

# 喀拉海海冰的多年变化特征及其主要成因\*

陈萍, 赵进平

(中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266100)

**摘要:** 利用 AMSR-E 卫星遥感数据对 2003 年 3 月 1 日~2011 年 2 月 28 日的喀拉海海冰覆盖率的变化及趋势做了分析。结果表明:喀拉海冰情的多年变化呈递减趋势,2003—2010 年下降了约 20%。其中 2003 和 2004 年为重冰年,2007、2008、2009 和 2010 年为轻冰年。喀拉海海冰融化大体分为 3 个阶段:在有暖水流入的海域海冰首先融化,包括各个河口海域、喀拉海峡的暖水入流区以及新地岛北端的暖流区。随后,西部的融冰海域逐渐扩大,并连成一片。最后,海冰边缘自南向北,自西向东退缩,开阔水扩展到整个海区。研究显示:冬季积温、陆地径流、夏季南风 and 北角暖流对喀拉海海冰变化具有重要影响。冬季积温决定了冬季海冰的冰情,进而影响了次年夏季海冰的融化速率,与海冰覆盖率指数的相关系数为 -0.839。径流将大量来自陆地的热量带入海洋,加速海冰的融化,与海冰覆盖率的相关系数为 -0.87 时,达到 0.95 的置信度。风场是影响海冰空间分布的重要动力学因素,夏季南风有利于喀拉海海冰向北运移,是喀拉海冰情轻于其它北极边缘海的一个重要原因。来自大西洋的暖流在新地岛分为两支,一支经喀拉海峡流入喀拉海,净流量约 0.6 Sv,对喀拉海西南部的海冰融化产生重要的影响。另一支流沿新地岛北缘北上,成为新地岛西流,从新地岛的北端进入喀拉海,直接影响喀拉海西北部的海冰融化。

**关键词:** 喀拉海; 海冰; 多年变化; 积温; 径流; 风场; 北角暖流; 卫星遥感

**中图法分类号:** P727.4

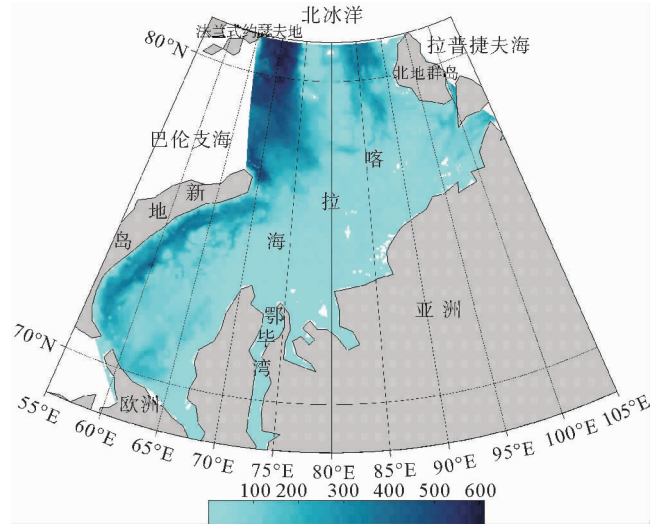
**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-5174(2014)05 II-016-08

近半个世纪以来,北极环境发生了很大变化。其中包括部分地区温度上升 2~3 °C,北冰洋海冰退缩,海表面温度升高,气压降低等<sup>[1]</sup>。由于海冰与海表面温度之间存在着负反馈机制,因而了解北极海冰有助于我们了解北极环境的变化<sup>[2]</sup>。而北极各个边缘海海冰的变化对北冰洋海冰的整体变化起决定性作用<sup>[3]</sup>。

喀拉海(Kara Sea)是位于西伯利亚大陆架上的一个半封闭海,是北极的主要边缘海之一(见图 1)。喀拉海东部通过北地群岛与拉普捷夫海(Laptev Sea)相连。西部为新地岛(Novaya Zemlya),通过喀拉海峡与巴伦支海(Barents Sea)相连。在海域西北陆坡上有名为法兰士约瑟夫地(Franz Josef Land)的群岛,法兰士约瑟夫地与北地群岛之间的陆坡是喀拉海连接北冰洋的通道。在法兰士约瑟夫地与新地岛之间是巴伦支海与喀拉海之间的通道,来自巴伦支海的暖流由此进入喀拉海西北。喀拉海海域东西长 1 448 km,南北宽 800 km,面积  $8.8 \times 10^5 \text{ km}^2$ ,体积  $1.04 \times 10^5 \text{ km}^3$ 。平均深度 118 m,最大深度 620 m。通过海冰的运移,喀拉海每年向北冰洋输出约  $1.8 \times 10^5 \text{ km}^2$  的海冰,对北冰洋海冰的变化起到很大的作用<sup>[4]</sup>。同时喀拉海对其周围的海域的海冰变化有重要影响,巴伦支海和 Svalbard 群岛海域可以直接从喀拉海获得大量海冰。喀拉海海流是

北极穿极漂流的重要组成部分<sup>[4]</sup>。喀拉海位于亚欧大陆架上,且有几支大的陆地径流流入,主要包括叶尼塞河、鄂毕河、皮亚西纳(Pyasina)河和喀拉河<sup>[4-5]</sup>。径流所携带的污染物通过海冰的运移等进入北冰洋及其相连海域<sup>[4-5]</sup>。因此研究喀拉海海冰的变化对北极海冰变化及其环境污染状况的研究都具有重要意义。



(图中颜色代表水深。The bathymetry is denoted by shaded color.)

图 1 喀拉海区域示意

Fig. 1 Map showing the location of the Kara Sea

\* 基金项目:全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951403);国家南北极环境综合考察专项(CHINARE2012-04-04)资助  
收稿日期:2013-03-04; 修订日期:2013-04-27  
作者简介:陈萍(1987-),女,硕士生。E-mail: chenpinghappyevery@163.com

研究通常用海冰覆盖率来反映海冰的变化情况。海冰覆盖率的变化是由动力学因子(风场、流场等)和热力学因子(太阳辐射收支等)共同作用的结果<sup>[6]</sup>。由于喀拉海地理位置的特殊性,喀拉海海冰除受到风场和太阳辐射的影响外,还受到北角暖流的影响<sup>[7]</sup>。同时由于喀拉海是1个半封闭海,形成了特殊的环流系统<sup>[5,8]</sup>。上述因素共同影响喀拉海海冰的变化特征。

本文将利用卫星遥感数据研究喀拉海海冰的多年变化特征,探讨海冰变化的主要物理机制。

### 1 数据来源

本文的研究工作采用 AMSR-E 日平均海冰密集度产品,空间分辨率为 6.25 km<sup>[9]</sup>,选取的时间段为 2003 年 3 月 1 日~2011 年 2 月 28 日。海表面气温、风场及径流的数据则来源于美国国家海洋大气局(NOAA)提供的第 2 代再分析数据<sup>[3]</sup>,空间网格均为 T62 高斯网格(192×94)。

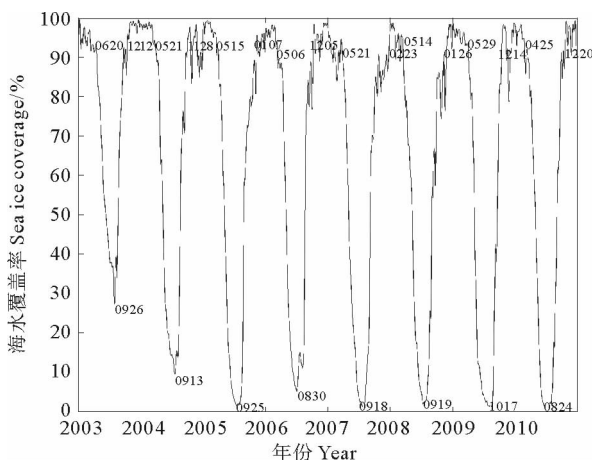
## 2 喀拉海的海冰覆盖率多年变化

### 2.1 喀拉海海冰覆盖率逐日变化分析

海冰覆盖率定义为研究区域内的海冰覆盖面积与区域面积的比值

$$R(t) = \int_s c(s,t) ds / S \quad (1)$$

其中: $R(t)$  为海冰覆盖率,即海冰净面积所占的比例; $c(s,t)$  为  $s$  处的海冰密集度; $S$  指喀拉海海域的总面积。本文将 2003 年 3 月 1 日~2011 年 2 月 28 日的海冰密集度数据按照公式(1) 进行计算,对缺失的数据进行 3 次样条差值,得到海冰覆盖率的时间变化图(见图 2)。将 2003 年 3 月 1 日~2011 年 2 月 28 日的海冰覆盖



(图中红色数字是指每年达到最小海冰覆盖率的日期,黑色数字则是指海冰开始融化和开始冻结的日期。Red numbers denote the date of sea ice coverage minimum, Black numbers denote the outset date of melting and freezing.)

图 2 喀拉海的海冰覆盖率逐日变化曲线

Fig. 2 Daily variations of the sea ice coverage of the Kara Sea

率数据做多年日平均,得到海冰覆盖率的季节变化曲线(见图 3)。

海冰从春季开始融化到冬季开始冻结的时段是海冰的融冻期(melt-freeze period)。海冰的融化与冻结是平滑过渡的,需要确定 1 个统一的判据来研究融冻期的多年变化。本文取海冰覆盖率为 93% 作为喀拉海海域海冰开始融化和全面冻结的标志<sup>[10]</sup>。从图 3 可见,喀拉海海域平均在 5 月上旬开始融化,约在 12 月底全面冻结,总共近 8 个月。与相邻的海域相比,拉普捷夫海海冰融冻期约为 5 个月左右,东西伯利亚海约为 6 个月<sup>[3]</sup>,表明喀拉海在北极边缘海中冰情相对较轻。

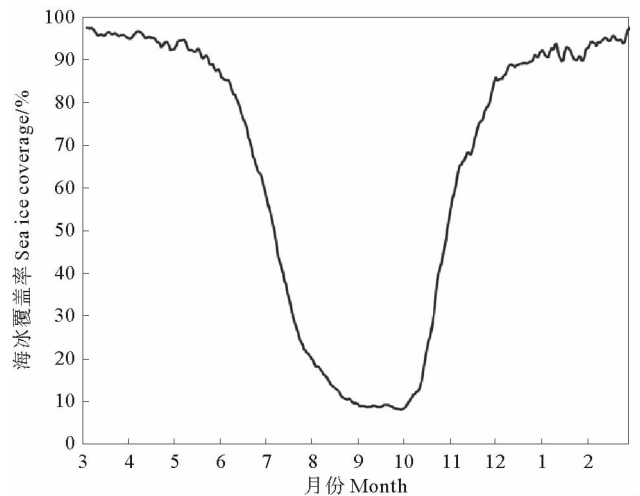


图 3 喀拉海多年平均海冰覆盖率季节变化曲线

Fig. 3 Mean annual variations of the sea ice coverage of the Kara Sea

冬季喀拉海全部被海冰覆盖,多年平均的冬季海冰覆盖率最高可达到 97.86%,喀拉海多年日平均海冰覆盖率最小值为 8.0%,发生在 9 月中下旬(见图 3)。夏季最小海冰覆盖率的年际变化较大,2003 年约为 27%,而近几年则小于 1%,即夏季基本无冰(见图 2)。图 3 表明,海冰融化过程较慢,大约从 5 月初~9 月中下旬,需要 4~5 个月;而结冰过程较快,只需 3 个月。融化初期和末期较为平缓,每个月下降约 10%,中间的 2 个月较为剧烈,2 个月融化了 60% 多。结冰初期的 1 个月里冻结的较快,1 个月海冰覆盖率增长了约 50%,后面 2 个月增长了约 30%。

### 2.2 融冻期海冰覆盖率指数

为了定量研究喀拉海海冰覆盖率年际变化,本文引入融冻期海冰覆盖率指数:即将海冰覆盖率变化显著的时间段(5 月 1 日~12 月 31 日)内的海冰覆盖率距平值进行时间平均(下文简称海冰覆盖率指数)。

$$I_j = \frac{1}{245} \sum_{k=121}^{365} R'_{k,j} \quad (2)$$

$$R'_{k,j} = R_{k,j} - \bar{R}_k \quad (3)$$

其中:  $I_j$  为第  $j$  年海冰覆盖率指数;  $R'_{k,j}$  为第  $j$  年第  $k$  天海冰覆盖率距平值;  $R_{k,j}$  为第  $j$  年第  $k$  天的海冰覆盖率;  $\bar{R}_k$  为第  $k$  天的多年平均海冰覆盖率<sup>[3]</sup>。应用上述公式可以得到融冻期海冰覆盖率指数, 如表 1 所示。

### 2.3 喀拉海多年海冰覆盖率距平变化特征

用 8 年(2003-03-01 ~ 2011-02-28) 的海冰覆盖率数据计算多年逐日平均结果, 获取海冰覆盖率的距平数据(见图 4)。依据喀拉海融冻期海冰覆盖率指数的状况, 本文定义海冰覆盖率指数为正值且数值较大的年份为重冰年, 海冰覆盖率指数为负值且绝对值较大的年份为轻冰年, 海冰覆盖率指数绝对值较小的年份为过渡冰年<sup>[11]</sup>。可得, 8 年中重冰年有 2 年, 分别为 2003 和 2004 年。这 2 年的海冰覆盖率基本上全年大于多年平均状况, 冰情较重, 其中 2003 年在 8 月份出现单峰值, 高于平均状况约 34%, 是这 8 年中冰情最重的一年, 这主要是由于 2003 年北极中央区海冰的大量涌入所引发的<sup>[12-14]</sup>。2004 年则出现一大一小 2 次峰值, 分别集中在 6 月初和 10 月中旬, 这主要是由于重冰年的海冰融化较晚结冰较早所造成的(见图 4)。

2007、2008、2009 和 2010 年海冰覆盖率指数较小, 为轻冰年。这 4 年的海冰覆盖率小于多年平均状况, 2007 年海冰覆盖率距平最小值比平均状态小 28%, 是典型的轻冰年。2009 年变化较为复杂, 正负距平各有一峰值, 正值处于融化阶段的 6 月底, 负的峰值所处的时间是结冰的初期 10 月底, 且峰值较大, 低于平均状态接近 40%, 这对 2010 年的冰情起到一定影响, 也与近几年来喀拉海海冰覆盖率减少的现象相一致。轻冰年典型

的特征是海冰融化较早、结冰较晚, 这 4 年海冰覆盖率负距平绝对值的最小值出现在 9 月份初, 即在轻冰年时该海域在 9 月初基本上已融冰结束(见图 4)。

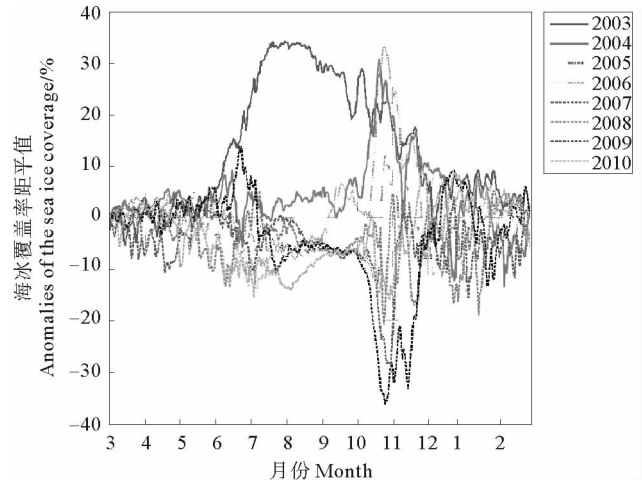


图 4 喀拉海海冰覆盖率距平变化曲线

Fig. 4 Anomalies of the sea ice coverage of the Kara Sea

2005 和 2006 年出现了海冰覆盖率距平值正负交替的现象, 总体上体现了中等冰情, 是过渡冰年。2005 年发生由冰情偏重到冰情偏轻的过渡; 而 2006 年融化阶段冰情较轻, 而结冰期则为正距平(见图 4)。

从上述分析可以看出, 融冻期海冰覆盖率指数可以很好的定量反映出其海冰冰情的年际变化。2003 年以来, 喀拉海海冰覆盖率在夏季持续减少, 这与北极海冰的整体变化趋势相一致, 体现了北极海域冰情减弱的整体变化特征<sup>[15]</sup>。

表 1 喀拉海融冻期海冰覆盖率指数、最小海冰覆盖率、融冻期时间长度、冬季积温距平  
Table 1 The sea ice coverage index during the melt-freeze period, ice coverage minimum, the length of melt-freeze period, accumulative temperature in winter

年份 Year	融冻期海冰覆盖率指数 <sup>①</sup>	最小海冰覆盖率 <sup>②</sup>	融冻期时间长度 <sup>③</sup>	冬季积温距平 <sup>④</sup>
2003	18.16	29.55	186	-632.87
2004	5.82	10.45	192	-365.78
2005	-3.47	1.79	238	296.16
2006	1.70	5.55	214	199.95
2007	-5.25	1.38	279	337.45
2008	-4.99	2.42	258	178.65
2009	-5.83	1.35	199	90.19
2010	-6.13	1.28	240	-103.74

Note: ①The sea ice coverage index during the melt-freeze period; ②Ice coverage minimum; ③The length of melt-freeze period; ④Accumulative temperature in winter

### 2.4 最小海冰覆盖率与融冻期长度

最小海冰覆盖率是反映海冰冰情变化的 1 个重要参数。本文取每年达到最小海冰密集度的时间的前后

共 10 d 数据, 去掉最大值和最小值之后进行时间平均, 可以得到如表 1 所示的 2003—2010 年的最小海冰覆盖率参数值。重冰年数值较大, 轻冰年数值较小。做

2003—2010 年的海冰覆盖率指数与最小海冰覆盖率折线图(见图 5)。可以看出,这 8 年最小海冰覆盖率与海冰覆盖率指数的整体变化趋势基本上是一致的,呈现整体下降的趋势,8 年来下降了约 20%。最小海冰覆盖率与海冰覆盖率指数的相关性可以达到 0.977,在很大程度上最小海冰覆盖率也能够定量地反映当年海冰冰情。

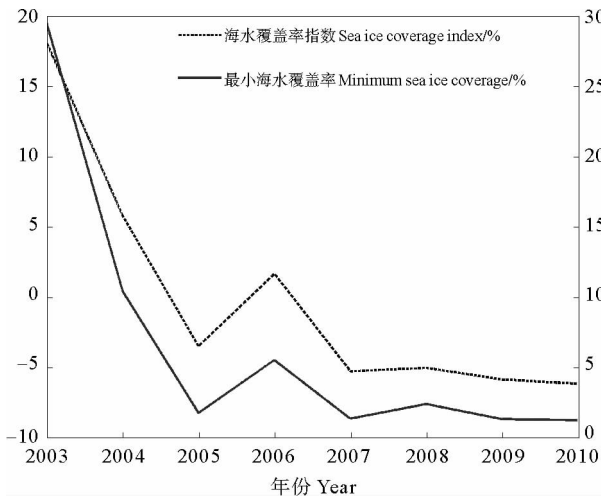


图 5 海冰覆盖率指数和最小海冰覆盖率的折线图

Fig. 5 Variations of the sea ice coverage index and annual variations of the minimum sea ice coverage

融冻期时间长度是指海冰开始融化至全面冻结所经历的时间,前面提到将喀拉海海冰覆盖率为 93% 时作为海冰开始融化和全面冻结的标志,则融冰期长度  $T_{fm}$  可表示为

$$T_{fm} = k_{f93} - k_{m93} \quad (4)$$

其中:  $k_{f93}$  和  $k_{m93}$  分别为冻结和融化阶段海冰覆盖率首次达到 93% 的日期。由表 1 可见,融冻期长度在重冰年 2003 年达到最小,为 186 d;在轻冰年 2007 年达到最大,为 279 d,与海冰冰情有很好的负相关。8 年里融冻期长度与海冰覆盖率指数的相关系数为 -0.683。

### 3 影响喀拉海海冰冰情的主要机制

#### 3.1 冬季积温对海冰冰情的影响

冬季海表面温度对海冰的厚度和面积都具有重要的影响,从而决定了来年该海域的冰情<sup>[16]</sup>。本文将该海域单位面积上海表面气温的冬季(前一年年 11 月至该年 4 月)积累平均值定义为冬季积温。其表达式如下:

$$A_T = \iint T(s, t) ds dt / S \quad (5)$$

其中:  $A_T$  指冬季积温;  $T(s, t)$  是指时间为  $t$  时;  $s$  处的海表面气温;  $t$  的起止时间是从前一年的 11 月份到该年的 4 月份;  $S$  指喀拉海海域的总面积。

计算 2003—2010 年冬季积温,再对冬季积温距平

得到各年的冬季积温距平值(见表 1),将冬季积温距平值与融冻期海冰覆盖率指数同绘于图 6(冬季积温距平纵坐标取反向坐标),可以看出海冰覆盖率指数与其海表面的冬季积温有密切的关系。冬季积温越高,该年海冰的冰情越轻,反之亦然。冬季积温与融冻期海冰覆盖率指数的相关性系数达到 -0.827,呈很好的负相关性。从图 5 也可以看出,也有例外的情况发生,如 2009 年的冰情比 2008 年的冰情要轻,但该年的冬季积温却低于 2008 年。形成这种现象的原因主要是海冰面积变化除了受海表面气温影响外,还受到局地大气过程的影响。整个变化过程是 1 个复杂的海气耦合过程<sup>[17]</sup>。

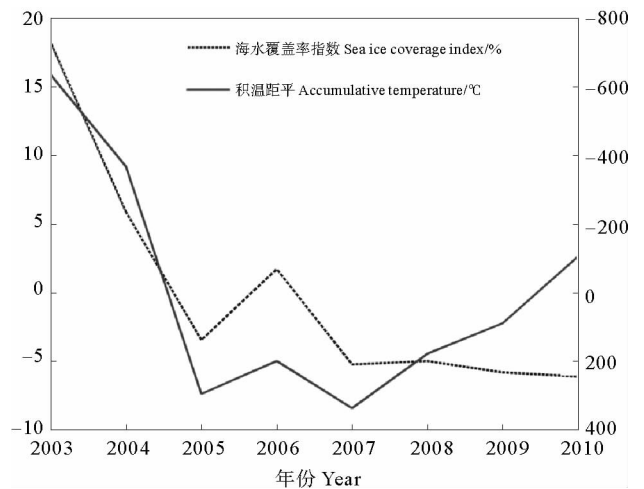


图 6 冬季(11~4月)积温距平与海冰覆盖率指数的折线图  
Fig. 6 Variations of the sea ice coverage index and the negative accumulative temperature in winter (from November to April)

#### 3.2 陆地径流对海冰分布的影响

喀拉海受陆地径流的影响很大,鄂毕河、叶尼塞河等大河每年流入喀拉海的径流量占到西伯利亚海域总径流量的 55%<sup>[4-5]</sup>,陆地径流对喀拉海的水文特征有支配性作用。淡水入流一方面为该海区带来了大量的热能,加速了海冰的融化;另一方面,径流的北向流动促使暖水向冰下渗透,加剧海冰面积的减少<sup>[18]</sup>。本文利用 NOAA 提供的径流月平均数据,对喀拉海海域的月平均径流数据做空间平均,再分别对月平均径流数据和月平均海冰覆盖率数据做标准化处理,得到了两者随时间的变化曲线(见图 7)。

冬季亚欧大陆温度降低,河流大量结冰,因而很少有淡水注入喀拉海。而到了春天,各大河流域的大陆率先升温,产生一定量的冰雪融水流进入喀拉海,在热力学和动力学的共同作用下促进了喀拉海海冰的融化。到了夏季大陆的河流冰雪完全融化,达到最大径流量。而在此时,喀拉海海冰也在各种物理因子的作用下融化,出现大量开阔水。

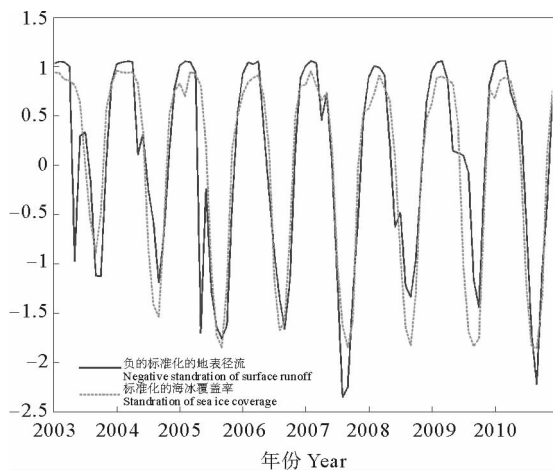


图7 地表径流与海冰覆盖率标准化的时间序列

Fig. 7 Standard time series of surface runoff and sea ice coverage variations

从图7可以看出,在2003和2004等重冰年,喀拉海夏季的单位面积淡水注入量较少,而在2007、2008、2009和2010等轻冰年,其淡水注入量则相对较大。可见,陆地径流对海冰冰情具有重要的影响<sup>[3]</sup>。这8年淡水注入量与海冰覆盖率的相关系数为 $-0.87$ 时,达到 $0.95$ 的置信度。

### 3.3 风应力分布特征

海面风场影响海冰的空间分布,风驱动是海冰面积短期变化的主要原因之一,但海冰的运动与风的驱动往往并不一致,海冰面积的变化往往取决于整个海域风场的平均作用结果<sup>[3,19]</sup>。本文运用NOAA提供的月平均的风场数据,截取喀拉海海域的风场,对其进行空间平均得到喀拉海海表面风速的时间序列(见图8)。

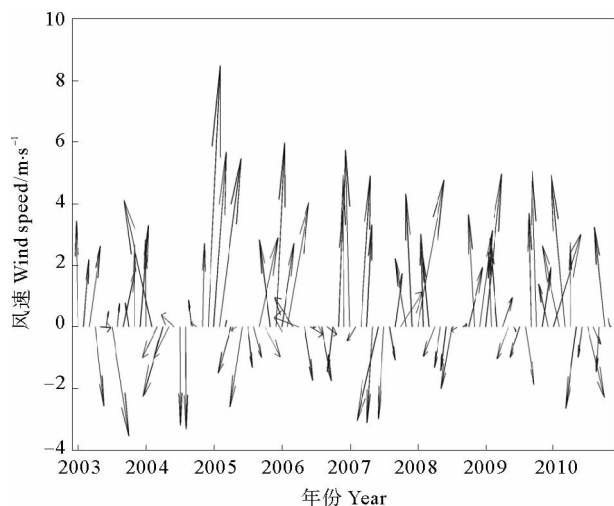


图8 2003—2010年喀拉海海表面风速

Fig. 8 Sea surface wind speed in the Kara Sea from 2003 to 2010

东西伯利亚海,楚科奇海等海域在海冰的融化冻结阶段,海冰的运移即受到经向风的影响,也受到纬向

风的影响<sup>[12,20-21]</sup>。由于喀拉海是1个半封闭海,海冰在东西方向的运动受到岛屿阻隔,对南北方向的风有较好的响应。图8显示,夏季南北方向上南风占主导地位,有利于将亚欧大陆的暖空气带入喀拉海,同时阻止北部冷空气进入喀拉海。再者,也有利于冬季喀拉海海冰向北极中央区的运移,阻止了夏季北部海冰进入喀拉海<sup>[4]</sup>,这也是喀拉海海域海冰相对于其他海区海冰偏少的原因之一。

海冰覆盖率对海冰漂流有重要的影响。当海冰覆盖率较大时,风与海冰运动的相关性并不好<sup>[22]</sup>。海冰的运移与风场在夏季具有较好的相关性<sup>[23]</sup>,间接影响海冰的覆盖率。作者对2003—2010年7~11月份的经向风数据做平均,得到8年的夏半年平均经向风速。同时计算这8年的7~11月份的夏半年海冰覆盖率指数 $I_{s,j}$ 。8年夏季平均经向风数据与夏半年海冰覆盖率指数的相关系数为 $-0.527$ 时,达到 $0.95$ 的置信度。

## 4 喀拉海海冰的季节变化特征及其关联因素

海冰的融化是1个连续的过程,但在融化的不同阶段主要驱动因素有较大的差别<sup>[20-21]</sup>。为了更好地理解喀拉海海冰的季节变化特征,本文给出了2006年喀拉海海冰融化过程(见图9)并探讨其物理机制。根据图9,可以将喀拉海的融化过程分为3个阶段:

**第一阶段 河口-喀拉海峡-新地岛东侧融冰期**(见图9a~b)。喀拉海有3个主要的暖流流入海域。海区南岸鄂毕河、叶尼塞河流入喀拉海的淡水流量达到 $1200 \text{ km}^3/\text{a}$ ,而80%是在春季排放<sup>[24]</sup>,使海区南部与河口相接处率先融化。Ivanov等人研究显示,每年喀拉海几乎有40%的区域直接受到陆地径流的影响<sup>[5]</sup>。另外,北角暖流也是喀拉海海冰早期融化的主因,暖流在新地岛分为两支:一支从喀拉海峡进入,导致喀拉海西部沿岸海冰率先融化<sup>[7]</sup>;另一支成为新地岛西侧流(Western Novaya Zemlya Current),沿新地岛西侧向北流动,最后到达新地岛北端,导致新地岛北部海冰加速融化<sup>[25]</sup>。每年经由喀拉海峡进入喀拉海的净流量为 $0.6 \text{ Sv}$ ,而经由新地岛与法兰士约瑟夫群岛之间的净流量为 $1.6 \text{ Sv}$ <sup>[7]</sup>。这些入流给喀拉海带来了大量的热量和盐量,对喀拉海海冰及其他物理特性的分布都具有重要的影响<sup>[23]</sup>。

**第二阶段 西南部融冰期**(图9b~c)。从6月中旬开始,第一阶段的3个主要暖水海域进一步扩展,海冰覆盖率减小,开阔水域增多。这些水域在喀拉海西部逐渐连接成片,形成大范围的开阔水域,并逐渐向海域西北部扩展。

**第三阶段 全面融冰期**(图9c~d)。到了7月份,海面已出现大量的开阔水,太阳辐射持续增强,海水吸收



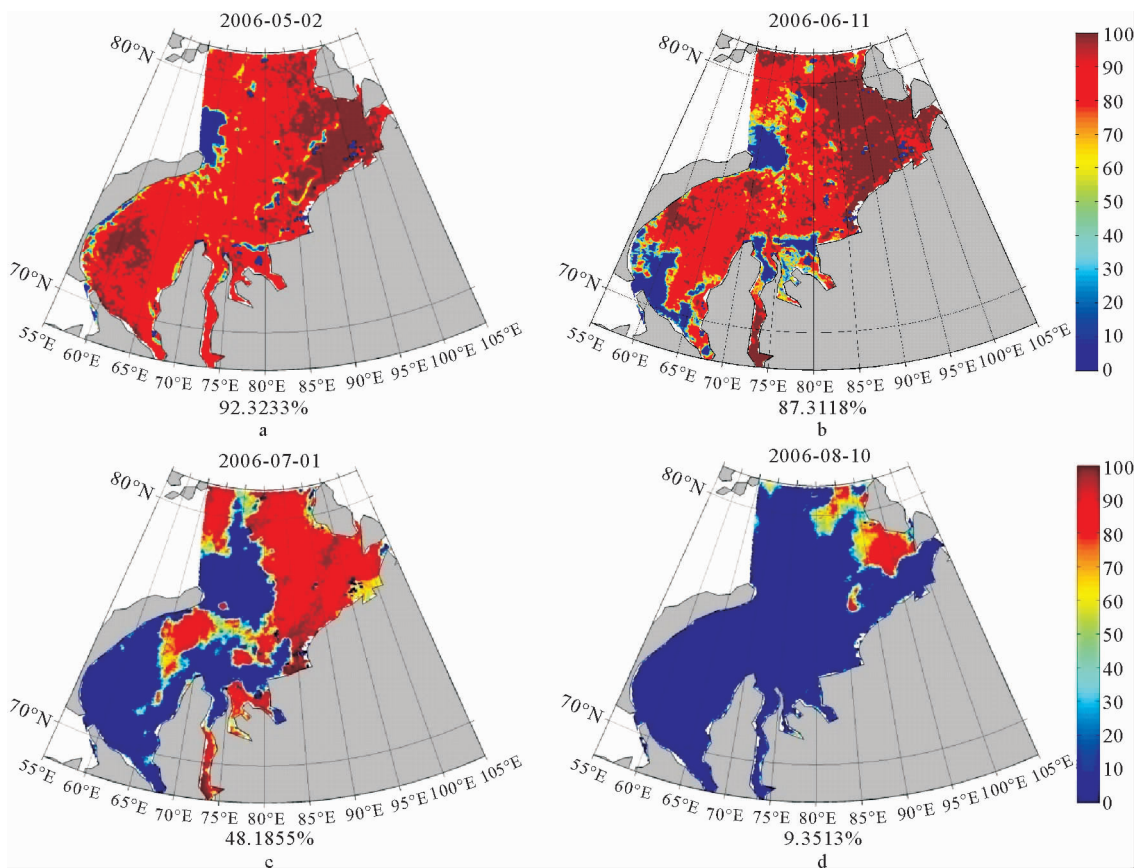


图9 喀拉海海冰形态变化的3个阶段

Fig. 9 Three stages of the sea ice cover variation in the Kara sea

大量的热量加剧海冰的融化。此时开阔水从西向东、自南向北迅速扩展。进入全面融冰期。在每年的9月中下旬,整个海域达到最小海冰覆盖范围。近十年可以看到喀拉海夏季最小海冰覆盖率很小,尤其是近几年整个海区甚至可以达到无冰,仅有北地群岛沿岸剩有少量海冰。

可见,在海冰融化初期,陆地径流和大西洋暖流对喀拉海的海冰融化起到了至关重要的作用。其中从巴伦支海过来的北角暖流是喀拉海与其它北极边缘海的1个重要区别,Loeng等人认为从巴伦支海经由喀拉海峡进入喀拉海的流量为 $0.7 \text{ Sv}^{[7]}$ ,Pavlov等人计算的经由新地岛和法兰士约瑟夫群岛之间的入流量为 $5\,000 \sim 10\,000 \text{ km}^3/\text{a}^{[5]}$ 。海冰区域性变化特点是:自西向东,自南向北,之后扩展到整个海域。

## 5 结果与讨论

本文利用卫星遥感数据对2003年3月1日~2011年2月28日的喀拉海海冰覆盖率的变化及趋势做了分析,并利用积温、径流、风场等资料进行分析,探索引起海冰分布变化的热力学、动力学机制。得出以下结果:

(1) 喀拉海冬季海冰基本上覆盖整个海域,夏季则会出现大面积的开阔水。喀拉海夏季海冰覆盖率的多年变

化呈递减趋势,2003—2010年下降了约20%,与北极海冰整体减少的趋势相一致。夏季最小海冰覆盖率在2003年达到最大值,在2010年达到最小值,接近无冰。对8年的海冰数据进行分析,喀拉海5月份开始融冰,9月下旬到达最小值。其融冰期为4个月,而结冰期则只有2~3个月。其中2003和2004年为重冰年,体现为融冰晚结冰早的变化特征;轻冰年有2007、2008、2009和2010年,轻冰年融冰早结冰晚,融冰期长;2005和2006年为过渡冰年。整体呈现了近几年海冰冰情变轻的趋势。

(2) 喀拉海海冰融化大体分为3个阶段:在有暖水流入的海域海冰首先融化,包括南部各个河口的径流、喀拉海峡的暖水入流以及新地岛北端的暖流区。随后海域西部的融冰海域逐渐扩大,并连成一片,形成西部无冰的阶段。最后,海冰边缘自南向北,自西向东退缩,开阔水扩展到整个海区,形成最小海冰覆盖范围。

(3) 为了定量反映各年的海冰冰情,本文引入融冻期海冰覆盖率指数,更好地体现海冰的全年整体变化情况,用以研究影响海冰变化的主要因子。结果表明,冬季积温、陆地径流和大西洋暖流对喀拉海海冰的变化起到了至关重要的作用。冬季积温影响了冬季海冰的冰情,进而影响了来年夏季海冰的融化速率,与海冰覆盖率

指数呈很好的负相关性, 相关系数达到  $-0.839$ 。径流将大量来自陆地的热量带入海洋, 加速海冰的融化, 径流流量与夏季海冰的融化有密切的相关性, 与海冰覆盖率指数的相关系数在置信度为  $0.95$  时达到  $-0.87$ 。北角暖流在新地岛分为 2 支, 一支经喀拉海峡流入喀拉海, 净流量约  $0.6 \text{ Sv}$ , 将大量热量带入, 对喀拉海西南部的海冰融化产生重要的影响。另一支流沿新地岛北缘北上, 成为新地岛西流, 从新地岛的北端进入喀拉海, 直接影响喀拉海西北部的海冰融化。风场是影响海冰空间分布的重要动力学因素, 夏季南风有利于喀拉海海冰向北运移, 并进入北冰洋, 风场作用在海冰的融化过程中是重要的影响因素, 是喀拉海冰情轻于其它北极边缘海的 1 个重要原因。

综上所述, 喀拉海冰情近几年呈递减趋势。喀拉海与其他北极边缘海相比封闭性更强, 与北冰洋中央区的交换更差, 形成了特有的海冰变化特征。在半封闭海, 冬季积温的作用决定了春季海冰的强度和厚度, 从而影响夏季冰情; 夏季, 径流与暖流携带的热量决定了海冰融化的速度, 一旦暖流携带更多的热量进入, 海冰将突破积温的制约而更多地融化; 南风的驱动在带来了南部热量的同时也使得海冰北向运移, 也是喀拉海海冰减小的关键因素之一。这些因素共同决定了喀拉海的冰情。

#### 参考文献:

- [1] 陈立奇, 赵进平, 卞林根, 等. 影响北极地区迅速变化的一些关键过程研究[J]. 极地研究, 2003, 15(4): 283-302.
- [2] 杨清华, 张占海, 刘骥平, 等. 海冰反照率参数化方案的研究回顾[J]. 地球科学进展, 2010, 25(1): 14-21.
- [3] 李涛, 赵进平, 朱大勇, 等. 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.
- [4] Pfirman S L, Kögeler J W, Rigor I. Potential for rapid transport of contaminants from the Kara Sea[J]. Science of the Total Environment, 1997, 202(1): 111-122.
- [5] Pavlov V K, Pfirman S L. Hydrographic structure and variability of the Kara Sea: Implications for pollutant distribution[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 1995, 42(6): 1369-1390.
- [6] Polyakov I V, Alekseev G V, Bekryaev R V, et al. Long-term ice variability in Arctic marginal seas[J]. Journal of Climate, 2003, 16(12): 2078-2085.
- [7] Loeng H, Ozhigin V, Ädlandsvik B. Water fluxes through the Barents Sea[J]. ICES Journal of Marine Science: Journal du Conseil, 1997, 54(3): 310-317.
- [8] Siegel F R, Galasso J J, Kravitz J H. Geochemistry of thirteen Voronin Trough cores, Kara Sea, European Arctic: Hg and As contaminants at a 1965 timeline[J]. Applied Geochemistry, 2001, 16(1): 19-34.
- [9] Comiso J C, Nishio F. Trends in the sea ice cover using enhanced and compatible AMSR-E, SSM/I, and SMMR data[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(C2): C02S07.
- [10] Belchansky G I, Douglas D C, Platonov N G. Duration of the Arctic sea ice melt season: Regional and interannual variability, 1979-2001[J]. Journal of Climate, 2004, 17(1): 67-80.
- [11] 李涛. 东西伯利亚海海冰面积时空变化特征及相关因素分析[D]. 青岛: 中国海洋局第一海洋研究所, 2007.
- [12] Deser C, Teng H. Evolution of Arctic sea ice concentration trends and the role of atmospheric circulation forcing, 1979-2007[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2): 1-5.
- [13] Perovich D K, Richter-Menge J A, Jones K F, et al. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(11): 1-4.
- [14] Stroeve J C, Serreze M C, Fetterer F, et al. Tracking the Arctic's shrinking ice cover: Another extreme September minimum in 2004[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(4): 1-4.
- [15] 朱大勇, 赵进平, 史久新, 等. 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.
- [16] Wang J, Ikeda M. Arctic oscillation and Arctic sea-ice oscillation[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27(9): 1287-1290.
- [17] Inoue J, Hori M E, Takaya K. The role of Barents sea ice in the wintertime cyclone track and emergence of a warm-Arctic cold-Siberian anomaly[J]. Journal of Climate, 2012, 25(7): 2561-2568.
- [18] Shiklomanov I A. Assessment of Water Resources and Water Availability in the World [M]. Stockholm, Sweden: World Meteorological Organization, 1997: 1-88.
- [19] 朱大勇, 赵进平, 史久新, 等. 2003 年与 1999 年楚科奇海海冰的差异及其发生原因[J]. 极地研究, 2005, 17(1): 11-22.
- [20] 赵进平, 朱大勇, 史久新, 等. 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.
- [21] 李涛, 赵进平, 朱大勇, 等. 东西伯利亚海海冰季节变化特征及主要影响因素分析[J]. 极地研究, 2007, 19(2): 87-98.
- [22] Martin T, Wadhams P. Sea-ice flux in the East Greenland Current [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 1999, 46(6): 1063-1082.
- [23] Thorndike A S, Colony R. Sea ice motion in response to geostrophic winds [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans (1978-2012), 1982, 87(C8): 5845-5852.
- [24] Harms I H, Karcher M J. Modeling the seasonal variability of hydrography and circulation in the Kara Sea [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans(1978-2012), 1999, 104(C6): 13431-13448.
- [25] Lundhaug M, Johannessen O M, Esbensen K H. Seasonal ERS SAR studies of sea ice in the Pechora and Kara Sea region [J]. Remote Sens, 2002, 28(2): 114-127.

## Multi-Year Variations of Sea Ice in the Kara Sea and Its Main Driving Factors

CHEN Ping, ZHAO Jin-Ping

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

**Abstract:** Variations of the sea ice coverage in the Kara Sea are studied in this study using the satellite remote sensing data, AMSR-E from 1 February 2003 to 28 March 2011. There is a decreasing trend for multi-year variations in summer sea ice coverage in the sea, with a rate about 20% from 2003 to 2010. 2003 and 2004 are heavy ice years, while 2007, 2008, 2009 and 2010 are light ones. The sea ice melting process in the sea can be divided into 3 stages: The earliest melting takes place in the regions where the warm water flow in, including estuaries, Kara Strait and the northern end of Novaya Zemlya; then, all ice-free regions merge into large open water areas in the western and southern Kara Sea; finally, the sea ice edge retreats gradually from south to north and simultaneously from west to east, and the most area of Kara Sea become ice free. The result of this study shows that accumulative surface air temperature in winter, river runoff, south wind in summer and north cape current have important influence on the variations of sea ice in the Kara Sea. The accumulative temperature determines the ice conditions in winter, thereby affecting the melting rate of summer sea ice in the following year. The winter accumulative temperature is highly correlated to the sea ice coverage index with the correlation coefficients of  $-0.839$ . River runoff brings a lot of heat into ocean from the land, accelerates the melting of sea ice. The correlation coefficients between the river runoff and the sea ice coverage index is  $-0.87$ . The dominant wind is an important dynamic factor influencing the spacial distribution of sea ice. The south wind in summer contributes to the northward drift of the sea ice, which induces the relatively lighter ice status in the the sea. Warm current from the Atlantic Ocean is divided into two branches in the Novaya Zemlya. One flows into Kara Sea through Kara Strait, with net flux about  $0.6SV$ , and exerts obvious impact on the melting of the sea ice in the southwestern Kara Sea. The other one along the northern bank of Novaya Zemlya becomes Western Novaya Zemlya Current flowing into Kara Sea, directly affects the sea ice melting in the north Kara Sea.

**Key words:** Kara Sea; sea ice; multi-year variation; accumulative temperature; river runoff; wind field; North Cape Current; satellite remote sensing

责任编辑 庞 旻