

# 基于MODIS数据的辽东湾海冰面积特征分析及与气温关系的探讨

左涛<sup>1</sup>, 郭玉娣<sup>2</sup>, 刘彬贤<sup>1</sup>, 王彩霞<sup>3</sup>

(1. 天津海洋中心气象台, 天津 300074; 2. 天津市气候中心, 天津 300074; 3. 天津市滨海新区气象局, 天津 300457)

**摘要:** 利用MODIS卫星遥感数据反演得到2002—2017年辽东湾海冰面积资料,并分析了海冰面积的时空分布特征及年际变化特征。辽东湾初冰日出现在12月上中旬,终冰日出现在3月上中旬,个别年份出现在2月下旬。最大海冰日普遍出现在1月下旬或2月上旬,最大日海冰面积偏大的年份,冰期也相对偏长。进一步分析了辽东湾日海冰面积与营口气象站气温和气温积温( $\leq -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )的相关性,结果显示辽东湾海冰面积与二者均存在显著负相关关系。在此基础上利用回归分析方法建立了辽东湾海冰面积发展期和消融期的预报方程,并在2019/2020年度冬季进行检验。

**关键词:** 辽东湾海冰面积;冰期;气温;积温;卫星遥感;MODIS

**中图分类号:** P731.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)05-0047-06

## 1 引言

辽东湾是我国海冰冰情最严重的海区,冬季受强冷空气影响会有不同程度的结冰现象,每年冬季结冰,次年春季融冰,为典型的一年冰,冰期可达3~4个月。海冰是冬季影响我国北方海洋最主要的灾害之一,严重的冰情会造成很大损失,如船只被冻在海上导致船体挤压变形破裂进水,港湾及航道被封冻,海上石油平台和观测平台等建筑物遭到破坏<sup>[1]</sup>,海水养殖业损失严重<sup>[2]</sup>等。因此,开展海冰监测和预报尤为重要。

我国系统的海冰监测工作开始于20世纪60年代初期,20世纪80年代后开始大量应用卫星遥感技术监测海冰,并获得了长期、连续、大范围和同步实时的监测资料。基于卫星遥感资料,众多学者对渤海海冰的变化特征尤其对长时间的变化特征进行了分析研究<sup>[3-6]</sup>。在海冰变化的影响因子方面,专家指出与海冰联系最直接的是冬季气温<sup>[5,7]</sup>,海冰的发

生和发展与降温幅度和持续时间有关,海冰面积与气温之间呈负相关关系<sup>[5,8]</sup>。负积温作为衡量冬季寒冷程度的指标,也是研究渤海海冰年际变化的重要因子。日平均气温 $\leq -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的积温<sup>[9-10]</sup>与渤海海冰变化存在一定的相关性。另外,副热带高压<sup>[11-13]</sup>、极涡<sup>[11-12]</sup>、纬向环流<sup>[11,14]</sup>、北大西洋涛动<sup>[15]</sup>、太平洋海温<sup>[16]</sup>以及太阳黑子<sup>[12,17]</sup>等都是与渤海海冰变化相关的因子。

以往研究多将渤海海冰变化作为一个整体,但实际上,3个海湾的地理、水文和环境条件存在一定差异,每年的冰情发展趋势也不同。本文选取渤海海冰最发育的辽东湾海区作为研究海域,基于中分辨率成像光谱仪(MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS)卫星数据,通过人机交互方式提取渤海海冰信息,并分析辽东湾海冰面积的时空分布特征。在此基础上,分析辽东湾海冰面积与短期气温和积温的相关关系,并利用统计方法建立辽东湾海冰面积预测模型。

收稿日期: 2020-10-19; 修回日期: 2020-12-26。

基金项目: 天津市气象局博士基金项目(201745bsjj05); 国家重点研发计划(2019YFC1510105)。

作者简介: 左涛(1986-),女,工程师,博士研究生,主要从事海洋气象预报研究。E-mail: zuotao.1986@163.com

通讯作者: 刘彬贤(1974-),男,正研级高级工程师,学士,主要从事海洋气象预报研究。E-mail: 379356841@qq.com

## 2 研究区概况

渤海属于半封闭海区,结冰海域分为3个海区:辽东湾、渤海湾和莱州湾。本文的研究区域为辽东湾,位于39°N以北,以(40°00'N, 121°00'E)为中心,面积约 $2.8 \times 10^2 \text{ km}^2$ ,是渤海最大的海湾。辽东湾属于半封闭海区,有着特殊的海洋气象条件。冬季受到南下的强冷空气影响,海水热量散失,水温迅速降到冰点,且有辽河、大凌河和小凌河等注入,使得海水盐度降低,更易于结冰。

## 3 数据来源及处理

### 3.1 MODIS遥感数据

本文海冰数据主要来自MODIS(包括AQUA和TERRA)卫星数据反演。MODIS数据通过辐射校正、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信息,得到2002—2017年渤海逐日海冰面积等要素数据。本文用到的是2002—2017年辽东湾16个冰期的逐日海冰资料,其中剔除了被云等覆盖过度无法判识的日期。

利用MODIS数据在可见光和近红外通道的冰水直方图统计以及红外通道亮温值,可获得海冰的判识阈值,用于判识海冰信息和生成海冰信息二值数据,在此基础上估算海冰面积。海冰判识中需要去除云区的影响,高云可用远红外通道亮温区分冰与云;低云及雾的反射率和亮温均与海冰相近,海冰在短波红外通道(1.6  $\mu\text{m}$ )有较强的吸收,与低云或雾的较强反射有明显差异,此时可用短波红外通道区分海冰和低云或雾。

海冰判识的主要条件是:

$$\begin{aligned} CH_{2c} \geq CH_2 > CH_{2w} \text{ 且 } CH_{1c} \geq CH_1 > CH_{1w} \text{ 且 } \\ T_{4c} \leq T_4 < T_{4w} \text{ 且 } NDSI \geq NDSI_c \\ NDSI = \frac{CH_1 - CH_6}{CH_1 + CH_6} \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $CH_{2c}$ 、 $CH_{1c}$ 和 $T_{4c}$ 分别为近红外、可见光和远红外通道区分海冰与云的判识阈值, $CH_{2w}$ 、 $CH_{1w}$ 和 $T_{4w}$ 分别为近红外、可见光和远红外通道区分海冰与海水的阈值。NDSI(Normalized Difference Snow

Index)为积雪指数, $NDSI_c$ 为区分海冰与海水的NDSI阈值。

当冰面覆有积雪时,对海冰的判识即成为对冰面上积雪的判识,因而可用积雪判识方法。

### 3.2 气象常规观测资料

气象站点资料来自逐3 h常规地面站点观测资料,时间为2001—2006年的11月—次年3月,经过计算得到站点逐日平均气象要素数据。本文选择营口气象站,用到的气象要素主要是气温以及用气温计算的海冰日对应的积温( $\leq -4^\circ\text{C}$ )。

## 4 2002—2017年辽东湾海冰面积时空特征分析

### 4.1 辽东湾海冰空间变化特征

辽东湾东西北三面被辽宁省环绕,受高纬度影响,冰情重于莱州湾和渤海湾,是渤海冰情最严重的海区。渤海海冰最早在辽东湾北部沿岸浅水区生成,随着冷空气不断侵袭和气温降低,结冰范围逐步由北向南,由沿岸浅水区向海上深水区发展;随着天气逐渐转暖,海冰开始消融,由南向北、由海上向岸边浅水区融化,3月中上旬完全消融。冰情较轻的年份,整个渤海仅辽东湾海区有不足1/3面积的海冰生成,而冰情最重的年份,整个辽东湾均被海冰覆盖。

### 4.2 辽东湾海冰年际变化特征

2002—2017年卫星监测的辽东湾海冰冰期统计结果显示,辽东湾初冰日通常出现在12月上中旬,平均日期为12月9日;融冰日多出现在3月上中旬,平均日期为3月9日,个别年份海冰消融较早,于2月下旬结束。与国家海洋局《中国海洋灾害公报》对比发现,辽东湾海冰存在个别年份卫星监测初冰日偏晚、终冰日偏早和冰期相对偏短的现象,这与初冰日和终冰日前后海冰范围小卫星监测不到有关,另外存在被云过度覆盖无法判识的海冰日,也对结果造成一定的影响。

卫星监测到的辽东湾海冰冰期平均为88 d,最短76 d,最长102 d。2002—2017年期间,辽东湾最

大海冰日均出现在1月下旬或2月上旬,仅2002/2003年度最大海冰日出现在2003年1月上旬(1月5日)。日海冰面积最大值出现在2009/2010年度,约为28 582 km<sup>2</sup>,即整个辽东湾海区都是结冰状态;最小值出现在2001/2002年度,约为5 067 km<sup>2</sup>,不足辽东湾总面积的1/5。最大海冰面积超过辽东湾面积一半以上的年份有2002/2003年度、2004/2005年度、2009/2010年度、2010/2011年度、2011/2012年度、2012/2013年度和2015/2016年度,除2004/2005年度为86 d外,其余均达到90 d以上。海冰面积小于辽东湾1/3面积的年份为2001/2002年度、2014/2015年度和2016/2017年度,对应的冰期也较短,一般在80d以下(见表1)。

图1为2002—2017年卫星监测到的辽东湾最大日海冰面积距平和冰期距平变化曲线。图中可以看出,最大海冰面积与冰期有很好的对应关系,最大海冰面积偏大,冰期也偏长,最大海冰面积偏小,结冰日数偏少。

表1 2002—2017年卫星监测辽东湾最大海冰面积及冰期统计表

年度	最大海冰面积/km <sup>2</sup>	最大海冰面积出现日期	冰期/d
2001/2002	5 067.00	2月1日	76
2002/2003	15 692.11	1月5日	100
2003/2004	13 647.61	1月27日	84
2004/2005	17 244.43	2月11日	86
2005/2006	11 987.03	1月18日	91
2006/2007	9 069.95	2月2日	79
2007/2008	13 525.16	2月4日	85
2008/2009	9 460.96	2月20日	83
2009/2010	28 582.54	2月16日	102
2010/2011	19 863.42	1月29日	92
2011/2012	20 349.51	2月2日	92
2012/2013	23 674.04	2月8日	98
2013/2014	11 411.34	2月11日	80
2014/2015	6 704.66	1月31日	81
2015/2016	20 768.92	2月2日	98
2016/2017	8 815.00	1月24日	80

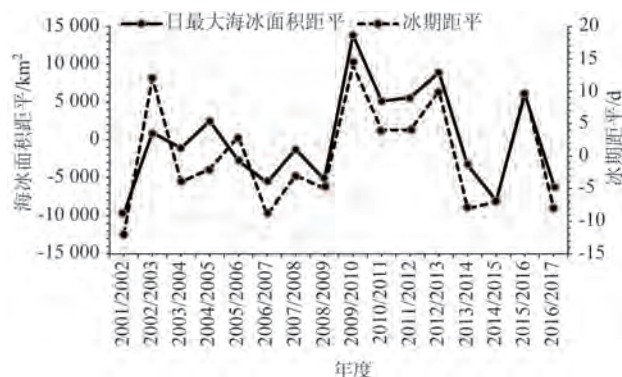


图1 2002—2017年卫星监测辽东湾最大日海冰面积距平和冰期距平变化曲线

## 5 辽东湾海冰面积与气温、积温的关系分析

### 5.1 海冰面积与气温的关系

渤海海冰为浅水内陆海的海冰,受气象条件的影响非常显著,渤海冰情的轻重主要取决于11月—次年3月之间冷空气活动强度<sup>[17]</sup>。冷空气强度大小直接反映在气温上,冬季渤海的冰情变化与气温有着密切联系<sup>[5,10,13]</sup>。

我们分析营口等单站气温与渤海海冰的关系。首先选择营口单站的气温与辽东湾海冰面积进行相关分析,分别计算了当日(0)、前1 d(-1)、前2 d(-2)、当日与前1 d平均、当日与前1 d及前2 d平均气温与辽东湾海冰面积的相关系数,样本容量为162个,结果如表2所示。结果表明,辽东湾海冰面积与上述5种情况下的气温均呈现负相关,且通过了99%显著性检验。营口前2 d和前1 d气温与辽东湾海冰面积的相关性(-0.52和-0.55)大于当日(-0.45),而营口3 d平均气温与辽东湾海冰相关性最大,最大相关系数为-0.57,和王萌等<sup>[5]</sup>的研究结果相似。这说明日海冰面积变化不仅与当日气温有关,和前几日的气温相关性更大,海冰面积对气温的反应有一定的滞后性,也说明达到海水冻结温度的气温不断积累更有利于海冰生成。

将冰期分为海冰发展期和融冰期分别进行分析,结果如表2所示,海冰发展期气温与海冰面积存



表2 营口站气温与辽东湾海冰面积相关系数

	前2 d (-2)	前1 d (-1)	当天 (0)	2 d平均 (-1)+0	3 d平均 (-2)+(-1)+0
整个冰期 (162样本)	-0.52	-0.55	-0.45	-0.55	-0.57
发展期 (116样本)	-0.49	-0.55	-0.44	-0.55	-0.57
融冰期 (61样本)	-0.66	-0.68	-0.66	-0.72	-0.75

在负相关,3 d平均气温与辽东湾海冰面积负相关性最大,为-0.57,样本容量为116个。融冰期气温与辽东湾海冰面积相关系数显著增大,为-0.75,样本容量为61个。

根据上述分析,融冰期气温与海冰日面积具有更好的相关性。绘制海冰日面积与营口站3 d平均气温的散点图(见图2),从图上可以看出二者线性关系非常明显,剔除离散度比较大的点,利用辽东湾融冰期海冰日面积与营口站3 d平均气温,通过回归分析,建立一元线性回归方程:

$$Y = 1\,621.24 - 1\,284.82X \quad (2)$$

样本容量58个,复相关系数  $R = 0.803 > 0.344 = R_{0.01,56}$ ,通过99%信度检验。令  $Y=0$ ,计算  $X$  约为1.26,即当营口站平均气温达到1.26℃左右,辽东湾海冰完全消融。式(2)可以用来预报辽东湾海冰融冰期海冰面积。

## 5.2 海冰面积与积温的关系

负积温能够较好反映出气候对某一自然过程

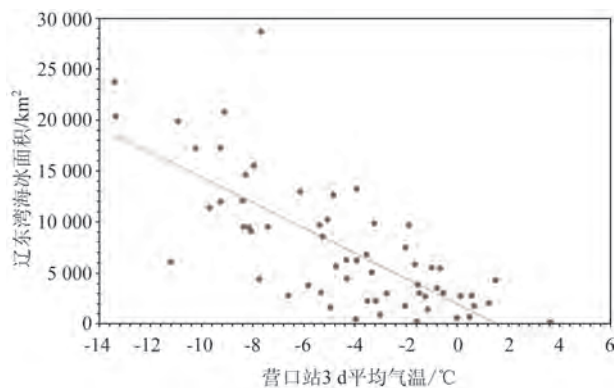


图2 2002—2017年辽东湾日海冰面积与营口站3 d平均气温散点图

的温度条件或热量资源状况,气象上通常把低于0℃的日平均气温累加值称为负积温。研究证明,用日平均气温 $\leq -4$ ℃的积温和日数作为分析研究渤海海冰的气候指标是可行的,因为 $\leq -4$ ℃积温的初日与渤海的初冰日比较接近<sup>[10]</sup>。

以-4℃为基准,对2003—2017年辽东湾海冰日对应的营口站积温进行了计算,并对其与辽东湾海冰面积进行分析。营口站-4℃气温积温与辽东湾海冰面积相关系数为-0.52,样本容量为158个。从逐年海冰与积温对应点图(见图3)中可以看到,在海冰面积增大的过程中,海冰面积与积温大致呈线性关系,即负积温值越大,海冰面积越大;而在海冰消融阶段,即海冰面积减小,负积温变化不大。在计算过程中发现,海冰消融的时间和负积温不再增长的时间基本一致。营口站-4℃气温积温与辽东湾融冰期海冰面积的相关系数为-0.13,样本容量为58个,没有通过95%信度检验,所以融冰期的-4℃积温与海冰面积不存在显著的相关性;而海冰发展期相关系数达到-0.89,样本容量114个,具有显著的相关性。

从辽东湾海冰发展期日冰面积与营口-4℃气温积温的散点图(见图4)中可以看出,二者呈显著的线性负相关关系。剔除离散点,通过回归分析,用辽东湾海冰发展期海冰日面积与营口站-4℃气温积温建立一元线性回归方程:

$$Y = -912.6 - 33.978X \quad (3)$$

样本容量为110个,复相关系数  $R = 0.908 > 0.256 = R_{0.01,100}$ ,通过99%信度检验。令  $Y=0$ ,计算  $X$  约为-26.86,即当营口站气温积温达到-26.86℃左

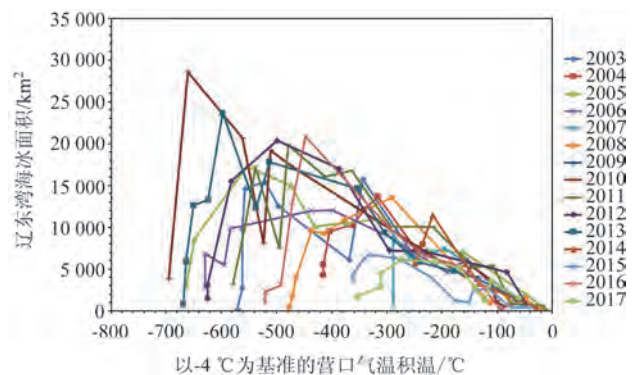


图3 2003—2017年辽东湾逐日冰面积与营口单站日平均气温积温( $\leq -4$ ℃)对应点图

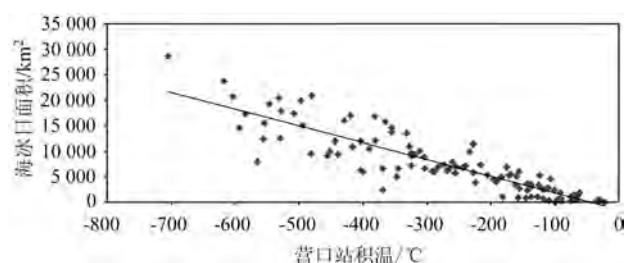


图4 2003—2017年辽东湾海冰发展期日冰面积与营口站积温散点图

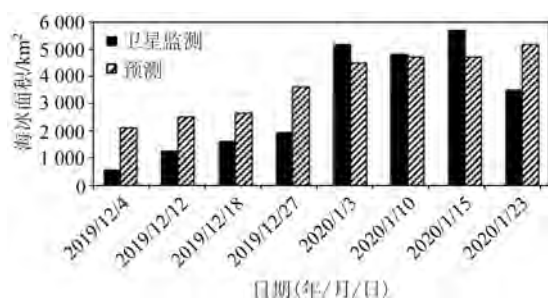


图5 2019/2020年度冬季海冰发展期辽东湾海冰面积监测与预测对比

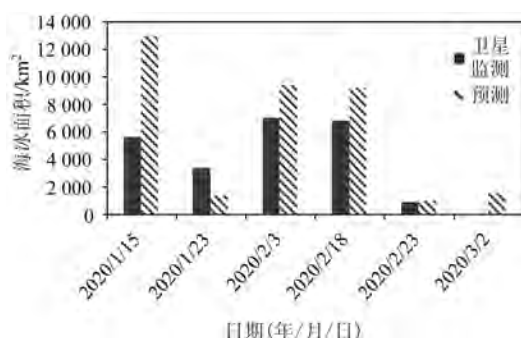


图6 2019/2020年度冬季融冰期辽东湾海冰面积监测与预测对比

右,辽东湾开始结冰。式(3)可以用来预报辽东湾海冰发展期海冰面积。

### 5.3 辽东湾海冰面积预报检验

根据5.2节中的分析,分别利用营口站 $\leq -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 气温积温和气温建立辽东湾海冰发展期和融冰期的海冰面积预报方程:

$$\begin{aligned} Y_1 &= -912.6 - 33.978X_1 && \text{海冰发展期} \\ Y_2 &= 1\,621.24 - 1\,284.82X_2 && \text{融冰期} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $X_1$ 为营口站气温积温( $\leq -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), $X_2$ 为营口站3 d平均气温,结合营口站预报气温,即可实现对辽东湾海冰面积的预报。

利用上述预报方程,对2019/2020年度冬季辽东湾海冰面积进行了预报检验。在海冰发展期(见图5),当海冰面积较大时预报效果较好,短期内由于气温回升造成的海冰面积减小不能被很好地预测。融冰期(见图6),尽管样本容量较少,海冰面积存在一定的差异,但是海冰面积整体变化趋势是一致的,对融冰期的海冰变化也具有一定的参考意义。

## 6 结论和讨论

本文利用MODIS卫星遥感数据反演得到2002—2017年辽东湾海冰面积资料,分析了海冰面积的时空分布特征以及年际变化特征,讨论了海冰面积与营口站平均气温和气温积温之间的关系,在此基础上建立了辽东湾海冰面积预测方程。

在2002—2017年间,辽东湾初冰日出现在12月上中旬,终冰日出现在3月上旬或中旬,个别年份出现在2月下旬。辽东湾最大海冰日出现在1月下旬或2月上旬,仅2002/2003年度最大海冰日出现在2003年1月上旬。辽东湾海冰面积最大时,整个辽东湾海区都是结冰状态。最大海冰面积较大的年份,冰期也相对较长,最长出现在2009/2010年度,为102 d;冰期最短出现在2001/2002年冬季,为76 d。

辽东湾海冰面积与营口站气温积温( $\leq -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ )相关系数为-0.52,在海冰发展期相关系数高达-0.89,利用这一关系建立海冰发展期辽东湾海冰面积的预测方程,效果较好。辽东湾海冰面积与环辽东湾气象站的气温存在负相关关系,海冰面积与营口气象站3 d平均气温之间的相关性为-0.57,而融冰期3 d平均气温与海冰面积的相关性达到-0.75,根据这一相关关系建立了融冰期辽东湾海冰面积的预测方程,对融冰期海冰面积有一定的参考。

本文从气温角度探讨辽东湾海冰面积变化及预测,有一定的参考价值,但影响海冰的因素众多,单一要素的探讨存在一定的误差。另外,由于现阶段业务化运行的卫星监测产品无法剔除被云过度覆盖的影响,人机交互方式判识海冰也存在一定的

主观性,导致部分卫星反演结果与相关职能部门发布的海冰信息存在出入,有待进一步完善。

#### 参考文献:

- [1] 王相玉,袁本坤,商杰,等. 渤海海冰灾害与防御对策[J]. 海岸工程, 2011, 30(4): 46-55.
- [2] 武浩,夏芸,许映军,等. 2004年以来中国渤海海冰灾害时空特征分析[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(5): 81-87.
- [3] 刘成,曹祥村,尹朝晖,等. 2007-2018年黄渤海海冰气候特征及其对气象因子的响应[J]. 海洋通报, 2019, 38(2): 173-178.
- [4] 庞海洋,孔祥生,孙志伟,等. 基于遥感和气象数据对辽东湾海冰变化预测研究[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(4): 725-732.
- [5] 王萌,武胜利,郑伟,等. 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[J]. 气象, 2016, 42(10): 1237-1244.
- [6] 李彦青,苏洁,汪洋,等. 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[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(7): 7-16.
- [7] 岳海波,张杰,纪永刚,等. 辽东湾海冰面积变化模拟和预测探讨[J]. 海洋学报, 2005, 31(5): 169-174.
- [8] 武晋雯,张玉书,冯锐,等. 基于MODIS的海冰面积遥感监测及其与气温的相关分析[J]. 遥感技术与应用, 2009, 24(1): 73-76.
- [9] 王相玉,张惠滋,严素,等. 渤、黄海北部海冰年代时空变化特征分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(2): 26-32.
- [10] 顾卫,史培军,刘杨,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.
- [11] 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.
- [12] 白珊,刘钦政,吴辉碁,等. 渤海、北黄海海冰与气候变化的关系[J]. 海洋学报, 2001, 23(5): 33-41.
- [13] 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.
- [14] 耿淑琴,王咏亮,白珊. 2000-2001年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): 25-33.
- [15] 药蕾,苏洁. 渤海海冰与西伯利亚高压之间的关系及与北大西洋涛动之间的可能联系[J]. 中国海洋大学学报, 2018, 48(6): 1-12.
- [16] 周群,魏立新,黄焕卿. 秋季巴伦支海海温异常对冬季我国渤海冰情的可能响应[J]. 海洋学报, 2016, 38(3): 40-48.
- [17] 张云吉,金秉福,冯雪. 近半个多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.

## Characteristics analysis of the sea ice area based on MODIS satellite data in Liaodong Bay and its correlation with air temperature

ZUO Tao<sup>1</sup>, GUO Yu-di<sup>2</sup>, LIU Bin-xian<sup>1</sup>, WANG Cai-xia<sup>3</sup>

(1. Tianjin Central Observatory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074 China; 2. Tianjin Climate Center, Tianjin 300074 China; 3. Tianjin Binhai New Area Bureau of Meteorology, Tianjin 300457 China)

**Abstract:** The sea ice area data in Liaodong Bay from 2002 to 2017 is obtained by using MODIS satellite data, and the characteristics of spatial and temporal distribution and annual variation of the sea ice area are analyzed in this paper. During these 16 years, the initial ice day in Liaodong Bay generally occurred in early or mid-December. The final ice day generally occurred in early or mid-March, except for several years in late February. The largest daily ice area occurred in late January or early February. The years with a larger ice area also had a relatively longer ice duration. Moreover, the ice area in Liaodong Bay shows a negative correlation with the air temperature and the accumulated temperature ( $\leq -4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). The regression analysis method is used to establish a prediction equation of the sea ice area in Liaodong Bay during the increasing and the thawing period, and is validated for the winter of 2019/2020.

**Key words:** sea ice area in Liaodong Bay; ice duration; air temperature; accumulated temperature; satellite remote sensing; MODIS