

Tidal Current Variations in Canada Basin during the Arctic Sea Ice Retreat

Daohuan Xu, Ling Du*, Jingkai Ma

College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong
Email: *duling@ouc.edu.cn

Received: May 3rd, 2018; accepted: May 21st, 2018; published: May 28th, 2018

Abstract

In recent years, Arctic upper oceanic and tidal current are changed accompanied with sea ice rapidly declined. In this study, we analyzed the variations of near-surface tidal current in Canada Basin from 2005 to 2016. Canada Basin is dominated by semidiurnal constituent and the tide is changed with the variations of local sea ice areas, mean flow and surface wind. The speed of semidiurnal and diurnal constituent are small in Canada Basin, while the oscillation is significant that tidal current is always intensified during melting-frozen season. Compared with summer of 2012 and winter of 07/08, the semi-monthly oscillation has been found in oceanic current. Both tidal and mean flow component of MS_1 present barotropic structure that the vertical shear is weak, while the M_2 constituent shows layered structure. It's considered that the enhanced of semi-monthly current is influenced by wind field, while the layered structure of M_2 is related with local inertial motion.

Keywords

Tidal Current, Semi-Monthly Oscillation, Canada Basin, Tidal Current-Sea Ice Interaction

北极海冰减退期间加拿大海盆潮流变化特征

徐道欢, 杜 凌*, 马靖凯

中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛
Email: *duling@ouc.edu.cn

收稿日期: 2018年5月3日; 录用日期: 2018年5月21日; 发布日期: 2018年5月28日

摘 要

近年来北极海冰快速变化, 北冰洋上层海洋环流和潮流也发生变化。本文利用波弗特流涡勘探计划

*通讯作者。

(Beaufort Gyre Exploration Project)的锚定实测海流数据,分析了2005~2016年间加拿大海盆的近表层潮流的变化特征。潮流类型主要为半日潮,且随海冰面积、平均流以及大气风场的变化而改变。海冰快速减退期间加拿大海盆的主要半日和全日分潮流较小,但潮流流速变化显著,潮流椭圆呈顺时针旋转,椭圆倾角则随深度逆时针旋转。融冻期会出现潮流增大的情形。本文对比分析了2012年夏季和2007/08年冬季的潮流垂直结构,发现融冻期加拿大海盆海流存在显著半月周期变化。半月 MS_1 分潮流和平均流均呈正压结构,垂直剪切明显偏弱,而同期半日 M_2 分潮流则表现出较为明显的分层结构。融冻期近表层半月分潮流增大是受大气风场半月周期变化的影响,而半日分潮流垂直结构差异则可能与局地惯性运动有关。

关键词

潮流, 半月变化, 加拿大海盆, 潮流 - 海冰相互作用

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

加拿大海盆(包括波弗特流涡)蕴含着 $45,000 \text{ km}^3$ 的淡水[1],是北冰洋八大主要河流年径流量的 10~15 倍,是北冰洋最主要的“淡水库”。波弗特流涡(Beaufort Gyre, 简记 BG)作为加拿大海盆上层海洋环流的主要特征,其流型结构和强度的变化与调整,均关系到北极淡水储存和运移,以及多年冰的变化。

北冰洋海洋变化是影响北极海冰变化的最重要因素之一[2]。关于北冰洋潮汐的认识,最早可以追溯到北冰洋沿岸验潮站设立之后,而 Kowalik 和 Proshutinsky [3]则首次系统的给出了包括深海洋盆和陆架海域的北冰洋潮汐特征,此后随着海洋潮汐模式的发展和卫星数据的应用,这一海域的海洋潮汐研究得到了迅速发展。

与海洋潮汐类似,北冰洋海冰运动也具有较为显著的潮周期。潮流运动以及潮致海冰的辐合辐散,一方面有利于冰间水道的形成[4]以及冰面融池的维持[5],进而影响局地冰-海-气间的热量交换;另一方面在海流较弱的海域,潮流与海冰的相互作用则是北冰洋海洋混合的主要来源[6]。近年来利用锚系海流资料,探讨北冰洋 Laptev 海上层 S_2 分潮流与局地海冰密集度有很好的相关关系[7]。数值模式结果也显示,潮汐运动会引起北极海冰冰量减少 15%,并影响表面盐度的分布特征[8]。

基于我国第二次北极科考数据的研究发现,与主要半日和全日分潮流相比而言,夏季北冰洋海流存在较为显著的半月周期变化。白令海峡附近,这种半月分潮流(MS_1)振幅约为平均流的一半,比主要半日和全日分潮流大得多[9] [10]。研究还发现,这种出现在白令海峡和楚科奇海的半月周期变化,不完全是由天文半月 MS_1 分潮引起的,还受大气因素、平均流变化以及海底地形的共同影响。

全球变暖对北极产生了持续的影响,21 世纪来北极增暖的趋势明显高于全球平均水平[11],与之同时发生的是北极海冰覆盖范围显著减小,2007 年夏季发生了海冰面积锐减了 31%的事件[12],而美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, 简记 NSIDC)监测的 2012 年夏季海冰面积更是打破历史观测记录。这种北极海冰快速变化引起了北极科学界的高度关注。由于北冰洋的海流实测资料相对匮乏,已有的研究又大多集中在北冰洋陆架海域,对深海洋盆(如波弗特流涡)区的上层海洋的潮流结构,以及海冰与潮流半月变化相联系的认识仍待深入。本文利用加拿大海盆内的近 10 余年的锚定海流数据,结

合海冰数据,在对原始数据进行质量控制的基础上,探讨了该海域潮流的基本特征以及影响海流半月周期变化的可能因素。

2. 数据与方法

2.1. 数据

2.1.1. 实测海流数据

本文用于分析北冰洋加拿大海盆上层海流的变化特征的数据,来自伍兹霍尔海洋研究所提供的波弗特流涡勘探计划(Beaufort Gyre Exploration Project, 简记 BGEP)的锚定实测海流数据(数据网址:<http://www.whoi.edu/website/beaufortgyre/data>)。锚定测量系统位于加拿大海盆的波弗特流涡内。该锚定测量系统由以下几部分组成:1) 420 kHz 仰视声呐环境科学测量仪,用以提供上 50 m 的海流以及海冰漂流信息;2) 系缆式剖面仪 MMP,提供 50~2050 米深度范围的海流和水文数据;3) 高精度海底压力记录仪,用来获取海表面高度变化以及海底 3800 米处的水温。

波弗特流涡是一支控制加拿大海盆和波弗特海的反气旋式环流,这里平均水深可达 3000 m (图 1),基于全球简单海洋资料同化分析系统(Simple Ocean Data Assimilation, 简记 SODA)的海流数据可以很好的捕捉到加拿大海盆中 BG 的基本特征。本文利用加拿大海盆内三个锚定系统的上 30 米(2 米深度间隔)的逐时海流观测资料。锚定系统分别位于加拿大海盆南部的 A 点,中心区的 B 点,以及北部的 C 点,海流实测数据的基本信息见图 1。其中南部的 A 站具有较连续的长时间序列,下文中分析海流和潮流变化特征的工作也主要基于该站的观测资料。

2.1.2. 海冰、风场数据

海冰密集度数据由 NSIDC 提供(数据网址:<http://nsidc.org/data/G02202/versions/3>),是由被动微波的亮温数据,综合运用 NASA Team 和 NASA Bootstrap 两种反演算法得到的海冰数据,空间分辨率为 25 km [13]。该资料融合了 SSMR、SSM/I 和 SSMIS 多个传感器的数据,其优势是能够形成连续的海冰长期变化序列。本文选取的是其日均海冰密集度数据,时间段为 2005~2015 年。本文统计分析了近年来日均海冰密集度数据,计算锚定系统附近海域的海冰面积,探讨局地海冰演变与上层海洋环流、潮流变化的关系。

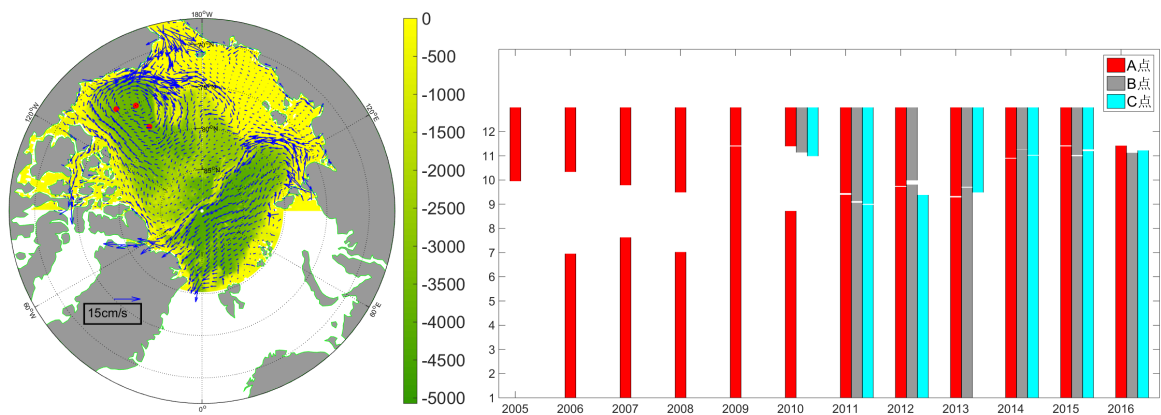


Figure 1. Surface circulation of Arctic Ocean and detail information about the three mooring systems (Dots indicate the locations of three mooring systems, vectors indicate surface circulation based on the SODA assimilation datasets during 2005-2015; shading color indicates the bathymetry in Arctic basins; the marked region indicates the Beaufort Gyre.)

图 1. 海冰快速减退时期北冰洋表层环流及锚定海流数据的基本信息(圆点为锚定点所在位置: A(74°N, 140°W)、B(75°N, 148°W)、C(78°N, 148°W); 矢量由 2005~2015 年 SODA 同化数据得到 5 米深处的表层环流, 单位: cm/s; 阴影显示北冰洋水深; 图中所示区域为波弗特流涡)

大气风场数据来自欧洲中尺度天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)提供的 ERA-Interim 数据集(网址: <http://apps.ecmwf.int/datasets/>)。该数据为再分析数据,采用了 ORA-S3 海洋同化/再分析系统,这一系统不但能够提供实时的季节预报,还可以为气候研究提供历史数据。我们使用了 10 米处风场再分析数据,其空间分辨率为 1/4 度。

2.2. 实测资料的处理

综合分析原始锚定观测资料的数据质量、连续性审查等,对 BGEP 锚定数据进行了如下质量控制和筛选。为了更好的研究半月潮流变化[14],本文对经过质量控制后的实测海流资料,进行了 45 天的滑动潮流调和,滑动窗口为 10 天。潮流调和后,共得到 34 个分潮的潮流流速、旋转率等椭圆要素,我们选择了较有代表性的半月分潮 MS_f 和半日分潮 M_2 进行研究。

对于实测数据每 1 小时即测得一个数据的情形,本文假设海流数据在短时间内(考虑半日分潮 M_2 的涨潮时、落潮时,这里取为 6 小时)应具有较好的连续性,不发生大幅度的改变,因此采用窦以文等(2008)方法审查时间序列的连续性:

$$|V_i - V_{i-1}| + |V_i - V_{i+1}| \leq 4\sigma V$$

其中, V_{i-1} 、 V_i 和 V_{i+1} 分别是连续三个时刻的观测值, σ 为 i 时刻附近 6 小时观测值的标准偏差,如果当前时刻的测量值 V_i 不满足此条件,则将其作为异常值处理。

3. 表层海流特征

采用上节介绍的海流观测资料的质量控制,很好的保留了原始海流信息的同时,又提高了观测数据质量,进而分析北极海冰快速变化期间,加拿大海盆表层海流变化的基本特征。

3.1. 表层流

波弗特流涡是加拿大海盆主要的环流系统,表层环流具有较为稳定的环流系统。统计了加拿大海盆内三点的海流资料,其中 A 点共计 82451 个小时, C 点共计 47595 个小时,资料最少的 B 点也有 40,077 个小时的观测数据。本文参照风玫瑰分布,分析了 16 个方位上层流流的统计特征(图 2, 表 1)。

与同期 SODA 海流同化资料结果基本一致(图 1),位于加拿大海盆核心区的三个锚定系统的海流主轴方向很好的表征了表层环流特征。南部锚系 A 站的海流主轴方向为南向,出现频率约占 52%(表 1);在

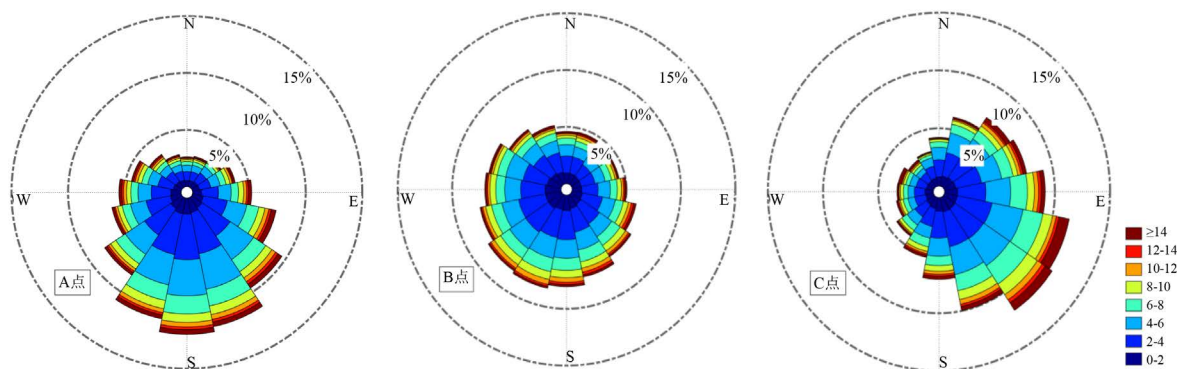


Figure 2. Statistics of upper layer currents in the 16 directions (shading sectors indicate the statistical frequency of the specified speed intervals, whose unit is cm/s)

图 2. 锚定表层海流数据在 16 个方位上的统计特征(所在深度为 3 米,阴影指示不同流速区段的统计频率,流速单位: cm/s)

Table 1. Statistical frequency of three mooring current systems in the upper ocean
表 1. 三个锚定系统的表层海流统计频率(%)

方向	N	NNW	NW	WNW	W	WSW	SW	SSW	S	SSE	SE	ESE	E	ENE	NE	NNE
角度 (°)	0	22.5	45	67.5	90	112.5	135	157.5	180	202.5	225	247.5	270	292.5	315	337.5
A 点	2.6	2.9	3.5	4.5	5.5	6.3	8.2	10.8	12	11.5	9.6	7.5	5.2	3.9	3.2	2.7
B 点	4.6	5.3	5.9	6.8	7	7.6	8.1	8.4	8.1	7.4	6.7	6	5	4.4	4.3	4.6
C 点	4.2	3.1	2.8	3.3	3.3	3.4	4.1	5.3	7.1	10	11.9	11.5	9.1	7.6	7.2	6.1

主轴方向上, 表层环流流速仍较小, 流速大多集中在 2~6 cm/s。北部锚系 C 站主要表现为东南方向, 出现频率为 50%; 中心锚系 B 站, 流速较小, 没有显著占优的海流主轴方向。

表层海流的季节变化与加拿大海盆海冰面积变化密切的联系。统计结果显示, 冰封期(12 月-次年 1 月)表层流速较小, 不足 5 cm/s; 而夏季(7~9 月)海冰面积迅速减小, 此时加拿大海盆表层流速明显加快, 流速增大 3~4 倍, 最大可超过 20 cm/s。值得注意的是, 某些年份的冬季(如 2006、2008、2012 和 2013 年的 1 月), 曾出现较为显著的流速增大事件, 以及 2007/08 冬季的平均流转向(图 3)。

3.2. 潮流变化

本文对质量控制后的海流锚系观测资料, 进行了 10 天滑动的调和分析, 探讨该海域上层潮流变化特征。平均流是从海流实测资料减去 35 个分潮流后得到的。研究发现, 北冰洋的主要半日和全日分潮流较小, 这与前人在楚科奇海台附近海域的研究结果相近(Li *et al.*, 2005), 半日分潮流显著大于全日分潮流, 潮流类型为半日潮流特征。最大分潮流流速变化显著, 如 M_2 最大分潮流流速为 1.2 ± 1.2 cm/s。加拿大海盆内潮流随海冰变化(融化-冻结)、平均流的变化而改变, 在海冰快速减退期间(2006~2016), 几乎所有的融冻期均有分潮流增速的情形(图 3)。这里的融冻期(融化-冻结时期)是指, 局地海冰从平均海冰密集度出现低于 85%, 融化至年最低值后, 再次冻结至平均海冰密集度高于 85%所经历的时间。潮流流速增大最显著的是半月 MS_f 分潮流和半日 M_2 分潮流。前者流速在 2012 年融冻期达到最大, 可达 8.5 cm/s, 是其平均值的 6 倍。融冻期 MS_f 最大分潮流与当年局地海冰面积($71^\circ\text{N}\sim 77^\circ\text{N}$, $135^\circ\text{W}\sim 145^\circ\text{W}$ 范围内的海冰面积)呈负相关关系, 海冰的大面积减少往往伴随着分潮流速度的增大, 如 2013~2015 年夏季海冰面积减退, 同期半月分潮流速度也明显增强。其他两个锚系数据中也有类似的现象(图略)。2009 年融冻期海冰面积为 7.1×10^4 km² 时, 明显高于夏季最低值, 而同期半日 M_2 分潮流却达到观测记录内的最大值。而且以上两个时段, 均对应地出现了表层平均流增大的现象。这表明, 大面积融冰出现, 波弗特涡旋和局地海冰、大气间相互作用有利于近表层潮流明显加强。

调和分析的结果显示, 加拿大海盆融冻期会出现显著的海流的半月周期变化, 其最大流速要比平均流和主要潮流都大, 这与前人的研究结果相似(杜凌等, 2011)。但作者也发现在冬季波弗特海被大面积海冰覆盖时, 如 2008 和 2012 年初, 平均海冰密集度均高于 85%, 而同时存在半月周期潮流的增速现象。下文结合同期大气、海冰和海流数据, 分析了不同海冰覆盖率情形下, 加拿大海盆近表层海流的半月变化差异。

4. 海流的半月周期变化

北冰洋主要潮流较小, 本文研究发现近表层潮流仍存在较为显著的半月变化, 且在北冰洋的深海洋盆海域, 这种半月变化特征, 及其与局地海冰以及大气因素变化的可能联系还不清楚。本文结合锚定测量系统(南部 A 站)附近的海冰变化及 ERA-Interim 10 米风场数据, 探讨这种半月周期变化的可能机理。

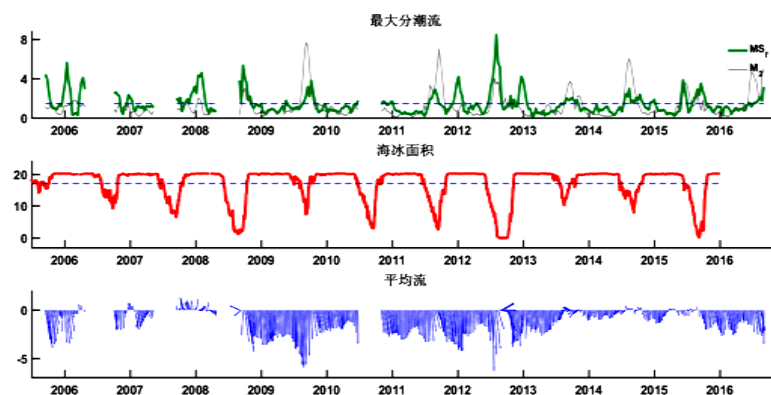


Figure 3. Upper tidal currents, regional sea ice area and mean currents at the mooring sta. A. (the maximum currents are shown for the semi-monthly MS_f and semi-diurnal M_2 constituents; sea ice area is calculated in the region 71°N - 77°N , 135°W - 145°W , unit in 10^4 km^2 ; moving harmonic analysis of tidal currents is conducted in the period of 45-day with 10-day moving windows)

图 3. 南部锚系 A 站的表层潮流流速(半月 MS_f 分潮流、半日 M_2 分潮流), 局地海冰面积(71°N - 77°N , 135°W - 145°W , 单位 10^4 km^2)和表层平均流的变化特征(潮流调和分析的滑动窗口为 10 天、分析时段是 45 天)

4.1. 垂直结构

不同季节和海冰状况期间, 加拿大海盆的半月 MS_f 分潮和半日 M_2 分潮的最大分潮流有明显的差异, 分潮流椭圆要素显示主要在夏季海冰大面积融化时增大; 此外, 冬季的冰封期也会出现最大分潮流增大的现象(图 3)。考虑到海流的半月周期变化的显著程度以及锚定系统附近的海冰分布状况, 本文选取了 2007/08 年冬季(2008 年 1~2 月)和 2012 年夏季(2012 年 7~8 月)两个时期(图 4), 具体分析海流的垂直结构差异。两个时期的平均流流速、潮流椭圆要素分析结果以及数据质量见表 2。

夏季加拿大海盆海域近表层半月 MS_f 分潮流和半日 M_2 分潮流的垂直结构呈现出不同的变化规律。分析时段(2012.7.20~9.3)内, 局地海冰面积由 $7.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ 锐减至 0, 此时半月 MS_f 分潮流、平均流均呈正压结构, 垂直剪切弱, 而半日 M_2 分潮流则表现为较为明显的分层结构(图 4)。 MS_f 最大分潮流流速的垂直结构较为一致, 随深度缓慢减小, 至 23 m 观测深度处流速约减小了 35%。分潮流的旋转率显示, MS_f 分潮流主要表现为往复式潮流, 随深度的增加旋转率变大, 开始表现出某些回转式潮流的特征。潮流椭圆倾角随深度逆时针旋转, 表层至近表层 23 m 米深度上, 椭圆主轴仅旋转了 34 度左右, 且平均流方向的变化与之一致。半日 M_2 分潮流为回转式潮流, 其垂直结构较为复杂。随着深度的增加, 潮流流速明显增大, 23 m 处潮流速度是表层的 3 倍; 与此同时, 旋转率也随深度迅速变大, 17 m 以深分潮流的最大流速和最小流速几乎相当, 旋转率的大小也接近 0.9。 M_2 分潮流椭圆倾角也表现为随深度逆时针旋转, 然而旋转幅度明显大于半月分潮流, 可达 100 度。北部锚定 C 站也有类似的现象出现。

冬季, 研究海域被大面积海冰所覆盖, 海流为正压结构, 潮流(包括半月 MS_f 分潮流和半日 M_2 分潮流)和平均流均减弱(表 2)。在 2007/08 年冬季, 分潮流在垂直方向上的变化特征, 同样表现为半月分潮呈往复式潮流且速度随深度减小, 半日分潮呈回转式潮流且速度随深度增加。但由于 11 m 以深海流观测数据缺测率超过四分之一, 近表层的海流垂直结构尚需进一步验证。

4.2. 与海冰、大气因素变化的关系

调和分析的结果表明除得到半日和全日潮流特征(表 2)外, 也同时发现海流变化存在非常明显的半月

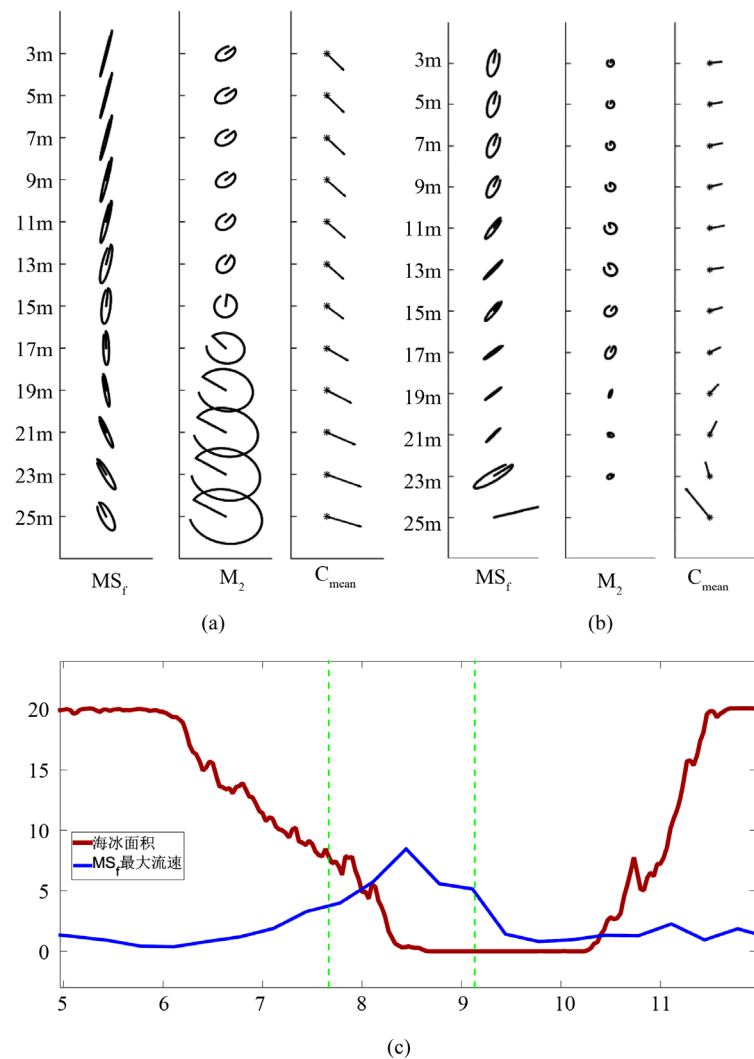


Figure 4. The vertical structure of semi-monthly MS_F , semi-diurnal M_2 and mean flow at mooring sta. A during the 2012 summer and 2007/08 winter (2012.7.20-9.3, 2008.1.16-2.29), and the variations of maximum current of semi-monthly MS_F and regional sea ice area during May to November 2012

图 4. 南部锚系 A 站的 MS_F 、 M_2 分潮流和平均流的垂直结构差异 (a) 2012 年夏季, 7.20~9.3; (b) 2007/08 年冬季, 2008.1.16~2.29), 以及 (c) 2012 年 5~11 月 MS_F 分潮流最大流速 (单位: cm/s) 及局地海冰面积变化 (单位: 10^4 km^2)

周期, 即对应着天文分潮中的 MS_F 分潮, 且半月周期最大潮流约是 M_2 分潮流的两倍, 垂直剪切弱。这种半月周期的变化, 其中一部分是由于天文半月分潮(MS_F 分潮)本身引起的, 同时还包括具有与 MS_F 相近周期的非潮分量, 而后者则可能与北冰洋及其周围海域间的大气风场变化有关(杜凌等, 2011), 同时又受局地海冰变化影响。

加拿大海盆中的半月和半日周期变化在垂直方向上呈反向变化, 可能由于局地海冰大面积融化, 导致近表层海流与大气风场变化密切联系。本文分析了表 2 的两个时段期间的 ERA-Interim 的 10 米风速的周期特征(图 5), 由于本文关注的是半月周期变化, 对一天四次的风速数据采用了五点平滑处理。2012 年融冻期, 分析时段内(7 月中旬至 9 月初)锚定系统附近的风速表现出明显的半月变化, 小波分析结果显示其显著周期为 12~15 天。同时, 加拿大海盆的海冰面积在 2012 年达到了有记录以来的最低值(NSIDC),

Table 2. Mean flow and major tidal component ellipse of Southern Sta. A
表 2. 南部锚系 A 站平均海流和主要分潮流椭圆要素差异

时期	2012 夏季(2012.7.20~9.3)						2007/08 冬季(2008.1.16~2.29)					
	MS_f 分潮流		M_2 分潮流		平均流流速 (cm/s)	缺测数据 比例(%)	MS_f 分潮流		M_2 分潮流		平均流 流速 (cm/s)	缺测数据 比例(%)
深度 (m)	最大流 速 (cm/s)	旋转率	最大流速 (cm/s)	旋转率			最大流速 (cm/s)	旋转率	最大流 速 (cm/s)	旋转率		
3	8.9	-0.03	3.5	-0.58	5.0	0	5.2	0.32	1.4	-0.76	2.0	0
5	8.7	-0.03	3.7	-0.62	5.1	0	4.9	0.35	1.5	-0.80	2.1	0
7	8.6	-0.05	3.6	-0.66	5.2	0	4.6	0.35	1.6	-0.82	2.2	0
9	8.5	-0.06	3.4	-0.67	5.2	0	4.4	0.34	1.6	-0.90	2.2	0.6
11	8.1	-0.08	3.5	-0.70	5.0	0	4.7	0.18	2.1	-0.88	2.5	14.4
13	7.4	-0.16	3.6	-0.66	4.7	0	4.7	0.08	2.4	-0.81	2.3	26.4
15	6.7	-0.20	4.3	-0.79	4.2	0	4.5	-0.17	2.3	-0.74	2.3	42.6
17	6.4	-0.14	6.1	-0.91	4.6	0	3.9	-0.11	2.6	-0.52	2.3	54.1
19	6.2	-0.09	8.6	-0.90	5.0	0.5	3.5	-0.06	1.6	-0.20	2.9	66.1
21	6.1	-0.11	10.2	-0.87	5.5	2.3	3.5	-0.06	1.0	-0.69	3.8	76.1
23	6.3	-0.16	10.9	-0.87	6.2	7.8	7.4	-0.23	1.1	-0.61	3.9	81.4
25	5.7	-0.30	11.5	-0.86	6.0	16.4	17.8	0	0	0	8.7	97.4

海冰的大面积融化导致观测点附近的开阔水增加,有利于局地的海气相互作用。这使潮流更易受到大气风场的影响,从而使近表层海流的半月周期变化明显增大,且大气风场的这种影响随着深度而明显减弱。

与大气风场变化密切相关的惯性震荡对近表层海流变化产生显著影响,南部锚系 A 站的惯性流(其惯性周期为 12.48 小时)与半日分潮流的周期十分接近,导致实测半日潮流受局地惯性震荡的影响,使得回转式潮流特征更加明显。此外,整个加拿大海盆的同期海冰密集度数据显示,锚定点周围区域仍部分被海冰覆盖,这种海冰的分布特征也有利于半日 M_2 分潮流表现出显著的分层结构。与之相对应的 2008 年初的冬季分析时段,一方面大气风场不再有明显的半月周期变化,另一方面加拿大海盆完全被海冰覆盖,海气间相互作用显著减弱,且惯性震荡的影响几乎消失,导致潮流(包括半月 MS_f 分潮流和半日 M_2 分潮流)较夏季明显减弱(图 4)。

5. 结果与讨论

5.1. 结果

北极加拿大海盆的上层海洋环流结构及其变化,直接影响着北极海冰和淡水输运。本文利用 BGEP 计划提供的加拿大海盆锚系海流观测资料,结合同期大气风场、海冰密集度数据,分析了近表层潮流变化及其垂直结构,探讨海流低频变化的可能原因。

加拿大海盆的潮流类型主要为半日潮流特征,分析还发现显著的低频变化(半月周期)特征。分潮流流速通常在融冻期(融化-冻结时期)时显著增强。融冻期半月 MS_f 分潮流流速与海冰的变化存在较为显著的负相关关系,海冰的大面积减退(2008、2012、2015 年夏季)往往伴随着半月 MS_f 分潮流速增大,如 2012 年夏季半月 MS_f 分潮流流速超过 8 cm/s,是同期半日 M_2 分潮流的两倍。此外,部分年份的冬季冰封期,也会出现潮流增速的现象。表层海流的季节变化与加拿大海盆海冰面积变化密切相关。16 个方位上的表层海流统计特征显示,南部锚系站海流主要为南向流。

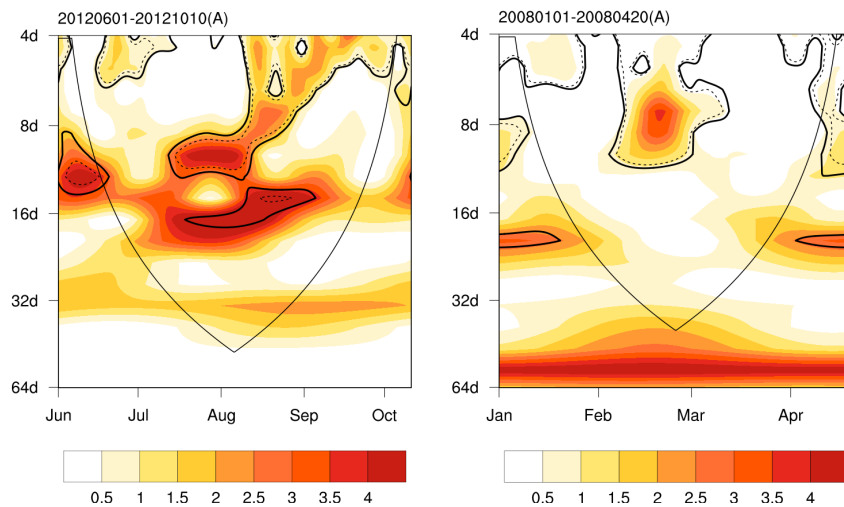


Figure 5. Wavelet analysis of wind speed near Mooring Sta. A. (a.2012.6.1~10.10; b.2008.1.1~2008.4.20; Confident levels are 90% and 95%)

图 5. 南部锚系 A 站附近 ERA-Interim 风速的小波分析 (a.2012.6.1~10.10; b.2008.1.1~2008.4.20, 置信度为 90%(实线)和 95%(虚线))

本文选取 2012 年夏季和 2007/08 年冬季两个时期, 探讨潮流垂直结构上的变化。夏季, 近表层半月 MS_f 分潮流和半日 M_2 分潮流的垂直结构明显不同。一方面半月 MS_f 分潮流呈正压结构且垂直剪切较弱, 而半日 M_2 分潮流则表现为较为明显的分层结构; 另一方面, 潮流椭圆(包括半月 MS_f 分潮流和半日 M_2 分潮流)均呈顺时针旋转(旋转率小于零), 椭圆倾角则随深度逆时针旋转。冬季潮流和平均流均减弱, 呈正压结构。

结合同期大气风场、海冰密集度数据, 分析了影响潮流变化的可能影响因素。加拿大海盆海流存在显著半月周期变化, 其中一部分是由于天文半月分潮本身引起的, 同时还包括具有与天文分潮相近周期的非潮分量, 而后者则可能与临近海域大气风场、海冰变化有关。夏季, 一方面海冰减退导致开阔水增加, 海气相互作用增强, 近表层潮流易受大气风场半月周期变化的影响; 另一方面, 可能与大气风场变化相关的惯性运动是影响近表层半日分潮流垂直结构差异的重要因素, 在潮流的垂直结构和回转式潮流特征上均有表现。在冬季, 由于海冰的隔绝作用, 大气风场自身的半月周期也十分微弱, 潮流在垂直方向上更趋于正压结构。

5.2. 讨论

由于北极海流观测数据相对匮乏, 且时空连续性明显不足, 而尽管 BGEP 计划提供了近年来的较连续资料, 但也仅在上 25 m 满足分析要求, 因此对于加拿大海盆海域的海洋环流结构(尤其是海洋上层)的认识还显不足。此外, 本文仅初步分析了局地海冰变化、大气风场与近表层海流之间可能联系, 缺乏相应的数值模拟结果的支持, 这也是下一步的主要工作。

基金项目

全球变化研究国家重大科学研究计划项目(课题编号: 2015CB953902)和国家自然科学基金项目(41376008, 41330960)。

参考文献

- [1] Aagaard, K. and Carmack, E.C. (1989) The Role of Sea Ice and Other Fresh Water in the Arctic Circulation. *Journal of*

- Geophysical Research*, **94**, 14485-14498. <https://doi.org/10.1029/JC094iC10p14485>
- [2] 赵进平, 史久新, 王召民, 李志军, 黄菲. 北极海冰减退引起的北极放大机理与全球气候效应[J]. 地球科学进展, 2015, 30(9): 985-995.
- [3] Kowalik, Z. and Proshutinsky, A.Y. (1994) The Arctic Ocean Tides. In: Johannessen, O.M., Muench, R.D. and Overland, J.E., Eds., *The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment*, American Geophysical Union, 137-158. <https://doi.org/10.1029/GM085p0137>
- [4] Deming, J. (1993) The NEWATER Steering Committee and Principle Investigators, Northeast Water Polynya: Polar Sea Cruise Results. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **74**, 185-196. <https://doi.org/10.1029/93EO00264>
- [5] Hannah, C.G., Dupont, F. and Dunphy, M. (2009) Polynyas and Tidal Currents in the Canadian Arctic Archipelago. *Arctic*, **62**, 83-95. <https://doi.org/10.14430/arctic115>
- [6] Hunkins, K. (1986) Anomalous Diurnal Tidal Currents on the Yermak Plateau. *Journal of Marine Research*, **44**, 51-69. <https://doi.org/10.1357/002224086788460139>
- [7] Pnyushkov, A.V. and Polyakov, I.V. (2012) Observations of Tidally Induced Currents over the Continental Slope of the Laptev Sea, Arctic Ocean. *Journal of Physical Oceanography*, **42**, 78-94. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-064.1>
- [8] Luneva, M.V., Aksenov, Y., Harle, J. and Holt, J.T. (2015) The Effects of Tides on the Water Mass Mixing and Sea Ice in the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, **120**, 6669-6699. <https://doi.org/10.1002/2014JC010310>
- [9] Li, L., Du, L., Zhao, J.P., Zuo, J.C. and Li, P.L. (2005) The Fundamental Characteristics of Current in the Bering Strait and the Chukchi Sea from July to September 2003. *Acta Oceanologica Sinica*, **24**, 1-11.
- [10] 杜凌, 赵进平, 左军成, 李磊, 李杰. 2003 年夏季白令海峡和楚科奇海海流特征[M]//张占海, 主编. 快速变化中的北极海洋环境. 北京: 科学出版社, 2011: 11-21.
- [11] Screen, J.A. and Simmonds, I. (2010) The Central Role of Diminishing Sea Ice in Recent Arctic Temperature Amplification. *Nature*, **464**, 1334-1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>
- [12] Zhang, J., Lindsay, R., Steele, M., *et al.* (2008) What Drove the Dramatic Retreat of Arctic Sea Ice during Summer 2007? *Geophysical Research Letters*, **35**. <https://doi.org/10.1029/2008GL034005>
- [13] Meier, W., Fetterer, F., Savoie, M., Mallory, S., Duerr, R. and Stroeve, J. (2017) NOAA/NSIDC Climate Data Record of Passive Microwave Sea Ice Concentration, Version 3. [Indicate subset used]. National Snow and Ice Data Center (NSIDC), Boulder, Colorado.
- [14] Foreman, M.G.G. (1978) Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction (Pacific Marine Science Report 78-6). Institute of Ocean Science, Patricia Bay, Sidney, B.C., 61 p.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2376-4260, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ams@hanspub.org