

王萌,武胜利,郑伟,等. 2016. 长时间序列卫星遥感渤海海冰时空分布特征及与气温关系分析. 气象, 42(10):1237-1244.

长时间序列卫星遥感渤海海冰时空分布 特征及与气温关系分析^{*}

王 萌 武胜利 郑 伟 赵长海 刘 诚

国家卫星气象中心, 北京 100081

提 要: 利用气象卫星资料整理分析了 1996—2011 年冬季渤海海冰的时空分布变化: 年际统计表明, 单日海冰面积最大的 3 个年份分别是 2011、2010 和 2001 年, 日最大冰面积均超过 30000 km²; 单日海冰面积最小的 3 个年份分别是 1999、2002 和 2007 年, 日最大冰面积均不超过 10000 km²。分区统计显示, 海冰主要集中在辽东湾, 其次是渤海湾, 莱州湾最小; 辽东湾海冰从东北向西南、从海滨到远海出现频率依次降低; 渤海湾和莱州湾从海滨到远海, 海冰的出现频率逐渐降低。在此基础上, 分析了渤海逐日冰面积与营口站日均气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)及气温的关系, 结果表明渤海逐日冰面积与积温、气温之间均为负相关关系, 其相关性在不同阶段表现不同: 海冰发展期, 渤海逐日冰面积与营口日均气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)之间的相关性最为显著, 相关系数为 -0.90 ; 海冰消融期, 渤海逐日冰面积与营口 3 日(当日与前两日)平均气温的相关性最为显著, 相关系数为 -0.84 ; 通过回归分析方法获得了渤海逐日冰面积与营口日均气温积温及 3 日平均气温的线性回归方程。最后, 结合积温回归方程和 3 日平均气温回归方程, 提出了分阶段的海冰面积预报方程, 并利用该方程对 2013 和 2014 年度冬季渤海冰面积进行预报检验, 检验结果证明上述方程具有一定的预报能力。

关键词: 渤海海冰, 时空分布, 积温, 气温, 气象卫星

中图分类号: P461, P468

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.10.008

Temporal-Spatial Distribution of Bohai Sea Sea-Ice in Long-Time Series and Its Correlation with Air Temperature

WANG Meng WU Shengli ZHENG Wei ZHAO Changhai LIU Cheng

National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Using meteorological satellite data, this paper analyzes the temporal-spatial difference of Bohai Sea sea-ice in winters from 1996 to 2011. The interannual statistics indicate that 2011, 2010 and 2001 are three years with the largest daily ice areas over 30000 km² while 1999, 2002 and 2007 are three years with the smallest daily ice areas, which are less than 10000 km². Sea ice mainly concentrates in Laizhou Bay, followed by Bohai Bay and Liaodong Bay. The frequency of sea ice decreases from northeast to southwest and from seashore to deep sea in Liaodong Bay, and from seashore to deep sea in Bohai Bay and Laizhou Bay. By analyzing the ice area data of Bohai sea and accumulated air temperature ($\leq -2^{\circ}\text{C}$) and air temperature at Yingkou Station, we found that the ice area in the Bohai Sea shows a negative correlation with the accumulated air temperature ($\leq -2^{\circ}\text{C}$) and air temperature at Yingkou Station. During the increasing period of sea ice, the ice area shows a significant correlation with the accumulated air temperature, the regression equation about them is derived and the correlation coefficient is -0.90 ; in the thawing period, the correlation between ice area and the 3 days (that very day and two days before) average temperature is fine, and the

* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306049)资助

2015 年 5 月 11 日收稿; 2016 年 4 月 25 日收修定稿

第一作者: 王萌, 主要从事卫星遥感地表环境及灾害监测评估应用研究. Email: wangmeng@cma.gov.cn

regression equation about them is derived the correlation coefficient is -0.84 . Finally, the equation for the Bohai Sea ice area forecast is proposed by stages, and the equation is applied to sea ice forecasting test in the 2013/2014 winter. The test result proved the equation is good for the Bohai Sea ice area forecasting.

Key words: Bohai Sea sea-ice, temporal-spatial distribution, accumulated temperature, air temperature, meteorological satellite

引 言

渤海地处中纬度季风气候带,是我国最北的内海,也是全球纬度最低的结冰海域之一,每年冬季都会有不同程度的结冰现象。海冰对渤海航运,海上油气勘探,生产和人民生活等都有不同程度的影响,即使在冰情较轻的年份,海冰依然会在个别海区造成灾害(Su et al, 2013; 郝天依等, 2012)。

海冰的形成虽然与海水密度、盐度、水深、冻结等密切相关,但最主要的原因是大气和海水的热力和动力因素综合作用使表层海水温度降低至冰点;热力因素主要指温度的降低及低温的持续时间;动力因素指风速、风向以及海流等;可以说气温的降低幅度和低温的持续时间直接影响到海冰形成、发展、消融的全过程。海冰的变化一定程度上反映了所在海域天气的变化,长时间序列海冰资料对气候变化有一定的指示意义(刘钦政等, 2004)。

渤海海冰是一年冰,冰期约 3~4 个月,由三部分组成:辽东湾、渤海湾和莱州湾,辽东湾是渤海最大的海湾,也是渤海海冰最发育的海区(史培军等, 2003; Xu et al, 2012)。每年冬季随着北方冷空气南下,海冰最先在辽东湾生成,之后随着气温降低和冷空气的不断侵袭,冰情越来越重,1 月中下旬或 2 月上旬达到最重,随后冰情随天气转暖而减轻,2 月中旬渤海南部海冰开始消融,并逐步向北部发展,直至消失,冰情随每年冬季气候差异而不同。营口位于渤海辽东湾底部,营口站气温变化较好地反映了渤海局地气候,冬季渤海的冰情变化与该站气温有着密切的联系(白珊等, 2001; 王圆圆等, 2014)。

本文利用气象卫星资料,首先整理分析了 1996—2011 年冬季渤海海冰的时空分布变化;其次分析了渤海逐日冰面积与营口日均气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)的关系,发现两者有很好的相关性;剔除融冰期样本,通过回归分析方法获得了渤海逐日冰面积与营口日均气温积温的线性回归方程;再次,对比分析了渤海逐日冰面积与营口日平均气温、渤海逐日

冰面积与营口 2 日(当日与前一日)平均气温、渤海逐日冰面积与营口 3 日(当日与前两日)平均气温之间的关系,结果表明,日冰面积与当日平均气温的相关系数为 -0.55 ,与 2 日平均气温的相关系数为 -0.60 ,与 3 日平均气温的相关系数为 -0.64 ;若以海冰发展期和融冰期分别进行分析,发现融冰期渤海逐日冰面积与营口 3 日平均气温的相关性为最显著;通过回归分析获取融冰期渤海逐日冰面积与营口 3 日平均气温的回归方程;最后,结合积温回归方程和 3 日平均气温回归方程,本文提出了分阶段海冰面积预报方程,并利用该方程对 2013、2014 年度冬季渤海冰面积进行了预报检验,检验结果证明上述方程具有一定的预报能力。

1 研究区和数据

1.1 研究区概况

渤海面积约 $7.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均水深 18 m,其地理坐标为 $37^{\circ} \sim 41^{\circ}\text{N}$ 、 $117^{\circ} \sim 123^{\circ}\text{E}$ (Shi et al, 2012a; 2012b; Zhang et al, 2015; 王云秀等, 2010),图 1 所示。海区半封闭,由三部分组成:北部的辽东湾、西部的渤海湾和南部的莱州湾。其中辽东湾位于 39°N 以北,以 $40^{\circ}00'\text{N}$ 、 $121^{\circ}00'\text{E}$ 为中心,面积约 $2.8 \times 10^4 \text{ km}^2$,最大水深达 30 m,是渤海最大的海湾(尹尽勇等, 2011)。



图 1 渤海地理位置图

Fig. 1 Maps of the Bohai Sea Region

渤海地区属于典型的季风气候带,12 月到翌年 3 月,平均气温在 $-4.0 \sim 8.0^{\circ}\text{C}$,最低达到 -25°C (武晋雯等,2009);平均风速为 $5.0 \sim 7.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速为 $20 \sim 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (白珊等,2001)。冬季受亚洲大陆高压控制,盛行偏北风。当冷空气过境,尤其当寒潮入侵时,伴随着强冷风气温急剧下降,海冰面积迅速发展。

1.2 数据来源

本文所采用的数据包括气象卫星数据和气象站点常规观测数据。气象卫星数据包括 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration) 14、NOAA16、NOAA18、FY3(风云三号)-A/B 和 EOS/MODIS,数据进行辐射校正、几何校正、投影转换和裁剪等预处理,利用人机交互方式提取海冰分布信息。气象站点常规观测数据为营口站日平均气温数据,来自国家气象信息中心。

海冰提取分以下 3 种情况:晴空无积雪覆盖,主要利用海冰与海水在可见光、近红外通道反射率的差异,以及红外通道亮温的不同提取海冰;晴空积雪覆盖,表面有积雪覆盖海冰的提取采用冰雪指数 NDSI(Normalized Difference Snow Index)进行,

$$\text{NDSI} = (\text{CH}_{\text{可见光}} - \text{CH}_{\text{短波红外}}) / (\text{CH}_{\text{可见光}} + \text{CH}_{\text{短波红外}})$$

其中 NOAA 和 FY3 系列卫星分别对应的是 1 通道和 6 通道,MODIS 为 4 通道和 6 通道;低云覆盖,有低云覆盖时利用短波红外通道对冰雪的较强吸收有效地识别海冰信息。

2 1996—2011 年渤海海冰的时空分布

2.1 海冰面积的年际变化

1996—2011 年气象卫星监测的渤海海冰初生冰日期及融冰日期表中可见(表 1),海冰一般 12 月上旬生成,2 月底或 3 月上旬消融,冰期为 82~102 d 不等。图 2 是 1996—2011 年渤海逐年日冰面积统计图。图中可见:冰面积最大的 3 个年份是 2011、2010 和 2001 年,冰面积最小的 3 个年份是 1999、2002 和 2007 年;其中 2011 年日最大海冰面积为 32885 km^2 ,2010 年日最大海冰面积为 33015 km^2 ,2001 年日最大海冰面积为 31714 km^2 ;冰面积最小 3 年中,1999 年日最大海冰面积为 6259 km^2 ,

2002 年日最大海冰面积为 9632 km^2 ,2007 年日最大海冰面积为 7078 km^2 ;表 1 可见,冰面积最大的 3 个年份冰期相对较长,平均 92 d,冰面积最小的 3 个年份冰期相对较短,平均 86 d。

表 1 1996—2011 年渤海海冰初生冰日期及融冰日期统计

Table 1 The birth date and melt date of Bohai Sea sea-ice from 1996 to 2011

年	初冰日	消融日	冰期/d
1996	12 月 15 日	3 月 7 日	84
1997	12 月 1 日	3 月 2 日	92
1998	11 月 27 日	3 月 7 日	101
1999	12 月 1 日	2 月 24 日	86
2000	12 月 6 日	3 月 16 日	102
2001	12 月 11 日	3 月 3 日	83
2002	12 月 8 日	3 月 9 日	92
2003	12 月 8 日	3 月 19 日	102
2004	12 月 3 日	2 月 24 日	84
2005	12 月 16 日	3 月 14 日	89
2006	12 月 7 日	3 月 18 日	102
2007	12 月 9 日	2 月 28 日	82
2008	12 月 6 日	3 月 3 日	89
2009	12 月 7 日	3 月 4 日	87
2010	12 月 3 日	3 月 8 日	96
2011	12 月 3 日	3 月 9 日	97

图 2 不仅可以看出海冰面积的年际变化,还可以看到每年中不同月份的变化,且每年的变化规律是不同的。其中 1997、1999、2001、2003 和 2010 年存在相对明显的两个峰值,海冰面积先增加,之后略有减小,然后再增加,峰值分别出现在 1 和 2 月;1998、2000、2004、2006、2008、2009 和 2011 年为一个峰值,峰值出现在 1 月底或 2 月初;1996、2002、2005 和 2007 年海冰面积没有明显的峰值。

图 3 是逐年 12、1、2 和 3 月日最大冰面积统计图,可见:12 月海冰面积相对较小,平均 5300 km^2 ,最大不超过 12000 km^2 ;1 月海冰面积最大,平均 17000 km^2 ,最大超过 30000 km^2 ;2 月次之,平均 16000 km^2 ,最大超过 30000 km^2 ;3 月海冰面积最小,平均仅 1900 km^2 ,且很多年份海冰已经完全消融。

2.2 海冰面积分区时空分布特征

从 1996—2011 逐年 12、1、2 和 3 月海冰分布频率图(图 4)分区统计来看,海冰主要集中在辽东湾,这与辽东湾位置偏北,冬季气温偏低有关;其次是渤海湾,莱州湾最小。将 3 个湾每年的冰面积进行平均求和,计算每个湾所占比例为辽东湾约占 79%,渤海湾约占 16%,莱州湾约占 5%。

整体来看,辽东湾是从东北向西南,从海滨到远海,海冰的出现频率依次降低;渤海湾和莱州湾是从海滨到远海,海冰的出现频率逐渐降低。从时间上

看,辽东湾出现海冰的频率最大,渤海湾和莱州湾出现海冰的频率较小;1 和 2 月是辽东湾、渤海湾和莱州湾一年中海冰出现频率最高的时期。

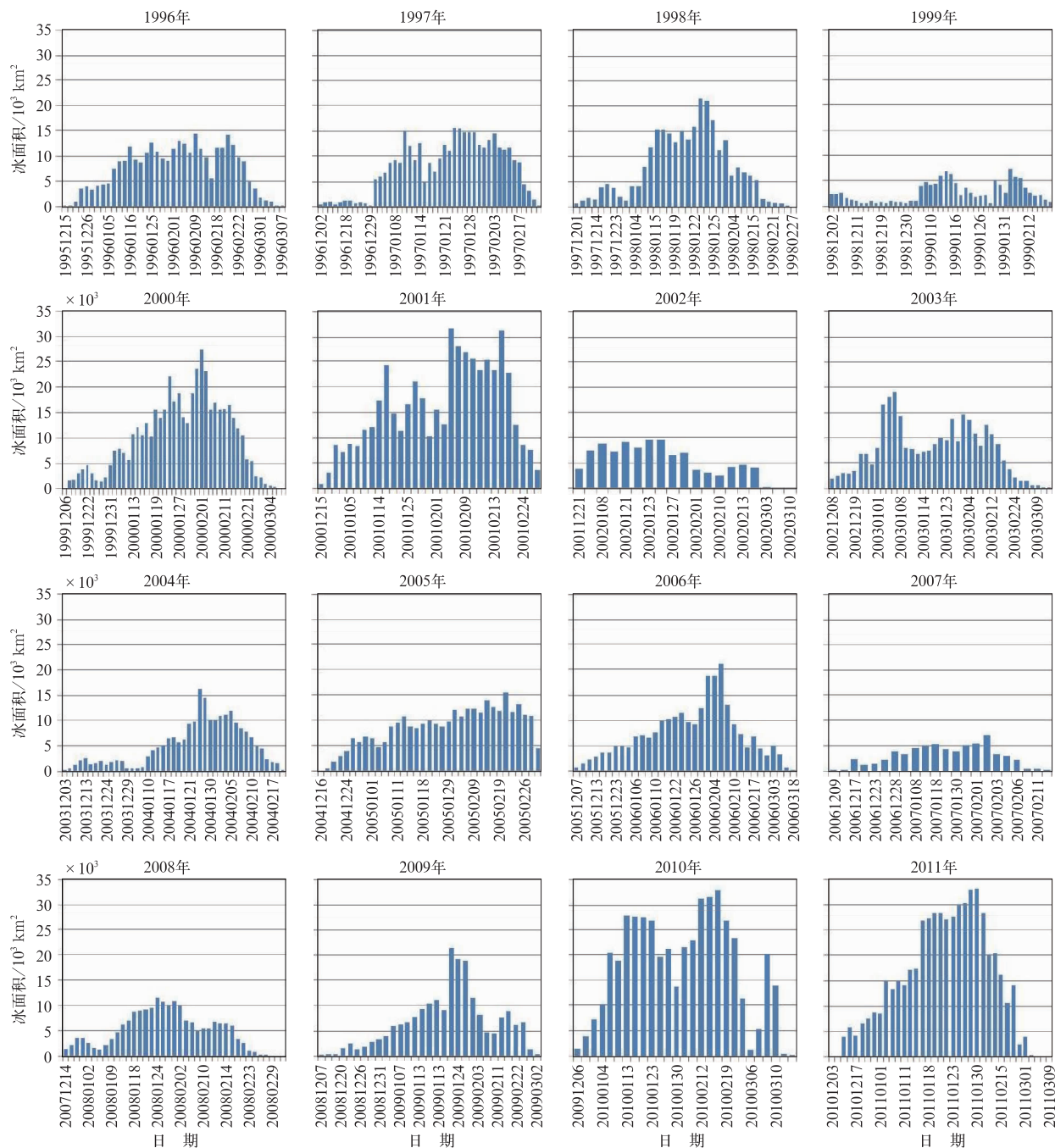


图 2 1996—2011 年渤海逐年日冰面积统计图

Fig. 2 Statistics of sea ice areas of Bohai Sea from 1996 to 2011

3 气温、积温与海冰面积关系分析

众所周知,海冰的发展与该海区的天气变化密

切相关(刘煜等,2009;Galbraith et al,2011),如气温、日照、风等,其中气温起着决定性的作用,Yue 等(2008)提出影响海冰面积变化的主要因素是气温。从海冰的空间分布可见,海冰主要集中在辽东湾,

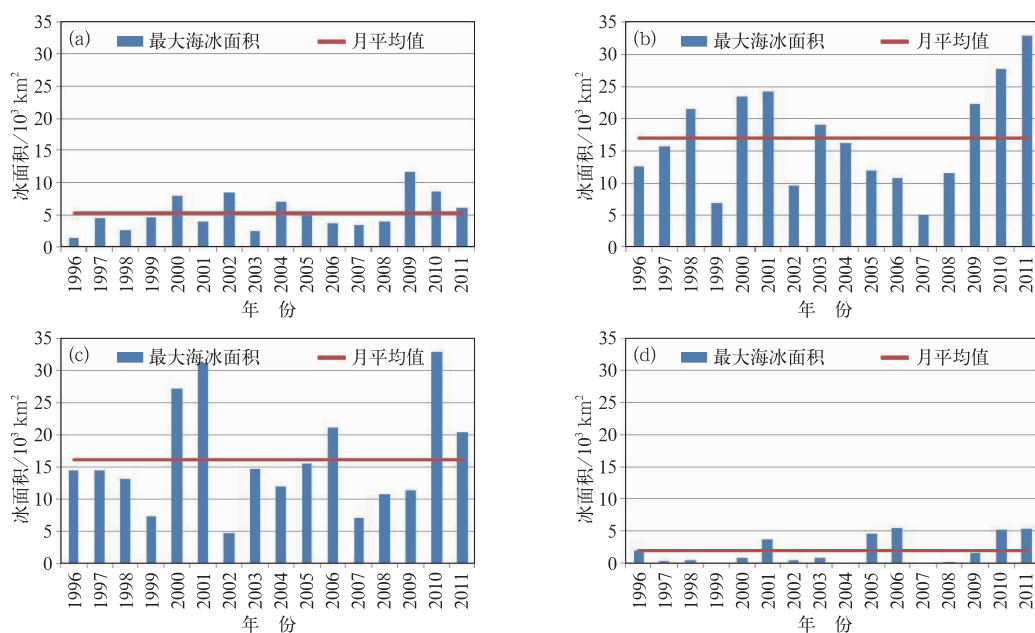


图 3 1996—2011 年 12 月(a)、1 月(b)、2 月(c)和 3 月(d)日最大冰面积统计图

Fig. 3 The daily largest sea ice areas of in December (a), January (b), February (c) and March (d) from 1996 to 2011

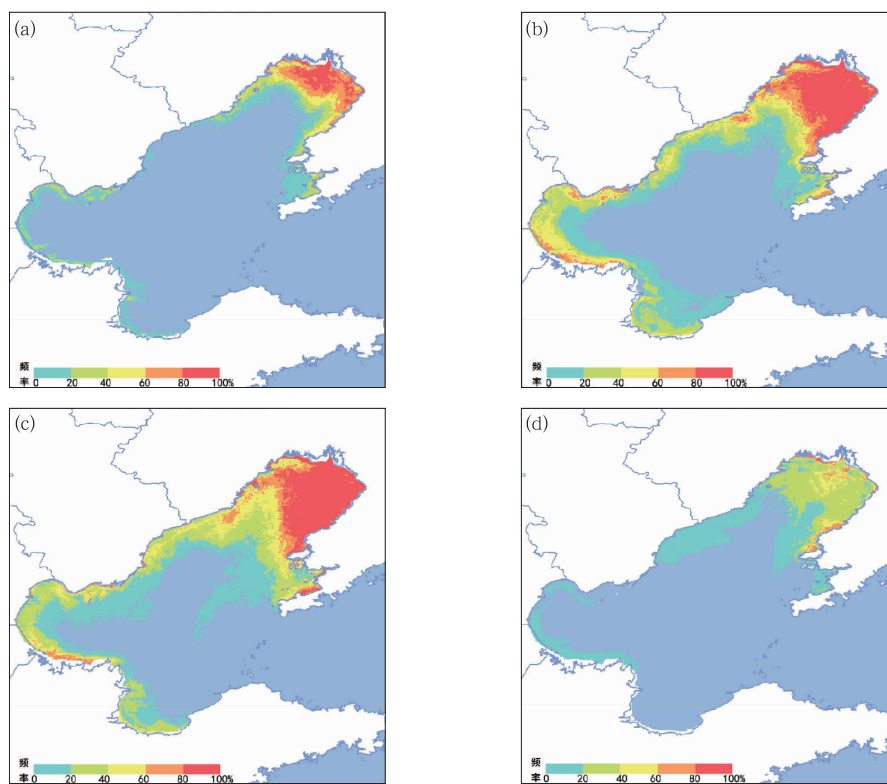


图 4 1996—2011 逐年 12 月(a)、1 月(b)、2 月(c)和 3 月(d)海冰分布频率图

Fig. 4 Sea ice coverage in December (a), January (b), February (c) and March (d) 1996—2011

约占渤海海冰面积的 79%; 每年冬季, 伴随着强冷风气温急剧下降, 海冰自北向南逐渐发展; 营口位于

渤海辽东湾底部, 营口站气温变化较好地反映了渤海局地气候, 冬季渤海的冰情变化与该站气温有着

密切的联系(白珊等,2001;王圆圆等,2014)。本文以积温、气温为代表,探寻海冰变化与天气变化之间的关系。

3.1 积温

积温可以反映出各地气候对某一自然过程所能提供的温度条件或热量资源总量,气象上通常把小于 0°C 的日平均气温累加值称为负积温(顾卫等,2002;高苹等,2012)。由于海水的冰点在 0°C 以下[标准海冰的冻结温度是 -1.8°C (王可光等,1999)],海冰的形成与负积温的多少是有相关关系的。

本文以 -2°C 为基准,对 1996—2011 年连续 16 年冬季渤海逐日冰面积与营口气象站的日均气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)进行了分析,图 5 是这 12 年冬季逐日冰面积和营口日均气温积温的对应点图。从图中可以看到,在海冰发展期,即冰面积持续增长时,冰面积与营口日均气温积温对应点较为集中,大致呈线性关系;在海冰发展后期,冰面积与营口日均气温积温存在一定的波动;在融冰期,即冰面积持续减小时,积温值变化不大,冰面积迅速减小,不同年份的冰面积与积温对应关系差别较大,对应点较为离散。

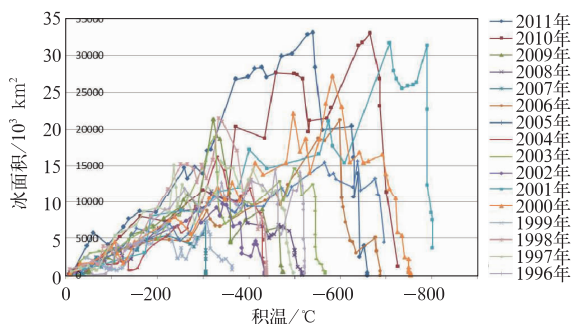


图 5 1996—2011 年渤海逐日冰面积与营口日均气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)对应点图

Fig. 5 The correlation between daily sea ice areas and the Yingkou accumulated air temperature ($\leq -2^{\circ}\text{C}$) over Bohai Sea from 1996 to 2011

如果剔除融冰期样本,营口气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)与渤海冰面积相关系数为 -0.90 ,样本容量为 433,其相关性较好。通过回归分析,建立营口气温积温 $X(\leq -2^{\circ}\text{C})$ 与渤海冰面积 Y 之间的回归方程:

$$Y = -1233.03 - 39.36X \quad (1)$$

令 $Y=0$,计算 X 约等于 -31.3 ,其物理意义为

当积温达到 -31.3°C 左右,理论上渤海即会有海冰生成。结合天气预报,利用营口预报气温,通过计算积温,用式(1)即可预报发展期海冰面积。

图 6 为剔除融冰期样本的营口($\leq -2^{\circ}\text{C}$)日均气温积温与渤海冰面积最小二乘回归直线,从图中可见,营口日均气温积温与冰面积的回归效果比较好。

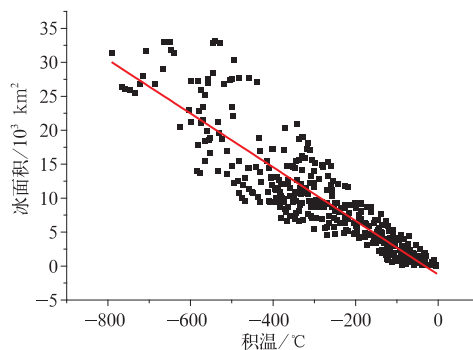


图 6 1996—2011 年渤海逐日冰面积与营口日均气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)回归直线

Fig. 6 Scatter plot of the Bohai Sea daily sea ice areas and Yingkou accumulated air temperature ($\leq -2^{\circ}\text{C}$) from 1996 to 2011

3.2 气温

气温作为天气变化的指示因子,理论上将对海冰面积的变化产生一定的影响,本文分析了冰面积与营口日平均气温之间的关系,分别选取以下 3 种情况进行对比分析:日冰面积与日平均气温,日冰面积与 2 日平均气温(当日与前一日),日冰面积与 3 日平均气温(当日与前两日)。结果表明,日冰面积与当日平均气温的相关系数为 -0.55 ,与 2 日平均气温的相关系数为 -0.60 ,与 3 日平均气温的相关系数为 -0.64 ,样本容量 545 个。上述分析表明,日冰面积与日平均气温、2 日平均气温和 3 日平均气温之间为负相关关系,其中日冰面积与 3 日平均气温之间的负相关性最好,即温度降低冰面积增加,但冰面积对气温降低的反应有一定的滞后性。理论上,标准海冰的冻结温度是 -1.8°C ,日平均气温 $\leq -1.8^{\circ}\text{C}$ 的气温条件均有利于渤海海水产生冻结,因此在通常情况下渤海海冰面积达到最大值的日期并不是日平均气温最低日,而是日平均气温稳定通过 $\leq -1.8^{\circ}\text{C}$ 的终日,即表现为冰面积对气温降低的反应有一定的滞后性。

若以上述海冰发展期和融冰期分别进行分析,

其结果如下:在海冰发展期日冰面积与当日平均气温的相关系数为 -0.50 ,与 2 日平均气温的相关系数为 -0.59 ,与 3 日平均气温的相关系数为 -0.63 ,样本容量 335 个;在融冰期日冰面积与当日平均气温的相关系数为 -0.65 ,与 2 日平均气温的相关系数为 -0.77 ,与 3 日平均气温的相关系数为 -0.84 ,样本容量 210 个。以上分析表明日冰面积与气温之间均存在负相关关系,尤其是在融冰期,日冰面积与 3 日平均气温之间的负相关性最好。

通过回归分析,建立融冰期营口 3 日(当日与前两日)平均气温 X 与渤海冰面积 Y 之间的回归方程:

$$Y = 1652.97 - 1318.83X \quad (2)$$

令 $Y=0$, 计算 X 约等于 1.25, 其意义为当 3 日平均气温达到 1.25°C 左右, 理论上渤海海冰即完全消融。结合天气预报, 通过计算 3 日平均气温, 用式(2)即可预报融冰期冰面积。

图 7 为营口 3 日平均气温与渤海日冰面积最小二乘回归直线, 图 7 中可见, 营口 3 日平均气温与日冰面积的回归效果比较好。

4 冰面积预报检验探讨

上述积温、气温与冰面积的分析表明, 冰面积与积温、气温之间均为负相关关系, 其相关性在不同阶段表现不同。在海冰发展期, 日冰面积与 $\leq -2^{\circ}\text{C}$ 的积温之间的相关性最为显著, 相关系数为 -0.90 , 而日冰面积与日平均气温的相关系数为 -0.50 , 日冰面积与 2 日平均气温的相关系数为 -0.59 , 日冰面积与 3 日平均气温的相关系数为 -0.63 ; 在融冰期, 即温度达到或者超过结冰点温度时, 积温值变化不

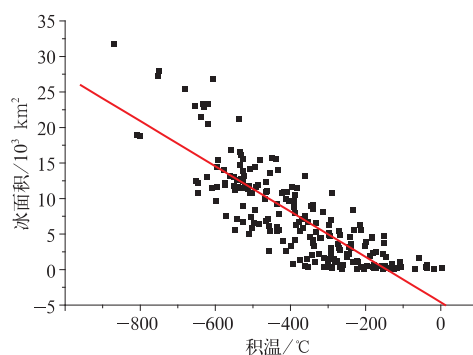


图 7 营口 3 日平均气温(当日与前两日)与渤海日冰面积最小二乘回归直线

Fig. 7 Scatter plot of the Bohai Sea daily sea ice areas and Yingkou 3 day average air temperature

大, 冰面积迅速减小, 此时日冰面积与 3 日平均气温的相关性最为显著, 相关系数为 -0.84 , 而日冰面积与日平均气温的相关系数为 -0.65 , 日冰面积与 2 日平均气温的相关系数为 -0.77 。

综上所述, 本文提出了分阶段的渤海海冰面积预报方程:

$$Y_1 = -1233.03 - 39.36X_1 \quad \text{海冰发展期}$$

$$Y_2 = 1652.97 - 1318.83X_2 \quad \text{海冰消融期}$$

其中 X_1 为营口气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$), X_2 为营口 3 日平均气温(预报当日与前两日)。结合营口预报气温, 计算积温和 3 日平均气温, 理论上即可实现对渤海海冰面积的完整预报。

利用上述预报方程, 结合营口预报气温, 通过计算积温和 3 日平均气温, 对 2013 和 2014 年度渤海海冰面积进行了预报检验, 结果如图 8 所示。图中可见预报冰面积与卫星监测海冰面积尽管个别时段存在一定的差异, 但整体趋势是一致的, 对开展渤海海冰面积预报有一定的应用价值。

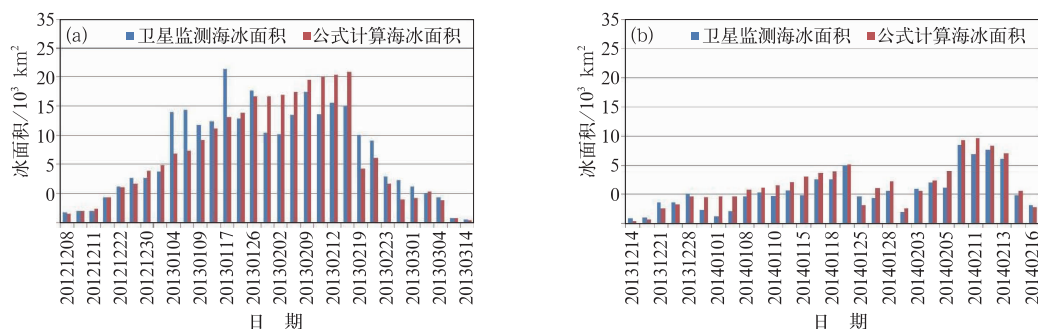


图 8 2013 年(a)和 2014 年(b)渤海海冰面积预报检验

Fig. 8 Bohai Sea sea-ice area forecast test in 2013 (a) and 2014 (b)

5 结论和讨论

本文利用 1996—2011 年气象卫星监测渤海海冰面积和营口站实际观测气温资料,分析了海冰的时空分布变化,讨论了海冰面积与营口气温积温及气温之间的关系,并对海冰面积预测开展了研究,给出了海冰面积预测方程。

年际统计显示,1997、1999、2001、2003 和 2010 年海冰面积存在相对明显的两个峰值,1998、2000、2004、2006、2008、2009 和 2011 年海冰面积为一个峰值,1996、2002、2005 和 2007 年海冰面积没有明显的峰值;单日海冰面积最大的 3 个年份是 2011、2010 和 2001 年,日最大冰面积均超过 30000 km²;单日海冰面积最小的 3 个年份是 1999、2002 和 2007 年,日最大冰面积均不超过 10000 km²。分区统计显示,海冰主要集中在辽东湾,其次是渤海湾,莱州湾最小;辽东湾海冰从东北向西南、从海滨到远海出现频率依次降低;渤海湾和莱州湾从海滨到远海,海冰的出现频率逐渐降低。

渤海逐日冰面积与营口日均气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)及气温之间的分析对比表明:渤海逐日冰面积与营口日均气温积温及气温之间均为负相关关系,相关性在不同阶段表现不同。海冰发展期,冰面积与营口日均气温积温($\leq -2^{\circ}\text{C}$)之间的相关性最为显著,相关系数达-0.90;在融冰期,冰面积与营口 3 日(当日与前两日)平均气温的相关性最为显著,相关系数为-0.84;通过回归分析方法获得了渤海逐日冰面积与营口日均气温积温及 3 日平均气温的线性回归方程。结合积温回归方程和 3 日平均气温回归方程,本文提出了分阶段的海冰面积预报方程,该方程对 2013 和 2014 年度渤海海冰面积的预报整体趋势一致,但由于影响海冰面积变化的因素众多,如气温、风速、大气环流因子等,单一要素的预测会有一定的误差,有待进一步完善。

本文探讨的预测方程对海冰的整体预报有一定的应用价值,但由于渤海三个湾的地理、水文、环境条件存在一定差异,其冰情发展变化也有不同,在冰面积的空间分布变化预测上有待进一步完善。

参考文献

白珊,刘钦政,吴辉碇,等. 2001. 渤海、北黄海海冰与气候变化的关

- 系. 海洋预报, 23(5):33-41.
- 高苹,张佩,谢小萍,等. 2012. 基于海温和环流特征量的江苏省小麦适播期预测. 气象, 38(12):1572-1578.
- 顾卫,史培军,刘杨,等. 2002. 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(2):168-174.
- 郝天依,王式功,尚可政,等. 2012. 环渤海地区大气低能见度气候特征及影响因子分析. 气象, 38(9):1087-1095.
- 刘钦政,黄嘉佑,白珊,等. 2004. 渤海冬季海冰气候变异的成因分析. 海洋学报, 26(2):11-19.
- 刘煜,李宝辉,李春华,等. 2009. 2006—2007 年冬季渤海天气与冰情分析. 海洋预报, 26(1):1-6.
- 史培军,顾卫,谢锋,等. 2003. 辽东湾冬季海冰资源量的空间分布特征. 资源科学, 25(3):2-8.
- 王可光,吴辉碇,王彩欣,等. 1999. 渤海冰期的基本水文气象参量研究. 海洋通报, 18(2):18-27.
- 王圆圆,李贵才,闵文斌,等. 2014. 利用遥感估算区域气温评价站点代表性—以藏东南林芝站点为例. 气象, 40(3):373-380.
- 王云秀,王鑫,李月英,等. 2010. 渤海海域春季水污染的遥感分析. 气象, 36(1):111-114.
- 武晋雯,张玉书,冯锐,等. 2009. 基于 MODIS 的海冰面积遥感监测及其与气温的相关分析. 遥感技术与应用, 24(1):73-76.
- 尹尽勇,曹越男,赵伟,等. 2011. 一次黄渤海入海气旋强烈发展的诊断分析. 气象, 37(12):1526-1533.
- Galbraith P S, Larouche P. 2011. Sea-surface temperature in Hudson Bay and Hudson Strait in relation to air temperature and ice cover breakup, 1985—2009. J Marine Sys, 87:66-78.
- Su Hua, Wang Yunpeng, Xiao Jie, et al. 2013. Improving MODIS sea ice detectability using gray level co-occurrence matrix texture analysis method: A case study in the Bohai Sea. ISPRS J Photogra Rem Sen, 85:13-20.
- Shi Wei, Wang Menghua. 2012a. Sea ice properties in the Bohai Sea measured by MODIS-Aqua: 1. Satellite algorithm development. J Marine Sys, 95:32-40.
- Shi Wei, Wang Menghua. 2012b. Sea ice properties in the Bohai Sea measured by MODIS-Aqua: 2. Study of sea ice seasonal and interannual variability. J Marine Sys, 95:41-49.
- Xu Zhantang, Yang Yuezhong, Sun Zhaohua, et al. 2012. In situ measurement of the solar radiance distribution within sea ice in Liaodong Bay, China. Cold Regions Sci Tech, 71:23-33.
- Yue Haibo, Ji Yonggang, Zhang Xi. 2008. Analysis of effect of environment factors on spatio-temporal distribution of ice in Liaodong Bay with envisat ASAR and MODIS imagery. (Special Publication) ESA SP, n656 SP 2008.
- Zhang Jinqiang, Chen Jing, Xia Xiangao, et al. 2013. Heavy aerosol loading over the Bohai Bay as revealed by ground and satellite remote sensing. Atmos Envir, 1-10.