。当选取最大位温梯度时,算出的传导热通量与经验公式算出的热通量接近。屈玲等^[24]通过分析2005年8月至2011年8月期间的锚定潜标数据,对双扩散阶梯和高温高盐的大西洋水及相对低温低盐的盐跃层下部水这两种水团之间的相互作用进行研究。发现双扩散阶梯的位温主要受与其接近的水团的影响,同时也受其相邻的阶梯生成或消亡的影响,大西洋水对其上方的双扩散阶梯和盐跃层下部水起到加热作用;而盐跃层下部水的深度变化主导着大西洋水和双扩散阶梯的深度变化。两个相邻的阶梯具有一致的位温和深度变化趋势。通过经验公

式,估计大西洋水通过双扩散阶梯向上传输的热通量为0.05~0.6 W/m²,且由下至上呈现逐渐增大的趋势;而由双扩散造成的垂向涡扩散系数为 $3 \times 10^{-6} \sim 3.3 \times 10^{-5}$ m²/s,且由下至上呈现逐渐减小的趋势。

由于双扩散阶梯热通量的绝对值很小,通过双扩散阶梯向上的垂直热通量远小于表面混合层对海冰的平均热通量,约为0.05~0.22 W/m²^[22]。因此,大西洋水热量很少进入上层海水,在北极中央区来自中层水的垂直热通量对加拿大海盆海表面热收支的影响不是重要的。但是在楚科奇海台区和加拿大海盆的南部,较强的湍流运动导致双扩散阶梯消失,也将导致有更多的中层水热量进入海洋上层,大西洋水的热量可能对上层海洋结构和热通量产生显著影响。

2.3 北冰洋锋面的研究

海洋锋是特征明显不同的两个水体之间的狭窄过渡带,是海洋内部物质运动和能量交换的敏感区域。

北海特殊的海底地形和复杂的洋流决定了其具有典型的锋面结构。何琰和赵进平^[51]讨论了对于月平均数据,用温盐梯度分析锋面比等值线的方法更适用。文章还利用多年月平均格点数据分析了北海主要锋面的分布特征和季节变化规律,对Nilsen和Falck^[52]关于北极锋基本上没有季节性移动的说法进行了修正和补充。

汤毓祥等^[43]借助中国首次北极科考资料研究发现,1999年夏季楚科奇海70°N以北海域形成较强的温、盐锋带。海洋锋有明显的时间变化和空间摆动,并由此造成锋面附近水体温盐结构的大幅度变化。2008年夏季中国第三次北极科学考察期间,利用锚碇潜标对北冰洋楚科奇陆架海域进行了为期33天的海流剖面、近底层温度与盐度连续观测。观测数据显示楚科奇陆架海域近底层海水温度出现了两次较大幅度的快速升降现象^[53]。舒启等^[54]结合此次科学考察R断面CTD观测资料,以及卫星遥感海表温度和海表风场等资料进行了综合分析,认为楚科奇海温度锋面整体北移的同时所出现南北摆动是导致该现象的主要原因。温度锋面的整体北移属于北极季节变化特征,而温度锋面的南北摆动则与短期天气过程直接相关。

2.4 北冰洋海流的研究

2.4.1 白令海峡夏季海流的研究

白令海峡是连接太平洋和北冰洋的唯一通道,穿过海峡的海水体积通量在年际尺度上主要取决于海

峡南北海面高度的分布,其年际变化对于北冰洋海冰、海洋过程有着重要的意义。由于我国一直没有在白令海峡进行海流观测,已有的研究没有对海流的直接观测结果,而多是通过同化数据或水团特性研究流动特性。张洋和苏洁^[31]在比较了 Simple Ocean Data Assimilation(SODA)资料计算的白令海峡海水体积通量和实测分析结果的基础上,对夏季白令海峡流量的年际变化及成因进行分析。结果表明:夏季白令海峡的体积通量主要是由正压地转流控制的;通过分析 SODA 海面高度数据、卫星高度计同化的高度异常数据和验潮站长期水位数据可知,夏季白令海峡体积通量正异常时,海峡以北的楚科奇海、东西伯利亚海、拉普捷夫海以及波弗特海南部沿岸海面高度负异常;南部白令海陆架海域海面正异常。利用表面应力资料、海冰漂流速度和海冰密集度资料合成表面应力,对相关海域夏季的埃克曼运动、上层海洋温度、盐度和垂直流速进行分析,发现相关海域海面高度异常与白令海峡入流体积通量变化的关系主要是由大尺度海面气压分布异常造成的埃克曼运动引起的。进一步分析海表面气压场,发现夏季白令海峡的体积通量正异常对应着北冰洋中央海域海面气压的正异常及白令海海盆海面气压负异常。这种气压的异常分布在一定程度上解释了上层海洋运动、海水温盐结构与白令海峡入流的关系,从而把夏季白令海峡体积通量和大尺度大气环流联系起来。

2.4.2 楚科奇海域潮流的结构和变化

2008 年夏季中国第三次北极科学考察期间,利用锚碇潜标对北冰洋楚科奇陆架海域进行了为期 33 天的海流剖面、近底层温度与盐度连续观测。观测数据显示楚科奇陆架海域近底层海水温度出现了两次较大幅度的快速升降现象。王辉武等^[55]基于 2008 年夏季楚科奇海中央水道长期连续的 ADCP 测流资料,对所在海域的潮流、余流分布特征及流的斜压性做了分析。研究表明:该海区半日潮最强,且以 M_2 最为典型;整个测流剖面内平均流向基本一致,为东北偏北向;各层余流存在显著的垂向同步的周期性变化;在 8~11 m 范围内平均斜压动能较强,而 18 m 以下平均斜压动能较弱,在 11~18 m 范围内由上而下平均斜压动能不断减弱,平均斜压余流逐渐变小。文章又对该资料采用 Lanczos 余弦滤波的方法,研究了楚科奇海中央水道余流剖面及温盐时间序列的结构和变化特征,发现余流的方向和大小在垂直方向上存在明显的差异:表层余流全流呈现西向流态,受表层

风场影响显著;中、下层的余流呈现东北偏北方向。在整个观测期间,温度时间序列表现出剧烈的震荡,振幅达到 3.7℃ 以上,而盐度序列变化缓慢,波动区间相对较小,为 32.0~32.8,并表现出逐渐降低的趋势;温盐序列的变化受底层余流分布的影响较弱。

2.4.3 北极冰下海洋埃克曼漂流的研究

埃克曼(Ekman)漂流是上层海洋普遍存在的一种运动形式。海面风力对好水的搅拌混合使风的动量通过海面传给表面海水,再通过海水的湍流运动依次传给下层的海水。在海冰覆盖的海域,风的动能不能直接输入海水,作用在海面上的主要是海冰的拖曳力。海冰拖曳的作用与风的作用相当,都可以产生 Ekman 漂流。刘国昕和赵进平^[56]采用湍流黏性系数的 PP 参数化方案,用实测温盐数据对冰下 Ekman 流速进行计算。结果表明,上层海洋发生的流速垂向剪切主要是 Ekman 漂流,并且用温盐数据计算 Ekman 漂流流速的方法可以得到令人满意的结果。海洋层化和海冰漂移速度的变化是影响 Ekman 层流场的两个重要因素:首先海水层化的存在导致在跃层处湍流黏性系数减小,强烈抑制了流速的向下传播,致使 Ekman 漂流在跃层处完全消失。在水体均匀的冬季,海冰拖曳引起的上层海洋漂流会发生在较大的深度上,而夏季层化条件下,海冰拖曳引起的漂流只能达到 20~30 m 的深度。漂流层变浅意味着海冰拖曳做功产生的能量不能进入海洋深处,而是在很浅的表层水体内部积聚,使上层海洋的温度增加,有利于加剧海冰的底部融化。表面海冰流速发生变化时,导致各层流速发生相应变化,但 Ekman 流的摩擦影响深度并不随表面冰速的变化而发生变化,摩擦影响深度是由海水的密度结构所决定的,跃层的位置决定 Ekman 流的摩擦影响深度,与海冰漂流流速无关。

2.4.4 混合增密对流的研究

大西洋经向翻转环流是全球大洋环流系统的一个重要组成部分,它将大量的热量由热带输送到北大西洋的高纬地区,形成了北半球高纬地区的主要热量来源之一。Macdonald 和 Wunsch^[57]认为海气联合系统向极地输送热量的一半均由大洋经向翻转环流提供,其强度的变化对北半球气候格局至关重要。格陵兰海内发生的等密度混合后产生的增密对流是重要的对流现象之一,也是翻转环流下沉运动的主要形式。北欧海有暖流和寒流注入,又发生大量回流,水团特性异常复杂。北冰洋正在发生快速变化,其内水团变性以及环流系统的改变都将使格陵兰海等密度

混合对流发生明显变化,继而将对全球气候变化产生影响。史文奇和赵进平^[58]探讨北冰洋内部不同海域的水体进入该海域后会对混合增密对流造成的可能影响。发生在东格陵兰极锋处的有效对流都是大西洋的水体,一部分是在格陵兰海回流的大西洋回流水;一部分是在北冰洋潜沉并回流的北极大西洋水,该水体在北冰洋循环的时间越长,温度差越大,产生的有效对流越强。而横越北冰洋的太平洋水因密度过低而不能参与等密度混合对流,加拿大海盆主盐跃层之上的水体也都不能参与对流。

2.4.5 北冰洋环流的结构和变化

在南极,人们熟知南大洋存在着南极绕极流,构成了环绕南极的海水封闭循环。在北极,海水的流动要比南极复杂得多,与南极的海洋环流几乎没有相似之处。然而,如果把来自大西洋的海水运移路线作为判断的依据,北冰洋也存在着封闭的绕极循环,称为北极环极边界流(Arctic Circumpolar Boundary Current, ACBC)。ACBC的提出不仅仅对北冰洋的环流系统有重要贡献,而且对世界海洋循环有潜在的重要影响^[59]。

Wang和Zhao^[32]通过对1979年1月至2006年12月的月平均海冰漂流矢量场数据进行分析,考虑到海冰漂流场的形态特征、海冰输送特征以及对应的海面气压场分布,将北冰洋海冰的漂流(月平均的漂流场)分为4种主要常见类型,分别是波弗特涡流/穿极流型、反气旋涡流型、气旋涡流型和内外对称流型。其中内外对称流型多在冬季爆发,其高发月份在2月,其运动形式有利于北冰洋多年冰的积累。研究还发现,在2010年,穿极流长达4个月不连续,这表明北冰洋上层环流已经发生了显著变化。第一,上层海洋环流转型是海冰漂流场持续气旋性变化现象,如果夏季海冰持续数月的气旋式漂流,就足以导致大范围的海冰稀疏,形成了事实上的环流转型。第二,上层海洋环流的转型与海冰的分布有关,现在发生的环流转型不应该是完全的气旋式环流,而是随海冰退缩而不断扩展的气旋式流涡。2010年的海冰和漂流变化告诉我们,虽然我们还无法确知转型是否在每个夏季都要发生,无法确定转型过程要经历多少时间,但由于转型的基础是海冰稀疏导致的对局地风场更好的响应,上层环流的转型是不可避免的,是未来可能常态化发生的上层海洋现象。

3 结语与展望

从中国首次北极科学考察至今,我国科学家已经

历经十几年的积累和探索,尤其是经过国际极地年的锤炼,中国的北极物理海洋学研究已经逐步与国际北极研究接轨。利用历次中国北极科学考察的物理海洋学数据和国外的科考数据,我们对北冰洋上层海洋热结构、加拿大海盆淡水含量和北欧海热通量的变化、白令海水团的特性、次表层暖水的形成发展机制及时空分布、北极中层水及双扩散阶梯结构及热量传输、北冰洋主要锋面的特征、楚科奇海域潮流的结构和变化以及北冰洋环流的结构和变化有了较为系统的认识,有利于我们对北冰洋海域的水文环境给出综合的评估,同时为北极海冰、大气、生态环境等的研究提供了一定的基础。

未来的研究仍然将以各种水文现象的结构和机制为重点,同时也要发展与气候变化相关联的研究领域,重点研究北极对我国气候的直接和间接的影响。具体来说需要优先发展以下几个相互关联的科学方向:

(1)海洋和海冰的变化过程和物理机制的研究。海冰是海水的相变,海冰变化的实质还是大气、海洋和海冰之间的能量分配与调整。热力学过程在能量收支方面占支配作用,而动力学过程在能量分配和内部调整方面是决定性因素。深入研究将突破海气相互作用的限制,从更高的立点看待北极的变化及其对气候系统的影响,将大气、海洋与海冰作为同一个能量系统,北极快速变化作为系统内部的演化和调整而发生和发展,得到对北极长期变化更深刻的认识。

(2)北极整体循环和北极环极边界流研究。北极环极边界流的提出虽然只有十几年的时间,但也即将成为历史。现有研究正在揭示出北极中层环流对全球海洋热盐环流的重要作用,认识到发生在北极的过程将影响到全球海洋循环,深刻地影响现今的全球气候及未来的气候演化,是全球系统中最有价值的动力体系。而这个体系中的诸多环节还很不清楚,需要物理海洋学家深入研究,增进对影响北极环极边界流变化过程因素的研究。

(3)作为北冰洋的一部分,北欧海因其高密度水对北大西洋深层水的补充作用而深刻影响北大西洋经向翻转流的强度,并由此影响到全球气候。北极是全球变化最敏感的区域之一。近年来,由于全球变暖的影响,北欧海中层水呈增暖的趋势,而与此同时,上层表现为显著的淡化,以格陵兰海为主的深对流减弱。这些变化对气候系统产生了显著的反馈作用,并通过北大西洋涛动以及遥相关等机制影响东亚季风

以及中国气候。所以,认识和研究北欧海的海洋过程 对我国的影响是非常重要的。

参考文献:

- [1] Cao Yong,Zhao Jinping. Progress of China in Arctic physical oceanography and sea ice physics during 2007—2010[J]. *Advances in Polar Science*, 2011,22(4): 281—292.
- [2] Perovich D K,Light B,Eicken H,et al. Increasing solar heating of the Arctic Ocean and adjacent seas,1979—2005: Attribution and role in the ice-albedo feedback[J]. *Geophysical Research Letters*,2007,34: L19505.
- [3] Steele M,Ermold W,Zhang J L. Arctic Ocean surface warming trends over the past 100 years[J]. *Geophysical Research Letters*,2008, 35: L02614.
- [4] Polyakov I V,Alexeev V A,Belchansky G I,et al. Arctic Ocean freshwater changes over the past 100 years and their causes[J]. *Journal of Climate*, 2007,21(2): 364—384.
- [5] Serreze M C,Holland M M,Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. *Science*,2007,315(5818): 1533—1536.
- [6] McPhee M G,Proshutinsky A,Morison J H,et al. Rapid change in freshwater content of the Arctic Ocean[J]. *Geophysical Research Letters*,2009, 36: L10602.
- [7] 赵进平,Ken D. 北海主要海盆海面热通量的多年变化[J]. *中国海洋大学学报*,2014,44(10): 9—24.
Zhao Jinping, Ken D. Multyear variation of the main heat flux components in the four basins of Nordic Seas[J]. *Periodical of Ocean University of China*,2014,44(10): 9—24.
- [8] Hurrell J W. Decadal trends in the North Arctic Oscillation: regional temperature and precipitation[J]. *Science*,1995,269:676—679.
- [9] Thompson D W J,Wallace J M. The Arctic oscillation signature in wintertime geo potential height and temperature fields[J]. *Geophys Res Lett*, 1998,25: 1297—1300.
- [10] Taylor P D,Feltham D L. A model of melt pond evolution on sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research*,2004,109: C12007.
- [11] Zhang Shugang,Zhao Jinping,Shi Jiuxin,et al. Surface heat budget and solar radiation allocation at a melt pond during summer in the central Arctic Ocean[J]. *Journal of Ocean University of China*,2014,13(1): 45—50.
- [12] 赵进平,史久新,矫玉田. 夏季北冰洋海冰边缘区海水温盐结构及其形成机理[J]. *海洋与湖沼*,2003,34(4): 375—388.
Zhao Jinping,Shi Jiuxin,Jiao Yutian. Temperature and salinity structure in summer marginal ice zone of Arctic Ocean and an analytical study on its thermodynamics[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*,2003,34(4): 375—388.
- [13] 王翠,赵进平. 夏季北冰洋无冰海域次表层暖水结构的形成机理[J]. *海洋科学进展*,2004,22(2): 130—137.
Wang Cui,Zhao Jinping. Formation mechanism of subsurface warm water in summer ice-free sea area if the Arctic Ocean[J]. *Advances in Marine Science*,2004,22(2): 130—137.
- [14] 陈志华,赵进平. 北冰洋次表层暖水形成机制的研究[J]. *海洋与湖沼*,2010,41(2): 167—174.
Chen Zhihua,Zhao Jinping. The thernodynamics of subsurface warm water in the Arctic Ocean[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*,2010,41(2): 167—174.
- [15] Cao Yong,Su Jie,Zhao Jinping,et al. The study on near surface temperature maximum in the Canada Basin for 2003—2008 in response to sea ice variations[C]//*Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Beijing,2010: 1238—1242.
- [16] 曹勇,赵进平. 2008 年加拿大海盆次表层暖水的精细结构的研究[J]. *海洋学报*,2011,33(2): 11—19.
Cao Yong,Zhao Jinping. Study on the fine structure of near surface temperature maximum in the Canada Basin in 2008[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011,33(2): 11—19.
- [17] Cao Yong,Zhao Jinping,Chen Zhihua. The thermal feedback mechanism of near sea-surface temperature maximum[C]//*Proceedings of the Twenty-first (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference*. Hawaii,2011.
- [18] Zhao Jinping,Cao Yong. Summer water temperature structures in upper Canada Basin and their interannual variation[J]. *Advances in Polar Science*,2011,22(4): 223—234.
- [19] Morison J,Kwok R,Peralta-Ferriz C,et al. Changing Arctic Ocean Freshwater Pathways[J]. *Nature*,2012,481:66—70.
- [20] Li Shujiang,Zhao Jinping,Su Jie,et al. Warming and depth convergence of the Arctic Intermediate Water in the Canada Basin during 1985—2006 [J]. *Acta Oceanol Sin*,2012,31(4):1—9.
- [21] Zhong Wenli,Zhao Jinping. Deepening of the Atlantic Water core in the Canada Basin in 2003—11[J]. *Journal of Physical Oceanography*,2014, 44:2353—2369.
- [22] 赵倩,赵进平. 加拿大海盆双扩散阶梯结构分布与能通量研究[J]. *地球科学进展*,2011,26(2): 193—201.
Zhao Qian,Zhao Jinping. Distribution of double diffusive staircase structure and heat flux in the Canadian Basin[J]. *Advances in Earth Science*, 2011,26(2): 193—201.
- [23] 宋雪珑,周生启,Ilker Fer. 北冰洋上层双扩散阶梯热通量的分析[J]. *海洋学报*,2014,36(1):65—71.
Song Xuelong,Zhou Shengqi,Ilker Fer. Analysis of the doubled-diffusive heat flux in the upper Arctic Ocean[J]. *Haiyang Xuebao*,2014,36(1): 65—71.
- [24] 屈玲,宋雪珑,周生启. 加拿大海盆东南部锚定观测双扩散阶梯的时间演化研究[J]. *海洋学报*,2015,37(1): 21—29.

- Qu Ling, Song Xuelong, Zhou Shengqi. Temporal evolution of mooring-based observations of double diffusive staircases in the southeast Canada Basin[J]. *Haiyang Xuebao*, 2015, 37(1): 21—29.
- [25] Maslanik J A, Fowler C, Stroeve J, et al. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L24501.
- [26] Lindsay R W, Zhang J, Schweiger A, et al. Arctic Sea Ice retreat in 2007 follows thinning trend[J]. *J Climate*, 2009, 22: 165—176.
- [27] Pfirman S, Haxby W F, Colony R, et al. Variability in Arctic sea ice drift[J]. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L16402.
- [28] Hakkinen S, Proshutinsky A, Ashik I. Sea ice drift in the Arctic since the 1950s[J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L19704.
- [29] Rampal P J, Marsan W D. Arctic sea ice velocity field: General circulation and turbulentlike fluctuations[J]. *J Geophys Res*, 2009, 114: C10014.
- [30] Woodgate R A, Weingartner T J, Lindsay R. Observed increases in Bering Strait oceanic fluxes from the Pacific to the Arctic from 2001 to 2011 and their impacts on the Arctic Ocean water column[J]. *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L24603.
- [31] 张洋, 苏洁. 白令海峡夏季流量变化的影响因素分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(5): 1—10.
Zhang Yang, Su Jie. The inter-annual variability in the volume transport through Bering Strait and its related factors[J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(5): 1—10.
- [32] Wang Xiaoyu, Zhao Jinping. Seasonal and inter-annual variations of the primary types of the Arctic sea ice drifting patterns[J]. *Advances in Polar Science*, 2012, 23(2): 72—81.
- [33] Zhong Wenli, Zhao Jinping. Variation of upper-ocean heat content in the Canada Basin in summers of 2003 and 2008[J]. *Advances in Polar Science*, 2011, 22(4): 235—245.
- [34] Guo Guijun, Shi Jiuxin, Zhao Jinping, et al. Summer freshwater content variability of the upper ocean in the Canada Basin during recent sea ice rapid retreat[J]. *Advances in Polar Science*, 2011, 22(3): 153—164.
- [35] 郭桂军, 史久新, 赵进平, 等. 北极海冰快速减少期间加拿大海盆上层海洋淡水含量变化[J]. *极地研究*, 2012, 24(1): 35—46.
Guo Guijun, Shi Jiuxin, Zhao Jinping, et al. Summer freshwater content variability of the upper ocean in the Canada Basin during recent sea ice rapid retreat[J]. *Advances in Polar Science*, 2012, 24(1): 35—46.
- [36] 邵秋丽, 赵进平. 北欧海深层水形成的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(1): 42—55.
Shao Qiuli, Zhao Jinping. On the deep water of the Nordic Seas[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(1): 42—55.
- [38] Cayan D R. Latent and sensible heat flux anomalies over the northern oceans; driving the sea surface temperature[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1992, 22(17): 859—881.
- [39] Kawamura R. A rotated EOF analysis of global sea surface temperature variability with interannual and interdecadal scales[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1994, 24(3): 707—715.
- [40] Deser C, Blackmon M L. Surface climate variability over the North Atlantic Ocean during winter: 1900—1989[J]. *J Climate*, 1993, 6: 1743—1753.
- [41] Slonosky V C, Mysak L A, Derome J. Linking arctic sea ice and atmospheric circulation anomalies interannual and decadal time scales[J]. *Atmosphere Ocean*, 1997, 35(3): 333—366.
- [42] 牟龙江, 赵进平. 格陵兰海冰外缘线变化特征分析[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 709—717.
Mu Longjiang, Zhao Jinping. Variability of the Greenland Sea ice edge[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 28(6): 709—717.
- [43] 汤毓祥, 矫玉田, 邹娥梅. 白令海和楚科奇海水文特征和水团结构的初步分析[J]. *极地研究*, 2001, 13(1): 57—68.
Tang Yuxiang, Jiao Yutian, Zou Emei. A preliminary analysis of the hydrographic feature and water masses in the Bering Sea and the Chukchi Sea [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2001, 13(1): 57—68.
- [44] 高郭平, 侍茂崇, 赵进平, 等. 1999年白令海夏季水文特征分析[J]. *海洋学报*, 2002, 24(1): 8—16.
Gao Guoping, Shi Maochong, Zhao Jinping, et al. An Analysis of the hydrographic feature of the Bering Sea in Summer, 1999[J]. *Haiyang Xuebao*, 2002, 24(1): 8—16.
- [45] 高郭平, 董兆乾, 侍茂崇. 1999年夏季中国首次北极考察区水团特征[J]. *极地研究*, 2003, 15(1): 11—20.
Gao Guoping, Dong Zhaoqian, Shi Maochong. Water properties of the seas surveyed by Chinese First Arctic Research Expedition in Summer, 1999 [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, 15(1): 11—20.
- [46] 高郭平, 赵进平, 董兆乾, 等. 白令海峡海域夏季温盐分布及变化[J]. *极地研究*, 2004, 16(3): 229—239.
Gao Guoping, Zhao Jinping, Dong Zhaoqian, et al. Distribution and variation of temperature and salinity around the Bering Strait[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(3): 229—239.
- [47] Zhao Jinping, Shi Jiuxin, Gao Guoping, et al. Water mass of the northward throughflow in the Bering Strait in summer 2003[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25(2): 25—32.
- [48] 王晓宇, 赵进平. 北白令海夏季冷水团的分布与多年变化研究[J]. *海洋学报*, 2011, 33(2): 1—10.
Wang Xiaoyu, Zhao Jinping. Distribution and inter-annual variations of the cold water on the northern shelf of Bering Sea in summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(2): 1—10.
- [49] 赵进平, 高郭平, 矫玉田. 楚克奇海台及其周边海域中层水增暖特征[J]. *中国科学 D辑: 地球科学*, 2004, 34(2): 188—194.
Zhao Jinping, Gao Guoping, Jiao Yutian. Warming in Arctic intermediate and deep waters around Chukchi Plateau and its adjacent regions in 1999 [J]. *Science in China Ser D: Earth Sciences*, 2004, 34(2): 188—194.

- [50] Zhao Jinping, Gao Guoping, Jiao Yutian. Warming in Arctic intermediate and deep waters around Chukchi Plateau and its adjacent regions in 1999 [J]. *Science in China Ser D: Earth Sciences*, 2005, 48(8): 1312–1320.
- [51] 何琰, 赵进平. 北欧海的锋面分布特征及其季节变化[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(10): 1079–1091.
He Yan, Zhao Jinping. Distributions and seasonal variations of fronts in GIN Seas [J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(10): 1079–1091.
- [52] Nilsen J E O, Falck E. Variations of mixed layer properties in the Norwegian Sea for the period 1984–1999 [J]. *Progress in Oceanography*, 2006, 70(1): 58–90.
- [53] 王辉武, 刘娜, 赵昌, 等. 2008 年夏季楚科奇海余流分布特征[J]. *海洋科学进展*, 2012, 30(3): 338–346.
Wang Huiwu, Liu Na, Zhao Chang, et al. Distribution characteristics of residual current in the Chukchi Sea in summer 2008 [J]. *Advances in Marine Science*, 2012, 30(3): 338–346.
- [54] 舒启, 乔方利, 陈红霞. 2008 年夏季楚科奇陆架海域近底层水温大幅快速变化事件研究[J]. *海洋学报*, 2012, 34(1): 57–63.
Shu Qi, Qiao Fangli, Chen Hongxia. Rapid and significant temperature changes at the near bottom of central Chukchi Sea in summer 2008 [J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(1): 57–63.
- [55] 王辉武, 陈红霞, 吕连港. 楚科奇海夏季潮流和余流观测研究[J]. *海洋学报*, 2011, 33(6): 1–8.
Wang Huiwu, Chen Hongxia, Lü Lian'gang, et al. Study of tide and residual current observations in Chukchi Sea in the summer 2008 [J]. *Haiyang Xuebao*, 2011, 33(6): 1–8.
- [56] 刘国昕, 赵进平. 海洋层化和海冰漂移速度变化对北极冰下海洋 Ekman 漂流的影响[J]. *中国海洋大学学报*, 2013, 43(2): 1–7.
Liu Guoxin, Zhao Jinping. The influence of stratification on Ekman Drift under sea ice [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2013, 43(2): 1–7.
- [57] Macdonald A, Wunsch C. The global ocean circulation and heat flux [J]. *Nature*, 1996, 382: 436–439.
- [58] 史文奇, 赵进平. 北冰洋水体对格陵兰海混合增密对流的可能影响分析[J]. *海洋学报*, 2012, 34(6): 19–29.
Shi Wenqi, Zhao Jinping. Analysis of possible effects of various water masses in Arctic Ocean to Greenland Sea isopycnal cabling convection [J]. *Haiyang Xuebao*, 2012, 34(6): 19–29.
- [59] 赵进平, 史久新. 北极环极边界流研究及其主要科学问题[J]. *极地研究*, 2004, 16(3): 159–170.
Zhao Jinping, Shi Jiuxin. Research progresses and main scientific issues in studies for Arctic circumpolar boundary current [J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(3): 159–170.

Progress in Arctic physical oceanography in China during 2011–2014

Cao Yong¹, Zhao Jinping¹

(1. College of Physical and Environment Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Over the past ten years sea ice changes have been the main feature in the Arctic rapidly changing. However, the ocean plays a key role in the ice-sea-air change system. The Arctic Ocean not only affects the ice melting and freezing processes, but also is the main source of energy of the atmospheric change. In the context of rapid changes in Arctic sea ice, the Arctic Ocean feature has also undergone a series of changes. After the Fourth International Polar Year, Chinese has made a series of scientific research in the Arctic physical oceanography. In this paper Arctic water masses, fronts, currents, the structure of the upper ocean and other major hydrological phenomena were summed up during the 2011–2014.

Key words: Arctic; physical oceanography; thermodynamics; water mass; current