

# 渤海海冰外缘线候平均离岸距离的变化及其关键影响因子\*

李彦青<sup>1</sup>, 苏洁<sup>1\*\*</sup>, 汪洋<sup>2</sup>, 郭晓霞<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学海洋环境学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国科学院海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 以渤海海冰为研究对象, 基于 MODIS 遥感数据, 构建了辽东湾、渤海湾和莱州湾 2001—2011 年 11 个冬季的海冰外缘线离岸距离候平均时间序列, 并对其年际和季节内变化特征进行了分析。研究表明, 每年的海冰候平均离岸距离最大值通常发生在 1 和 2 月上旬, 辽东湾最大值出现的时间比渤海湾和莱州湾晚, 且具有发生时间越晚, 该年度冬季冰情越重的特点。基于海冰离岸距离候平均时间序列, 从季节内变化角度分析了影响渤海海冰的关键因子。结果指出, 小的海区(渤海湾和莱州湾)的海冰对气温的响应更快, 每候负积温是 1 个比候平均气温更好的预报因子; 而大的海区(辽东湾)与 1 个月左右的前期气温因子相关更好; 对 3 个海湾整体而言, 前期副高面积、强度和脊线位置均与渤海海冰离岸距离呈明显负相关, 海冰对副高面积的响应比其他副高指数更强、更快; 500 hPa 位势高度的西风环流带上存在 2 个与渤海海冰距离呈明显负相关的关键区(东亚和西太), 关键区的平均位势高度可以作为新的海冰预报因子。本文对这 2 个因子影响渤海海冰的机制进行了分析和解释。

**关键词:** 渤海; MODIS 数据; 候平均时间序列; 海冰外缘线离岸距离; 关键影响因子

**中图法分类号:** P722.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-5174(2013)07-007-10

渤海是北半球纬度最低的结冰海区, 包括位于北部的辽东湾、西部的渤海湾和南部的莱州湾 3 个海湾。该半封闭海区面积 7.7 km<sup>2</sup>, 平均水深 18 m。每年冬季渤海都会有海冰发生, 冰期一般 3~4 个月, 为典型的一年冰。渤海海冰是中国海洋灾害之一, 冰情严重的年份会造成很大的经济损失。海冰对于渤海的渔业、港口贸易、运输和石油平台等也有着重要的影响, 所以对渤海海冰的监测和预报非常重要。

渤海的面积较小, 在极区广泛应用的微波数据由于分辨率不足难以满足渤海海冰监测的需要。可见光数据分辨率较高, 但受云雾和极夜的影响, 在进行冰水识别和海冰密集度反演之前需要进行云检测。针对目前使用较多的 MODIS 数据, 将极区的海冰反演算法<sup>[1-2]</sup>应用到渤海海区时, 还会遇到云剔除过量或不足、近岸泥沙或悬浮物的影响造成的误判等问题。尽管在个例研究中提出了利用反射率和亮温的差异区分冰水<sup>[3-4]</sup>, 以及利用不同通道比值来区分冰、海水和云等的算法<sup>[5]</sup>, 但针对每日的遥感数据, 即便采用分区处理的方法<sup>[4]</sup>, 这些算法对应的阈值、甚至是算法本身仍存在不确定性。另外, 由于厚冰和薄云的地表发射性质类似, 也为反演产品的应用带来困难。因此, 在目前

渤海海冰的反演水平下, 利用反演的海冰密集度计算的海冰面积还具有较大的误差, 特别是对莱州湾和渤海湾这样的泥沙情况较严重的海区。然而, 对渤海海冰的研究需要有较连续的时间序列。在本文研究中, 作者利用 MODIS 数据采用人机交互方式获取外缘线, 计算海冰外缘线离岸距离。这种方法可避免由于冰水识别和反演算法引起的误差, 在反演算法的应用还不是很完善的阶段是行之有效的。

以往对渤海海冰年际变化的研究多采用每年的最大结冰面积或海冰外缘线离岸距离作为研究对象<sup>[6-8]</sup>。这些研究为认识渤海海冰变化规律打下了很好的基础, 但是为了揭示海冰的季节性生消规律和年际变化, 还需要对时间尺度更小的海冰数据进行分析。另外, 以往研究多将整个渤海的海冰变化作为 1 个整体研究, 但实际上, 渤海虽然面积很小, 但是 3 个海湾的地理、水文、环境条件是存在一定差异的, 3 个海湾每年的冰情发展趋势也有不同。因此, 本文分别构建了 3 个海湾的海冰外缘线离岸距离候平均时间序列来进行海冰变化规律及成因的研究。

在海冰变化的影响因子研究方面, 与渤海海冰关系最直接的无疑是渤海冬季气温<sup>[6,9-10]</sup>, 当海冰形成之

\* 基金项目: 国家海洋局公益性行业科研专项(201105016); 国家气象局公益性行业科研专项(201306091); 国家自然科学基金面上项目(41176022) 资助

收稿日期: 2012-04-30; 修订日期: 2012-09-19

作者简介: 李彦青(1987-), 女, 硕士生。

\*\* 通讯作者: E-mail: sujie@ouc.edu.cn

后,海表面气温降温的幅度和持续时间会直接影响到海冰的发生和发展。以往研究指出,负积温时空分布与渤海每年的冰情轻重有密切关系<sup>[11]</sup>。另外,副热带高压<sup>[6,8,12-14]</sup>、极涡<sup>[6,8,13]</sup>、纬向环流<sup>[8,12]</sup>、北极涛动<sup>[15]</sup>、太平洋海温<sup>[16]</sup>、以及太阳黑子<sup>[6,9]</sup>等都是与渤海海冰变化相关的因子。有研究指出北极海冰的变化会对东亚气候造成影响<sup>[17]</sup>,而东亚气候的变会直接影响到渤海的海冰。但以往研究中这些渤海海冰的影响因子基本上都是针对海冰的年际变化(如每年最大结冰范围)提出的,对海冰的季节内变化及成因的研究主要是通过数值模式<sup>[18-19]</sup>和诊断统计预报方程<sup>[10,20]</sup>进行模拟(后报)和短期预报,但预报的准确性很大程度地取决于气象场的预报准确率。人们还是希望能够获得具有统计意义的前期影响因子,本文将针对海冰候平均时间序列,首先分析气温因子和副高指数对渤海海冰的影响,进而基于 500 hPa 位势高度场提出渤海海冰季节内变化的前期关键影响因子。

## 1 数据来源及处理

### 1.1 MODIS 遥感数据

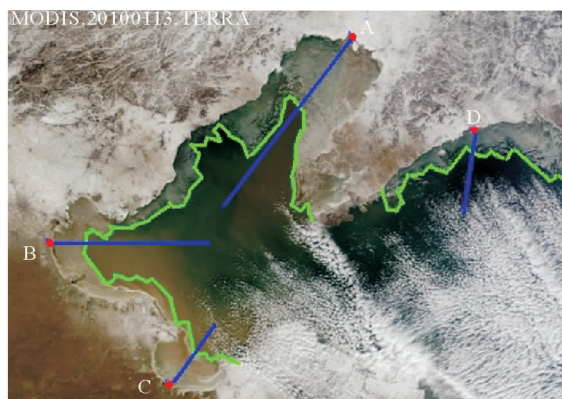
本文研究主要的数据来源是 MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer,中等分辨率成像光谱仪)数据。该光谱仪搭载在 EOS-TERRA 和 EOS-AQUA 2 颗卫星上,数据可免费下载(网址为 <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)。MODIS 从可见光到热红外有 36 个波段,波长范围为 0.4~14.4  $\mu\text{m}$ 。空间分辨率有 2 个通道可达 250 m,5 个通道为 500 m,其余 29 个通道为 1 000 m,刈幅达到 2 330 km,通过反演可同时获取大气、海洋、陆地、冰川雪盖等多种环境信息<sup>[21]</sup>。本文使用的数据是 MODIS 1B 的 500 m 分辨率产品,还包括 MODIS 03 的地理信息数据。

整个遥感数据处理过程是通过 IDL-ENVI 软件实现的。以下给出数据处理具体步骤。

1.1.1 获取渤海真彩图 将分辨率为 1 000 m 的经纬度数据进行插值,获得 500 m 分辨率的海洋和陆地掩膜和投影网格;读取 1~7 通道的 MODIS 1B 数据,并对数据进行订正,包括各个通道的太阳高度角订正和几何校正等;对投影网格内出现的空值(黑点现象)进行插值;利用 1、4、3 通道合成真彩图。截取研究海区的图像,若 MODIS 分景图像不能完全覆盖研究海区,需要进行图像拼接。图 1 为 2010 年 1 月 13 日的海冰真彩图及外缘线分析图。

1.1.2 确定外缘线及计算离岸距离 为了避免海冰遥感反演中对近岸泥沙与海冰及薄云与海冰的误判,本文采用 IDL-ENVI 软件,首先通过人机交互方式,利

用 MODIS 真彩图,手绘海冰外缘线(图 1 中绿线),并将外缘线位置存入计算机。3 个海湾的海岸基准点和基准线<sup>[22]</sup>,见图 1 中的红点和蓝线。基准点及相应指向点的位置取为:辽东湾为(40°50'N,121°50'E)~(39°50'N,120°45'E),渤海湾(38°43'N,117°35'E)~(38°41'N,119°46'E),莱州湾(37°12'N,119°10'E)~(37°50'N,119°46'E)。其次,通过 IDL 程序自动提取逐日海冰外缘线离岸距离,继而获取候平均时间序列。



(绿色实线为海冰外缘线,红点为基准点,蓝色实线为基准线。The green line: sea ice edge; The red point: reference point; The blue line: reference axis.)

图 1 2010 年 1 月 13 日 MODIS 渤海海冰真彩图及外缘线分析图

Fig. 1 MODIS image and sea ice edge analysis figure of Bohai Sea on January 13, 2010

### 1.2 海洋站气温数据

本文使用的气温数据来源于中国气象科学数据共享服务网地面交换站数据集,在 3 个海湾分别挑选了 1 个站点(辽东湾沿岸的营口站、渤海湾沿岸的塘沽站和莱州湾沿岸的龙口站),获得 2001—2011 每年冬季的日平均气温,继而根据本文研究需要,计算了这 11 个冬季的累积气温、累积负积温、候平均气温和每候负积温。

### 1.3 NCEP 格点数据

NCEP(National Centers for Environmental Prediction)数据具有覆盖范围广、时间序列长的优势,水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。本文主要使用 2000—2011 年的 500 hPa 位势高度再分析日平均数据。

根据中国气候中心 74 项环流指数及《中华人民共和国气象行业标准—西北太平洋副高监测》对西北太平洋副高的定义,针对东亚及西北太平洋地区 500 hPa 位势高度,本文各副高指数的计算方法如下:

(1)副高脊线位置:候平均意义下,副高位势高度最大值所在位置纬度的平均值。

(2)副高面积指数:候平均意义下,位势高度大于 588

位势米的网格点数。

(3)副高强度指数:候平均意义下,位势高度大于 588 位势米网格点的位势高度平均值与 587dgam 之差值的累计值。

(4)副高西伸脊点位置:候平均意义下,在  $90^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$  范围内,588 位势米最西格点所在的经度。

## 2 海冰外缘线离岸距离时间序列构建和分析

### 2.1 海冰外缘线离岸距离时间序列构建

对 MODIS 数据进行 2.1 节中所述处理,获得 2000 年 12 月~2011 年 3 月 11 个年度的辽东湾、渤海湾和莱州湾海冰外缘线离岸距离候平均时间序列。每个年度冬季从 12 月 1 日到次年的 3 月 10 日共 20 候,每 5 d 进行平均。由于使用的是可见光数据,必然要受到云的影响,在绘制外缘线过程中,如果云遮挡住冰外缘线部分,可以

参考该天前 1~2 d 和该天之后 1~2 d 的真彩图,辅助判断海冰外缘线的位置,以提高准确率和遥感数据的使用率。但在厚云等天气条件下,当海冰结冰范围和外缘线无法判识时,视为缺测。图 2 给出了各海湾每候的统计数据个数,图中时间 2001 指 2000—2001 年度,后文所有图中时间轴同此说明。其中辽东湾数据较全,缺测数据只占 4.5%,从第 5 候~第 17 候每候都有数据,且其中每候有 3 个数据以上的占 76.5%,可以获得严重冰期较连续的时间序列;渤海湾和莱州湾数据缺测分别为 8.6% 和 11.4%。在严重冰期缺测的数据在一定程度上会影响对年度海冰外缘线最大离岸距离的判断。为了不破坏海冰离岸距离时间序列的波动性,本文对缺测数据根据 1.2 节中的台站每年冬季气温及累积气温、负积温的时间序列进行了经验性插补。

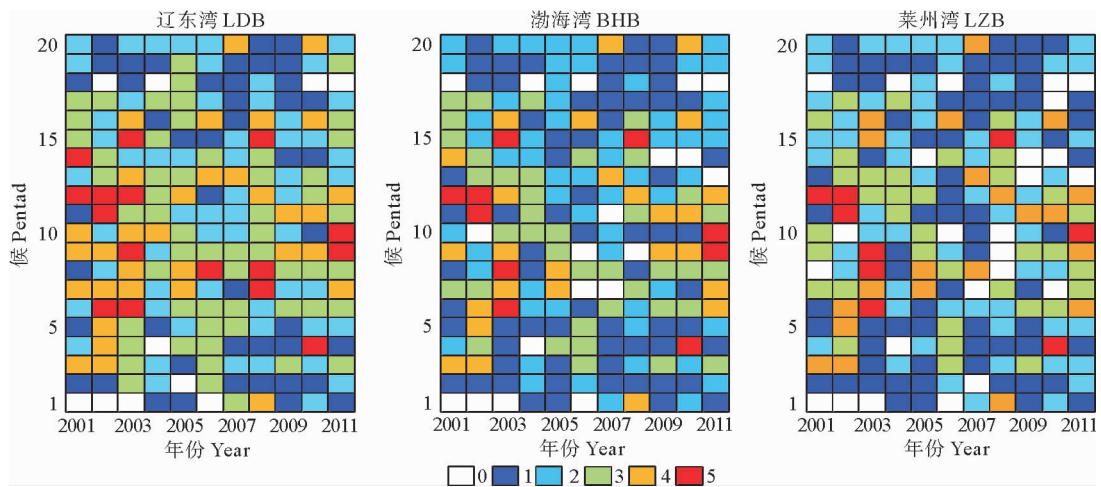


图 2 每候海冰距离数据个数统计

Fig. 2 Numbers of sea ice distance data in a pentad

图 3 给出了辽东湾、渤海湾、莱州湾的各年度逐候海冰外缘线离岸距离。实线为 MODIS 程序所得数据,虚线部分为插补数据。图中横轴为时间(单位:候),“1”表示每个年度的第 1 候,即前 1 年 12 月的第 1 候,依次类推,直至第 2 年的 3 月第 2 候即该年度第 20 候。为了显示海冰开始生成的阶段,图中曲线在横轴“1”之前延伸了 3 候,即前 1 年 11 月的第 4~6 候。

### 2.2 海冰离岸距离的年际变化

从图 3 中可以看到,3 个海湾的海冰无论从年际尺度还是季节内尺度都具有不同的变化趋势。从年际尺度看,3 个海湾中纬度最高、面积最大的辽东湾海冰外缘线离岸距离明显比另 2 个海湾大,2000—2001 和 2009—2010 年 2 个年度海冰沿基准线方向最大的候平均距离均达到 200 km 以上,其中 2000—2001 年度为研究时段的候平均最大值。2010—2011 年度最大值约为 150 km,为海冰离岸距离第 3 大的年份。研究时段内辽东湾冰情最轻的 3 个年度依次为 2001—2002、

2006—2007 和 2008—2009 年度,年度最大候平均海冰离岸距离均在 100 km 以下。

渤海湾的冰情最严重也发生在 2000—2001 年度,最大海冰候平均离岸距离接近 80 km。但与辽东湾不同的是,2010—2011 年度最大值明显高于 2009—2010 年度。渤海湾冰情最轻的年份是 2001—2002 和 2006—2007 年度。

莱州湾的冰情年际变化与其他 2 个海湾有着明显差别。2000—2001 年度莱州湾的海冰离岸距离并不严重,甚至属于冰情偏轻的年份,冰情最重的是 2010—2011 年度,海冰候平均离岸距离很明显地高于其他年份,已经接近了 120 km,其次是 2009—2010 年度,海冰离岸距离也达到了 80 km。排第 3 位的是 2008—2009 年度,最大值为约为 40 km,其他年份最大值基本在 40 km 以下。渤海湾虽然纬度比莱州湾高,但在很多年份,莱州湾海冰离岸距离都明显大于渤海湾,如 2002—2003、2003—2004、2005—2006、2008—2009 和 2009—

2010年度。

表1给出了各海湾海冰离岸距离最大的3个年度的发生时间和当年候平均最大距离值。根据国家海洋局1973年发布的海冰冰情标准<sup>[23]</sup>,将渤海海冰冰情分为5级,分别为:轻(冰)年、偏轻(冰)年、常(冰)年、偏

重(冰)年和重(冰)年。国家海洋局每年发布的中国海洋灾害公报中指出,渤海冰情在2000—2001和2009—2010年度属偏重年,2010—2011和2008—2009年度属于常年。这是针对整个海区给出冰情等级,更多地体现了海区面积较大的辽东湾的冰情特点。

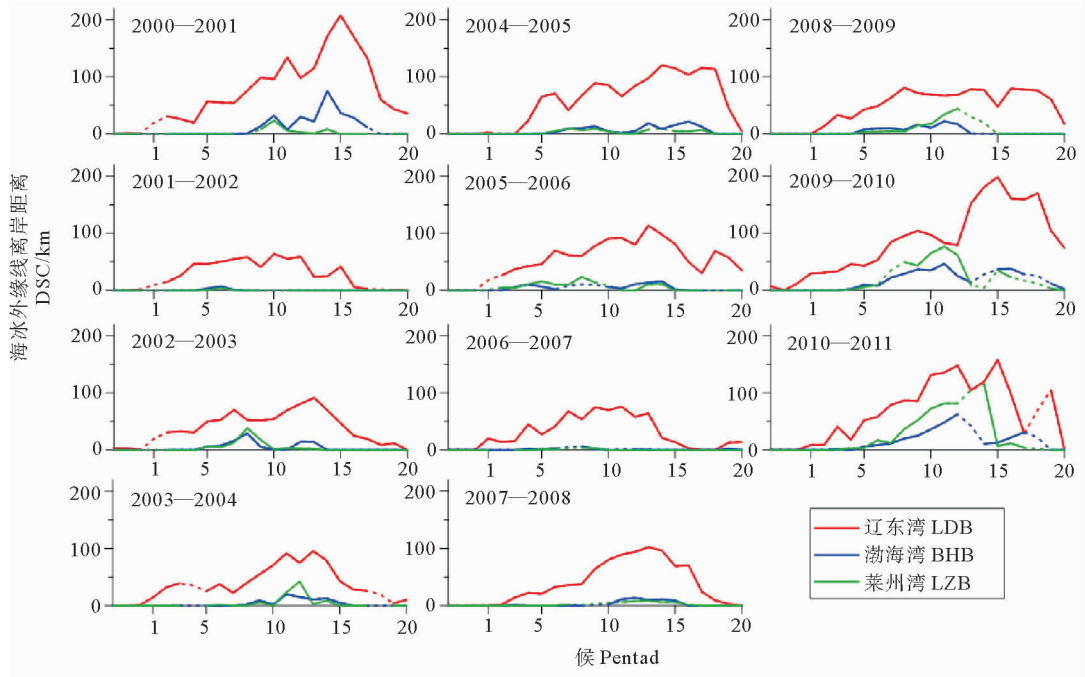


图3 2001—2011辽东湾、渤海湾和莱州湾候平均海冰离岸距离

Fig. 3 Distance between the sea ice edge and the coast (DSC) in Liaodong Bay (LDB), Bohai Bay (BHB) and Laizhou Bay (LZB)

表1 各海湾前3个最大海冰外缘线离岸距离及发生年度

Table 1 The top three large distances between sea ice edge and coast and their corresponding year

辽东湾 Liaodong Bay		渤海湾 Bohai Bay		莱州湾 Laizhou Bay		
发生年度 Year	最大距离 Maximum/km	发生年度 Year	最大距离 Maximum/km	发生年度 Year	最大距离 Maximum/km	
1	2000—2001	219	2000—2001	101	2010—2011	115
2	2009—2010	200	2010—2011	73	2009—2010	91
3	2010—2011	165	2009—2010	56	2008—2009	63

### 2.3 海冰离岸距离的季节内变化

从图3还可以清楚地看出各海湾在季节内变化上也存在不一致性。首先,辽东湾出现候平均最大海冰离岸距离的时间通常比其他2个海湾晚。例如辽东湾在2000—2001和2009—2010年度候平均最大海冰离岸距离都出现在第15候(即2月11~15日),而2000—2001年度渤海湾和莱州湾海冰离岸距离最大值分别出现在14候和10候,2009—2010年度这2个海湾最大值都出现在11候。2010—2011年度的情况比较例外,辽东湾有2个候平均最大距离的峰值,分别出现在第12和第15候,海冰离岸距离明显小于2000—2001和2009—2010年度,2010—2011年度莱州湾在

11 a中候平均离岸距离最大值发生得最晚(第14候)、冰情也是最严重的1年。

在大部分年份中,渤海湾和莱州湾季节内变化趋势较一致,这是因为这2个海湾地理位置更接近,容易受相同局地气象条件的控制,从而造成较相似的海冰季节内变化。但也有例外,如2000—2001年度渤海湾变化趋势就与辽东湾较相近,候平均最大海冰离岸距离发生的时间接近,而且都达到11 a中海冰离岸距离的最大值,但莱州湾这年的冰情却属偏轻,且年度候平均最大海冰离岸距离发生时间较早。

为了进一步体现各海湾海冰离岸最大距离出现的时间的不一致性,图4a统计了3个海湾每年最大距离

发生时间的频数。辽东湾最大海冰距离的发生时间相对集中,超过 2/3 的年份都是发生在 13~15 候,集中在 2 月份,最多发生在 13 候。渤海湾和莱州湾的分布相对分散一些,渤海湾最早的 1 年是发生在第 6 候(12 月底),最晚的 1 年是 15 候(2 月下旬),11 和 12 候发生的次数较多,即大部分年份最大冰情是出现在 1 月下旬,最多出现在 11 候。莱州湾最早的时间也是第 6 候,最晚一年是发生在 14 候(2 月上旬),发生次数较多的是 8 候和 12 候,最大海冰离岸距离通常是发生在 1 月份。

图 4b 给出了海冰最大值及其发生时间散点图。从图 4b 可以得到 1 个大致规律,即海冰候平均离岸距离最大值发生的时间越晚,该年的最大值通常是越大的,其中辽东湾这种趋势最明显。这说明晚冬更易

发生严重的冰情,1969 年的渤海特大冰封也是发生在 2 月底。从海冰的凝结条件来看,首先是晚冬经过前长时间的降温积累,负积温更大,有助海冰的发展。其次是前冬的气温升降会造成海冰的不断生成和融化,使得海域中产生碎冰,这些碎冰作为凝结核也更有利于海冰的大范围生成。大的海区热含量保持性好,冰期期间的海冰融化不容易造成海区海水的迅速升温,因此一般来讲比小的海区更符合晚冬容易发生严重冰情这一规律。另外,对莱州湾,由于受到黄河口淡水的影响,海水盐度小,冰点较高,而且浅滩较多,在倒春寒的天气条件下,容易发生返冻现象,如 2009—2010 和 2010—2011 年度,但在返冻时达到年度海冰离岸距离最大值的现象并不多见。

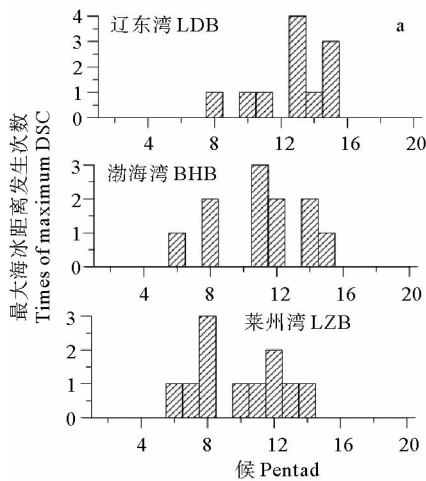


图 4a 最大海冰距离发生时间统计

Fig. 4a Histogram of times of maximum DSC

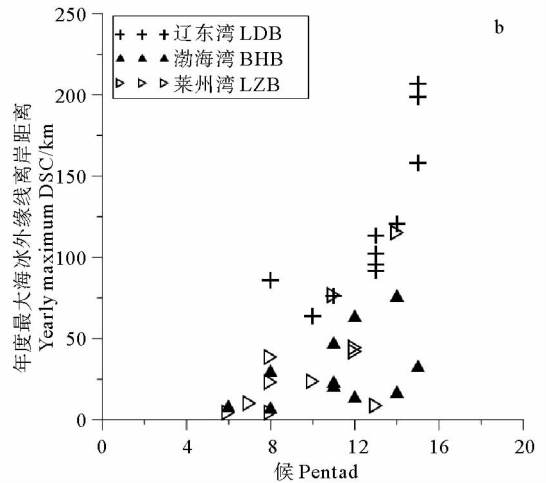


图 4b 最大海冰距离及其发生候的散点图

Fig. 4b Scatter diagram of the maximum distance and corresponding pentad

### 3 海冰季节内变化的影响因素分析

上节分析了海冰的年际变化和季节内变化,对渤海海冰年际变化的成因已有大量的研究<sup>[6,8-9,12-14]</sup>,本文将基于构建的海冰离岸距离候平均时间序列着重分析影响渤海海冰季节内变化的关键因子,为海冰中期预报提供依据。为了保证渤海湾和莱州湾数据的平稳性,各海湾进行相关分析的海冰时间序列统一只取 12 月~2 月每年 18 个候的数据。

#### 3.1 渤海海冰与气温因子的关系

海冰变化受很多因素的影响,气温变化是最直接的影响因子<sup>[6,9-10]</sup>,为研究渤海海冰的季节内变化,首先分析候平均尺度下气温与渤海 3 个海湾海冰离岸距离的关系。图 5a 是候平均气温与 3 个海湾海冰离岸距离的超前相关,图中横轴为气温超前海冰离岸距离变化的时间,实线是不同海湾海冰距离与平均气温的相关系数,黑色

虚线为 99% 的置信线。可以看到超前 0~6 候的气温与海冰距离都呈负相关,相关系数都超过 99% 置信的。其中渤海湾和莱州湾超前 1 候负相关最强,相关系数值分别为 0.57 和 0.45,超前 3 候开始系数值明显减小;辽东湾超前 2~6 候的相关系数值都大于 0.50 超前 5 候为最大值 0.58。这说明渤海湾和莱州湾的海冰对气温响应较快,而辽东湾前期(1 个月内)的气温对其海冰都有影响。这是因为辽东湾海区范围和水深都较大,对同样的降温,辽东湾的海冰变化不如另两个海湾快和明显,而是更多地体现了气温长时间的累积效应。

负积温作为衡量冬季寒冷程度的指标,一直是研究渤海海冰的年际变化的重要因子<sup>[11]</sup>。针对季节内变化,本文建立了每候的负积温时间序列,可以很好地反映出各候的寒冷程度。从图 5b 中可以看到,3 个海湾的候平均海冰距离与超前 0~6 候的每候负积温的负相关系数也都超过 99% 置信。渤海湾海冰距离与超前

1 候的每候负积温相关系数值最大,为 0.60;莱州湾超前 1~2 候相关系数值较大,都大于 0.56;辽东湾超前 2~6 候相关系数值都大于 0.50,超前 3 候为最大值 0.56。对比图 5a 和图 5b 可以发现,3 个海湾海冰距离与 2 个气温因子超前 0~6 的相关系数变化趋势很相

近,故从每候负积温的角度,也能证明辽东湾海冰能受到更前期的气温因子的影响。对渤海湾和莱州湾,海冰距离与每候负积温的相关性比与候平均气温的相关性更好,所以在分析预报莱州湾和渤海湾的海冰时,每候负积温是一个更好的预报因子。

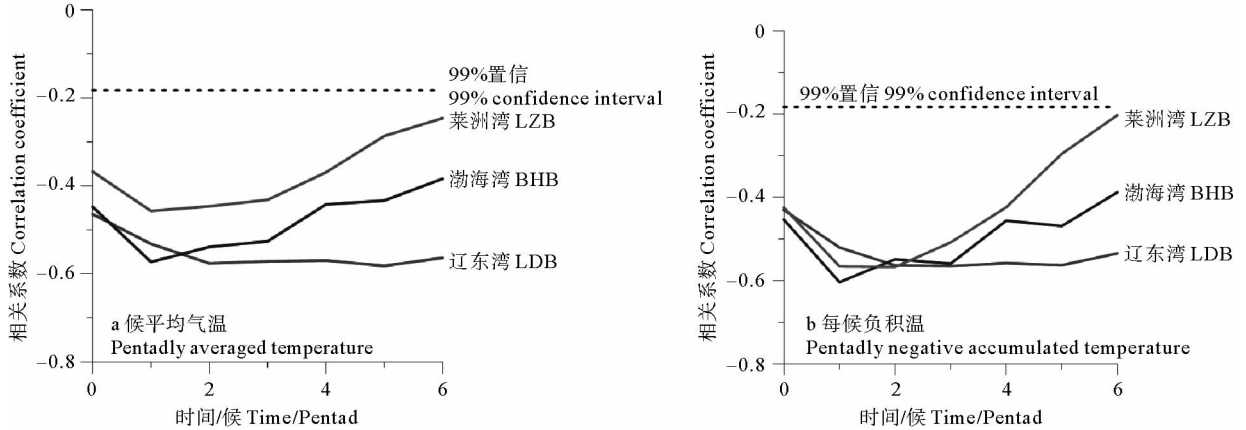


图 5 气温因子与海冰距离的相关图

Fig. 5 The correlation analysis between temperature index and DSC

### 3.2 渤海海冰与西太平洋副高的关系

冬季大气环流因子是影响海冰冰情的重要因素。西太平洋副热带高压作为中低纬度的气候系统,其形态、强度等指数对渤海冰情变化具有不可忽视的影响<sup>[6,8,12-14]</sup>。以往研究多针对每年的海冰等级或面积指数序列,李剑等<sup>[8]</sup>得到西太平洋副高面积指数以及强度与海冰面积指数存在提前 1 年的负相关的结论,李春花等<sup>[14]</sup>也分析说明 8 和 12 月太平洋副热带高压的强度和面积指数与冬季冰情等级有良好的相关关系。作者认为在季节内变化尺度上前期的西太平洋副高对冰情的影响更值得探究,并希望得到能够应用于海冰中期预报的关键因子。因此,对应海冰离岸距离的候平均数据,本文构造了西太副高各项指数 11a 的候平均时间序列,并与 3 个海湾海冰外缘线离岸距离候平均序列做超前相关(见图 6),以研究季节内变化尺度下的副高指数与渤海海冰的关系。图中横轴为副高指数超前海冰离岸距离变化的时间,实线是不同海湾海冰距离与副高指数的相关系数。

图 6a 显示,3 个海湾的海冰离岸距离与副高脊线位置(参数确定见 1.3 部分)都呈负相关,且超前 2~9 候 3 个海湾都超过 99% 的置信。副高脊线所处纬度越高,海冰冰情越轻。这是因为副高脊线表示的是副高的南北位置的移动,如果副高位置偏北则冬季冷空气的南下就会受到阻碍,导致渤海冬季气温偏高,不利于海冰的生成。对辽东湾和莱州湾,均为副高脊线超前海冰离岸距离 5 候负相关最强,对渤海湾是超前 4 候负相关最强。可见,渤海海冰的离岸距离与约 1 个月前

的副高脊线位置关系很好,而且 3 个海湾的相比较,超前 0~12 候的相关系数都是辽东湾最大,渤海湾次之,莱州湾最小。

3 个海湾的海冰候平均离岸距离与副高面积也呈负相关,在超前 8 候之内 3 个海湾全部超过了 99% 的置信(见图 7b),副高面积表示副高的影响范围的大小,副高影响范围越大,越不利于冷空气的南下,进而会阻止渤海气温的降低。3 个海湾的相关系数最大的都出现在副高面积超前海冰离岸距离 1~2 候,其中辽东湾和渤海湾是超前 2 候相关最大,莱州湾是超前 1 候。可见渤海海冰对副高面积的响应比对副高脊线位置更快,而且 3 个海湾相比,与副高面积的相关系数也都是辽东湾最大,然后依次是渤海湾、莱州湾。

同样,副高强度与海冰候平均离岸距离也呈负相关关系(见图 7c)。副高强度表示的是副高势力的强弱,假设在副高面积、副高脊线、副高西伸脊点不变的情况下,副高强度值越大,其向北输送暖空气的能力越强,因此就越不利于渤海海冰的生成。从超前 2 候开始,3 个海湾的相关系数就全部超过了置信,其中莱州湾是在超前 4 候是系数最大,渤海湾是在超前 8 候时最大,辽东湾是超前 10 候。与前 2 种指数不同的是,3 个海湾相比较,辽东湾和渤海湾的相关系数不再整体高于莱州湾,在超前 3~4 候时,副高强度与莱州湾和渤海湾的相关系数都是大于辽东湾的,超前 6~12 候是辽东湾的相关系数整体较大。

副高西伸脊点表示的是副高的经向伸展程度,图 7d 显示大部分情况下副高西伸脊点与海冰离岸距离为

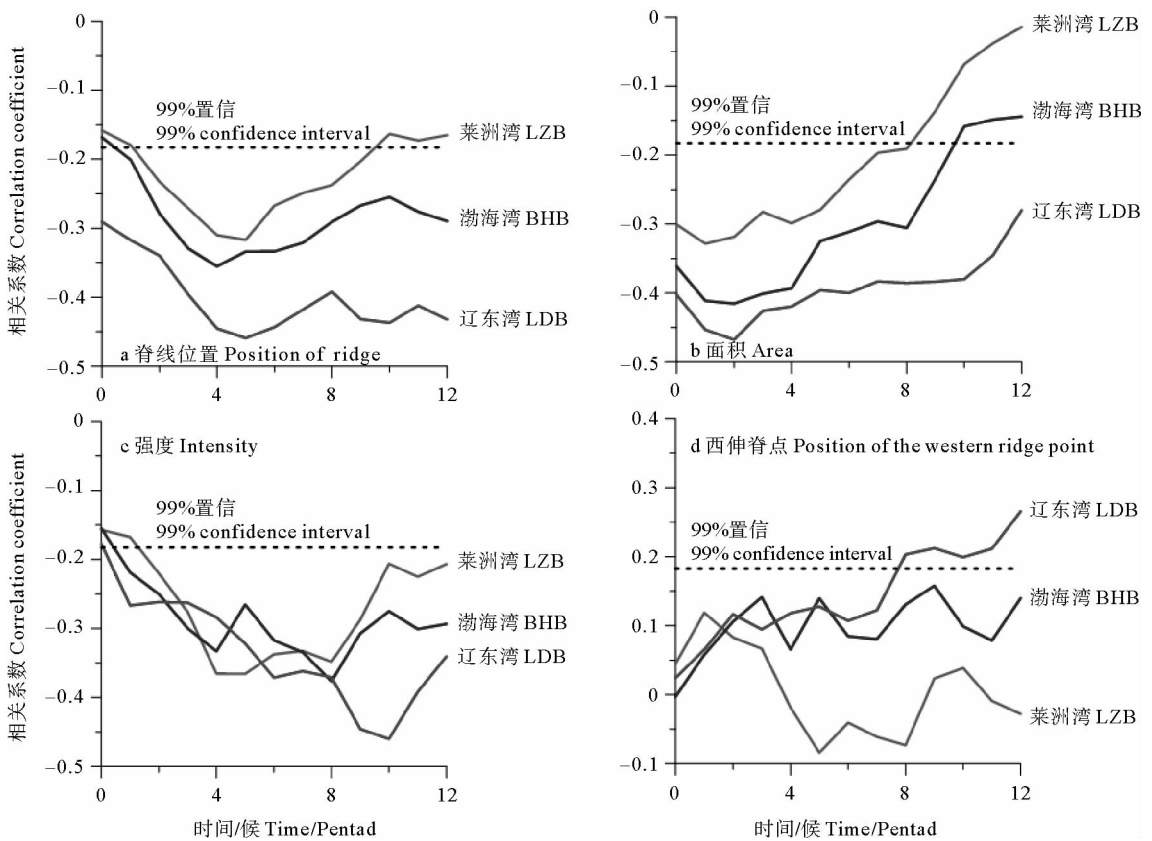


图6 副高指数与海冰距离的相关系数

Fig. 6 The correlation coefficient between Subtropical high index and DSC

正相关关系,但相关系数不高,只有辽东湾的海冰距离与副高西伸脊点在超前8候以上的相关超过了置信。

总之,候平均时间序列分析体现出,前期副高脊线位置、强度和面积是影响渤海海冰离岸距离的1个重要因子,且从季节内尺度上看,在副高发生变化后,渤海海冰在1个月之内就会有明显的响应,其中对副高面积的响应最快,且相关系数整体较大。副高面积可作为短期预报因子,而副高脊线位置和强度则是较好的中期预报因子。辽东湾和渤海湾的海冰离岸距离都是与副高面积相关系数最大,只有莱州湾是与副高强度相关系数最大。

### 3.3 渤海海冰与北半球500 hPa位势高度场的关系

虽然副热带高压是常年存在的,但冬、夏季的强度和范围差异很大<sup>[24]</sup>,夏季强度大,范围大,7~8月份副高脊线位于 $30^{\circ}\text{N}$ 附近<sup>[25]</sup>。3.2节的研究表明1个月前的副高对渤海海冰影响较大,但秋冬季副高已经远不如夏季强,且位置偏南,离渤海距离较远,10月份时副高脊线已南撤到 $25^{\circ}\text{N}$ 附近<sup>[25]</sup>,且面积也比夏季缩小。那么在秋冬季节,是否存在对渤海海冰影响更直接的前期大气环流因子呢?本文将北半球的500 hPa位势高度场与渤海海冰候平均离岸距离进行相关分析,目的在于寻找季节内尺度上影响渤海海冰的关键

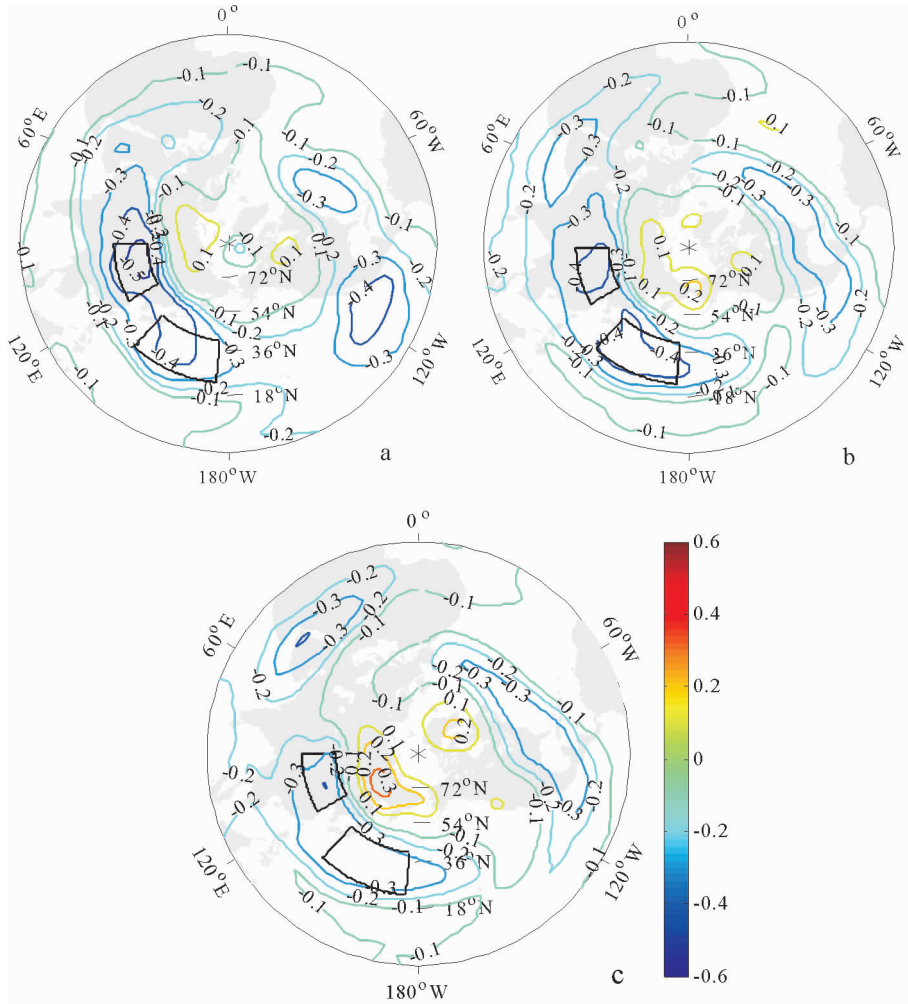
因子。

利用北半球500 hPa候平均位势高度场分别与辽东湾、渤海湾和莱州湾候平均海冰离岸距离做0~12候的超前相关。结果显示,3个海湾的海冰离岸距离与500 hPa位势高度场在超前2~6候相关较强,具有2个较明显的关键区,分别位于亚洲东部和西太平洋(见图7中黑框所示位置,分别称为东亚关键区和西太关键区)。图7中分别给出了针对3个海湾总体相关较好的相关系数场。对莱州湾而言,除了以上2个关键区,还存在亚洲东北部的正相关区。

对东亚关键区和西太关键区,观察每年冬季500 hPa位势高度图变化规律可以发现,这2个关键区都是在西风带环流上,是等值线平行且较为密集的区域。其中东亚关键区就在渤海的西侧,在该位置出现的槽或脊等扰动会对到达渤海的寒潮产生很大的影响<sup>[12]</sup>,例如在该位置出现的东亚大槽,会直接造成东亚的寒潮天气<sup>[13]</sup>。当东亚关键区出现槽,该处的位势高度降低,正对应东亚将会出现寒潮降温天气,渤海海冰增长,若此处出现脊则情况相反,故该关键区会与海冰离岸距离呈负相关关系。西太关键区位于西风带上,位置处于我国的下游,当此处的长波发生显著变化后,也会影响上游环流系统即我国境内的西风带<sup>[25]</sup>,从500 hPa位势高度图(图略)上可以看到,西太关键区的

扰动反映了极地低压与副高之间的强弱对比,当极地低压强度和范围更大时,西风带偏南,该处位势高度偏低,对应东亚气温偏低,渤海冰情偏重;当副高的强度

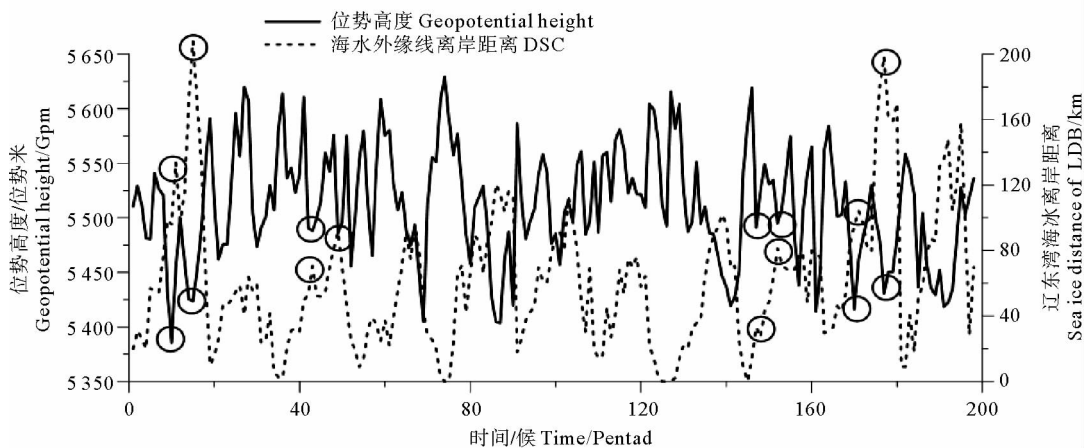
和范围更占优势,西风带偏北,则该关键区位势高度偏高,对应的渤海冰情是偏轻的,所以西太关键区与海冰离岸距离也是负相关的关系。



(a: 辽东湾,位势高度超前海冰距离2候;b:渤海湾,位势高度超前海冰距离3候;c:莱州湾,位势高度超前海冰距离3候。a: LDB, 2 pentads before; b: BHB, 3 pentads before; c: LZB, 3 pentads before.)

图7 500 hPa 位势高度与海冰距离相关系数

Fig. 7 The correlation coefficient between geopotential height of 500 hPa and DSC



(位势高度比辽东湾海冰离岸距离超前2候。Geopotential height is 2 pentads before DSC.)

图8 500 hPa 东亚关键区平均位势高度与辽东湾海冰距离

Fig. 8 East-Asia kay area average geopotential height of 500 hPa and DSC of LDB



利用东亚关键区和西太关键区的 500 hPa 平均位势高度建立候平均时间序列,作为影响渤海海冰季节内变化的 2 个新的影响因子。相关分析结果表明,对东亚关键区而言,超前 1~6 候的 500 hPa 平均位势高度与辽东湾海冰距离负相关系数值都超过 0.5,其中最大为超前 2 候,相关系数为 0.6;渤海湾相关系数值最大为 0.50,发生在超前 2 候;莱州湾相关系数值最大为 0.35,发生在超前 3 候。对西太关键区来说,对辽东湾超前 3~6 候时负相关系数值都大于 0.50,最大为超前 5 候,相关系数值为 0.54;对渤海湾和莱州湾都是超前 3 候时负相关最强,相关系数值分别为 0.45 和 0.40。

可见,2 个关键区的前期 500 hPa 平均位势高度对渤海各海湾海冰具有预报意义,特别是对辽东湾。图 8 给出了超前 2 候的东亚关键区的平均位势高度与辽东湾海冰离岸距离的时间序列。数据长度为 11 年×18 候,共 198 候。从图 8 除了能够看出每年的位势高度峰值(谷值)都对应着海冰距离的减小(增加),还可以看到,二者在季节内变化的许多细节上很好的对应关系(详见图 8 中圆圈位置),渤海湾和莱州湾的海冰与关键区前期 500mb 位势高度也有相似的对应关系,这体现了关键区选取的合理性。因此,大气环流因子的超前相关关系为渤海海冰的预报提供了很好的预报因子。

#### 4 结论

由于云雾的影响,利用可见光遥感数据无法提供逐日的海冰参数,本文利用 MODIS 数据,构建了 2001—2011 年冬季渤海 3 个海湾海冰外缘线离岸距离的候平均时间序列,给出了目前不借助同化模式手段的时间分辨率最高的海冰离岸距离数据。在此基础上分析研究了渤海各海湾海冰的年际和季节内变化特点,并进一步从季节内变化角度研究了气温因子、副高以及 500 hPa 位势高度等渤海海冰的关键影响因素,为渤海海冰中期预报提供了研究基础。主要结论如下:

(1)3 个海湾海冰具有不同的年际变化特点。3 个海湾海冰外缘线候平均离岸距离的年度最大值出现的年度不一致,辽东湾和渤海湾的都出现在 2000—2001 年度,而莱州湾该年度冰情却偏轻,其冰情明显偏重的年份出现在 2009—2010 和 2010—2011 年度,造成了重大的海冰灾害;

(2)从季节内变化的角度看,海冰距离最大值发生越晚、冰情越重的趋势在辽东湾更为明显;渤海湾和莱州湾变化特点较相似,离岸距离最大值通常出现在 1 月份,而辽东湾通常出现在 2 月份,本文分析指出面积大的海区更容易在晚冬发生严重冰情,并解释了成因。

(3)冬季气温是渤海海冰最直接的影响因子,从季节内

变化角度,渤海湾和莱州湾海冰距离与超前 1 候的候平均气温和每候负积温都有较好的关系,且每候负积温是较候平均气温更好的预报因子;辽东湾海冰距离与超前 2~6 候的 2 个气温因子相关系数都较大。这说明对较大的海区(辽东湾)近 1 个月的前期气温因子对海冰具有较大的影响,而对较小的海区(渤海湾和莱州湾)海冰对气温因子的响应更快。

(4)候平均时间序列相关分析指出,前期副高脊线位置、副高面积和副高强度与海冰外缘线离岸距离都呈明显负相关关系。辽东湾和渤海湾分别与超前 2 候和 1 候的副高面积的相关系数最大,莱州湾是与超前 4 候的副高强度相关最大。对渤海 3 个海湾整体而言,渤海海冰与副高面积较其他副高因子相关更高且响应更快。

(5)通过候平均时间序列的相关分析提出了 2 个新的渤海海冰影响因子,分别是东亚和西太关键区的 500 hPa 平均位势高度,都与海冰距离呈明显的负相关。其中东亚关键区与辽东湾和渤海湾的海冰距离是超前 2 候相关最大,与莱州湾是超前 3 候最大;西太关键区与辽东湾的海冰距离是超前 5 候相关最大,渤海湾和莱州湾海冰是超前 3 候相关最大。这两个关键区的平均位势高度可以作为很好的渤海海冰的预报因子。本文分析和解释了 2 个新的因子对渤海海冰的影响机制。

另外,对莱州湾,除了东亚和西太 2 个关键区,还存在亚洲东北部的正相关区,其与另 2 个海湾相关不明显,对于该关键区的影响机制还需进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] George A Riggs, Dorothy K Hall, Steven A Ackerman. Sea ice extent and classification mapping with the moderate resolution imaging spectroradiometer airborne simulator[J]. Remote Sensing of Environment, 1999, 68: 152-163.
- [2] George A Riggs, Dorothy K Hall, Vincent V Salomonson. MODIS sea ice products user guide to collection 5. [M]. Greenbelt, MD: NASA/Goddard Space Flight Center, 2007: 1-10.
- [3] 吴龙涛, 吴辉碁, 孙兰涛, 等. MODIS 渤海海冰遥感资料反演[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006, 36(2): 173-179.
- [4] 王宁, 张晰, 纪永刚, 等. 凝聚层次聚类的 MODIS 海冰外缘线提取算法与应用[J]. 地球信息科学学报, 2011, 13(2): 266-272.
- [5] 郭衍游, 焦明连. 利用 MODIS 数据反演渤海海冰分布[J]. 淮海工学院学报, 2010, 19(1): 84-87.
- [6] 白珊, 刘钦政, 吴辉碁, 等. 渤海、北黄海水冰与气候变化的关系[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 33-41.
- [7] 刘钦政, 黄嘉佑, 白珊, 等. 渤海冬季海冰气候变异的成因分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(2): 11-19.
- [8] 李剑, 黄嘉佑, 刘钦政. 黄、渤海海冰长期变化特征分析[J]. 海洋预报, 2005, 22(2): 22-32.
- [9] 张云吉, 金秉福, 冯雪. 近半个世纪以来渤海冰情对全球气候变化的影响[J]. 海洋通报, 2007, 26(6): 96-101.
- [10] 岳海波, 张杰, 季永刚, 等. 辽东湾海冰面积变化模拟和预测探

- 讨[J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 169-174.
- [11] 顾卫, 史培军, 刘扬, 等. 渤海和黄海北部地区负积温资源的时空分布特征[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 168-173.
- [12] 耿淑琴, 王咏亮, 白珊. 2000—2001 冬季北半球大气环流变化对渤海气候及海冰的影响[J]. 海洋预报, 2001, 18(3): 25-31.
- [13] 耿淑琴, 王旭. 2001—2002 年冬季黄渤海天气气候特征及对渤海海冰的影响[J]. 海洋预报, 2002, 19(4): 38-47.
- [14] 李春花, 刘钦政, 黄焕卿. 渤海、北黄海冰情与太平洋副热带高压的统计关系[J]. 海洋通报, 2009, 28(5): 43-47.
- [15] 赵金霞, 卜清军, 刘春霞. 2010 年 1 月渤海海冰成因分析[J]. 天津科技, 2012(3): 86-90.
- [16] 解思梅, 包澄澜, 韦定英. 太平洋海温和渤海海冰[J]. 海洋学报, 1991, 13(3): 339-347.
- [17] 武炳义, 卞林根, 张人禾. 冬季北极涛动和北极海冰变化对东亚气候变化的影响[J]. 极地研究, 2004, 16(3): 211-220.
- [18] Su Jie, Wu Huiding, Zhang Yunfei, et al. A coupled ice-ocean model for the Bohai Sea; II. Case study[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(3): 54-67.
- [19] Liu Yu, Liu Qinzhen, Su Jie, et al. Seasonal Simulations of a Coupled Ice-ocean Model in the Bohai Sea and North Yellow Sea since the Winter of 1997/1998[C]. Hawaii: The Proceedings of the Twenty First (2011) International Offshore and Polar Engineering Conference, 2011(1): 942-947.
- [20] 李春花, 白珊, 刘钦政, 等. 渤海冰面积与营口气温的关系[J]. 海洋预报, 2008, 25(1): 1-4.
- [21] 刘玉光. 卫星海洋学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 43.
- [22] 范学炜, 苏洁, 费立淑. 海冰卫星遥感资料微机处理系统的改进与应用[J]. 海洋预报, 1997, 14(1): 44-55.
- [23] 张方检. 我国的海冰[M]. 北京: 海洋出版社, 1986.
- [24] 刘屹岷, 吴国雄. 副热带高压研究回顾及对几个基本问题的再认识[J]. 气象学报, 2000, 58(4): 500-512.
- [25] 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 夏季北太平洋副热带高压系统的活动[J]. 气象学报, 2001, 59(6): 747-758.

## Variability of the Pentadly Average Distance Between the Sea Ice Edge and the Coast in the Bohai Sea and Its Key Impact Factors

LI Yan-Qing<sup>1</sup>, SU Jie<sup>1</sup>, WANG Yang<sup>2</sup>, GUO Xiao-Jia<sup>1</sup>

(1. College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. The Key Laboratory of Ocean Circulation and Wave, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Based on the MODIS remote sensing satellite data, the time series of pentadly averaged distance between sea ice edge and the coast in Bohai Sea from 2001 to 2011 is built. The interannual and seasonal variability of the series is studied. The analysis shows the largest distance happens in January and early February usually, and the time of the largest distance appearance in Liaodong Bay is later than that of the other two Bays. The later the largest distance happens, the heavier sea ice is. The key factors are analyzed as well based on the pentadly time series. The results show that sea ice in small area, such as Bohai Bay and Laizhou Bay, has a quicker response to air temperature, and pentadly negative accumulated temperature is a better predictor for sea ice than the pentadly average temperature for these two bays; while sea ice in larger sea area, such as Liaodong Bay, has better correlation with prophase temperature. Sea ice of the whole Bohai Sea is negatively correlated with prophase area, intensity and ridge line of subtropical high, among these subtropical high indexes, the area is the factor with more quickly and intense effect on sea ice distance. We present two key factors from the 500 hPa geopotential height near westerly circulation zone. The averaged geopotential height of East-Asia and West-Pacific areas can act as new predictors for sea ice of the Bohai Sea. We also analysis and explain the influence mechanism of the two new factors.

**Key words:** Bohai Sea; MODIS data; pentadly averaged time series; distance between sea ice edge and the coast; key factor