

研究论文

北极海冰快速减少期间加拿大海盆上层 海洋夏季淡水含量变化

郭桂军¹ 史久新^{1,2} 赵进平^{1,2} 矫玉田^{1,2} 徐栋¹

(¹ 中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266100; ² 教育部物理海洋学重点实验室, 中国海洋大学, 山东 青岛 266003)

摘要 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。本文根据 2003 年、2008 年中国北极考察以及 2004 年至 2007 年的加拿大考察数据进行计算, 发现除 2006 年以外, 夏季加拿大海盆淡水含量在此期间每年增加 1 m 以上厚度。增加主要发生在冬季白令海水以上的上层海水中, 而在此之下, 淡水含量维持在 3 m 左右, 没有显著年际差异。在 2006 年, 加拿大海盆西部上层淡水含量略微减少, 但东部和北部海域淡水含量仍略有增加。与 2003 年相比, 2008 年加拿大海盆中心海区淡水含量增加量最高可达 7 m。分析表明, 近年来的海冰减退对加拿大海盆上层淡水含量的增加起着重要作用, 北极涛动(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, 而降水、径流以及白令海峡入流水的变化对加拿大海盆淡水含量变化影响较小。

关键词 加拿大海盆 淡水含量变化 海冰 北极涛动

doi: 10.3724/SP.J.1084.2012.00035

0 引言

大西洋亚极地区弱层化导致的强对流是全球热盐环流的主要动力, 而北冰洋(图 1)是该海区表层水的主要来源之一^[1]。海冰输出是北冰洋向大西洋淡水输出的一种重要形式, Mauritzen 和 Hakkine^[2] 曾指出北冰洋海冰流出量每减少 800 km³, 北大西洋热盐环流可能增强 10%—20%。因此, 北冰洋淡水含量及变化得到极大关注。河流径流、降水、北极海冰融化/冻结过程以及风生海流对极地海盆淡水都会产生一定的影响^[3-8]。Polyakov^[9] 等人利用观测数据考察了 20 世纪北冰洋及其边缘海的淡水变化, 并利用线性插值方法获得了淡水在北冰洋海区的大致分布, 分析了引起北冰洋淡

水变化的因素以及各因素在淡水变化中作用的大小, 发现北冰洋中心海区在 20 世纪呈现出咸化趋势, 北冰洋中心海区淡水以 $239 \pm 270 \text{ km}^3 \cdot 10 \text{ yrs}^{-1}$ 的速度减少^[9]。但在 20 世纪末, 尤其是进入本世纪以来, 随着全球气温的升高, 北冰洋海洋大气系统发生了很大变化, 海冰开始急剧减少, 海水出现淡化现象^[10], 引起该变化的因素包括陆地径流、降水的变化、海冰消融、白令海峡入流量以及北冰洋淡水流出量。而地表径流、降水量和白令海峡入流水的变化对北冰洋淡水变化影响相对较小, 因此引起北极淡水含量变化的主要因素在于海冰消融和淡水的流出^[3-9]。Aagaard 和 Carmack^[3] 根据当时资料估算出北冰洋淡水含量总量接近 80 000 km³ (基准盐度为 34.8), 而加拿大海盆淡水含量则接近 45 800 km³, 约占北冰洋淡水总量的 60%, 是淡水的主要分布区

[收稿日期] 2011 年 5 月收到来稿, 2011 年 7 月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金项目(40631006, 40976111)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0720)资助

[作者简介] 郭桂军, 男, 1989 年生, 物理海洋学硕士。E-mail: guogujun2007@126.com

[联系作者] 史久新, E-mail: shijiuxin@ouc.edu.cn



图 1 北冰洋地形图

Fig. 1. Map of the Arctic Ocean

域。因此 研究加拿大海盆(图 1)淡水含量变化特征是认识北冰洋淡水变化的关键。

白令海峡连接北冰洋和太平洋,是太平洋水进入北冰洋的唯一通道(图 1)。太平洋水通过白令海峡首先进入楚科奇海,然后在陆坡处进入北冰洋海盆区^[11],是北冰洋淡水的主要来源。但是白令海峡入流量年际变化并不明显^[12],不足以对淡水含量产生显著影响,其进入北冰洋后在表层水以下形成盐跃层^[13],对维持表层水低温特性起着重要作用。太平洋水进入北冰洋后主要分布在加拿大海盆,形成三种不同性质的水团,包括阿拉斯加沿岸水(ACW)、夏季白令海水(sBSW)和冬季白令海水(wBSW)。加拿大海盆中这三种水团主要呈现为两种垂向结构,在受太平洋水影响的穿极漂流外缘,sBSW在wBSW之上,而在加拿大海盆南部,则是ACW在wBSW之上^[14]。图 2 描绘出了加拿大海盆

南部水团垂直分布,北冰洋表层水(SW)厚度约为 50 m,温度接近常数,盐度低于 30;表层水以下是太平洋盐跃层水,厚度约为 130 m,温度维持在冰点附近,盐度则增加到 34,ACW位于wBSW之上。太平洋盐跃层水以下则是盐度大于 34 的中层大西洋水(AW)^[15]。北冰洋淡水含量变化主要发生在 AW 以上的太平洋水团中,AW 的深度变化并不会影响北冰洋内的淡水含量,因此计算北冰洋淡水含量的基准盐度通常选取为 AW 的平均盐度 34.8^[9]。对于 AW 以浅的太平洋水影响层次,以 wBSW 为界,可以分为上下两层,下层是来源于冬季白令海和楚科奇海陆架上形成的水体,温盐性质稳定少变^[16],上层则包含了夏季的太平洋水和融冰水,是最为活跃的部分,因此本文将加拿大海盆上层定义为 wBSW 以浅,即温度极小值以浅,盐度小于 33.1 的层次,并对其重点分析。

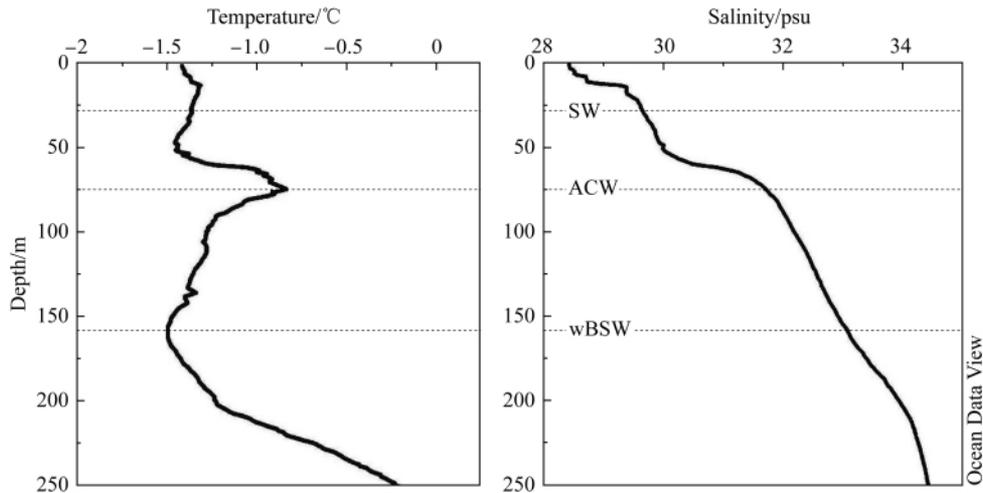


图2 加拿大海盆南部温度(T)和盐度(S)垂直分布图(加拿大LSSL号2005年航次LSS42站,测站位置在图3中用黄色点标出)
Fig. 2. Temperature and salinity profiles in southern Canada Basin (based on Station LSS42 of the Canadian LSSL cruise of 2005, marked with yellow symbol in Figure 3)

20世纪80年代后期,大气环流转变为气旋式环流,海冰总体积开始减少,北冰洋上层海水开始淡化^[17-18],北冰洋多年冰的输出也有所增快^[19-20]。从20世纪90年代中期开始,北冰洋海冰持续缩减^[21],其覆盖面积不断刷新历史最低记录^[22-23]。微波卫星数据表明,从1979年开始,北冰洋夏季海冰覆盖面积每10年大约减少11.5%。2007年9月创下历史最低值记录,尔后的2008年和2010年则分别居于历史第二和第三最低点^[24]。在海冰范围急剧减少的同时,北冰洋中心海盆区海冰的性质自20世纪80年代中期以来,也经历了急剧的变化。在1987年,57%的浮冰都具有5年以上冰龄,四分之一的海冰有9年以上的冰龄。而在2007年,只有7%的海冰冰龄在5年以上,并且几乎没有9年以上冰龄海冰^[25]。北冰洋海冰持续减退主要发生在加拿大海盆,会造成上层海水盐度减小,淡水含量增加。

在Proshutinsky和Johnson开展针对性的研究之前,很少有人关心北冰洋淡水含量变化。他们提出反气旋式波弗特流涡中的淡水含量变化要远远高于径流和海冰输出所引起的淡水含量变化,而波弗特流涡的年代际变化则与北极涛动(AO)密切相关。波弗特流涡是北冰洋内的风生海洋环流,是我们研究区域内上层海洋的基本流动形式,位于70.5°N—80.5°N,170°W—130°W的范围内^[26],与我们的研究区域基本重合(图1)。当AO处在负相位时,反气旋高压大气环流场使波弗特流涡内海水做反气旋

式运动,导致海水向反气旋中心辐聚,持续的体积输运产生一个向下的速度(埃克曼抽吸),在这种情况下,加拿大海盆会积聚淡水,淡水含量升高。而在AO处在正相位时,气旋式低压大气环流场会促使波弗特流涡的海水辐散,释放的淡水经弗拉姆海峡流入大西洋,导致加拿大海盆内淡水含量减少^[27]。Proshutinsky^[28]等人研究表明,2003—2007年波弗特流涡内淡水含量存在着明显增加趋势,尤其是中心海域,淡水含量每年增加高达1.5 m。其中一个重要原因就是加拿大海盆上空反气旋式环流的增强引起的埃克曼抽吸现象加剧了海水混合,使加拿大海盆积聚了大量淡水,但海面上风力有限,而且受到海冰的阻碍,埃克曼抽吸所引起的海水混合只能发生在海盆上层一定厚度内。因此,本文主要研究加拿大海盆上层即盐度值为33.1层次以上的海水淡水含量变化,增进对北冰洋淡水含量变化问题的全面认识。

进入21世纪以来,加拿大海盆的现场观测显著增多,为研究淡水含量变化提供了较好的基础。本文将利用中国和加拿大的CTD观测数据,首先分析2003年以来加拿大海盆淡水含量的变化,然后从海冰减少和AO变化两个方面探讨其中的原因。

1 数据和研究方法

1.1 数据

本文通过分析加拿大海盆上层各层海水与基准

层次的盐度差异计算各层次淡水含量。所采用的盐度数据来源于 2003 年、2008 年夏季中国北极考察 (CHINARE-2003、CHINARE-2008) 期间获得的 CTD 数据和加拿大 LSSL 号考察船 2004—2007 年加拿大海盆考察的观测数据。不同航次的观测站位在图 3 中给出。中国北极考察在加拿大海盆内的站位主要分布在海盆西侧,而 LSSL 号站位在加拿大海盆内分布则较为均匀。虽然受到北冰洋观测条件的限制,观测站位数量有限且分布存在明显差异,但这些资料仍可用于研究加拿大海盆上层海域淡水含量并很好地反映出其变化。

本文还分析了同期美国冰雪数据中心(NSIDC) DMSP SSM/I 海冰密集度月平均数据。该数据分辨率为 $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$, 是利用微波传感器成像仪获取的。本文所采用的 AO 指数资料来源于 NOAA/CPC 的全球再分析月平均资料(1950 年 1 月至今), 是对 20°N 以北的海平面月平均高度(1979—2000 年)进行 EOF 分解得到的第一特征向量的时间系数。

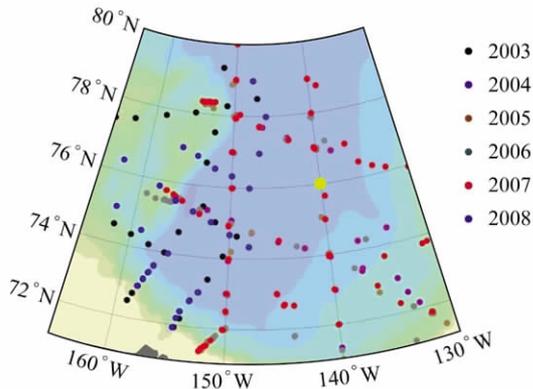


图 3 中国 2003 年及 2008 年北极考察和加拿大 LSSL 号 2004—2007 年加拿大海盆考察站位分布图

Fig. 3. Hydrographic stations of the Chinese Arctic Research Expeditions in 2003 and 2008 and the Canadian LSSL cruises in Canada Basin for 2003—2007

1.2 研究方法

水平单位面积上的海水淡水含量计算公式可以表示为:

$$FWC = \int_{z_1}^{z_2} \frac{S_{\text{ref}} - S(z)}{S_{\text{ref}}} dz \quad (1) \quad [29]$$

在此公式中, S 为各测站在深度为 z 时的海水盐度, S_{ref} 为基准盐度, 本文中取为 AW 平均盐度, 即 $S_{\text{ref}} = 34.8$ 。 z_1 为所求淡水含量对应水层的上边界深度, z_2 为其下边界深度。计算加拿大海盆上层淡水含量

时 z_1 取为海面深度 0, z_2 取为加拿大海盆上层底边界深度, 即 wBSW 特征盐度 $S = 33.1$ 对应的深度。而在计算 wBSW 以下海水的淡水含量时, z_1 取为 $S = 33.1$ 等盐面深度, z_2 则取基准盐度 $S = 34.8$ 对应的深度。

根据中国北极科学考察和加拿大 LSSL 号共 6 个航次的数据, 利用公式(1)的计算结果, 我们分别绘出了加拿大海盆内 2003—2008 年各观测站位以 wBSW 为界上下两部分的淡水含量空间分布图(图 4、图 5), 并对其变化特征进行了比较。另外, 我们还绘出了 33.1 等盐面的深度变化(图 6), 以考察 wBSW 这一分界面的变化情况。

2 结果和分析

2.1 淡水含量变化

由于观测站位数量的局限, 我们不能精确推算出加拿大海盆整个海域的淡水含量总量, 但我们所获取的观测资料依然可以很好地反映出海盆内淡水含量的变化。

根据 2003 年到 2008 年的观测资料计算得出的淡水含量表明, 在加拿大海盆 wBSW 以深海水中, 淡水含量除在 2008 年海盆南部出现明显增加以外(图 4f), 2003—2007 年在海盆南部始终维持在 3 m 左右, 在海盆北部则维持在 2.5 m 左右, 年际差异并不明显(图 4a—e)。因此, 我们认为加拿大海盆淡水含量的增加主要发生在上层, 海冰融化和波弗特流涡淡水积聚所引起的淡水含量的增加并不能穿过性质稳定的 wBSW 影响到深层海水。对于 2008 年海盆南部 wBSW 以下淡水增加现象, 我们认为, 这是该年海冰融化的急剧增强(图 7f) 和 AO 强势负相位(图 8) 共同作用引起的, 在 2.2.2 节中我们将对此作出详细解释。

McPhee^[10]等人的研究表明, 2008 年加拿大海盆淡水含量与 1950—2000 年间的气候态平均值相比增加了接近 11 m, 增加幅度高达 60%。我们的结果显示, 淡水在 wBSW 以下并未出现明显增加, 淡水含量的增加主要发生在海盆上层海水中。由加拿大海盆上层淡水含量分布图(图 5)可知, 加拿大海盆上层淡水主要分布在南部海域, 尤其是海盆东南部, 其淡水含量较北部要高出 5 m 以上, 这是由于北冰洋海冰融化主要发生在白令海峡入流水进入北冰

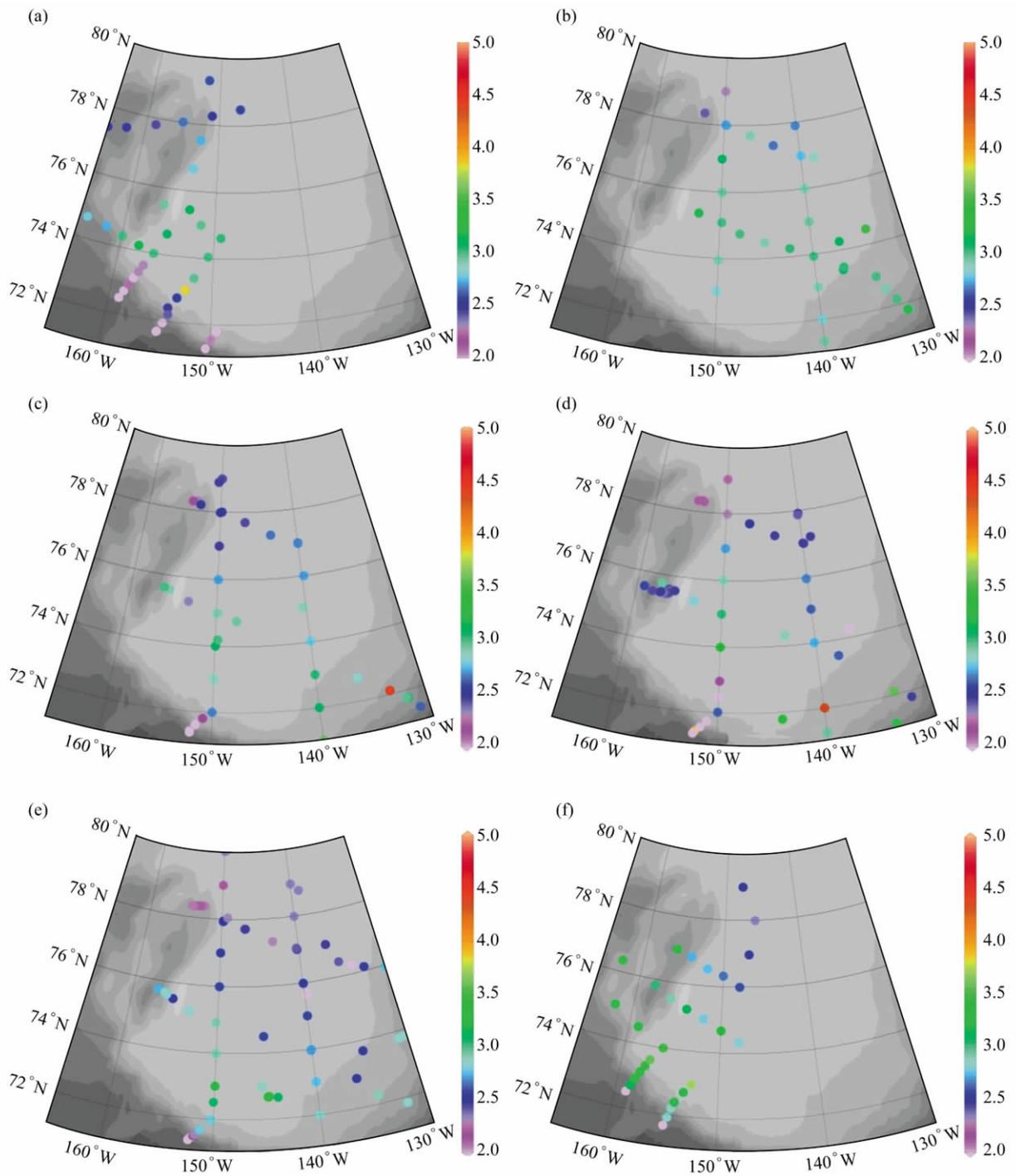


图 4 2003—2008 年加拿大海盆 wBSW 以下淡水含量(单位: m) . a. 2003; b. 2004; c. 2005; d. 2006; e. 2007; f. 2008
 Fig. 4. Freshwater content for 2003—2008 in the layer below wBSW in Canada Basin (Unit: m) . a. 2003; b. 2004; c. 2005; d. 2006; e. 2007; f. 2008

洋的海域^[12] 海冰融化给加拿大海盆南部带来了大量淡水,使其淡水含量大大高于加拿大海盆北部淡水含量。在 2003—2008 年期间,加拿大海盆整个海域上层淡水含量除 2006 年外,都呈现出明显增加现

象,每年增加量都 1 m 以上,尤其是在加拿大海盆南部中心海域,由 2003 年的不足 17 m 增加到 2008 年的 22 m 以上,变化异常剧烈。2003—2004 年海盆上层淡水含量增加较为缓和(图 5a, b),但在 2005

年,大部分海域淡水含量明显增加,在中心海域的增加量最高达 2 m,只是在海盆东南海域略有减少(图 5c)。到了 2006 年,海盆大部海域淡水含量略有减

少(图 5d),只在海盆东南部海域有所增加。但 2006 年以后,淡水含量出现了爆发式增长,2008 年南部中心海域的增加量甚至高达 3 m(图 5f)。

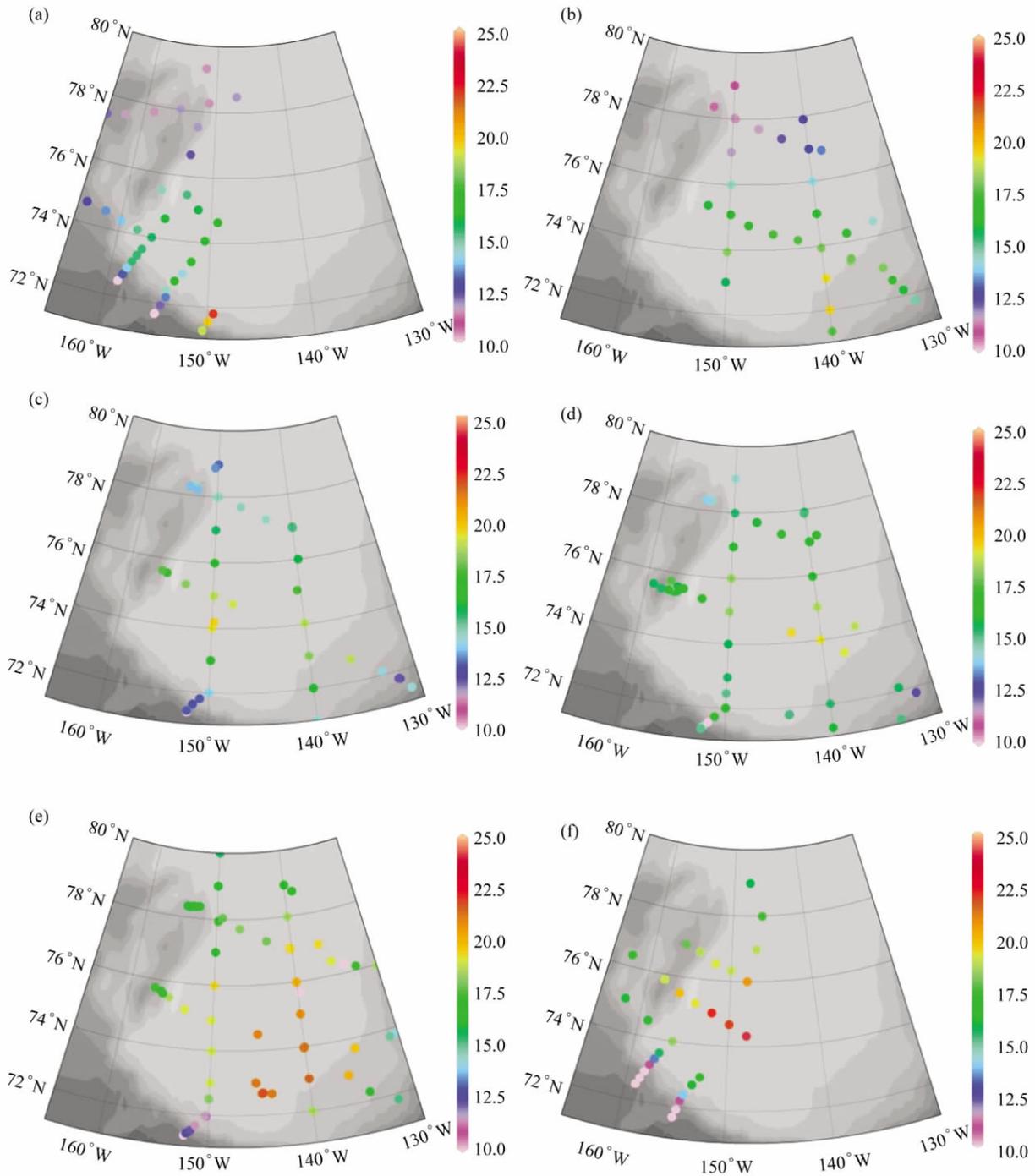


图 5 2003—2008 年加拿大海盆上层海水淡水含量(单位: m)。a. 2003; b. 2004; c. 2005; d. 2006; e. 2007; f. 2008

Fig. 5. Freshwater content for 2003—2008 in the upper layer of Canada Basin (Unit: m). a. 2003; b. 2004; c. 2005; d. 2006; e. 2007; f. 2008

上层淡水含量的变化会引起上层海水盐度随之变化。因此 33.1 等盐面作为加拿大海盆上层的底边界,其深度变化可直观反映出上层淡水含量的增加。根据加拿大海盆内 wBSW 特征盐度 33.1 的等盐面深度分布的年际变化(图 6)可以看出,与加拿

大海盆上层淡水含量变化相对应,除 2006 年外,加拿大海盆 wBSW 的深度也是逐年增加。2003 年(图 6a) 加拿大海盆上层海水厚度基本都在 160 m 以下,在随后的 5 年中,除 2006 年以外,加拿大海盆远离大陆的南部海域上层海水厚度每年增加接近

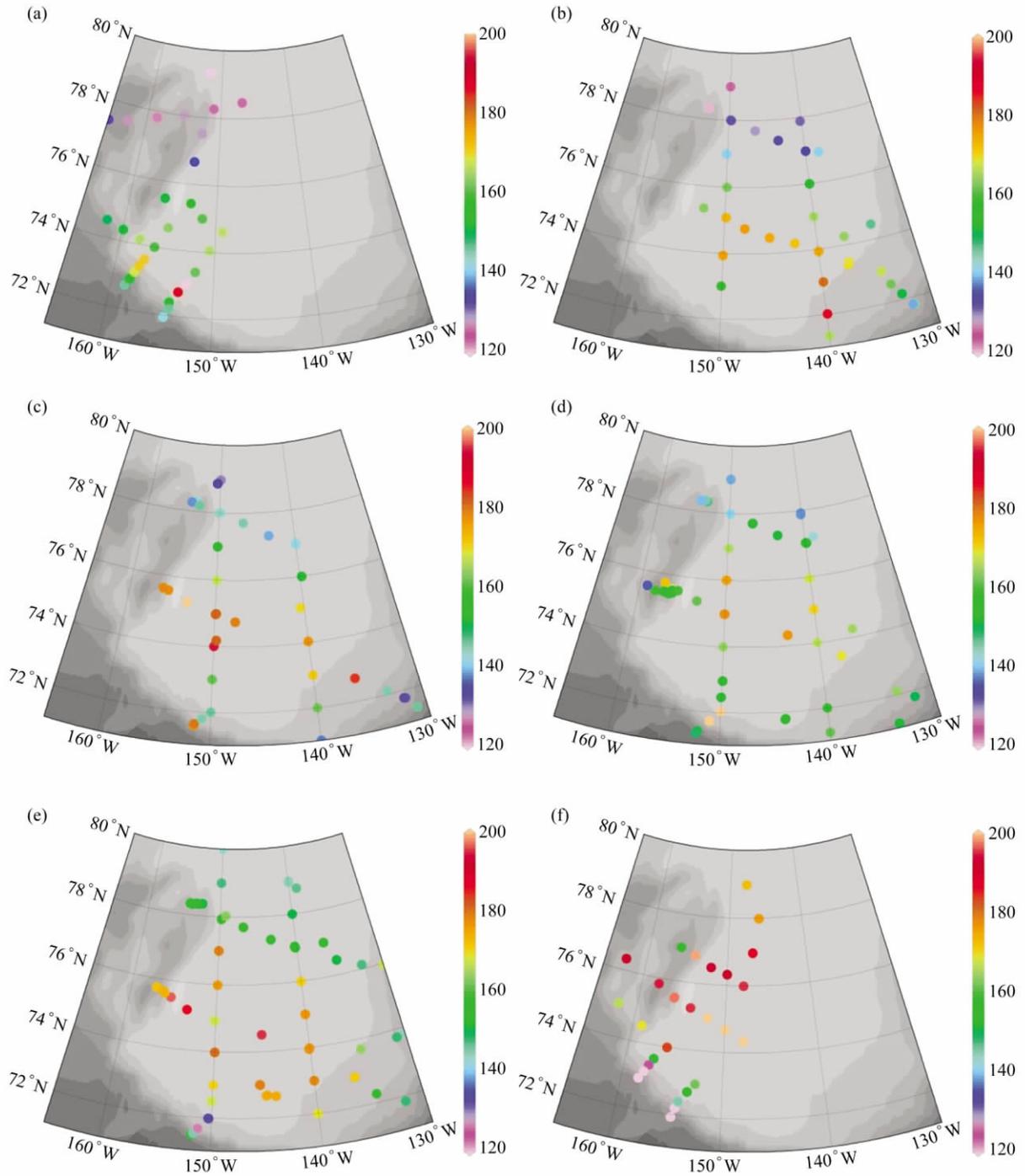


图 6 2003—2008 年加拿大海盆 33.1 等盐面对应深度(单位: m) . a. 2003; b. 2004; c. 2005; d. 2006; e. 2007; f. 2008
 Fig. 6. The depth of the interface of $S = 33.1$ in Canada Basin for 2003—2008 (Unit: m) . a. 2003; b. 2004; c. 2005; d. 2006; e. 2007; f. 2008

10 m 到 2008 年中心海域已经高达 200 m。造成这种现象的直接原因是加拿大海盆内上层淡水含量逐年增加,增加的淡水由于埃克曼抽吸向下转移^[10],使表层以下海水盐度有所降低。对于 2006 年加拿大海盆 33.1 等盐面深度略有变浅(图 6d),我们认为这是由于 2006 年海冰融化减弱,大部海域上层淡水含量有所降低,从而导致上层海水盐度略微升高,等盐面变浅(图 7d)。

2.2 淡水含量变化影响因素

加拿大海盆上层海洋淡水含量在 2003—2008 年急剧增加,但究竟是什么因素引起的这些变化?引起淡水含量变化因素,从淡水来源考虑,包括大气净降水变化、入海径流变化、白令海峡入流水变化和冰盖面积变化;从淡水运移和分布的角度考虑,还应该考虑海洋环流的变化,由于直接的测流资料匮乏,本文通过研究与环流形式密切相关的 AO 正负相位变化来间接研究。

太平洋水通过白令海峡进入北冰洋,是北冰洋淡水的主要来源。白令海峡多年平均流量为 0.8 Sv,相当于每年向北冰洋注入 25 000 km³ 太平洋水^[12]。而入流水多年平均盐度为 32.5^[3],我们可以据此计算出太平洋的淡水输入量多年平均值约为 1 600 km³。但白令海峡入流年际变化幅度一般为 0.1 Sv,在 2003—2008 年期间,白令海峡入流量最大值与最小值相差不足 0.2 Sv^[12],注入淡水量最大差异约 400 km³,不足以对加拿大海盆上层淡水含量产生显著影响。对于净降水,根据 NCEP/NCAR 的再分析数据,北冰洋整个海域净降水量变化幅度只有 10%,一般局限在 ±200 km³,而加拿大海盆淡水含量变化量级在 10³ km³^[3],其对上层海洋的淡水含量影响也非常有限。而河流径流量在本文的研究中也未被考虑在内。因为根据 Aagaard 和 Carmack^[3] 1989 年的测算结果,北冰洋河流径流总量大约有 3 800 km³,径流量的变化范围也局限在 ±200 km³。加拿大海盆海域流量较大河流只有一条,即马更些河,年径流量约 340 km³,年际变化只有 5%—20%,对加拿大海盆上层海洋淡水变化的影响也可以忽略不计。

由于径流、降水以及白令海峡入流年际变化太小,不足以引起北冰洋淡水含量显著变化,本文中我们对这些因素不作深入研究。而北冰洋海冰体积年际变化幅度高达 2 500 km³,无疑会对淡水含量变化

产生重要影响^[5]。但 2008 年加拿大海盆南部上层淡水含量与 2003 年相比增加 5 m 以上,根据 McPhee 等人^[10] 研究表明,北冰洋淡水含量增加 11 m 需要整个北冰洋海域 17 m 的海冰净融化量,因此加拿大海盆内海冰这一因素还不足以诱使淡水产生如此剧烈的变化。除海冰融化外,必然还有其他因素对淡水含量变化存在着不可忽视的影响。Proshutinsky 指出,波弗特流涡内的淡水含量年际变化与大气压强的变化密切相关。当 AO 负相位居于主导地位,海平面处在高压时,淡水含量会增加,反之,则会减少^[28]。因此除海冰融化外,大气状况及其导致的海洋环流变化也是影响加拿大海盆上层淡水含量的重要因素。

2.2.1 海冰覆盖面积的变化

首先我们考察海冰覆盖面积变化对加拿大海盆上层淡水含量的影响。由于全球气温的升高,自 20 世纪 90 年代开始,北极海冰开始持续消退,海冰体积不断减少。海冰体积年际变化幅度为 ±2 500 km³,对北冰洋淡水含量变化起着非常重要的作用^[9]。

白令海峡热通量的持续增加是北冰洋海冰持续消退的重要影响因素。因此北冰洋海冰融化主要发生在白令海峡入流水的影响范围内。自 2001 年开始至 2007 年,白令海峡热通量持续增加,2007 年热通量接近 2001 年的两倍,这足以融化 2007 年融冰季节 1/3 的海冰融化量^[12]。因此,随着白令海峡热通量的持续增加,加拿大海盆南部 2003—2008 年 8 月份海冰面积出现明显减少趋势,只是在 2005 年和 2006 年,海冰融化有所减少(图 7c、d)。海冰融化的加剧导致了加拿大海盆上层淡水含量的增加,尤其是 2007 和 2008 年,加拿大海盆海域 8 月海冰融化速度加快(图 7e、f),北冰洋海冰覆盖面积达到历史低点,因此海盆上层海水淡水含量远高于前几年的淡水含量。2005 年和 2006 年加拿大海盆内的海冰融化趋势减弱(图 7c、d),对 2005 年海盆东南海域以及 2006 年大部海域淡水含量减少起到了重要作用。对于 2003 年 8 月加拿大海盆中部海冰密集度较小而上层淡水含量却明显偏低以及 2005 年海盆南部淡水含量的异常增加,我们认为这是 AO 的变化打破了海冰融化和淡水含量的变化同步现象(2.2.2 节)。

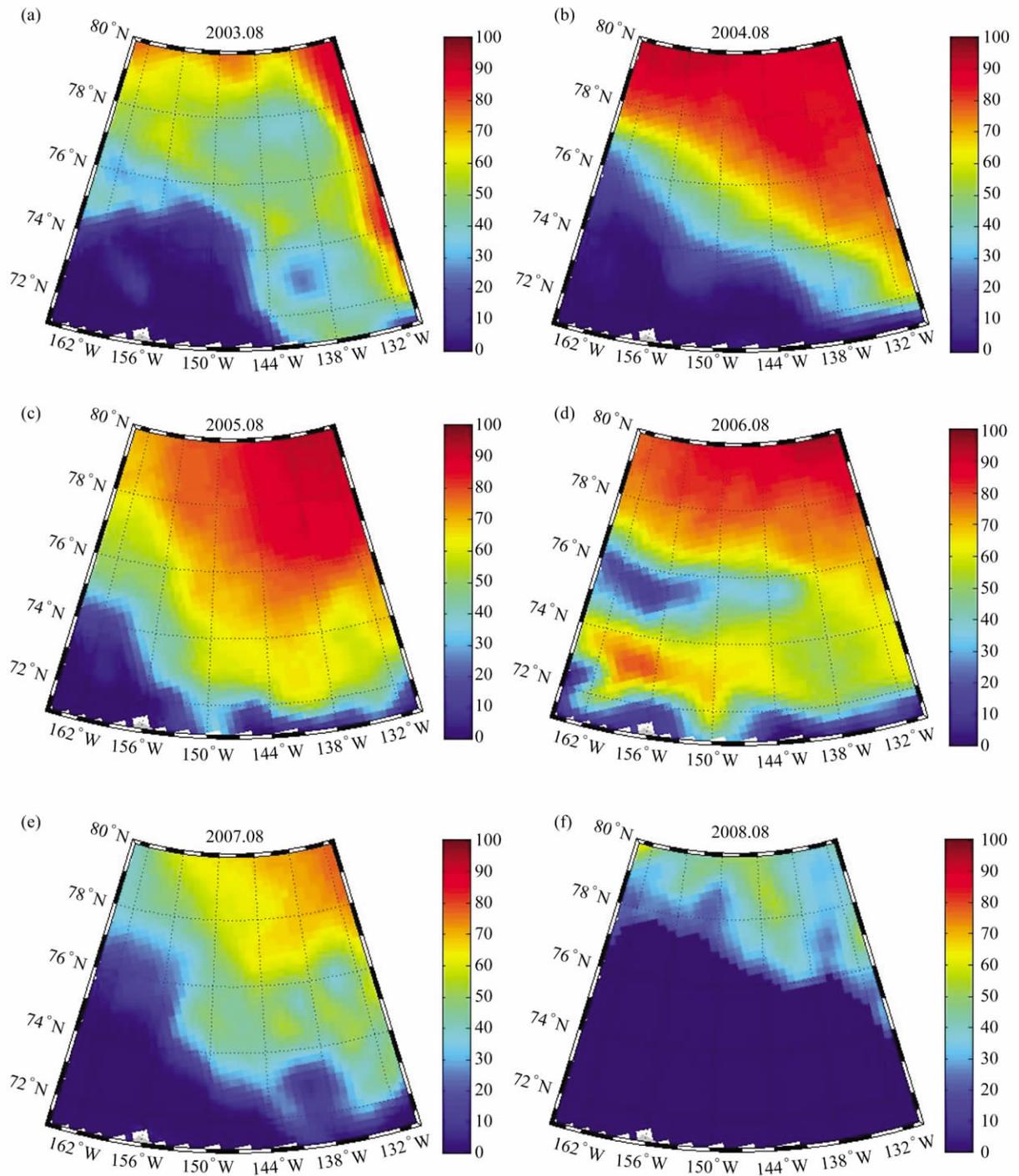


图 7 2003—2008 年海冰密集度分布图。 a. 2003; b. 2004; c. 2005; d. 2006; e. 2007; f. 2008
 Fig. 7. Sea ice concentration for 2003—2008. a. 2003; b. 2004; c. 2005; d. 2006; e. 2007; f. 2008

2.2.2 AO 相位变化

Proshutinsky^[4]提出了一种北冰洋淡水消长机制, 他们的理论重点放在波弗特流涡及淡水的长期变化。加拿大海盆基于 34.8 盐度值的淡水含量约

为 45 000 km³, 比河流注入北冰洋的流量高 10—15 倍, 比海冰储存的淡水含量至少高 2 倍^[3]。在这种机制下, 加拿大海盆内的淡水含量年际变化与大气状况引起的淡水分布密切相关。

AO 呈准周期变化,变化周期约 30 年。从 20 世纪 70 年代开始,北冰洋处在 AO 正相位主导的阶段,北冰洋海平面气压低于气候态均值。根据 Polyakov 等人^[9]的研究,北冰洋中心海盆区在 20 世纪呈现出咸化趋势,淡水以 $239 \pm 270 \text{ km}^3 \cdot 10 \text{ yrs}^{-1}$ 的速度减少。进入 21 世纪以后, AO 正相位开始减弱,北冰洋逐渐被反气旋高压控制(图 8)。在 2003 年, AO 全年主要处在正相位阶段,北冰洋海平面处在低压状态。根据 Proshutinsky 的理论,在此条件下加拿大海盆会释放淡水,从而导致 2003 年加拿大海盆中部虽然海冰融化明显但上层淡水含量依然相对较少。随着 AO 相位的逐渐减弱,加拿大海盆持续积聚淡水,上层海洋的淡水含量急剧增加,并在 2005 年抵消了海盆内大部分海域海冰融化减弱的影响。在 2006 和 2007 年, AO 正相位居于主导地位。2006 年 AO 的正向位与海冰融化减少共同作用使加拿大海盆淡水并未出现明显增加现象,只是在加拿大海盆东南部海域因局部海冰融化增强而略有增加。然而 2007 年 9 月份由于海冰覆盖面积达到历史最低点,加拿大海盆区域的海冰融化速度明显加快(图 7e),虽然全年 AO 均值较大,但难以抵消海冰融化所带来的淡水增加,因此 2007 年加拿大海盆淡水含量依然出现了急剧增加现象。在 2008 年,全年 AO 主要处在负相位阶段,强反气旋式环流使北冰洋上层低盐海水向加拿大海盆中心积聚,并通过埃克曼抽吸向表层以下海水转移。同时 2008 年海冰覆盖面积仅次于 2007 年,居于历史第二位低点。二者共同作用使本年度加拿大海盆淡水含量达到这几年的最高点,海水淡化现象异常显著, AO 负相位下的反气旋式环流产生了强烈的埃克曼抽吸,使大量海冰融化产生的淡水通过强混合达到了 wBSW 以下,导致了 wBSW 以下的淡水亦出现了增加现象。

3 结论

通过 2003 年和 2008 年中国北冰洋考察数据以及加拿大 LSSL 号 2004—2007 年加拿大海盆考察数据,我们讨论了北冰洋海冰快速减少期间加拿大海盆上层淡水含量的年际变化,并利用海冰密集度分布数据和 AO 资料分析了不同因素在淡水含量变化过程中的作用并简单讨论了白令海峡入流水、径流以及净降水作用。通过以上研究,本文取得如下主要结论:

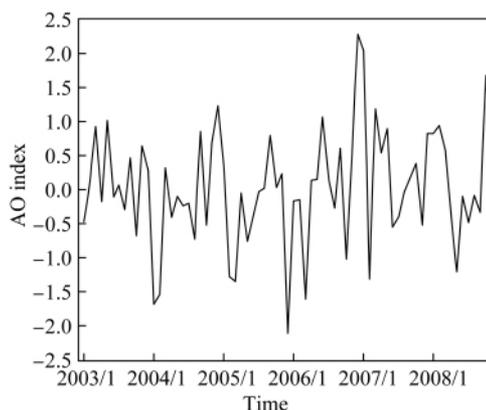


图 8 2003—2008 年 AO 指数的变化
Fig. 8. AO index time series for 2003—2008

在 2003—2008 年期间,加拿大海盆 wBSW 之上的上层海水厚度在明显增加,上层海洋出现显著淡化趋势,除 2006 年以外,加拿大海盆上层淡水含量逐年增加。在加拿大海盆南部海域,淡水含量每年增加都在 1 m 以上。在 2006 年,加拿大海盆大部海域淡水含量略微减少,但东南部海域淡水含量有所增加。

降水和径流的变化对加拿大海盆上层淡水含量并没有显著影响。白令海峡入流水虽然是北冰洋淡水的主要来源,但其年际变化比较小,也不足以控制加拿大海盆区域的淡水含量变化。

全球气温升高造成的海冰融化速度加快对加拿大海盆上层淡水含量的增加起着重要作用。2007 年、2008 年海冰覆盖面积居于历史最低点,加拿大海盆海冰覆盖面积迅速缩小,这与这两年加拿大海盆上层淡水含量在研究期间处于极大值相对应。

AO 正负相位变化也是控制加拿大海盆上层淡水含量变化的一个重要因素。AO 正位相时的环流场使淡水流出加拿大海盆,而负位相时则造成淡水在加拿大海盆积聚。始于 21 世纪初 AO 负相位增强在很大程度上促进了加拿大上层淡水含量的增加,2003 年的 AO 正位相造成的淡水输出很大程度上抵消了海冰减少造成的淡水增加,但 2007 年 AO 的正相位主导地位并未抵消海冰急剧融化造成淡水含量的增加。

致谢 本文所用 CTD 资料来自中国北极考察队和加拿大 LSSL 号考察船的“联合海洋-冰研究 (JOIS)”航次,海冰资料来自美国冰雪数据中心 (NSIDC), AO 指数数据来自 NOAA/CPC,在此一并表示感谢。

参考文献

- 1 Dickson R R , Osborn T J , Hurrell J W , et al. The Arctic Ocean response to the North Atlantic Oscillation. *Journal of Climate* , 2000 , 13(15) : 2671—2696.
- 2 Mauritzen C , Häkkinen S. Influence of sea ice on the thermohaline circulation in the Arctic North Atlantic Ocean. *Geophysical Research Letters* , 1997 , 24(24) : 3257—3260.
- 3 Aagaard K , Carmack E C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *Journal of Geophysical Research* , 1989 , 94(C10) : 14485—14498.
- 4 Proshutinsky A , Bourke R H , McLaughlin F A. The role of the Beaufort Gyre in Arctic climate variability: Seasonal to decadal climate scales. *Geophysical Research Letters* , 2002 , 29(2100) , doi: 10.1029/2002GL015847.
- 5 Häkkinen S , Proshutinsky A. Freshwater content variability in the Arctic Ocean. *Journal of Geophysical Research* , 2004 , 109(C03051) , doi: 10.1029/2003JC001940.
- 6 Swift J H , Aagaard K , Timokhov L , et al. Long-term variability of Arctic Ocean waters: Evidence from a reanalysis of the EWG data set. *Journal of Geophysical Research* , 2005 , 110(C03012) , doi: 10.1029/2004JC002312.
- 7 Peterson B J , McClelland J , Curry R , et al. Trajectory shifts in the Arctic and Subarctic freshwater cycle. *Science* , 2006 , 313(5790) : 1061—1066.
- 8 Steele M , Ermold W. Steric sea level change in the Northern Seas. *Journal of Climate* , 2007 , 20(3) : 403—417.
- 9 Polyakov I V , Alexeev V A , Belchansky G I , et al. Arctic Ocean freshwater changes over the past 100 years and their causes. *Journal of Climate* , 2007 , 21(2) : 364—384.
- 10 McPhee M G , Proshutinsky A , Morison J H , et al. Rapid change in freshwater content of the Arctic Ocean. *Geophysical Research Letters* , 2009 , 36(L10602) , doi: 10.1029/2009GL037525.
- 11 Swift J H , Jones E P , Aagaard K , et al. Waters of the Makarov and Canada basins. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* , 1997 , 44(8) : 1503—1529.
- 12 Woodgate R A , Weingartner T , Lindsay R. The 2007 Bering Strait oceanic heat flux and anomalous Arctic sea-ice retreat. *Geophysical Research Letters* , 2010 , 37(L01602) , doi: 10.1029/2009GL041621.
- 13 Guay C K , Falkner K K. Barium as a tracer of Arctic halocline and river waters. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* , 1997 , 44(8) : 1543—1569.
- 14 史久新 , 赵进平 , 矫玉田 , 等. 太平洋入流及其与北冰洋异常变化的联系. *极地研究* , 2004 , 16(3) : 253—260.
- 15 史久新 , 赵进平. 北冰洋盐跃层研究进展. *地球科学进展* , 2003 , 18(3) : 351—357.
- 16 Shi J X , Cao Y , Zhao J P , et al. Distribution of Pacific-origin water in the region of the Chukchi Plateau in the Arctic Ocean in the summer of 2003. *Acta Oceanologica Sinica* , 2005 , 24(6) : 12—14.
- 17 Smith D M. Recent increase in the length of the melt season of perennial arctic sea ice. *Geophysical Research Letters* , 1998 , 25(5) : 655—658.
- 18 Belchansky G I , Douglas D C , Platonov N G. Duration of the Arctic sea ice melt season: Regional and interannual variability , 1979—2001. *Journal of Climate* , 2004 , 17(1) : 67—80.
- 19 Rigor I G , Wallace J M. Variation in the age of Arctic sea-ice and summer sea-ice extent. *Geophysical Research Letters* , 2004 , 31(L09401) , doi: 10.1029/2004GL019492.
- 20 Belchansky G I , Douglas D C , Platonov N G. Spatial and temporal variations in the age structure of Arctic sea ice. *Geophysical Research Letters* , 2005 , 32(L18504) , doi: 10.1029/2005GL023976.
- 21 Belchansky G I , Douglas D C , Platonov N G. Fluctuating Arctic sea ice thickness changes estimated by an in situ learned and empirically forced neural network model. *Journal of Climate* , 2008 , 21(4) : 716—729.
- 22 Serreze M C , Maslanik J A , Scambos T A , et al. A record minimum arctic sea ice extent and area in 2002. *Geophysical Research Letters* , 2003 , 30(1110) , doi: 10.1029/2002GL016406.
- 23 Stroeve J C , Serreze M C , Fetterer F , et al. Tracking the Arctic's shrinking ice cover: Another extreme September minimum in 2004. *Geophysical Research Letters* , 2005 , 32(L04501) , doi: 10.1029/2004GL021810.
- 24 NSIDC. Weather and feedbacks lead to third-lowest extent. 2010. [http:// nsidc.org/arcticseaicenews/2010/100410.html](http://nsidc.org/arcticseaicenews/2010/100410.html).
- 25 NSIDC. Global Sea Ice Extent and Concentration: What sensors on satellites are telling us about sea ice. 2010. [http:// nsidc.org/sotc/sea_ice.html](http://nsidc.org/sotc/sea_ice.html).
- 26 Krishfield R , Proshutinsky A. Freshwater Content in the Beaufort Gyre: Data from Observations , Russian Climatology and Models. 2004. [http:// www.whoi.edu/beaufortgyre/pdfs/FWC_BG_draft.pdf](http://www.whoi.edu/beaufortgyre/pdfs/FWC_BG_draft.pdf).

- 27 Proshutinsky A Y , Johnson M A . Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean. *Journal of Geophysics Research* , 1997 , 102 (C6) : 12493—12514.
- 28 Proshutinsky A , Krishfield R , Timmermans M L , et al . Beaufort Gyre freshwater reservoir: State and variability from observations. *Journal of Geophysical Research* , 2009 , 14 (C00A10) , doi: 10.1029/2008JC005104.
- 29 Carnack E , McLaughlin F , Yamamoto-Kawai M , et al . Freshwater storage in the Northern Ocean and the special role of the Beaufort Gyre // Dickson R R , Meincke J , Rhines P . *Arctic-Subarctic Ocean Fluxes Defining the Role of the Northern Seas in Climate*. New York: Springer , 2008: 145—169.

SUMMER FRESHWATER CONTENT VARIABILITY OF THE UPPER OCEAN IN CANADA BASIN DURING RECENT SEA ICE RAPID DECLINE

Guo Guijun¹ , Shi Jiuxin^{1 2} , Zhao Jinping^{1 2} , Jiao Yutian^{1 2} , Xu Dong¹

(¹College of Physical and Environmental Oceanography , Ocean University of China , Qingdao 266100 , China;

²Key Laboratory of Physical Oceanography , Ministry of Education , Qingdao 266003 , China)

Abstract

Freshwater content (FWC) in the Arctic Ocean has changed rapidly in recent years , in response to the significant decrease in the extent of the sea ice. Research on freshwater content variability in the Canada Basin , the main storage area of fresh water , is important for understanding the input-output of freshwater in the Arctic Ocean. The FWC in the Canada Basin was calculated using data from the Chinese National Arctic Research Expeditions of 2003 and 2008 , and from expeditions of the Canadian icebreaker Louis S. St-Laurent from 2004—2007. Results show that the upper ocean in the Canada Basin became continuously fresher from 2003 to 2008 , excepting 2006. The FWC increased at a rate of more than $1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, and the maximum increase between 2003 and 2008 of 7 m was in the central basin. Variability of the FWC was almost entirely limited to the layer above the winter Bering Sea Water , below which the FWC remained around 3 m during the study period. Contributors to the FWC increase are generally considered to be net precipitation , runoff changes , Pacific water inflow through the Bering Strait , sea ice extent , and the Arctic Oscillation (AO) . However , we determined that the first three contributors did not have any apparent impact on the FWC changes. Therefore , this paper focuses on the analysis of the latter two factors and the results indicate that they were the major contributors to FWC variability in the basin.

Key words Canada Basin , freshwater content , sea ice , AO