

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, 2013, 28(6): 709-717.]

格陵兰海冰外缘线变化特征分析*

牟龙江, 赵进平

(中国海洋大学极地海洋过程与全球海洋变化重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: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。利用2003年1月到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。格陵兰海冬季的海冰外缘线极大值呈逐年下降的趋势, 体现了北极增暖导致的冬季海冰范围减小; 而夏季海冰外缘线离岸距离的极小值呈上升趋势, 表明夏季来自北冰洋的海冰输出量增大。2003—2004年是格陵兰海夏季海冰融化最严重的2年。2007年北冰洋夏季海冰覆盖范围达到历史最小; 而格陵兰海夏季的最小海冰范围最大, 表明2007年北冰洋海冰的输出量大于其他年份。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不是格陵兰海的局地风场, 而是弗拉姆海峡(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运输, 进而对格陵兰海海冰外缘线的分布产生滞后的影响。

关键词:格陵兰海; 海冰外缘线; 风场; 卫星遥感

中图分类号: P727.1; P733

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2013)06-0709-10

1 引言

近年来通过现场观测和数值模拟研究表明, 北极海冰覆盖面积减少^[1,2], 海冰厚度也呈下降趋势^[3-8], 成为全球气候变化最显著的地区^[9]。然而, 北冰洋边缘海的海冰变化在热力学过程和动力学过程上与北极中央冰区不同^[10-12], 研究北冰洋边缘海的海冰变化有助于加深对北极海冰变化的认识。

格陵兰海(Greenland Sea)是北冰洋主要的边缘海之一(图1), 位于格陵兰岛(Greenland)以东, 南部以扬马延岛(Jan Mayan)和格陵兰岛70.75°N海岸之间的连线为分界线与冰岛海(Iceland Sea)相连, 北部通过弗拉姆海峡与北冰洋相通, 东部紧靠挪

威海(Norwegian Sea)。

格陵兰海区淡水收支对全球大洋环流的稳定性有重要影响。淡水主要部分来自北冰洋的海冰输出, 还有陆地冰川融化引起的径流输入^[13]。此外, 格陵兰海海冰的热力学过程和动力过程能直接和间接影响到大气环流, 进而对全球气候变化产生作用^[8,14]。

海冰外缘线作为海冰特征参数之一能直观反映海冰的变化。影响海冰外缘线的因素有很多, 如辐射收支、风场作用、地表径流、海区温盐密的分布以及人类活动的直接或间接影响等。就格陵兰海的海冰外缘线而言, 弗拉姆海峡的海冰输出显著影响到海冰外缘线的分布, 而风场对海冰的输运有明显的

* 收稿日期: 2012-11-19; 修回日期: 2013-04-18.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“北极涛动核心区的关键海洋学过程研究”(编号: 40876006); 全球变化研究重大科学研究计划项目“北半球冰冻圈变化及其对气候环境的影响与适应对策”(编号: 2010CB951403)资助.

作者简介: 牟龙江(1989-), 男, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事极地物理海洋学研究. E-mail: oucmlj@gmail.com

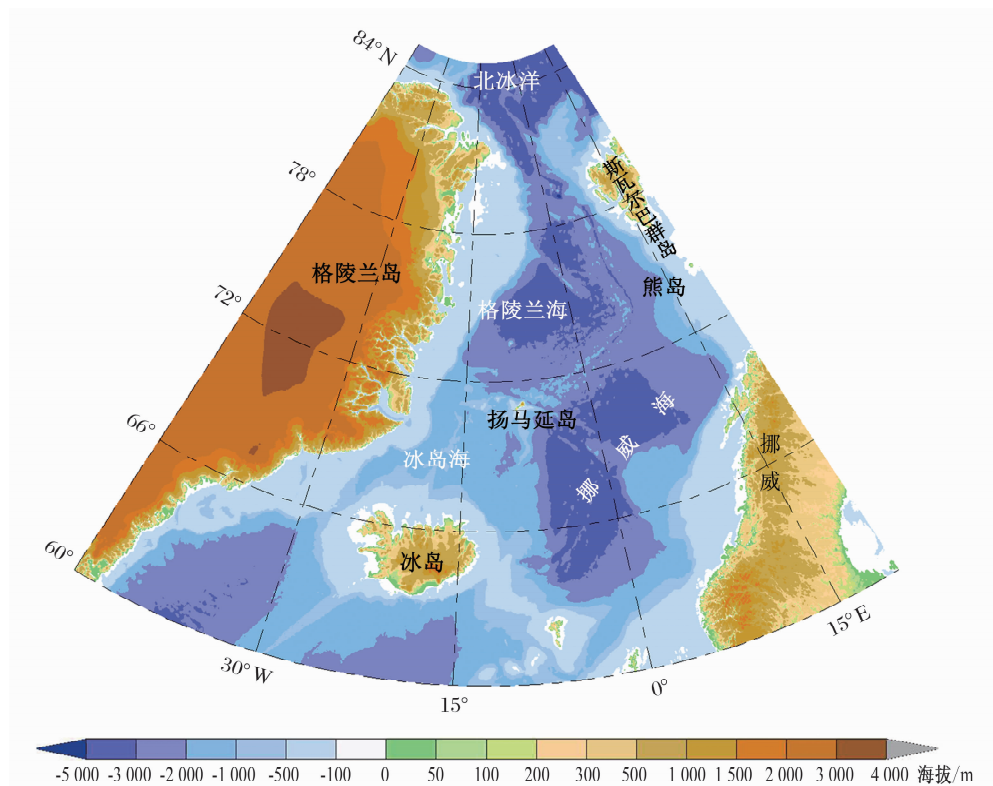


图1 格陵兰海区域示意图

Fig. 1 Diagram of the Greenland Sea

作用^[15]。不仅如此,来自北冰洋的海冰输出和格陵兰海局地风场作用有效支配了格陵兰海环流区深层对流的发生^[16],这也是格陵兰岛东北部冰间湖(Northeast Water Polynya)形成和维持不可缺少的机制^[17]。另外,格陵兰岛东部海拔较高,梯度很大,极易形成下降风^[18,19],能够影响格陵兰海海冰的分布。

本文利用卫星反演的高分辨率海冰密集度产品,研究了格陵兰海海冰外缘线的变化及其与陆地径流之间的关系,并对该海区风场对海冰外缘线的影响做了探究。

2 数据来源

本文采用的海冰密集度数据来自 Bremen 大学反演 AMSR-E 卫星 $6.25\text{ km}\times 6.25\text{ km}$ 的海冰密集度产品。利用 2003 年 1 月 1 日到 2011 年 6 月 30 日的逐日海冰密集度的数据,参考 Ogi 等^[20]关于海冰边缘的选取,将海冰密集度为 0.15 的等值线作为格陵兰海海冰外缘线的位置。该时间段内的风场数据和陆地径流数据均取自美国国家海洋大气局(NOAA)国家环境预测中心(National Center for En-

vironmental Prediction, NCEP), 分别为 NCEP/NCAR Reanalysis I 提供的 $2.5^\circ\times 2.5^\circ$ 的 10 m 逐日风场数据和 NCEP/DOE Reanalysis 2 提供的月平均地表径流(Water Runoff)数据,空间网格均为 T62 Gaussian grid (192×94)。

3 格陵兰海海冰外缘线的变化

格陵兰岛靠近格陵兰海的海岸与经线大致平行,可直接计算海冰外缘线与同纬度海岸之间的距离作为衡量海冰外缘线变化程度的指数。在 $70^\circ\sim 79.6^\circ\text{N}$ 之间的海域每隔 0.1° 纬度取一个空间点,在时间上将每个月的数据平均,得到海冰外缘线离岸距离的月平均数据。

3.1 海冰外缘线的多年变化

图 2 为海冰外缘线变化的纬度—时间综观图。格陵兰海夏季融冰、冬季结冰过程使得该海区海冰外缘线的变化具有明显的季节性。在 $70^\circ\sim 77.3^\circ\text{N}$ 之间的海域,海冰有明显的季节变化和年际变化。而 77.3°N 到弗拉姆海峡的高纬地区,与低纬度海区相比,冬夏两季海冰外缘线的变化并不强烈。另外,由图 2 也可看出不同纬度结冰和融冰的过程并

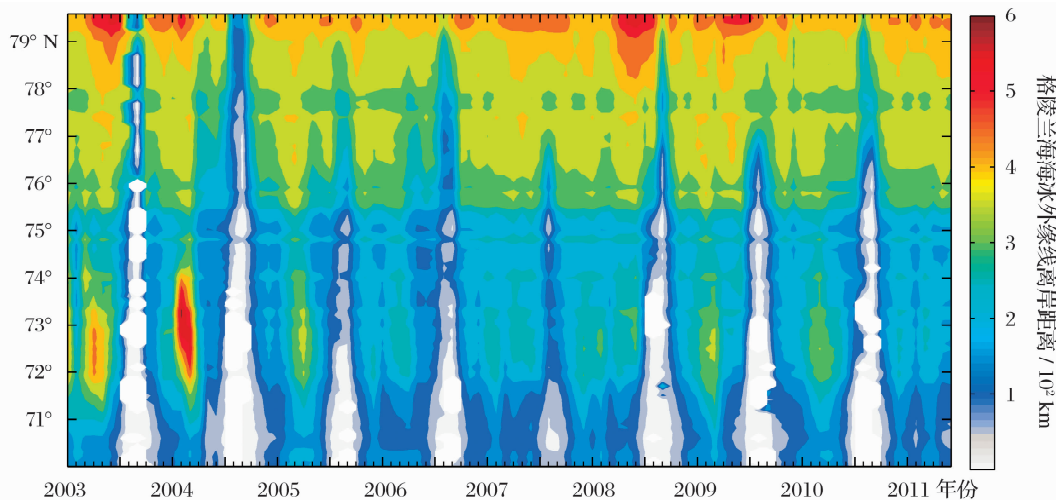


图 2 2003 年 1 月到 2011 年 6 月格陵兰海海冰外缘线变化情况

Fig. 2 Ice edge variations of the Greenland Sea from January 2003 to June 2011

不同时发生,在时间上高纬度和低纬度海区之间有
明显的时间延迟。

海冰覆盖的范围可以从海冰外缘线的分布中清晰
地看到。2003 年和 2004 年冬季海冰整体上向外
扩展较远,海冰外缘线的扩展范围明显大于 2005—
2010 年。研究时段内海冰最小覆盖范围出现在
2003 年的 9 月,此时格陵兰海海冰完全融化,海冰
存在范围退到 80°N 以北的高纬海区(图 3a);而海
冰外缘线离岸距离达到最远的一天在 2004 年 2 月
21 日(图 3b)。将每月各个纬度的海冰外缘线离岸
距离进行算术平均,得到海冰外缘线平均离岸距离
多年变化曲线(图 4a),显然,冬季的海冰范围极大
值(图 4b)和夏季的海冰范围极小值(图 4c)都存在
明显的年际变化。海冰外缘线向外扩展的极大值呈
逐年下降的趋势,以平均每年 15.68 km 的速度减少
(图 4b),体现了北极增暖导致的冬季海冰范围减
小;而海冰外缘线离岸距离的极小值呈上升趋势

(图 4c),表明夏季来自北冰洋的海冰输出量增大。
在北冰洋,2007 年夏季海冰覆盖范围达到历史最
小;而在格陵兰海 2007 年夏季海冰覆盖范围最小的
时候(图 3c)依然在 75°N 以南存在着海冰,同时 2007
年也是这 8 年中夏季海冰最多的一年(图 4c)。这表
明,2007 年北冰洋海冰的输出量大于其他年份,同时
导致了北冰洋海冰骤减和格陵兰海海冰激增。

3.2 海冰外缘线的季节变化

对整个格陵兰海区海冰外缘线变化的时间序列
(图 4a)作谱分析,结果表明外缘线的变化除存在一
年的变化周期外,还存在半年的变化周期,极大值为
6 个月和 12 个月(图 5 中黑线)。在该海区海冰覆
盖面积的时间序列中也存在 6 个月和 12 个月的周
期现象,如图 5 中蓝线所示。年周期体现出海冰外
缘线离岸距离最大值和最小值发生的时间,最大值
大多发生在每年的 3 月,有些年份出现在 4 月或 5
月,如 2007—2008 年。最小值多发生在每年 9 月,

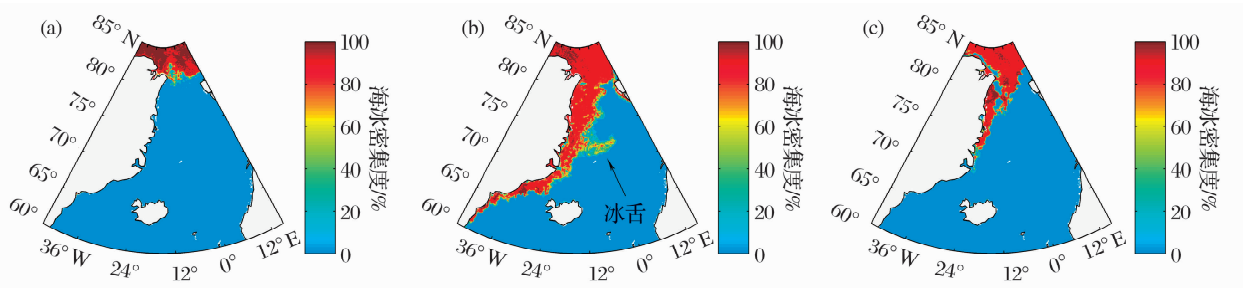


图 3 2003 年 9 月 11 日(a)、2004 年 2 月 21 日(b)和 2007 年 8 月 8 日(c)格陵兰海海冰覆盖范围

Fig. 3 Ice extent of the Greenland Sea on September 11 2003 (a), February 21 2004 (b) and August 8 2007 (c)

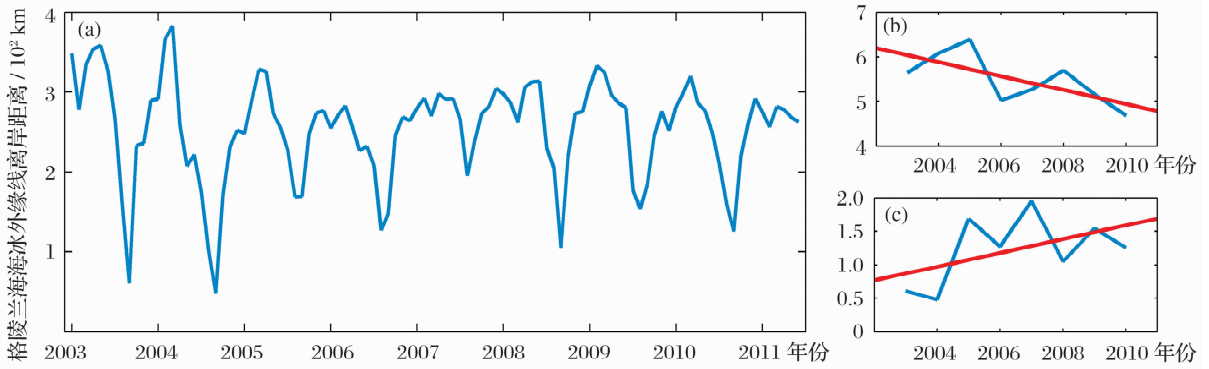


图4 格陵兰海海冰外缘线总体变化(a)、海冰外缘线离岸最远距离年际变化(b)、离岸最近距离年际变化(c)

Fig. 4 Monthly mean variations of the Greenland Sea ice edge (a), annual variations of the maximum distance of ice edge (b), annual variations of the minimum distance of ice edge (c)

(b), (c)图中红色直线表示最小二乘拟合后的线性趋势

Red lines in (b) and (c) indicate the trends derived from the least squares method

也有一些年发生在8月。半年周期体现了海冰外缘线向岸靠拢程度的周期性,受风场的影响每年初春和冬末海冰向岸靠拢,而冬季和夏季海冰外缘线比较容易向外扩展。对弗拉姆海峡平均经向风进行谱分析,同样发现了一年和半年的周期现象(图5中紫线),意味着风场对海冰外缘线和海冰覆盖面积有重要的影响。我们认为,风场的半年周期变化使海冰经由弗拉姆海峡的输运产生了半年周期变化,进而影响到海冰面积及外缘线的分布。

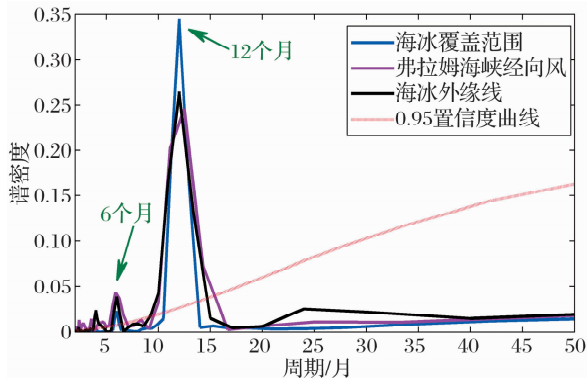


图5 格陵兰海海冰外缘线(黑线)、海冰覆盖范围(蓝线)和弗拉姆海峡经向风(紫线)时间序列的谱分析结果

Fig. 5 Diagram of energy spectrum of the Greenland Sea ice edge monthly mean time series (black line), monthly mean ice extent time series (blue line), monthly mean time series of wind field in Fram Strait (purple line)

3.3 地表径流与海冰外缘线变化的关系

径流携带的能量能够加快海冰的融化过程。注

入格陵兰海的淡水除北冰洋的海冰输入外,主要来自格陵兰岛融雪融冰后形成的地表径流以及冰河入流^[21]。Bamber等^[22]的研究表明在1992—2010年间格陵兰岛进入北欧海的淡水流量较1961—1990年间的平均值增长了17%。利用NCEP/DOE Reanalysis 2提供的月平均地表径流数据,得到注入格陵兰海区地表径流的标准化曲线(图6)。可见,海冰外缘线的变化要滞后地表径流变化1个月的时间,延迟相关系数达到-0.78。由于地表径流是月平均数据,海冰变化滞后1个月实际上不是精确的滞后时间,只是表明了滞后特性,体现了海冰因径流携带的热量而融化需要响应一段时间。冬季格陵兰岛冰原融冰水极少,入海径流量远小于夏季。2003, 2004和2008年夏季格陵兰海淡水注入量很大,海冰大量融化,外缘线离岸距离较其他年份近。2005, 2007和2009年夏季入海径流较少,海冰融化不严重,外缘线的离岸距离也较远。可见夏季格陵兰岛融冰融雪形成的地表径流对该海区海冰的融化有重要的影响,对海冰外缘线分布有不可忽视的作用。

3.4 格陵兰海海冰外缘线的空间变化

为了理解近年来格陵兰海海冰外缘线变化情况,将2003年1月到2011年6月各海区海冰外缘线离岸最远距离、最近距离以及无冰期持续时间列为表1。

在这段时间内,各个纬度的海冰在2003年曾完全融化,海冰外缘线离岸最近距离均为0 km。海冰外缘线离岸最远距离在各个纬度明显不同(图7a)。

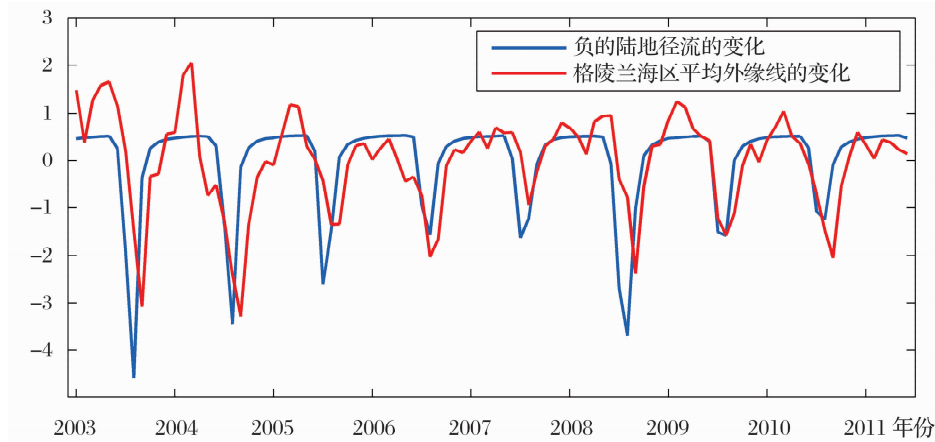


图6 地表径流和海冰外缘线离岸距离标准化的时间序列

Fig. 6 Standard time series of surface runoff (blue line) and ice edge variations (red line)

表1 2003年1月到2011年6月格陵兰海各纬度海冰外缘线变化统计表

Table 1 Variations of the Greenland Sea ice edge on different latitudes from January 2003 to June 2011

| 纬度/N | 70° | 71° | 72° | 73° | 74° | 75° | 76° | 77° | 78° | 79° |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 最远距离/km | 276.9 | 405.9 | 621.1 | 743.6 | 690.0 | 378.5 | 442.9 | 470.7 | 478.5 | 554.3 |
| 最近距离/km | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 无冰期/d | | | | | | | | | | |
| 2003年 | 115 | 58 | 33 | 83 | 61 | 62 | 55 | 45 | 45 | 42 |
| 2004年 | 109 | 96 | 57 | 90 | 26 | 31 | 7 | 9 | 0 | 0 |
| 2005年 | 80 | 66 | 38 | 45 | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2006年 | 88 | 69 | 23 | 55 | 8 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 |
| 2007年 | 49 | 26 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2008年 | 89 | 73 | 30 | 72 | 48 | 37 | 4 | 1 | 0 | 0 |
| 2009年 | 99 | 88 | 38 | 61 | 37 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2010年 | 114 | 115 | 59 | 83 | 59 | 37 | 4 | 2 | 0 | 0 |

整体上,由低纬到高纬海冰外缘线离岸的最远距离是增加的,但在 $72^{\circ}\sim 74^{\circ}\text{N}$ 的海区,外缘线离岸距离骤然增加。 73°N 附近的海区,外缘线离岸距离在2004年达到743.6 km,超过了弗拉姆海峡的宽度。海冰外缘线发生剧变的原因是由于在扬马延岛以北海区附近冰舌的出现(图3b)。Shuchman等^[23]认为冰舌的形成与风场之间有重要的关系,并且探讨了冰舌对格陵兰海深水对流的作用,也有一些研究表明北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)与冰舌的形成存在着一致的模态^[24]。

无冰期的持续时间作为研究海冰的重要参数,能够反映海冰多年变化的情况。格陵兰海各个纬度的无冰期持续时间整体上从低纬到高纬呈减少的趋势(图7b和表1)。2007年夏季格陵兰海在 71.6°N 以南的海冰全部融化,无冰期持续时间为49天。2008年和2010年融冰过程对于海冰外缘线的显著影响达到 78°N ,无冰期的持续时间也相应延长。2009年,夏季海冰的南边界也达到了 75°N 以北。

在 77°N 以北的高纬海区,2004—2010年间夏季没有出现无冰期。

在 73°N 附近的海区无冰期持续时间比相邻海区要长得多。无冰期的持续时间在 73°N 海区发生较大变化与该海区的流场和径流入海有一定关系。夏季格陵兰岛冰雪融化使得大量淡水在该海区入海,使得该处海冰首先融化,另外离岸流带走了一部分海冰,导致该处无冰期外缘线持续天数较低纬海区要长。冰舌容易出现在 73°N 附近的海区,2003, 2004, 2005, 2009和2010年在该海区都观察到冰舌出现,其中2003—2004年比较显著。这使得格陵兰海 73°N 附近海区在冰舌出现时海冰外缘线向外扩展到一年中最远,而夏季无冰期又最长。

此外,格陵兰岛东北部存在着每年5月或6月开始一直持续到9月的夏季冰间湖(Northeast Water Polynya)^[17],东部 $74^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{N}$ 间沿岸也存在冰间湖(Sirius Water Polynya)^[25],这对于夏季格陵兰海的融冰过程有着重要的影响,进而反映在海冰外缘线

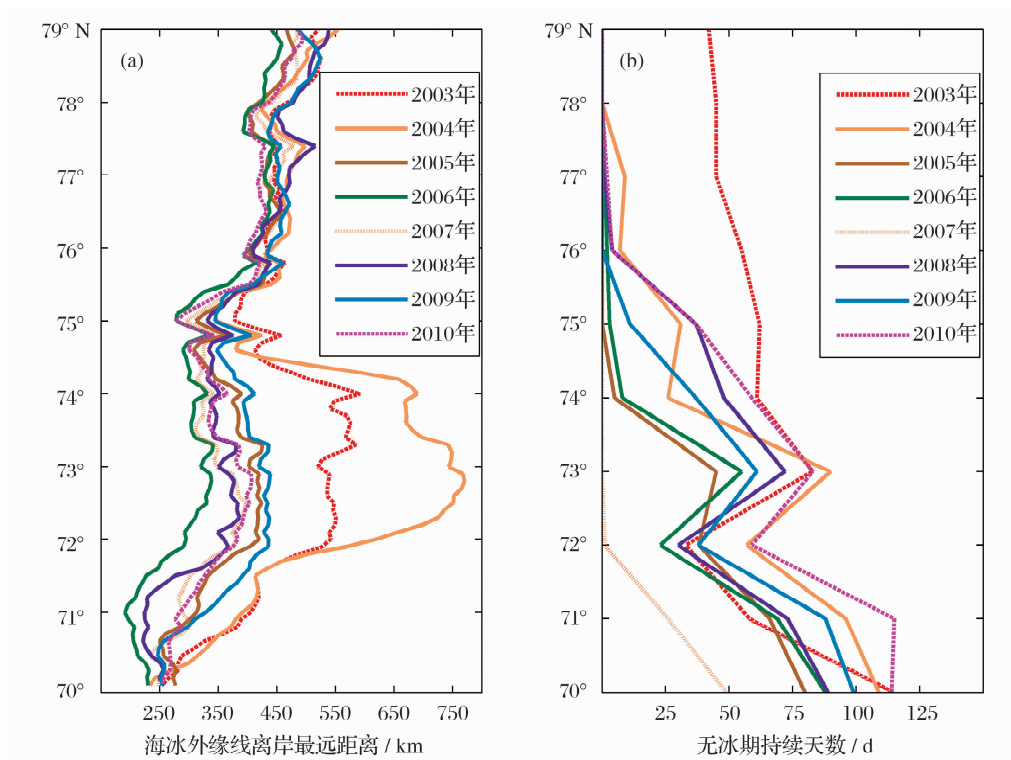


图 7 格陵兰海各个纬度海冰外缘线离岸最远距离 (a) 和不同年份各个纬度无冰期持续天数 (b)

Fig. 7 Maximum distance of the Greenland sea ice edge (a) and ice-free days (b) on different latitudes

的变化上。冰间湖开阔的洋面使表面反射率降低,能够吸收大量的短波辐射,促进海冰融化,使得冰间湖面积增大,从而吸收更多的热量。这个正反馈机制能够加速海冰的融化。与其他年份不同,2003 年夏季格陵兰海靠岸的海冰出现先融化的现象,使得格陵兰岛和海冰之间存在大量的开阔水。开阔水的出现,通过上述正反馈机制的作用,使得 2003 年夏季格陵兰海在 74°N 以北的海冰比 2004—2010 年融化更严重,无冰期持续时间偏长 (图 7b)。

3.5 风场对格陵兰海海冰外缘线变化的影响

在格陵兰海,由于冰岛低压常年存在,格陵兰海盛行北风,研究期间北风占 93.45%。一些研究也表明,格陵兰海西部大气温度较低,而东部较高,有利于形成热成风,从而维持北风的存在^[26]。北冰洋的海冰沿格陵兰岛沿岸向南漂移,在漂移过程中受到风应力和科氏力的共同作用,海冰不断向格陵兰岛沿岸挤压,使得海冰外缘线发生变化。这种挤压造成冰间相互作用力增大,反过来阻止海冰向岸移动进程。因此,海冰在离岸方向不容易对风场有紧密的响应。而在沿岸方向,由于没有陆地约束,海冰

漂流可以较好地响应风场的辐聚辐散,导致海冰外缘线向外凸出或向内凹陷。另外,海冰密集度对海冰漂流有很大的影响^[27],较小的海冰密集度有利于海冰的漂流。Zhang 等^[28]的研究表明在格陵兰海区当海冰密集度大于 85% 时,海冰的运动不易受到风场影响。冬季格陵兰海海冰密集度通常很高,经过计算,密集度大于 85% 的海区面积占整个海冰覆盖面积的 88% 以上,只有 12% 的海冰容易响应风场的变化。

我们仔细研究了格陵兰海风场对海冰的影响,结果表明,由于海冰密集度很高,风场平均散度对海冰外缘线影响不明显;另外,虽然局地纬向风对海冰外缘线有一定的影响,但总体上看海冰外缘线与纬向风之间不存在较好的相关性。对海冰边缘线影响最大的是弗拉姆海峡的经向风。

弗拉姆海峡邻近海域海表面风场影响海冰通过弗拉姆海峡的输运^[28-30]。Smetsrud 等^[30]认为北冰洋海冰经弗拉姆海峡向格陵兰海区输运增多是最近数十年北极海冰减少的原因之一。Zhang 等^[31]通过数值模式研究 2007 年北极海冰减少的原因,也做出类似的结论。将弗拉姆海峡的经向风速进行空间平

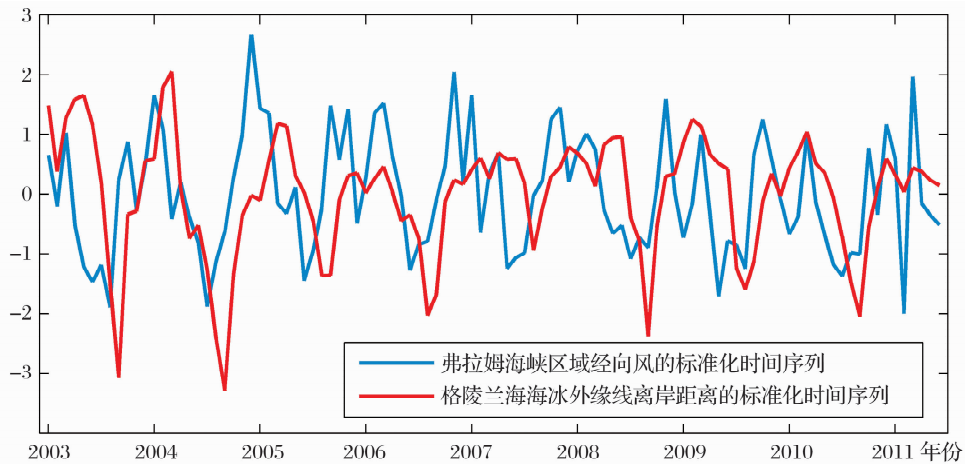


图8 弗拉姆海峡区域平均经向风和格陵兰海海冰外缘线离岸距离的标准化时间序列

Fig.8 Standard time series of monthly mean wind field in Fram Strait (blue line) and standard time series of the Greenland Sea ice edge (red line)

均,再得到平均经向风的时间变化曲线(图8红线,这里取北风为正)。与格陵兰海海冰外缘线平均离岸距离的标准化时间序列(图8蓝线)进行比较可见,二者有比较好的相关性,但海冰外缘线的变化要滞后经向风变化2个月,滞后相关系数为0.58,并且通过95%的置信度检验。结果表明,虽然海冰外缘线的变化受局地风场的影响很小,但是弗拉姆海峡风却与海冰外缘线变化有比较显著的相关性,表明弗拉姆海峡风引起北极海冰运输量的变化,改变格陵兰海表面流下游各处的海冰辐聚辐散特性,导致海冰外缘线离岸距离的增减。弗拉姆海峡海冰输送量变化的信号需要靠海流传递到下游,是导致海冰外缘线变化平均滞后2个月的原因。因此,弗拉姆海峡海冰输出量的变化直接影响到下游海冰的覆盖范围,是决定海冰外缘线位置的最主要因素之一。Smedsrud等^[30]的研究也表明整体上2005—2010年弗拉姆海峡输出到格陵兰海的海冰较2003—2004年增多。从另一方面来看,这也是2003—2004年夏季格陵兰海海冰较2005—2010年融化严重的原因。

4 结论与讨论

北冰洋的海冰覆盖范围正在发生快速变化,受其影响,格陵兰海的海冰也正在发生显著的改变。本文利用2003年1月到2011年6月卫星数据分析了格陵兰海海冰外缘线的变化,得到以下认识:

(1) 格陵兰海冬季的海冰外缘线极大值呈逐年下降的趋势,体现出北极增暖导致冬季海冰范围减小;而夏季海冰外缘线离岸距离的极小值呈上升趋

势,表明夏季来自北冰洋的海冰输出量增大。在北冰洋,2007年夏季海冰覆盖范围达到历史最小;而在格陵兰海,2007年夏季的最小海冰范围最大,说明2007年北冰洋海冰的输出量大于其他年份。从季节变化的角度看,海冰外缘线不仅存在一年的周期变化,而且存在比较显著的半年周期变化。其中,半年周期的变化是由海冰在春秋两季受风场的影响向岸收缩引起的。

(2) 夏季海冰融化导致海冰外缘线退缩,除了与气温与海水温度升高、短波辐射增强等因素有关,还与格陵兰岛的径流有密切的关系。分析表明,海冰外缘线的变化滞后于地表径流变化1个月的时间,延迟相关系数达到-0.78。显然,径流携带的热量对海冰的融化有重要贡献。

(3) 经向风与纬向风都是影响海冰外缘线的重要因素。然而根据本文的分析,由于格陵兰岛的约束作用和科氏力引起的向岸方向的挤压,格陵兰海海冰密集度很高,海冰外缘线的变化对局地风场的响应并不好,而对弗拉姆海峡经向风有更好的滞后响应。由于弗拉姆海峡的风与海冰输出量有密切的联系,这表明,弗拉姆海峡的海冰输出对海冰外缘线有显著的影响。

北冰洋输出的海冰增减将改变格陵兰海上层水体的温度和盐度结构,影响对流和热盐环流的强度,还将影响北大西洋水体结构。在本文的研究时间段内,2003—2004年格陵兰海夏季海冰融化最为严重,2005—2010年夏季北冰洋输出到格陵兰海的海冰有增多的趋势。而夏季格陵兰海海冰增多的趋势

若继续下去,必然会改变格陵兰海区热盐环流的结构和北半球气候。

致 谢:本项研究所用的 AMSR-E 海冰密集度数据由德国不莱梅大学(University of Bremen)及美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center)提供,风场数据和陆表径流数据由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)提供,特此感谢。

参考文献(References):

- [1] Serreze M C, Holland M M, Stroeve J. Perspectives on the Arctic's shrinking sea-ice cover[J]. *Science*, 2007, 315: 1 533-1 536.
- [2] Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. Arctic Sea ice extents, areas and trends, 1978-1996[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C9): 20 837-20 856.
- [3] Tucker W B III, Weatherly J W, Eppler D T, et al. Evidence for rapid thinning of sea ice in the western Arctic Ocean at the end of the 1980s[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28: 2 851-2 854.
- [4] Björk G. The relation between ice deformation, oceanic heat flux and the ice thickness distribution in the Arctic Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C8): 18 681-18 698.
- [5] Holloway G, Sou T. Has Arctic Sea ice rapidly thinned? [J]. *Journal of Climate*, 2002, 15: 1 691-1 701.
- [6] Polyakov V I, Alekseev G V, Bekryaev R V, et al. Long-term ice variability in Arctic marginal seas[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(12): 2 078-2 085.
- [7] Polyakov I V, Johnson M A. Arctic decadal and interdecadal variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27: 4 097-4 100.
- [8] Deser C, Walsh J E, Timlin M S. Arctic Sea ice variability in the context of recent atmospheric circulation trends[J]. *Journal of Climate*, 2000, 13: 617-633.
- [9] Dickson B. All changes in the Arctic[J]. *Nature*, 1999, 397: 389-391.
- [10] Zhao Jinping, Zhu Dayong, Shi Jiuxin. Seasonal variations in sea ice and its main driving factors in the Chukchi Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21(2):123-131. [赵进平, 朱大勇, 史久新. 楚科奇海海冰周年变化特征及其主要关联因素[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(2): 123-131.]
- [11] Zhu Dayong, Zhao Jinping, Shi Jiuxin. Study on the multiyear variations of sea ice cover of Chukchi Sea in Arctic Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(2):25-33. [朱大勇, 赵进平, 史久新. 北极楚科奇海海冰面积多年变化的研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(2): 25-33.]
- [12] Li Tao, Zhao Jinping, Zhu Dayong. Variations of sea ice cover in East Siberian Sea of Arctic Ocean in 1997-2005[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(2):822-828. [李涛, 赵进平, 朱大勇. 1997—2005年北极东西伯利亚海海冰变化特征研究[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 822-828.]
- [13] Aagaard K, Carmack E C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(C10): 14 485-14 498.
- [14] Belkin I M, Levitus S, Antonov J, et al. "Great Salinity Anomalies" in the North Atlantic[J]. *Progress in Oceanography*, 1998, 41(1):1-68.
- [15] Thorndike A S, Colony R. Sea ice motion in response to geostrophic winds[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1982, 87(C8): 5 845-5 852.
- [16] Hkkinen S. Simulated interannual variability of the Greenland Sea deep water formation and its connection to surface forcing[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C3): 4 761-4 770.
- [17] Schneider W, Budéus G. Summary of the Northeast Water polynya formation and development (Greenland Sea)[J]. *Journal of Marine Systems*, 1997, 10:107-122.
- [18] Klein T, Heinemann G. Interaction of katabatic winds and mesocyclones near the eastern coast of Greenland[J]. *Meteorological Applications*, 2002, 9:407-422.
- [19] Heinemann G. Forcing and feedback mechanisms between the katabatic wind and sea ice in the coastal areas of polar ice sheets[J]. *The Global Atmosphere and Ocean System*, 2003, 9(4): 169-201.
- [20] Ogi M, Rigor I G, McPhee M G, et al. Summer retreat of Arctic Sea ice: Role of summer winds[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24), doi: 10.1029/2008GL035672.
- [21] Liston G E, Mernild S H. Greenland freshwater runoff. Part I: A runoff routing model for glaciated and nonglaciated landscapes (hydroFlow)[J]. *Journal of Climate*, 2011, 25: 5 997-6 014.
- [22] Bamber J L, Broeke M R, Ettema J, et al. Recent large increases in freshwater fluxes from Greenland into the North Atlantic[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(19), doi: 10.1029/2012GL052552.
- [23] Shuchman R A, Josberger E G, Russel C A, et al. Greenland Sea Odden sea ice feature: Intra-annual and interannual variability[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C6): 12 709-12 724.
- [24] Germe A, Houssais M N, Herbaut C, et al. Greenland Sea sea ice variability over 1979-2007 and its link to the surface atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(C10), doi: 10.1029/2011JC006960.
- [25] Pedersen J B T, Kaufmann L H, Kroon A, et al. The Northeast Greenland Sirius Water Polynya dynamics and variability inferred from satellite imagery[J]. *Geografisk Tidsskrift*, 2010, 110(2): 131-142.
- [26] Van Angelen J H, Van den Broeke M R, Kwok R. The Greenland Sea Jet: A mechanism for wind-driven sea ice export through Fram Strait[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(12), doi: 10.1029/2011GL047837.
- [27] Martin T, Wadhams P. Sea-ice flux in the East Greenland Current[J]. *Deep-Sea Research II*, 1999, 46: 1 063-1 082.

- [28] Zhang H, Gudmandsen P. Relation between ice motion observed from AVHRR and wind in the Greenland Sea[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Remote Sensing: Global Monitoring for Earth Management. Helsinki; University of Denmark, 1991.
- [29] Kwok R, Rothrock D A. Variability of Fram Strait ice flux and North Atlantic Oscillation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C3):5 177-5 189.
- [30] Smedsrud L H, Sirevaag A, Kloster K, *et al.* Recent wind driven high sea ice export in the Fram Strait contributes to Arctic Sea ice decline[J]. *The Cryosphere*, 2011, doi: 10. 5194/tcd-5-1311-2011.
- [31] Zhang J, Lindsay R, Steele M, *et al.* What drove the dramatic retreat of arctic sea ice during summer 2007? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(11), doi: 10. 1029/2008GL034005.

Variability of the Greenland Sea Ice Edge

Mu Longjiang, Zhao Jinping

(*Ocean University of China, Key Laboratory of Polar Oceanography and Global Ocean Change, Qingdao 266100, China*)

Abstract: The Greenland Sea, a marginal sea of the Arctic Ocean, accommodates ice flux from the Arctic. The Greenland Sea ice edge is affected by ice export from the Arctic Ocean and also by local sea ice melting and freezing processes. The sea ice concentration product inverted from brightness temperature data on the AMSR-E microwave sensor from January 2003 to June 2011 is used to discuss the variability of the Greenland Sea ice edge in this paper. The study shows that the Greenland Sea ice edge did not only show annual periodic variations, but also significant semi-annual periodic variations associated with sea ice extent changes in spring and autumn. The maximum of winter sea ice edge had a decreasing trend which demonstrated sea ice extent decreasing caused by Arctic warming in winter, and the minimum of summer sea ice edge had a increasing trend caused by higher sea ice export from Arctic Ocean in summer. 2003 and 2004 were the year Greenland Sea ice melt most in summer. In 2007, the Arctic Ocean had the largest ice extent, while the Greenland Sea had the least ice extent that demonstrated more ice export from Arctic Ocean than the other years. In addition, surface water runoff from ice melting in summer on the Greenland had a certain impact on the variability of sea ice edge. Meridional wind in Fram Strait, which drove ice transport from the Arctic Ocean to the Greenland Sea and then produced lagging effect on the distribution of the Greenland Sea ice edge, played a more important role than local wind field on ice edge variations.

Key words: The Greenland Sea; Ice edge; Wind field; Satellite remote sensing.