

研究论文

# 北极拉普捷夫海海冰多年变化研究

姚文峻 赵进平

(中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

**摘要** 拉普捷夫海是北冰洋的边缘海和冰源地,对北冰洋的海冰变化有重要影响。通过分析 AMSR-E 海冰密集度数据以及 NECP-DOE 的风场、温度场数据,结果表明拉普捷夫海海冰在 2002—2011 年经历了如下过程:重冰年(2002—2004)—过渡性质年份(2005—2006)—轻冰年(2007, 2009—2011),即冰情由重向轻转变。研究结果也表明拉普捷夫海的冰情轻重与融冰期长短有较好的相关性,融冰期持续时间越短,冰情越重。4 个参数,包括海冰距平指数、最小海冰覆盖率、积温、风驱动指数描述了拉普捷夫海的海冰多年变化过程。海冰距平指数是时间(3—11 月)平均下的海冰覆盖率距平值,定量给出了各年冰情的轻重;最小海冰覆盖率是夏季海冰的极限情况,变化范围在 0.45%—48.73%,发生时间为 8 月底至 10 月上旬。积温是上一个冬季气温积累对当年冰情的影响,结果表明积温是影响当年冰情轻重的主要因素。2008 年的上一个冬季经历了异常低温,造成当年的异常重冰年。风驱动指数给出了风场对海冰覆盖率变化的短期影响,与同时期其他年份相比,2006 年 4 月、2007 年 9 月均出现了异常强北风,一定程度上造成了 2006 年融冰开始时间延后、2007 年夏季最小海冰覆盖率的明显偏大。

**关键词** 北极 拉普捷夫海 海冰覆盖率 多年变化 卫星遥感

doi:10.3724/SP.J.1084.2013.00218

## 0 引言

已有研究成果表明,自 20 世纪 70 年代以来,北极海冰的覆盖范围、密集度和厚度都呈现了明显减少的趋势。1978—1996 年,北冰洋夏季海冰覆盖面积以每年  $34\,300 \pm 3\,700 \text{ km}^2$  的速度减少,每十年减少 2.8%<sup>[1-2]</sup>。2005—2008 年,多年冰覆盖范围减少超过 42%,4 年内多年冰厚度下降了 0.6 m<sup>[3]</sup>。多年冰的平均输出量已经超过了季节性海冰的生成速度,北极海冰总量的减少正在不断加速,消融速度也远远超过现有的模式预测结果<sup>[4]</sup>。

拉普捷夫海(Laptev Sea)是北冰洋的 7 个边缘海之一(图 1)。拉普捷夫海面积约 67 万  $\text{km}^2$ ,近 70% 陆架水深小于 20 m,平均深度 578 m,最大深度

3 385 m。海域西侧为 Taymyr 半岛和 Severnaya Zemlya 群岛,与喀拉海相邻,东侧通过新西伯利亚群岛与东西伯利亚海相连,北边界从北极角(Arctic Cape)(图 1)延伸到经纬坐标点  $79^\circ\text{N}, 139^\circ\text{E}$ ,全部开放直面北冰洋。相比其他边缘海,冬季拉普捷夫海冰间湖的频繁生成与闭合,使海域的海冰总面积大小不断发生变化<sup>[5]</sup>。夏季期间,每天有大量海冰由拉普捷夫海直接进入北冰洋中心区,为北极穿极流补充海冰的流失。冬季在拉普捷夫海北缘附近存在狭长的开阔水区域,称为环北极冰间水道(Circumpolar flaw leads),在持续离岸风的作用下主导着新冰的产生<sup>[6-7]</sup>,产冰量占北冰洋海冰总量的 2.6%<sup>[8]</sup>。观测表明,每年从 Fram 海峡流出的海冰中,有多达 20% 来自拉普捷夫海<sup>[9]</sup>。研究拉普捷夫海海冰的变化以及气候特征,对了解北冰洋海冰变

[收稿日期] 2012 年 12 月收到来稿,2013 年 4 月收到修改稿

[基金项目] 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951403)和国家南北极环境综合考察专项(CHINARE2012-04-04)资助

[作者简介] 姚文峻,男,1989 年生。硕士研究生,主要从事极地海洋学与全球海洋变化研究。E-mail: wjmyao@163.com

化有重要的意义。

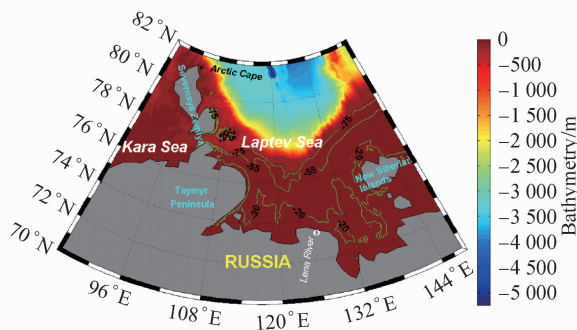


图1 北极拉普捷夫海水深地形示意图  
Fig. 1. Sketch of Laptev Sea of Arctic

陆地径流系统对拉普捷夫海起着不可忽视的作用。有多条河流汇入拉普捷夫海,集水面积约有1 400 000 km<sup>2</sup>。大量淡水入海后,影响了拉普捷夫海的水体结构。包括有:勒拿(Lena)河,长4 400 km,平均年流量550 km<sup>3</sup>;科特佳河(Kataga),平均年流量100 km<sup>3</sup>;安阿巴河(Anabar),平均年流量15 km<sup>3</sup>;奥勒那可河(Olenek),平均年流量40 km<sup>3</sup>;亚纳河(Yana),平均年流量40 km<sup>3</sup>[10]。其中,勒拿河起到最大的作用,并且河流流量正以较快的速度增加。在1991—2001年间勒拿河年流量呈现出了明显的增长趋势,高于历史平均年流量的12%[11]。

陆地径流是海冰融化的热源之一[12]。夏季河流的低盐、高温淡水入海,以及秋季的低盐表层河水结冰汇流入海,极大地影响了固定冰冰缘、冰间湖以及海冰的消融过程[13]。Lena河与Yana河两大河流使85%的出流集中在拉普捷夫海东部,对夏季海冰融化和秋季海冰冻结有着重大的影响。另一方面,开阔水吸收了更多的太阳辐射能,促进了海冰的进一步融化[14-15]。

在以往的工作中,Bareiss和Gorgen已给出了1979—2002年拉普捷夫海海冰的空间和时间变化,并通过模式一定程度上分析了影响海冰的动力与热动力因素[16]。本文应用2002—2011年AMSR-E的海冰密集度数据,在时间上延续对拉普捷夫海海冰多年变化的研究。同时利用NECP-DOE 1 000 hpa处的温度和风场数据,初步讨论了其中的动力学因素。考虑到这10年间北极海冰的显著变化,尤其是在2007年夏季出现的北极海冰历史最小面积现

象[17],对这一时期拉普捷夫海海冰变化的研究是很有必要的。

## 1 拉普捷夫海海冰的多年变化

本文采用的海冰密集度(SIC, Sea Ice Concentration)数据为准实时的日平均数据,来源于日本高级微波扫描辐射计AMSR-E测量的微波亮温数据,德国布莱梅大学通过反演计算其中的89 Hz频段部分得到海冰密集度产品。数据的分辨率为6.25 km,空间覆盖范围可从极点分别延伸到35°N和40°S,时间范围从2002年7月1日—2011年9月30日(之后因AMSR-E发生故障,数据终止)。

风场及温度场数据采用的是NECP-DOE再分析2代数据([http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep\\_reanalysis2\\_pressure.html](http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep_reanalysis2_pressure.html)),该数据覆盖全球,网格点分辨率2.5°×2.5°,提供的月平均风速、温度均为每6小时的平均值,并且涵盖了不同气压层数值(10—1 000 hPa)。在本文中,只使用了1 000 hPa处的月平均风速以及温度。

为了更好地认识拉普捷夫海的海冰多年变化状况,定义研究区域内的海冰覆盖率(ICR):

$$ICR(t) = \frac{1}{S} \int A(s, t) ds \quad (1)$$

其中, $S$ 为海域总面积; $s$ 为单个网格点的面积; $A$ 为海冰密集度。在时间点 $t$ 上,对区域内所有海冰面积求和,再除以海域总面积。ASI算法得到的AMSR-E海冰密集度数据在低密集度冰区存在较大误差[18]。但通过试验,将海域中 $A < 30\%$ 的网格全部设为 $A = 0$ ,按(1)式得到新的海冰覆盖率时间序列 $Y_t$ ,与原海冰覆盖率时间序列 $X_t$ 的绝对平均差为0.36%,最大偏差 $\max(X_t - Y_t)$ 为2.5%。因此,数据的误差对本文结果带来的影响很小,另外文中的有关结果均由原海冰密集度数据计算得到。

图2是拉普捷夫海海冰覆盖率从2002年7月1日至2011年9月30日的逐日变化曲线图。

由图2可以看出,2002—2011年间,冬季冰封期拉普捷夫海海冰覆盖率普遍大于96%,属于冰情较重的边缘海。在频繁生成、闭合的冰间开阔水影响下,冰封期内海冰覆盖率表现出较大波动,可以在2007年4月出现81.3%,2009年11月出现87.6%的低海冰覆盖率现象。

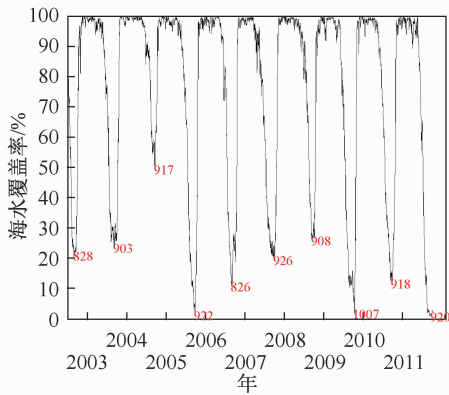


图2 拉普捷夫海海冰覆盖率逐日变化,红字为极值发生日期(mmdd)

Fig. 2. Daily variation of sea ice coverage ratio in the Laptev Sea

多年海冰的变化主要体现在夏季,并且有较明显的年际差异。冰情较轻时可以海面无冰,冰情较重时海面可有接近50%面积的海冰。10年来,夏季最小海冰覆盖率有7年不足21%,表现出明显的夏季少冰现象,发生日期在8月底—10月初变动。2005、2009、2011年夏季出现无冰海面,表明拉普捷夫海存在夏季无冰年。

### 1.1 海冰覆盖率多年平均与距平分析

图3对这10年的海冰覆盖率作了逐日平均,体现多年平均意义下拉普捷夫海的海冰变化特征。

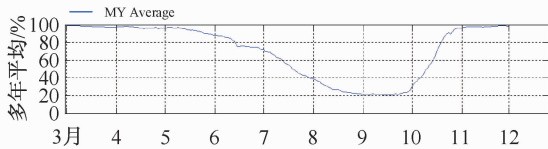


图3 多年逐日平均海冰覆盖率

Fig. 3. Multi-year average of sea ice coverage ratio

多年平均曲线表明海冰覆盖率变化有明显的季节特征。冰封期从11月到翌年4月,期间冰覆盖率接近100%。融冰期4个月,融冰速率保持基本一致,每月减少约20%,至9月份达到最小值。结冰期显著短于融冰期,只需要1个多月的时间,迅速从最小海冰覆盖率增长到全面冰封状态。

值得注意的是,在6月中旬海冰的减少会有一个突然的加速。Bauch等<sup>[19]</sup>给出了6月份是拉普捷夫海陆地径流Lena河的汛期,突然增大的淡水汇流入海在短时间内加快了融冰速度。

图4给出的各年海冰覆盖率是相对于多年平均海冰覆盖率的距平值,可以很好地表现出年与年之

间的差异。

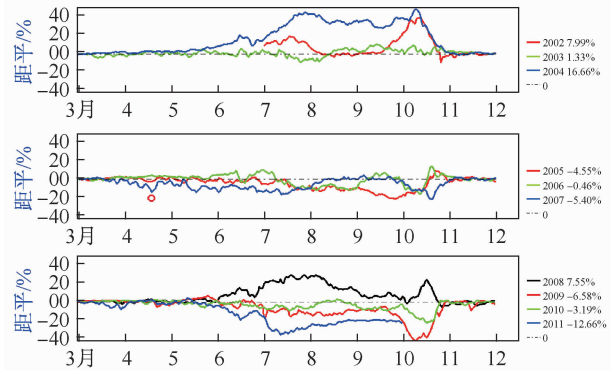


图4 海冰覆盖率距平,题注为年、海冰覆盖率距平时间平均值

Fig. 4. Anomaly of sea ice coverage ratio

2002—2004、2008年是海冰覆盖率正距平年份,属于重冰情年。正距平曲线在两段时间内出现峰值,一个是7—8月,表明融冰初期海冰融化速度较慢;另一个是10月中上旬,表明结冰期海冰面积快速增长。

2005—2006年的距平值在平衡位置波动,海冰覆盖率呈轻微负距平,是冰情由重向轻转变的过渡性质年份。

2007、2009—2011年是海冰覆盖率负距平年份,海冰覆盖率明显低于平均状态,属于轻冰情年。2009、2010两年,负距平最大值出现在10月中下旬,表明进入冰封期前夕仍然是大面积的开阔水面。2011年的距平曲线与其他9年相比,每个时期都呈现出最大的负距平,表明在这一年海冰覆盖率整体上是最低的。

值得注意的是2007年。依据多年逐日平均海冰变化特征(图3),4月份拉普捷夫海应仍处在全面冰封状态,整个海域的平均海冰覆盖率为98%以上,但图4却显示在2007年4月18日,距平值偏离平均值接近-20%(红色圆圈标示),意味着冰覆盖率下降到了81.3%。这一异常海冰现象可能与西伯利亚和拉普捷夫海的海平面异常低压有关<sup>[20]</sup>,与2007年北极海冰覆盖率达到极小值相对应。

在以往的工作中,Bareiss和Gorgen<sup>[16]</sup>给出在1979—2002年,拉普捷夫海的平均海冰面积与范围正分别以每10年1.5%、1.7%的速度减小,海冰的变化呈负增长趋势。而拉普捷夫海2002—2011年海冰的多年变化特征为:2002—2004年是冰情较重

年份; 2005—2006 年属于过渡性质的年份; 2007、2009—2011 属于明显的冰情较轻年份。冰情基本呈现为由重到轻的变化。需要指出的是, 在上述多年海冰变化规律下, 2008 年是冰情异常年份, 将在后面的章节进行讨论。因此, 在 1979—2011 年间, 拉普捷夫海的海冰面积表现为持续减少。

为了定量地给出各年冰情轻重的状态, 我们将各年海冰变化剧烈的时间段(3月1日—11月30日)的逐日海冰覆盖率距平值进行时间平均, 定义为海冰距平指数, 列于图4题注位置。可以看到, 重冰年海冰距平指数为正, 轻冰年为负, 海冰距平指数可以定量地描述冰情的轻重, 便于比较不同年份冰情的差异。

### 1.2 2003—2010 年融冰期

海冰融化对大气运动产生重要影响。融冰开始后, 冰间水体能够显著增强海洋对太阳辐射的吸收。海冰从开始融化到下降为最小覆盖率的阶段称为融冰期, 它是了解海冰变化的重要指标。关于融冰开始时间的选取, Belchansky 等人<sup>[21]</sup>采用单点海平面温度(SAT)大于或等于冰点时对应的时间, Rigor<sup>[22]</sup>则利用微波亮温数据来确定单点融冰开始时间。

对于空间区域融冰开始时间的确定, 可用海冰融化的面积来规定<sup>[23]</sup>, 当海域的冰覆盖率在春季降到一定值时, 认为该海域开始进入融冰期。本文将每年冰覆盖率在春季首次降到 96% 的时间点作为融冰开始时间, 此时, 海冰有一个最大的融化速率梯度变化。图5给出了拉普捷夫海 2003—2010 年融冰期的时间长度和月份。

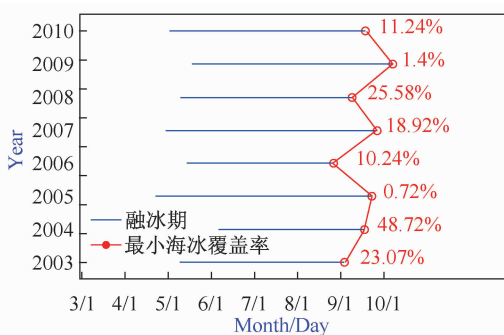


图5 各年融冰期(蓝线), 最小冰覆盖率发生时间(圆圈), 数字为冰覆盖率的数值

Fig. 5. The duration of ice melting (blue line). Circles represent the dates with minimum ice coverage, and red numbers represent the ratio of minimum ice coverage, respectively

表1 融冰期天数

Table 1. The duration of ice melting

| 年份    | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 融冰期天数 | 117  | 104  | 153  | 104  | 150  | 121  | 143  | 139  |

由图5可以看出, 拉普捷夫海融冰约开始于5月初, 在9月中旬达到最小, 并在11月上旬重新进入冰封期。各年的融冰期天数列于表1。

由于海冰反照率远大于海水反照率, 开阔水出现的时间越长, 意味着海洋吸收越多的太阳辐射, 加剧海冰的融化。因此, 融冰期的时间长短在一定程度上反映了冰情的轻重。重冰年 2003、2004、2008 年, 都经历了一个较短的、约 3 个月的融冰期, 小于轻冰年的 4—5 个月融冰期, 而且在重冰情年间, 融冰开始时间明显推迟。在经历 2003、2004 这两年重冰年后, 融冰期持续时间有了一个明显的增长。相对的, 轻冰年 2007、2009、2010 年, 海冰都有一个较长的融冰期。但是, 有时融冰期长度与冰情轻重还是有差别的, 例如: 2004 年与 2006 年的融冰期长度都是 104 天, 2004 年冰情较重, 而 2006 年却是冰情较轻的年份。

受局地大气条件的制约, 各年的最小海冰覆盖率有很大差异。冰情最重时可以达到 48%, 而冰情最轻时则仅有 0.45% (表2)。海冰距平指数是时间平均下的海冰覆盖率距平值, 更能表现当年海冰的整体轻重情况; 而最小海冰覆盖率是构成冰情轻重的一部分, 相对于海冰距平指数, 它是夏季海冰的极限情况。两者有很好的对应关系, 2002—2011 年, 海冰距平指数与最小海冰覆盖率的相关系数达到了 0.89 (表2)。

表2 海冰距平指数与最小海冰覆盖率

Table 2. Indices of sea ice anomaly and minimum ratio of sea ice coverage

| 年份        | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  | 2006  |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 海冰距平指数/%  | 7.99  | 1.33  | 16.66 | -4.55 | -0.46 |
| 最小海冰覆盖率/% | 20.32 | 23.08 | 48.73 | 0.73  | 10.24 |
| 年份        | 2007  | 2008  | 2009  | 2010  | 2011  |
| 海冰距平指数/%  | -5.40 | 7.55  | -6.85 | -3.19 | -12.6 |
| 最小海冰覆盖率/% | 18.93 | 25.59 | 1.40  | 11.24 | 0.45  |

## 2 大气条件对夏季海冰变化的影响

### 2.1 积温对海冰的影响

冬季气温的累积作用是决定春季海冰冰情的主

要因素,称为积温(Accumulative Temperature),定义为一段时间内温度对时间的积分。如果对整个冬季的温度进行积分,得到的积温是整个冬季气温的综合影响。在本文中,我们采用下式计算整个拉普捷夫海的平均积温<sup>[23]</sup>:

$$AT = \frac{1}{S} \iint T(s, t) ds dt \quad (2)$$

式中温度  $T(s, t)$  为单位时间单位面积 1 000 hpa 处的大气温度值,以摄氏温度表示; $s$  为面积, $t$  为时间点; $S$  为区域总面积,当年积温的时间积分范围为前一年 11 月至当年 4 月。

积温的变化取决于更大尺度的大气条件,包括太阳辐射、来自低纬的热量,以及海气之间的热量交换等。因此,上一冬季的积温量值影响当年海冰冰情,在大气-冰-海洋耦合下,当年的冰情轻重又制约着下一个冬季积温的大小。为了避免歧义,在表述时用积温距平表示温度的影响,即积温距平值越大,表示温度累积越高。相反积温距平值越小,表示温度累积越低。

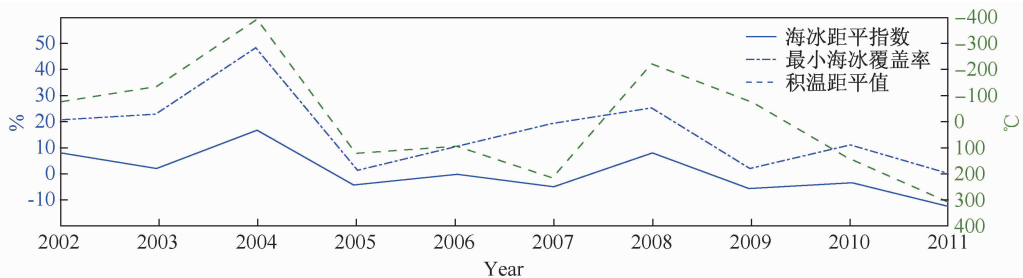


图6 海冰距平指数、最小海冰覆盖率和积温距平值(右侧纵坐标反向)

Fig. 6. Indices of sea ice anomaly, minimum ratio of sea ice coverage and accumulated temperature anomaly

2007年是特殊的一年,积温是2006—2008年三年间的极大值,而夏季最小海冰覆盖率相对较大。从结果来看,2007年夏季冰情受到了温度以外其他异常因子的制约。

## 2.2 风场分布特征

海冰运动的主要驱动力是风场。海冰同时受到两种切向应力的作用,一是来自气-冰界面的风应力,二是来自冰-水界面的摩擦应力<sup>[24]</sup>。海冰是不同于海水的固体,冰对风的摩擦作用,形成底摩擦,结果是海冰漂流方向与风方向相同。此外,海冰还要受到周边海冰的挤压作用,使其无法很好地随风流动。当海冰稀疏时,海冰对风场的响应得到改善。为了更好体现风场的综合作用,定义如下的风驱动

图6给出了海冰距平指数与积温距平值之间的关系。海冰距平指数是时间平均意义下的海冰覆盖率距平值,而积温距平值是冬季气温的综合效果。虽然计算两个指数时,取的时间范围不同,积温距平为前一年11月至当年4月,海冰距平指数为当年的3月至11月,但两者(2002—2011年)有很好的对应关系,相关系数达到-0.874。所以,可以认为积温是决定拉普捷夫海轻重冰情年的主要因素。

前面已经提到,拉普捷夫海2002—2011年经历了重冰年—过渡性冰年—轻冰年的过程,但2008年冰情却突然加重。图6积温距平曲线很好地反映了这一现象,2008年的上一冬季积温距平突然达到极小值,表明在相应的冬季气温累积异常低,造成2008年的异常重冰年。

同时,图6也给出了最小海冰覆盖率和积温距平的关系,两者相关系数为-0.777。相对于海冰距平指数,最小海冰覆盖率是夏季海冰的极限情况,更易受到短期大气条件的影响,因此与积温的相关性也相对较差。

指数:

$$U(t) = \frac{1}{S} \int u(s, t) ds \quad (3)$$

$$V(t) = \frac{1}{S} \int v(s, t) ds \quad (4)$$

其中, $U$ 、 $V$ 为东西、南北方向的风驱动指数,是对拉普捷夫海1 000 hpa处风速的面积加权; $u$ (经向)、 $v$ (纬向)为相应空间、时间点上的风速值。风速采用的是NECP-DOE再分析月平均数据。

图7给出了 $U$ 、 $V$ 在2002年7月至2011年9月的逐月分布。可以看出, $U$ 有很强的季节性变化,冬季明显大于夏季; $U$ 的变化没有体现出主导风向,而是东风与西风交替出现。风场的这个特点与海域的

陆地和岛屿的地理特征有关,拉普捷夫海东西两侧的半岛和岛链制约了风的纬向运动。在南北方向(图7), $V$ 冬季强、夏季弱,在大多数时间(77.5%)都为正值,即终年盛行由欧亚大陆吹向拉普捷夫海的南风,对海冰产生向北输送的效果。拉普捷夫海风场的这个特点与大尺度气压系统的分布有关,波弗特高压与靠近北欧海的低压系统常年存在,导致拉普捷夫海盛行南风。因此在夏季,风场的作用会将海冰向北冰洋中心区输送,直接导致海冰的减少,是影响拉普捷夫海夏季海冰变化的另外一个重要因素。

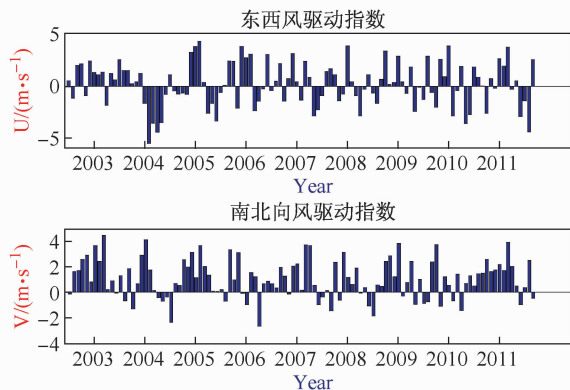


图7 拉普捷夫海风驱动指数逐月分布图

Fig. 7. Monthly variation of wind indices in the Laptev Sea

前面提到,拉普捷夫海2006年是中度冰情的年份,但融冰期却很短,与重冰年2004年一样是104天。2005年与2006年同样是中度冰情的年份,但2005年融冰开始时间提前了22天。表3给出了2003—2011年4月份的南北向风驱动指数,与其他年份相比,2006年4月盛行异常北风, $V$ 值为 $-2.67$ 。北风导致北冰洋中心区海冰进入拉普捷夫海,是造成2006年融冰开始时间明显延后的可能因素之一。而在2007年4月,则出现了刚好相反的极端情况,南风异常强烈,对应着1.1节提到的当年冰封期海冰大面积缩减现象。

表3 4月、9月南北向风驱动指数

Table 3. South-Northward wind indices of April and September

| Year                    | 2002  | 2003  | 2004  | 2005  | 2006  |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4月 $V/(m \cdot s^{-1})$ | \     | 0.20  | -0.44 | 1.35  | -2.67 |
| 9月 $V/(m \cdot s^{-1})$ | 1.69  | 1.86  | 0.54  | 3.35  | 1.94  |
| Year                    | 2007  | 2008  | 2009  | 2010  | 2011  |
| 4月 $V/(m \cdot s^{-1})$ | 3.71  | -0.05 | 2.46  | -1.43 | 2.04  |
| 9月 $V/(m \cdot s^{-1})$ | -1.46 | 0.45  | 2.41  | 1.49  | -0.49 |

另一方面,拉普捷夫海2007年最小海冰覆盖率与积温距平相关性并不好(图6),积温距平值在这一年是相对大值,即冬季气温较高,相应的,夏季最小海冰覆盖率应当是一个小值,但结果却不是这样。这时候应该考虑气温以外其他因素对海冰的作用。夏季海冰稀疏,海冰对风场有很好的短期响应。2007年夏季最小海冰覆盖率发生的时间是9月28日,在这里考虑9月份南北向风驱动指数 $V$ ,列于表3。 $V$ 的负值越大,表明北风越强,对海冰产生强的向南输送效果。相比其他年份,2007年9月 $V$ 值为 $-1.46$ ,盛行异常强的北风,使北冰洋中心区的海冰向拉普捷夫海输运。

局地风场对海冰变化的影响弱于气温,但在夏季海冰稀疏时,风场的贡献不可忽视,2007年9月拉普捷夫海盛行的强北风,使当年最小海冰覆盖率出现正异常。

### 3 结论

拉普捷夫海位于北极穿极流(Arctic Transpolar Current)的尾端,是北冰洋最重要的产冰源地之一,对该海域海冰多年变化的研究,有助于对整个北冰洋海冰变化的了解。本文通过AMSR-E海冰密集度数据,以及NECP-DOE月平均风速与温度数据,得到下列结论:

2002年7月1日—2011年9月30日,拉普捷夫海的海冰覆盖率在夏秋季经历了一个明显的下降过程,与同时期北冰洋海冰面积减小、厚度减薄的趋势一致。文章通过海冰面积指数定量描述各年冰情的轻重。结果表明,10年内海冰的变化规律为:重冰年(2002—2004)—过渡年份(2005—2006)—轻冰年(2007, 2009—2011),即经历了一个冰情由重向轻转变的过程,其中2008年为异常重冰年,这与上一个冬季的异常低温密切相关。

拉普捷夫海的融冰期大致发生在5月初至9月中旬,历时约4个月。融冰期长短一定程度上反映了各年冰情的轻重。重冰情年份融冰期持续时间短、开始时间晚。2003—2010年间,前2年融冰期较轻冰情年缩短了30天左右,往后融冰期持续时间有较明显的延长,与拉普捷夫海的多年海冰变化情况一致。但在2006年4月,海域出现了异常强的北风,整体海冰向拉普捷夫海南部压缩,并得到北冰洋

中心区一定量海冰的补充,是造成当年融冰开始时间延后,融冰期缩短的可能因素之一。

最小海冰覆盖率是衡量每年夏季海冰极限情况的参数。拉普捷夫海夏季的最小海冰覆盖率发生在8月底—10月初不等,并且量值也有明显的年际差异,在0.45%—48.73%之间变动。同时,2005年拉普捷夫海首次出现了夏季无冰,随后2009、2011年也出现了全海域无冰现象,表明拉普捷夫海存在夏季无冰年。

大气气温的影响。积温是描述大气气温对拉普捷夫海海冰影响的热力学因子。结果表明,上一个冬季的积温是决定当年冰情轻重的主要因素,两者相关系数达到-0.874,即积温距平值越小,冰情越重;反之越轻。10年内的积温距平变化给出了由于上一个冬季经历了异常低的气温积累,使2008年的冰情很突兀地出现正异常。

大气风场的影响。风驱动指数描述了风场对海冰覆盖率的短期综合作用效果。2002—2011年,东西方向风驱动指数U冬季强、夏季弱,由于拉普捷夫海的陆地、岛屿限制,没有主导风向。南北方向风驱动指数V也有冬季强、夏季弱的特点,并且在大多数时间里(77.5%)盛行南风,对拉普捷夫海的海冰起到向外海输运的作用。与其他年份同时期相比,2007年9月份出现了异常强北风,将海冰从外海带入到拉普捷夫海,形成了当年夏季最小海冰覆盖率的正异常。

综上所述,2002—2011年拉普捷夫海海冰覆盖率在夏秋季呈不断减少趋势,并且年际变化差异明显,冰情则由重向轻转变。上一个冬季的积温是影响当年冰情的主要因素,同时,夏季海冰低密集度期间短期的风场对海冰覆盖率的作用也不可忽视。

## 参考文献

- 1 Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, et al. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978—1996. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C9): 20837—20856.
- 2 Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1), L01703, doi:10.1029/2007GL031972.
- 3 Kwok R, Cunningham G F, Wensnahan M, et al. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003—2008. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114, C07005, doi:10.1029/2009JC005312.
- 4 Stroeve J, Holland M M, Meier W. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(9), L09501, doi:10.1029/2007GL029703.
- 5 Dmitrenko I A, Tyshko K N, Kirillov S A, et al. Impact of flaw polynyas on the hydrography of the Laptev Sea. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(1-3): 9—27.
- 6 Reimnitz E, Dethleff D, Nürnberg D. Contrasts in Arctic shelf sea-ice regimes and some implications: Beaufort Sea versus Laptev Sea. *Marine Geology*, 1994, 119(3-4): 215—225.
- 7 Dethleff D, Nürnberg D, Reimnitz E, et al. East siberian arctic region expedition '92: The Laptev Sea-its importance for Arctic sea ice formation and transpolar sediment flux. *Berichte zur Polarforschung*, 1993, 120: 3—37.
- 8 Dethleff D, Loewe P, Kleine E. The Laptev Sea flaw lead-detailed investigation on ice formation and export during 1991/1992 winter season. *Cold Regions Science and Technology*, 1998, 27(3): 225—243.
- 9 Pfirman S L, Colony R, Nürnberg D, et al. Reconstructing the origin and trajectory of drifting Arctic sea ice. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(C6): 12575—12586.
- 10 Rigor I, Colony R. Sea-ice production and transport of pollutants in the Laptev Sea, 1979—1993. *Science of the Total Environment*, 1997, 202(1-3): 89—110.
- 11 Berezovskaya S, Yang D Q, Hinzman L. Long-term annual water balance analysis of the Lena River. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(1-3): 84—95.
- 12 Nalimov Y V. The ice-thermal regime at front deltas of rivers of the Laptev Sea. *Reports on Polar Research*, 1995, 176: 55—61.
- 13 Kassens H, Dmitrenko I, Rachold V, et al. Russian and German scientists explore the Arctic's Laptev Sea and its climate system. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1998, 79(27): 317—323.
- 14 Eicken H, Reimnitz E, Alexandrov V, et al. Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export. *Continental Shelf Research*, 1997, 17(2): 205—233.

- 15 Curry J A, Julie L S, William B R, et al. Overview of arctic cloud and radiation characteristics. *Journal of Climate*, 1996, 9(8): 1731—1764.
- 16 Bareiss J, Gørgen K, Elserier B V. Spatial and temporal variability of sea ice in the Laptev Sea: Analyses and review of satellite passive-microwave data and model results, 1979 to 2002. *Global and Planetary Change*, 2005, 48(1-3): 28—54.
- 17 Stroeve J, Serreze M, Drobot S, et al. Arctic sea ice extent plummets in 2007. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2007, 89(2): 13—14.
- 18 Spreen G, Kaleschke L, Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89 GHz channels. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113, C02S03, doi:10.1029/2005JC003384.
- 19 Bauch D, Dmitrenko I, Kirillov S, et al. Eurasian Arctic shelf hydrography: Exchange and residence time of southern Laptev Sea waters. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(15): 1815—1820.
- 20 Maslanik J A, Fowler C, Stroeve J, et al. A younger, thinner Arctic ice cover: Increased potential for rapid, extensive sea-ice loss. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(24), L24501, doi:10.1029/2007GL032043.
- 21 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.
- 22 Rigor I G, Colony R L, Martin S. Variations in surface air temperature observations in the Arctic, 1979—1997. *Journal of Climate*, 2000, 13(5): 896—914.
- 23 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. *海洋学报: 中文版*, 2007, 29(2): 25—33.
- 24 Yang J Y. The seasonal variability of the Arctic Ocean Ekman transport and its role in the mixed layer heat and salt fluxes. *Journal of Climate*, 2006, 19(20): 5366—5387.

## STUDY ON MULTIYEAR VARIATIONS OF SEA ICE IN THE LAPTEV SEA OF THE ARCTIC OCEAN

Yao Wenjun, Zhao Jinping

(Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

### Abstract

The Laptev Sea is an important marginal sea and ice source region that has a significant influence on sea ice coverage in the Arctic Ocean. Multiyear variations of sea ice in the Laptev Sea over ten years (2002—2011) are studied by analyzing the Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System (AMSR-E) sea ice concentration, and National Centers for Environmental Prediction-Department of Energy (NCEP-DOE) wind and temperature data. Over the ten years, sea ice in the Laptev Sea underwent a change from heavy-ice to light-ice years. There was a strong relationship between ice condition and ice melt duration. That is, the longer that duration, the lighter the ice condition. Four parameters are defined to describe the multiyear variations of ice in the sea. These are indices of sea ice anomaly, minimum ratio of sea ice coverage, accumulated temperature and wind. Indices of sea ice anomaly are time-averaged (from March through November) values of sea ice coverage ratio that quantitatively express the ice condition. The minimum ratio of sea ice coverage shows the extreme condition of sea ice in summertime; this minimum ratio usually occurred between late August and early October, with magnitude 0.45%—48.73%. Accumulated temperature, which represents the wintertime impact of atmospheric temperature, is the prime influence on ice conditions in a given year. The heavy-ice year of 2008 resulted from the very low temperature of the prior winter. Wind indices represent the short-term impact on sea ice coverage in the Laptev Sea from wind forcing. In contrast to the same period in other years, there was an anomaly of northerly wind in April 2006 and September 2007, which to some extent postponed the onset of ice melt in 2006 and caused a positive anomaly of sea ice coverage in summer 2007.

**Key words** Arctic, Laptev Sea, Sea Ice Coverage Ratio, Multiyear Variation, Remote Sensing