

渤海海冰距离侯平均时间序列构建与分析

李彦青¹ 苏洁¹ 汪洋² 郭晓葭¹ 翟梦茜¹

1. 中国海洋大学 青岛, 中国 266100

2. 中科院 海洋环流和波浪重点实验室 青岛 中国

摘要 本文以渤海海冰为研究对象, 首先利用 MODIS 1B 数据, 绘制渤海的真彩图, 在此基础上采用人机交互方式绘制海冰的外缘线, 并计算辽东湾、渤海湾和莱州湾沿基准方向的海冰离岸距离, 构建了自 2001 年至 2011 年 11 年冬季的三个海湾海冰外缘线离岸距离的侯平均时间序列。通过对侯平均序列各种特征的统计和分析, 获取了三个海湾的海冰变化特征。通过本文的研究发现, 在研究时段渤海海冰冰情较重的年份是 2001 年、2010 年和 2011 年, 但各海区变化趋势不是完全一致的, 而且在冰情较重的三年的各海区冰情轻重也有很大差别。通过统计三个海湾每年海冰距离最大侯及所对应的时间, 辽东湾比渤海湾和莱州湾出现最大海冰距离要晚一些, 在统计过程中也发现同一个海湾最大海冰距离发生时间越晚, 该年最大海冰距离值往往越大。对三个海湾海冰生消的季节变化而言, 渤海湾和莱州湾在大部分年份有着更为相似的变化趋势, 与辽东湾有着较大差别。还有一个现象是, 近年莱州湾的海冰冰情常常重于渤海湾。同时本文还利用 NCEP 的 500 百帕位势高度和气温日平均数据, 分别从侯时间序列角度和年际变化变化角度分析了副高和寒潮对渤海海冰的影响。结果指出, 太平洋副高脊线位置、副高面积和副高强度与渤海海冰离岸距离的超前相关都呈明显负相关关系, 副高西伸脊点对渤海海冰影响不大。前两个指数对辽东湾海冰影响最大, 副高强度则对莱州湾海冰影响更大, 渤海海冰对副高面积的反应比副高基线位置和强度更快。各海湾每个冬季发生最大海冰离岸距离之前的寒潮次数和路径的与渤海海冰有着密切关系, 每年的最大海冰离岸距离受之前发生的寒潮次数的影响, 寒潮次数多的年份, 冰情往往偏重。侵入渤海寒潮次数较多、路径以西向占优、且强度较大, 可能是造成 2011 年莱州湾海冰偏重的原因。

关键词 渤海 MODIS 数据 侯平均 海冰距离 副高 寒潮

1. 前言

渤海是我国纬度最高的内海, 面积 7.7 平方 km, 平均水深 18 米。海区半封闭, 由三个海湾组成: 位于北部的辽东湾, 位于西部的渤海湾和位于南部的莱州湾。渤海也是北半球纬度最低的结冰海域。渤海海冰都为一年冰, 冰期一般从该年 11 月下旬到次年的 3 月上旬。海冰严重时, 不仅是自然灾害, 也会造成很大的经济损失, 如 1969 年的渤海大冰封, 整个渤海被坚冰封堵了 50 天之久, 多艘客货轮被困, 船只被挤压变形, 钻井平台被推倒, 损失惨重; 即使是在常年, 渤海的渔业、港口贸易、运输、石油平台等也受其影响。所以对海冰的监测和预报非常重要。

随着卫星遥感技术的发展, 卫星遥感精度不断地提高, 卫星遥感数据得到越来越广泛的应用。同时, 卫星遥感数据也成为海冰的研究中一个很重要的研究课题, 针对渤海海冰, 由于渤海范围较小, 所以对卫星的精度有着更高的要求, 近岸泥沙等的影响, 也为海冰反演造成了很多待解决的问题。目前, 已有的研究中, 利用冰和水反射率、亮温的差异, 可以将两者区分, 进行冰密集度的反演(吴龙涛等, 2010), 但碎云区容易判别为小冰区。利用波段 2、6 的比值可以很好地将海冰与海水、云区分开(郭衍游等, 2010), 但是与泥沙等悬浮物不易区分, 会造成误判, 要结合热红外波段才能进一步区分, 而近红外波段的分辨率比可见光低。因此, 目前的反演精度下, 根据反演的海冰密集度计算的海冰面积还具有一定的误差, 特别是对莱州湾和渤海湾这样的泥沙情况较严重的海区。

以往的抓住每年的最大结冰面积或离岸距离来研究海冰的年际变化固然具有重要的意

义,但是对于揭示每年海冰的生消规律等细节却是不足的。本文的工作是构建海冰外缘线离岸距离的候平均序列,以便从更小的时间尺度上研究海冰。第一步是利用 MODIS 数据获取海冰离岸距离,为了减小反演算法引起的误差,本研究采用人机交互方式获取外缘线,更为准确地获得海冰外缘线离岸距离的数据。另外,以往研究多将整个渤海的海冰变化作为一个整体研究,但实际上,渤海虽然面积很小,但是三个海湾的地理、水文、环境条件是存在一定差异的,三个海湾每年的冰情发展趋势也有不同。因此,本文分别构建了三个海湾的海冰离岸距离时间序列,以更好地研究渤海不同海湾的冰情发展规律。

获取海冰距离时间序列的基础上,进一步对海冰变化的规律及其影响因素进行研究。关于渤海海冰与渤海冬季气温的关系以往研究得很多,海冰冻结的主要原因是大气和海冰的热力耦合作用,降温的幅度和持续时间会直接影响到海冰,由于负积温资源时空分布,与渤海冰清的轻重有密切关系(顾卫等, 2002),分析获得定量的海冰面积和气温的关系,利用其可以对海冰面积进行模拟和预测(岳海波等, 2009)。另外副热带高压、极涡、大气环流,以及太阳黑子等都是与渤海海冰相关的因子(白珊等, 2001; 耿淑琴等, 2001; 李剑等, 2005; 张云吉等, 2007)。以往对于渤海海冰影响因子的研究也大部分关注的是年际变化,本文对影响因子的分析主要分为两部分,第一,配合海冰候平均时间序列,利用副高指数的候平均序列研究前期副高指数与海冰的关系;第二,从年际变化的角度分析寒潮过程与海冰变化的关系。

2. 数据来源及处理

2.1 遥感数据简介及处理

本文利用的数据来源是 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer),中等分辨率成像光谱仪,该光谱仪搭载在两颗卫星上, EOS-TERRA 和 EOS-AQUA,将实施观测数据通过 X 波段向全世界广播。MODIS 从可见光到热红外有 36 个波段,波长范围为 0.4-14.4 μm 。MODIS 的分辨率很高,两个通道的空间分辨率可达 250m, 5 个通道为 500m, 29 个通道为 1000m,刈幅达到 2330km,可同时获取地球大气、海洋、陆地、冰川雪盖等多种环境信息。数据从 MODIS 的网站上可以免费下载(网址为 <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>),使用的数据是 MODIS 的 1 级产品,是未经过任何处理的卫星原始数据,包括 MODIS 1B 的 500m 分辨率的数据和 MODIS 03 的地理信息数据。

数据处理具体步骤如下:

2.1.1 获取渤海真彩图

主要经过以下几个过程:首先读取 1-7 通道的数据,并将 1、2 通道 250m 的数据差值成 500m 的精度;然后对数据进行订正,各个通道都要进行太阳高度角订正和几何校正等,对投影网格内出现的空值现象,还有进行黑点差值,用差值的办法对图上的黑点进行填补;最后截取图像或者拼接图像,就可以获得渤海的真彩图。整个处理过程是通过 IDL-ENVI 软件实现的。

2.1.2 确定外缘线

在真彩图的基础上,利用 IDL-ENVI 软件研制了人机交互软件,绘制渤海的海冰外缘线。首先在三个海湾都确定好计算海冰距离的基准点和基准线,海岸线上基点及相应指向点为:辽东湾为 ($40^{\circ} 50' \text{ N}$, $121^{\circ} 50' \text{ E}$) ~ ($39^{\circ} 50' \text{ N}$, $120^{\circ} 45' \text{ E}$),渤海湾为 ($38^{\circ} 43' \text{ N}$, $117^{\circ} 35' \text{ E}$) ~ ($38^{\circ} 41' \text{ N}$, $119^{\circ} 46' \text{ E}$),莱州湾为 ($37^{\circ} 12' \text{ N}$, $119^{\circ} 10' \text{ E}$) ~ ($37^{\circ} 50' \text{ N}$, $119^{\circ} 46' \text{ E}$),见图 1 中蓝线。该基线位置和方向与国家海洋局发布预报的标准是一致的。

从真彩图中,可以清楚地看到渤海各个海湾的海冰范围,近岸的泥沙等十分明显,云和

海冰也能很好地分辨,说明分辨率 500m 的真彩图可以很好地反应渤海的冰情,实现冰外缘线的手绘。手绘海冰外缘线的程序,程序会输出所外缘线和基准线交点与对应基准点的距离,即为海冰距离数据。图 1 为手绘外缘线的结果图,日期是 2010 年 1 月 13 日。如图所示,图中岸线上的红点为基准点,蓝色实线为基准线,绿色实线就是手绘的海冰外缘线,蓝色实线和绿色实线的交点和对应红点之间的距离即为海冰距离数据。

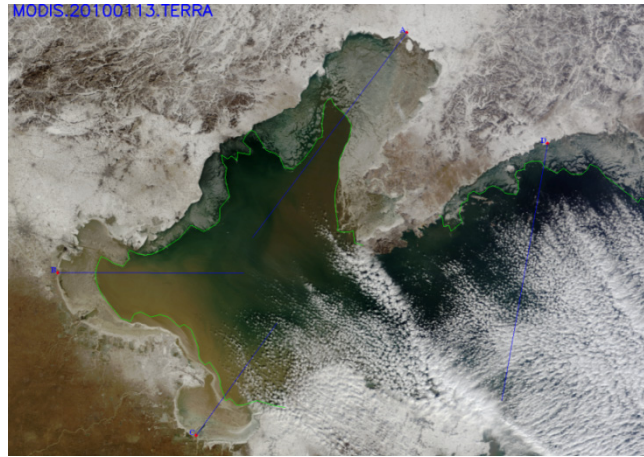


图 1-外缘线分析输出图 (日期 2010.1.13)

2.2 NCEP 格点化数据

NCEP(National Centers for Environmental Prediction)数据具有覆盖范围广、时间序列长的优势,能够获得最新到 2011 年的数据,水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。本文主要使用 500hPa 位势高度和气温的再分析日平均数据。参考中国气候中心 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》,西北太平洋副高定义为,东亚及西北太平洋地区 500hPa 位势高度大于等于 588 位势米的区域,本文各副高指数的计算方法如下:

- 1) 副高脊线位置: 侯平均意义下, 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: 侯平均意义下, 位势高度大于 588 位势米的网格点数。
- 3) 副高强度指数: 侯平均意义下, 位势高度大于 588 位势米网格点的位势高度平均值与 587dagm 之差值的累计值。
- 4) 副高西伸脊点位置: 侯平均意义下, 在 $90^{\circ}\text{E} - 180^{\circ}\text{E}$ 范围内, 588 位势米最西格点所在的经度。

利用日平均气温取渤海附近 9 点平均计算渤海日平均气温,继而统计逐日降温(即当日平均气温减前一天的平均气温)。同时,通过统计欧亚大陆的连续 7 天的逐日降温达到 10°C 以上的位置,确定降温范围,判断冷空气的路径,并统计寒潮发生次数。

3.海冰距离时间序列构建分析

对 MODIS 数据进行上述处理,获得了 11 年的辽东湾、渤海湾和辽东湾三个海湾海冰外缘线离岸距离序列,从 2001 到 2011 年,每年从上一年 12 月 1 日到该年的 3 月 10 日,每五天进行平均,得到海冰距离的侯平均时间序列。图 2 为辽东湾、渤海湾、莱州湾各自 11 年的海冰距离图,从图中可以看到三个海湾不同的变化趋势。

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 天和该天之后 1-2 天的真彩图,辅助判断海冰外缘线的位置,以提高准确率。但受厚云等天气条件的影响,11 年的数据中也存在一些数据的空缺,在分析中将这一侯去除,在之后与大气指数做相关分析时,也将对应的大气指数去除,使得每侯的数据相互对应。

由图 2 可知,11 年中,各海湾海冰变化存在着不一致性。辽东湾因为纬度最高,海区

也最大，所以海冰离岸距离通常是最大的，因此海冰距离明显比另两个海湾大。辽东湾的最大海冰离岸距离出现在 2001 年（指 2000—2001 年度）和 2010 年（2009—2010 年度），这两年海冰沿基准线方向最大的距离均达到 200km 以上，在这两年中，2001 比 2010 年最大冰距离稍大。2011 年海冰离岸距离为 150km 左右，为海冰距离第三大的年份。冰情偏轻的年份是 2002 年，最大海冰离岸距离在 75km 以下。

渤海湾虽然纬度比莱州湾高，但海冰离岸距离相对于莱州湾并无明显偏大，相反在很多年份，莱州湾海冰离岸距离都明显大于渤海湾，如 2003、2004、2006、2009 和 2010 年。渤海湾的冰情最严重也是在 2001 年，最大海冰离岸距离接近 80km。而近两年的趋势与辽东湾不同，2011 年海冰离岸距离最大值明显高于 2010 年。冰情偏轻的年份是 2002 和 2007 年。莱州湾的冰情趋势与其他两个海湾有着明显差别，辽东湾和渤海湾的最大值的出现年份是 2001 年，而 2001 年莱州湾的海冰离岸距离却并不严重，甚至属于偏轻的年份。莱州湾冰情最重的是 2011 年，海冰离岸距离很明显地高于其他年份，已经接近了 120km，其次是 2010 年，海冰离岸距离也达到了 80km。排第三位的是 2009 年，海冰离岸距离约为 40km，其他年份最大值基本在 40km 以下。

从图 2 还可以看出，各海湾在每年冰期内的变化趋势也存在不一致。其中，辽东湾出现最大海冰离岸距离的时间也明显与其他两个海湾明显不同，如辽东湾在 2001 和 2010 年都出现在第 15 候（即 2 月 11 日至 15 日），而另两个海区这两年出现时间早于此，2001 年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，2010 年这两个海湾最大值都出现在 11 候。

在大部分年份中，渤海湾和莱州湾变化趋势较一致，即海冰距离的峰值和谷值出现的时间对应得较好。这是因为这两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变化。但莱州湾也有与渤海湾冰情发展不一致的几个年份，如 2001 年，渤海湾和辽东湾变化趋势较相近，都达到 11 年中海冰离岸距离的最大值，但莱州湾这年的冰情却并不很严重；而 2011 年的情况则是虽然严重冰期由于数据缺失，不能确切地判断莱州湾和渤海湾出现最大海冰离岸距离的具体时间，但很明显莱州湾的在 11 年中离岸距离最大值发生得最晚、冰情也是最严重的一年，辽东湾这一年有两个峰值，分别出现在第 12 和第 15 候，离岸距离明显小于 2001 和 2010 年。渤海湾 2011 年的最大海冰离岸距离也不如 2001 年的大。

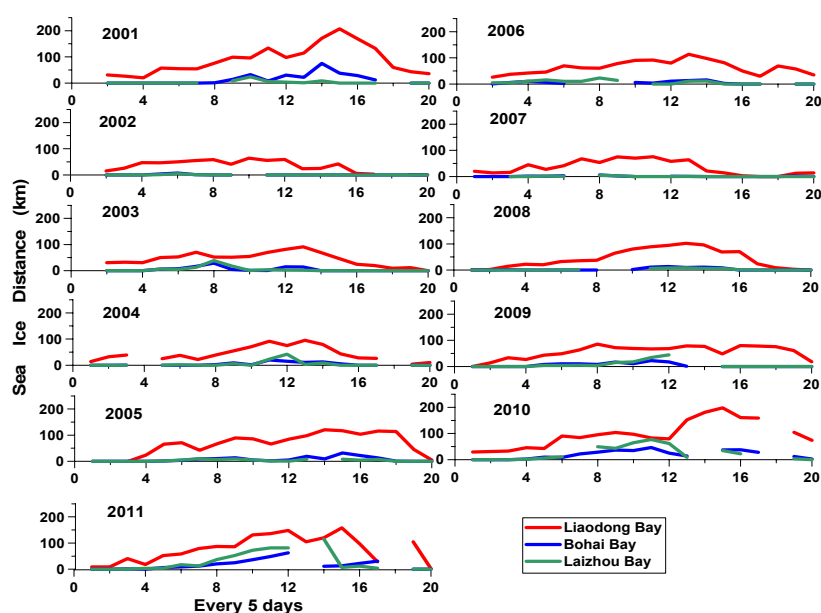


图 2-2001-2011 辽东湾、渤海湾和莱州湾候平均海冰离岸距离变化（横轴为时间/候）

各海湾海冰离岸最大距离出现的时间的不一致性可以更清楚地从每年海冰最大值和发生时间的散点图（图 3）看出。图 3 给出了一个大致的规律，即海冰离岸距离最大值发生的时间越晚，该年海冰离岸距离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，首先是晚冬经过前期长时间的降温积累，负积温更大，负积温是与海冰产生密切相关的，其次是前冬的气温升降会造成海冰的不断地生成和融化，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，冰期间的海冰融化不容易造成海区海水的迅速升温，因此比小的海区更符合晚冬容易发生严重冰情这一规律。

图 4 进一步统计了三个海湾每年最大冰距离发生时间频数。辽东湾最大海冰距离的发生时间相对集中，除三个年份外，其余都是在 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，渤海湾最早的一年是发生在第 6 候，即 12 月底，最晚的年份是 15 候，在二月下旬，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，故最大海冰离岸距离通常是发生在 1 月份。

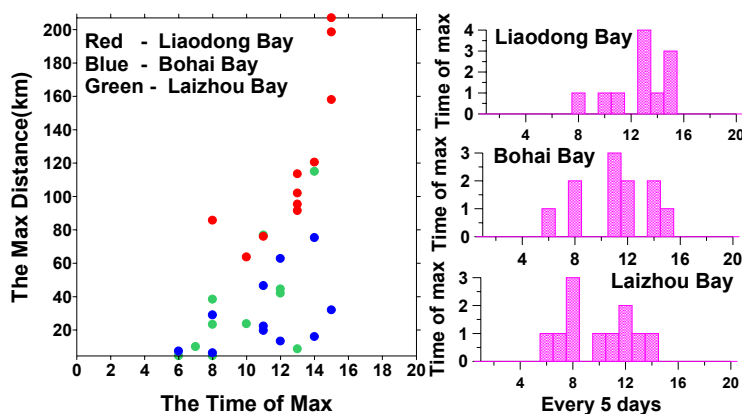


图 3 -最大冰距离及其发生侯的散点图

图 4-每年最大冰距离发生时间统计

(起始时间是 12 月第一候，终止时间是 3 月第二候)

4. 海冰变化的成因分析

值得注意的是，渤海湾和莱州湾 2010 年和 2011 年冰期明显增长，而且海冰离岸距离值也较大，属于冰情较重的年份，特别是莱州湾，达到了 30 年一遇的海冰结冰范围。这是是否是由于近年的大气环流和局地气象条件发生了较大的变化？我们知道渤海海冰主要受冬季寒潮影响，寒潮所带来的大风降温为渤海海冰的生成和发展带来直接的影响。另外，在以往的研究中可以看到，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。本文这里首先从候时间序列的角度讨论副高指数与渤海海冰的关系，继而从年际变化的角度分析寒潮强度对渤海海冰的影响。

4.1 海冰变化与副高的关系

与海冰离岸距离数据对应，各项指数也构造为 11 年的候平均时间序列，并与三个海湾海冰离岸距离序列做超前相关，相关系数如图 5 所示。图中横轴为副高指数超前海冰离岸距离变化的时间，单位为候。实线是不同海湾海冰距离与副高指数的相关系数，虚线为各海区 95%的置信线。

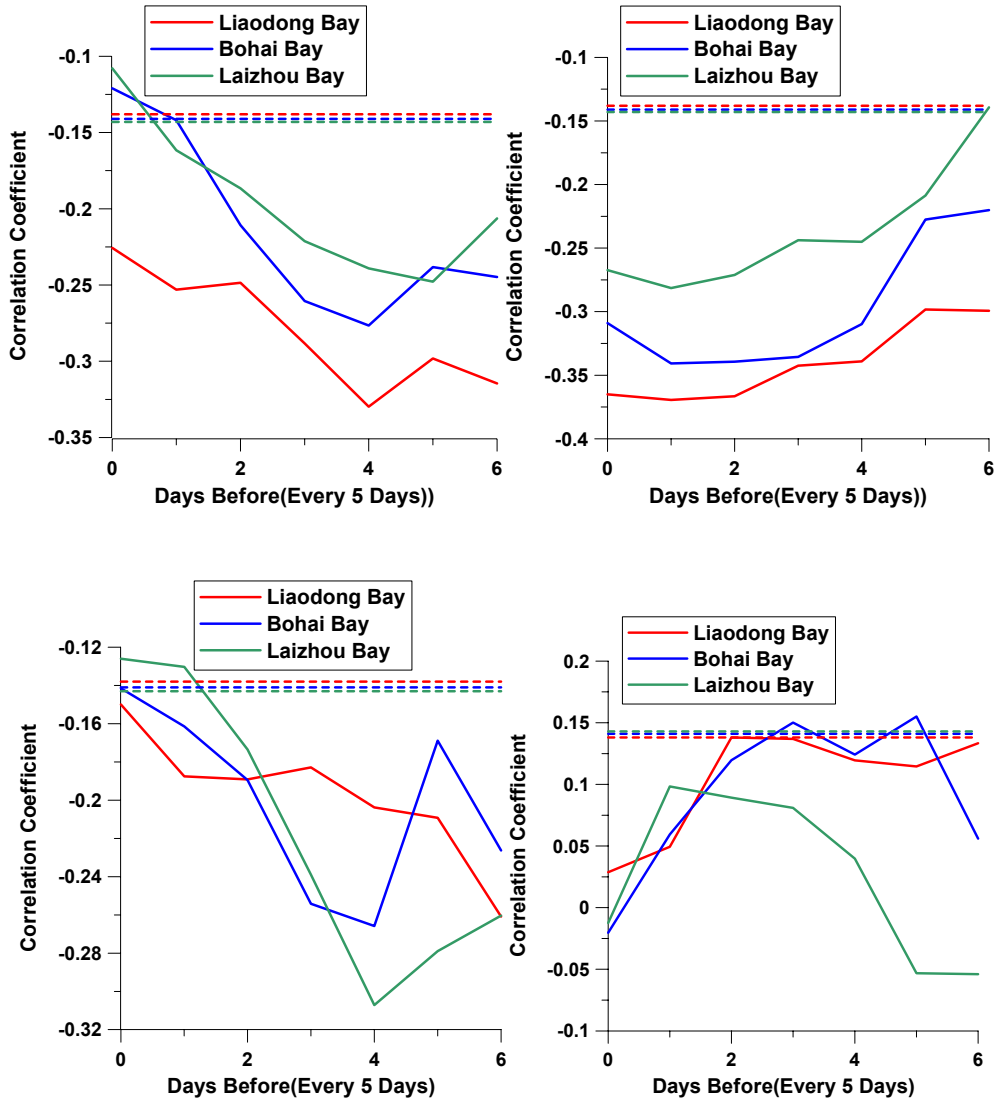


图 5-副高指数（左上：基线位置；右上：面积；左下：强度；右下：西伸脊点）与海冰距离的相关系数

图 5（左上）显示，三个海湾的海冰离岸距离与副高脊线位置都呈负相关，即副高脊线所处纬度越高，海冰冰清越轻。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会对冬季冷空气的南下有所阻碍，使渤海冬季气温偏高，不利于海冰的生成。三个海湾中辽东湾和渤海湾都是副高脊线超前海冰离岸距离 4 候相关最强，莱州湾是超前 5 候相关最强，说明莱州湾对副高脊线位置的响应比另两个海湾稍微滞后。而且，在三个海湾中辽东湾的海冰变化受副高影响最大，超前 4 候的相关系数为-0.33，其次为渤海湾，超前 4 候的系数为-0.28，莱州湾相关相对较弱，副高脊线超前 5 候系数为-0.25。

图 5（右上）中三个海湾的海冰离岸距离与副高面积也都是负相关，这也很好理解，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。三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 候，其中辽东湾最大为-0.37，其次为渤海湾-0.34，莱州湾是最小的-0.28。可见，渤海海冰对副高面积的响应相对于脊线位置更快，三个海湾相比，副高面积对也是辽东湾海冰影响更大。

同样，副高强度与海冰离岸距离也呈负相关关系（见图 5 左下）。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。与前两种指数不同的是，在三个海湾中，副高强度对对莱州湾的影响是最大的，渤海湾次之，而对辽东湾的影响最小。其中莱州湾和渤海湾都是副高强度超前 4 候时相关系数最大，分别为-0.31 和-0.27，辽东湾最大相关系数却是副高强度超前 6 候（相关系数为-0.26）或更长时间。

副高西伸脊点表示的是副高的经向伸展程度，图 5（右下）显示大部分情况下副高西伸脊点与海冰离岸距离为正相关关系，但只有渤海湾的海冰距离与副高西伸脊点的相关超过了置信，而且相关系数不高，所以渤海海冰对副高西伸脊点的响应很弱。

4.2 海冰变化与寒潮的关系

海冰的生成和发展最直接的影响无疑是冬季气温，而寒潮是影响渤海冬季气温的主要因子。寒潮天气是一种大规模的强冷空气活动过程，其主要特点是给途径之处带来剧烈降温和大风，有时还伴有雨、雪、雨淞或霜冻。中央气象台以过程降温和温度负距平相结合的方法来划定冷空气活动强度，过程降温大于 10℃，温度负距平绝对值大于 5℃定义为寒潮。根据这一定义，我们统计了 2001-2011 年冬季到达渤海的寒潮路径，图 6 是每年海冰最大距离发生前各种路径的寒潮统计结果，其中纵轴为某个方向的寒潮发生的次数。通常，冷空气入侵我国主要有四条路径：西北路，东路，西路，东路加西路。如图 6 所示，在研究时段对渤海区域产生影响的寒潮主要以西北路和西路为主。

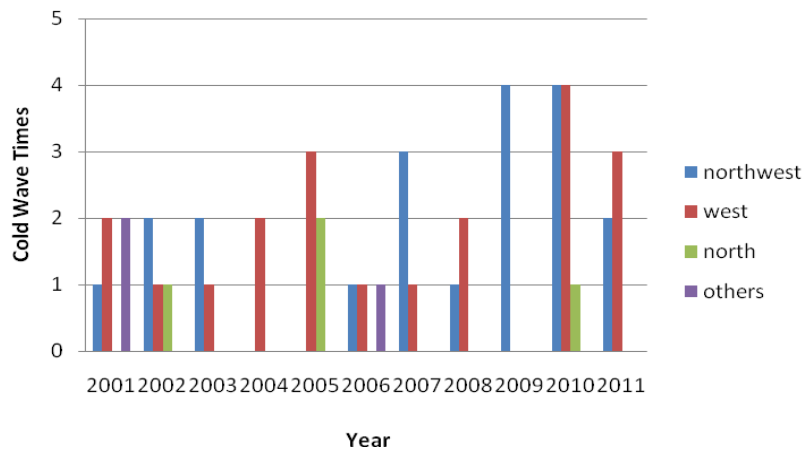


图 6-2001-2011 年寒潮路径统计

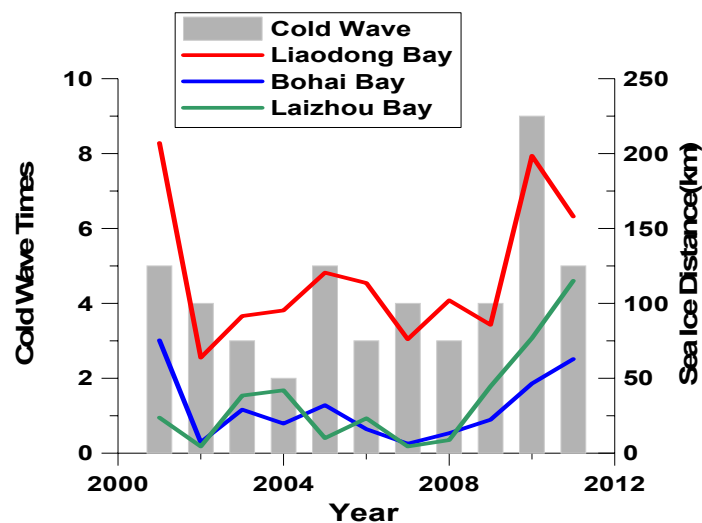


图 7-2001-2011 年渤海海冰距离最大值及寒潮发生次数

关于寒潮强度与渤海气温的关系已有较多的研究,本文进一步的分析结果表明,寒潮次数和路径与渤海海冰离岸距离也具有密切的关系。图 8 中彩色直线是渤海三个海湾每年海冰离岸距离的最大值,灰色柱形图为自前一年 11 月 1 日至海冰离岸距离最大值出现前发生的寒潮次数,由图可见,在每年最大海冰离岸距离出现之前发生的寒潮次数越多,当年的冰情往往越重。

同时寒潮路径的影响也非常值得注意。2010 年寒潮次数是最多的,以西向和西北向为主,两种类型的寒潮发生次数相近,这一年三个海湾的冰情都属于偏重的年份。2001 和 2011 年寒潮发生次数相差不大,辽东湾和渤海湾海冰距离都较大,但莱州湾这两年冰情差距较大,2011 年海冰远大于 2001 年。分析这两年的路径发现,2011 年到达渤海的寒潮,路径为西向的寒潮占优,加之强度较大,可能是造成 2011 年莱州湾海冰偏重的原因之一。

5、小结

本文利用 MODIS 真彩图像,采用人机交互方式绘制渤海海冰外缘线,计算获得了 2001 至 2011 年 11 年冬季渤海三个海湾的海冰外缘线离岸距离平均时间序列。并在此基础上分析研究了各海区海冰的不同变化趋势、年际和季节性变化特点及与副高和寒潮的关系,主要结论如下:

- 1、三个海湾海冰具有不同的年际变化特点,辽东湾冰情最重的年份依次为 2001、2010、2011,渤海湾最重的依次是 2001、2011、2010,莱州湾最重的 2011 和 2010 年,2001 年冰情却属于偏轻的年份。虽然莱州湾为地理位置最南的海区,近年莱州湾的海冰冰情常常重于渤海湾。
- 2、从季节变化的角度看,有海冰最大值发生越晚,则冰情越重的趋势。在大部分年份渤海湾和莱州湾有着相似的季节变化特点,但与辽东湾有着较大差别。辽东湾海冰离岸最大值通常出现的时间比其他两个湾晚,通常是出现在 2 月份,渤海湾和莱州湾最大值通常出现在 1 月份。
- 3、副高与渤海海冰具有密切关系,副高脊线位置、副高面积和副高强度与渤海海冰离岸距离的超前相关都呈明显负相关关系,副高西伸脊点对渤海海冰影响不大。前两个指数对辽东湾海冰影响最大,副高强度则对莱州湾海冰影响更大,渤海海冰对副高面积的响应比副高基线位置和强度更快。
- 4、各海湾每个冬季发生最大海冰离岸距离之前的寒潮次数和路径的与渤海海冰有着密切关系,每年的最大海冰离岸距离受之前发生的寒潮次数的影响,寒潮次数越多,冰情往往偏重。侵入渤海寒潮次数较多、路径以西向占优、且强度较大,可能是造成 2011 年莱州湾海冰偏重的原因。

参考文献

- [1]吴龙涛,吴辉碁,孙兰涛等.MODIS 渤海海冰遥感资料反演.中国海洋大学学报, 36 (2): 173-179.
- [2]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, 19 (1): 84-87.
- [3]顾卫,史培军,刘扬,谢锋,蔡雪鹏.渤海和黄海北部地区负积温资源的时空分布特征,自然资源学报, 17,168-173.
- [4]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,海洋学报, 31 (5): 169-174.
- [5]白珊,刘钦政,吴辉碁.渤海、北黄海海冰与气候变化的关系.海洋学报, 23 (5): 33-41.
- [6]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, 18(3): 25-31.
- [7]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, 26(6): 96-101.
- [8]李剑,黄嘉佑,刘钦政.黄、渤海海冰长期变化特征分析.海洋预报, 22 (2): 22-32.
- [9]刘玉光.卫星海洋学.北京:高等教育出版社, 2009: 337pp.
- [10]韦玉春,汤国安,杨昕.遥感数字图像处理教程.北京:科学出版社, 2007: 298pp.

- [11] 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. 海洋预报, 14 (1): 44-55.
- [12] 方国洪, 王凯, 郭丰义, 魏泽勋, 范文静, 张冬生, 毕家胜. 近30年渤海水文和气象状况的长期变化及其相互关系. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 515-523.
- [13] 任广成, 吴小林, 沈爱华. 冬季西太平洋副高异常变化对我国气温的影响及其与前期北太平洋海温的关系. 气象与科学, 2007, 30(3): 10-13.
- [14] 张启文. 渤海海冰变化与气象条件的关系. 海洋预报, 1986, 3(1): 49-54.