

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0132

MA Yuxian, XU Ning, YUAN Shuai, et al. Basic characteristics of sea ice environment on the east coast of Liaodong Bay based on field observations[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5):1492–1500. [马玉贤, 许宁, 袁帅, 等. 基于现场观测的辽东湾东岸海冰环境基本特征[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5):1492–1500.]

## 基于现场观测的辽东湾东岸海冰环境基本特征

马玉贤, 许宁, 袁帅, 刘雪琴, 史文奇, 周雪, 刘永青, 陈元

(国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:** 全面获取气-冰-海环境特征数据已成为当前冬季现场观测的重要任务, 用于准确、快速开展区域冰情评价预测, 以满足海冰防灾减灾工作需求。基于辽东湾东岸鲅鱼圈雷达海冰观测站(15 a)与温坨子附近海域(9 a)的冬季观测数据, 对辽东湾东岸的风、水温、海冰时空分布等环境基本特征进行了探讨。对鲅鱼圈站1月和2月4级风( $5.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )以上数据进行分析, 发现偏北风自2016年以来呈现由N、NNE、NE向NE转变, 偏南风自2016年以来主风向由SSW向WSW转变。对温坨子海冰观测站水温观测数据进行分析, 发现水温表现出降温期、平稳期与回温期, 降温期发生于12月至次年1月中旬, 平稳期发生于1月下旬至2月中旬, 回温期发生于2月下旬; 当气温低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 水温基本维持在 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近, 气温处于 $-10\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 水温基本分布于 $-1.4\sim-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间, 气温处于 $-5\sim5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 观测点水温基本分布于 $-1.4\sim3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对鲅鱼圈站与温坨子站能见范围内的逐日海冰分布面积比例进行分析, 发现海冰面积呈现增大期、稳定期与减少期, 鲅鱼圈站附近12月12日至次年1月9日前后为增大期(对应初冰期), 1月9日前后至2月8日前后为稳定期(对应盛冰期), 2月8日前后至3月15日前后为减少期(对应融冰期); 温坨子站与鲅鱼圈站类似。对鲅鱼圈站与温坨子站附近海域海冰结冰期进行统计, 给出了两个站点的平均初冰日、终冰日与结冰期, 并与历史数据进行了对比。结合初冰日与终冰日的环境要素分析, 对初冰与终冰的规律特征进行了总结, 对气候变化背景下的辽东湾冰情评估有着重要意义。

**关键词:** 鲅鱼圈; 温坨子; 气象; 水温; 冰情特征

**中图分类号:** P731.15      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1492-09

## 0 引言

作为北半球最低纬度的结冰海域, 渤海每年冬季生成的海冰对涉海经济活动造成重要影响<sup>[1-4]</sup>。以海冰工程为例, 海冰载荷是辽东湾海洋工程结构的控制载荷<sup>[5-7]</sup>, 工程结构的防冰抗冰一直是工程管理部门关注的重点。海冰冰情的准确评估对海冰灾害的防范与防治有着重要作用。

冰冻圈对气候变化的响应非常敏感<sup>[8]</sup>。有研究发现, 1961年以来影响我国东北的寒潮自1990年之后明显减少<sup>[9-12]</sup>。针对这一背景, Ma等<sup>[13]</sup>以气象数据为基础、以热力学数值模拟为手段进行了1951年以来的冰情评估, 给出了营口海域的冰情演变规

律; Yan等<sup>[14]</sup>以渤海冰情等级与卫星遥感数据为基础, 对1958年以来的冰情演变进行分析, 发现1958年以来渤海海域冰情呈现增大—减小—增大的趋势; Gong等<sup>[15]</sup>基于大尺度气候因子对渤海海冰进行研究, 发现渤海冰情整体呈现减弱的趋势。基于现场海冰观测, 臧恒范等<sup>[16]</sup>、王相玉<sup>[17]</sup>根据1963—1988年我国有关海洋站的海冰冰情观测资料, 给出了渤海和黄海北部沿海的结冰期及结冰期要素的多年平均变化状况和极值年份变化状况的特征值, 根据1974—1988年NOAA卫星图片、飞机航测和破冰调查船等观测资料, 给出了辽东湾、渤海湾、莱州湾与北黄海海冰生消的年际变化过程。不足的是,

收稿日期: 2022-02-07; 修订日期: 2022-07-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0604901); 大连市支持高层次人才创新创业项目(2019RJ07); 辽宁省科技计划项目(2021JH2/10300004)资助

作者简介: 马玉贤, 助理研究员, 主要从事海冰物理力学性质研究. E-mail: yxma@nmemc.org.cn

通信作者: 周雪, 工程师, 主要从事海冰物理性质研究. E-mail: xzhou@nmemc.org.cn

上述可查的海冰冰情特征,均以1990年之前现场观测数据为基础,对结冰期等要素的历史数据进行统计,缺乏造成冰情变化的环境特征分析。而且,20世纪90年代之后,由于渤海海域冰情变轻,导致当前海冰观测投入明显减少<sup>[18-19]</sup>,造成辽东湾东岸海冰生消过程连续观测存在严重不足,使得气候变化背景下针对结冰期的研究缺乏现场观测数据的验证。

本课题组依托于90年代后的业务化海冰观测与电厂冷源安全保障,在渤海冰情最重的辽东湾东岸鲅鱼圈(数据最早可查年份为1996年)与瓦房店温坨子(2012年始)附近海域进行了连续的海冰现场观测工作<sup>[20-24]</sup>。本文以鲅鱼圈雷达海冰观测站的气象数据、海冰冰量、海冰密集度数据与温坨子附近四个站点的气象、表层水温、海冰冰量、海冰密集度观测数据为基础,结合海冰观测站点附近的连续气象站(营口站与瓦房店站)观测数据,对近年来辽东湾东岸冰情基本特征进行了统计分析。本文所进行工作弥补了90年代后辽东湾东岸统计数据缺失的不足,明确了辽东湾东岸海冰环境的基本特征,上述工作对气候变化背景下的冰情演变研究有着重要意义。

## 1 数据来源

本文数据来源有两部分,一是鲅鱼圈雷达海冰观测站每年冬季进行的海冰观测,二是温坨子附近海域自2012/2013年开始的冬季海冰观测。鲅鱼圈站的观测手段包括岸基雷达图像反演冰情信息和人工海冰监测信息。岸基雷达图像反演冰情信息,主要是根据海冰表面粗糙程度与灰度值的基本关系进行的冰型提取信息<sup>[22]</sup>;人工海冰监测信息,主要是对岸边的固定冰和近岸浮冰的人工观测。2015年之前,鲅鱼圈站海冰观测人员每日记录08:00、14:00与20:00的气温、风速、能见范围内(观测半径16 km)的海冰冰量与海冰密集度(海滨观测规范)。自2015年之后,雷达站自动气象站(山东仪器仪表研究所研发设备)投入使用,每日仅需记录海冰范围与海冰密集度;气象站风速、风向记录依据海滨观测规范进行,即每3 s采集一次,连续10 min的数据进行滑动平均,得到最终观测数据。2017/2018年之后,鲅鱼圈站海冰观测暂停。

温坨子附近观测站点自北向南有4个,包括八仙岛、江石底、温坨子与大咀子。观测手段为人工

目测能见范围内的海冰冰量与海冰密集度信息。温坨子海冰观测站是四个站点中的主站点,自2012/2013年开始每日08:00与14:00记录能见范围内海冰冰量、海冰密集度、表层水温(海面以下0.5 m)与气象数据,2020年自动气象站投入使用(传感器型号Maximet系列GMX500,数据采集频率为1 Hz),气象数据开始连续采集;温坨子站观测位置高7 m,晴朗条件下能见范围约11 km;八仙岛站、江石底站与大咀子站为辅助站点,2012—2016年是每周不定期观测两次,没有连续观测数据;2016年开始每日观测一次,记录数据包括能见范围内海冰冰量与海冰密集度;八仙岛站观测位置高1 m,晴朗条件下能见范围约6 km;江石底站观测位置高4 m,晴朗条件下能见范围约9 km;大咀子站观测位置高16 m,晴朗条件下能见范围约16 km。在上述观测过程中,记录每日潮汐情况;水温使用水温表观测。观测站点位置见图1。观测站的基本情况见表1。其中,鲅鱼圈站缺失年份观测数据由于年份久远,大多未进行数据电子化,未能查找到。

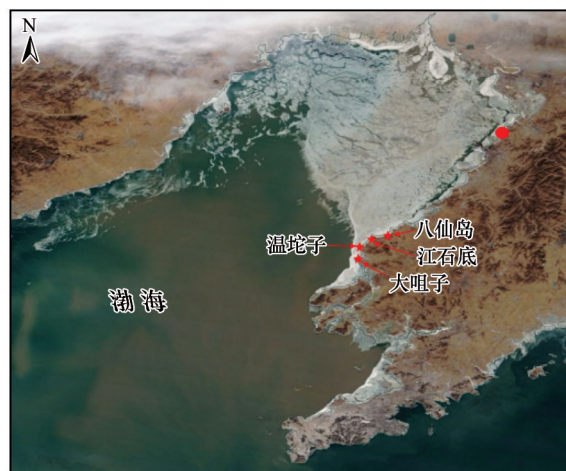


图1 观测站位置(红色圆点为鲅鱼圈站位置)

Fig. 1 Location of the observation stations (The red dot is the location of Bayuquan Station)

## 2 结果与分析

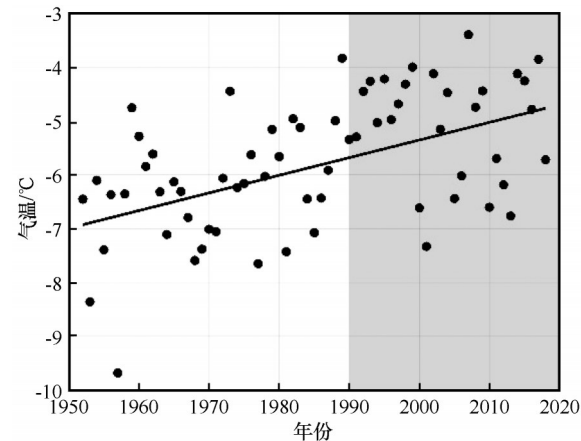
### 2.1 气象要素

气象要素对辽东湾东岸冰情有着重要影响,其中气温主要对海冰热力过程产生影响,风速与风向主要影响海冰动力过程。一般而言,海水在低温与凝结核的作用下形成平整冰,气温继续维持低位,海冰快速生长。随后,海冰在辽东湾东岸往复流与空气动力作用下往复运动。

表1 观测站的基本情况  
Table 1 Basic situation of the observation stations

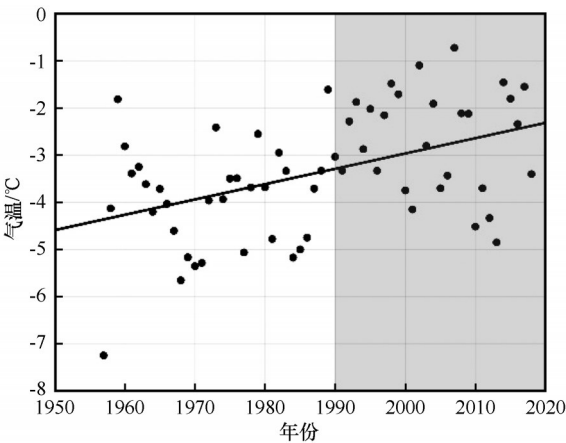
观测项目与设备	鲅鱼圈站	温坨子站	八仙岛站	江石底站	大咀子站
冰量、密集度	1995/1996年、2002/2003年、 2004—2009年、2010—2018年	2012年至今	2016年至今	2016年至今	2016年至今
风速风向仪	无	2012—2019年	2016年至今	2016年至今	2016年至今
气象数据	自动气象观测站	2015年至今	2020年至今	无	无
	附近气象站	1951年至今	1955年至今	1955年至今	1955年至今
水温	无	2012年至今	无	2020年至今	无

自动气象站运行之前,鲅鱼圈站气温数据使用营口气象站数据,温坨子站使用高精度水银温度计进行。由于鲅鱼圈站自动观测气温序列太短,且温坨子站离散气温数据仅覆盖有冰期间(每年对应不同时间段),导致鲅鱼圈站与温坨子站气温观测数据不能满足分析需求。基于上述背景,本文使用可查的营口气象站(鲅鱼圈站附近)数据与瓦房店气象站(温坨子站附近)数据,对长序列的气温变化过程进行阐述。一般而言,辽东湾初冰日均在12月1日之后,融冰日在3月31日之前,所以本文使用12月1日至3月31日的气温数据进行分析,结果见图2~3。可以发现,气象站冬季气温呈现明显的增加趋势,年际升温趋势均为 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ (Sen斜率估计),升温趋势在1990年之后尤其明显。对冬季可能有海冰生成的月份进行月值趋势分析,结果见表2。营口气象站12月与3月气温增加趋势相对较小,约为 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ;1月平均升温速率次之,约为 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ ;2月升温趋势最明显,约为 $0.55\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 。相比于营口气象站,瓦房店气象站12月升温趋势明显偏低;1月、2月升温趋势相



注: 1990年之后的气温底色为灰色  
图2 营口气象站冬季平均气温趋势  
Fig. 2 Trend of average air temperature in winter at Yingkou Meteorological Station

当;3月升温趋势明显偏高。上述气温变化对两地海冰冰情变化产生明显的影响。



注: 1990年之后的气温底色为灰色  
图3 瓦房店气象站冬季平均气温趋势  
Fig. 3 Trend of average air temperature in winter at Wafangdian Meteorological Station

表2 基于Sen斜率估计的气温趋势(单位:  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ )  
Table 2 Air temperature trends based on Sen's slope estimation (unit:  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ )

站点	12月	1月	2月	3月
鲅鱼圈站	0.018	0.037	0.054	0.016
瓦房店气象站	0.010	0.036	0.053	0.026

注: 上述结果均通过显著性水平检验 ( $P<0.05$ )。

作为影响海冰动力的重要要素,风速与风向是海冰输运与堆积的重要条件。一般而言,影响渤海的冷空气路径大致可分为三路:西路由新疆北部侵入,向东南方向移动;中路由蒙古南下,向南偏东移动;东路由我国东北平原南下。基于上述背景,本文对2015/2016年冬季以来鲅鱼圈站气象站的风速、风向分别进行统计,初步分析风速、风向对海冰冰情的影响。由于辽东湾东岸海冰主要在1月发展,2月开始消融,因此本文着重对上述两个时段进行分析。为更好地体现强烈的空气动力作用对冰



情的影响,本文选择4级风( $5.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )以上数据进行数据分析,并将每年冰情等级<sup>[1]</sup>列在图中,汇总结果见图4。可以发现,对于偏北风的发生概率:2016年以来呈现由N、NNE、NE向NE转变,2016年冬季风向以N、NNE、NE为主,2020与2021年冬季风向以NE为主;对于偏南风,2016年以来主风向由SSW向WSW转变。结合2016年以来冰情等级可以发现,大于4级偏北风的发生概率越大,空气动力过程越剧烈,气温变化越剧烈,通常对应冰情剧烈变化(快速生长与消融)。

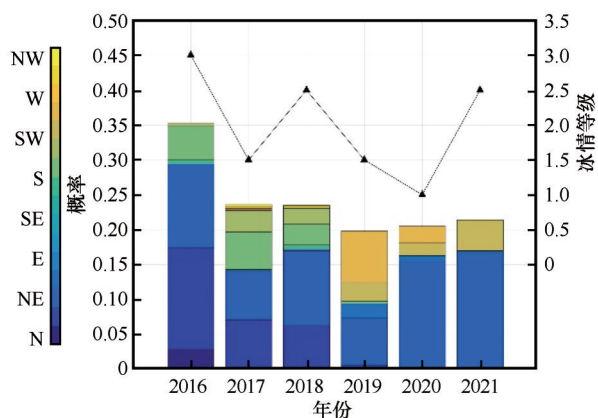


图4 2016年以来1月和2月4级风以上风向与冰情等级  
Fig. 4 Wind directions of the winds greater than Level 4 and ice condition grade in January and February since 2016

依据现场观测经验,在海冰快速发展阶段,当风向为西路与中路时,海冰向辽东湾东岸聚集、堆积;随着海冰逐渐增多,海冰越过长兴岛海域,进入水深、热容量较大的区域,海冰冰情继续增加的阻力逐渐增大。当风向为东路时,动力作用使海冰向渤海湾聚集,这一区域水深浅、热容量低,对渤海湾海冰的堆积与发展起到“正”作用。据1969年观测数据记录,持续的偏东大风是造成渤海特大冰封的重要原因<sup>[25]</sup>。在融冰阶段,偏南风使聚集于辽东湾东岸的海冰快速拖拽离岸,导致海冰进入深水区,造成原本被北风挤压密集的海冰迅速分散与融化。

## 2.2 水温

本文汇总温坨子站水温观测数据,给出平均水温随时间的变化折线图(图5)。可以发现,水温表现出三个阶段,即降温期、平稳期、回温期。降温期发生于12月至次年1月中旬,此时太阳辐射弱,气温逐渐降低;受深水区高水温影响,往复流导致冷水与热水在这一时期随着涨落潮影响观测区域水温,此时观测区域水温在振荡过程中逐渐降低。平

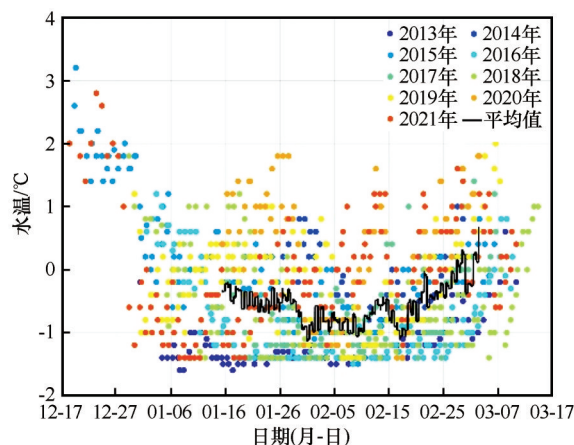


图5 温坨子站历年水温与平均水温

Fig. 5 Water temperature and average water temperature at Wentuozi Station over the years

稳期发生于1月下旬到2月中旬,平均水温基本维持在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近;此时渤海海水被冷空气影响累计时间逐渐增加,海水水温整体维持较低水平,此时观测区域海冰冰情进入盛冰期。回温期发生于2月下旬,平均水温逐渐增加;此时气温逐渐升高、太阳辐射逐渐增加,海冰快速融化,导致海水温度逐渐升高,此时观测区域海冰冰情属于融冰期。

为明确冬季有冰海域水温随气温的关系,本文汇总2013年以来的水温与气温数据,绘制冰情散点图,结果见图6。可以发现,当气温低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,除个别受涨落潮影响的奇异点外,水温基本维持在 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近;当气温处于 $-10\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,水温基本分布于 $-1.4\sim-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,海水水温在窄范围内波动变化;当气温处于 $-5\sim5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,观测点水温基本分布于 $-1.4\sim3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且水温随着气温的升高逐渐升高。

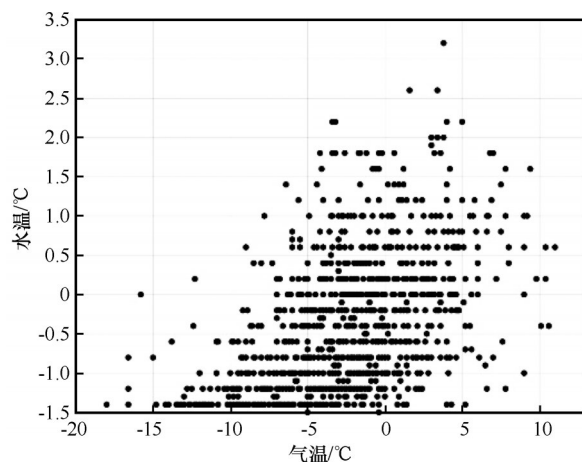


图6 温坨子站历年气温与水温散点图

Fig. 6 Scatter plot of air temperature and water temperature at Wentuozi Station over the years

2.3 海冰分布范围

鲑鱼圈海域海冰监测数据中,冰量和冰密集度是表征海冰分布的重要海冰参数。为了比较近年来的海冰分布状况,根据海冰监测数据中的冰量和密集度(成数),定义观测范围内海冰分布比例为:冰量(成数)×密集度(成数)/100<sup>[21]</sup>。对鲑鱼圈与温坨子可查数据分别进行汇总,并将所有年度海冰观测数据进行平均。对上述逐年数据绘制随时间变化的散点图,对平均数据绘制折线图,鲑鱼圈海冰分布比例数据见图7,温坨子海冰分布比例数据见图8。

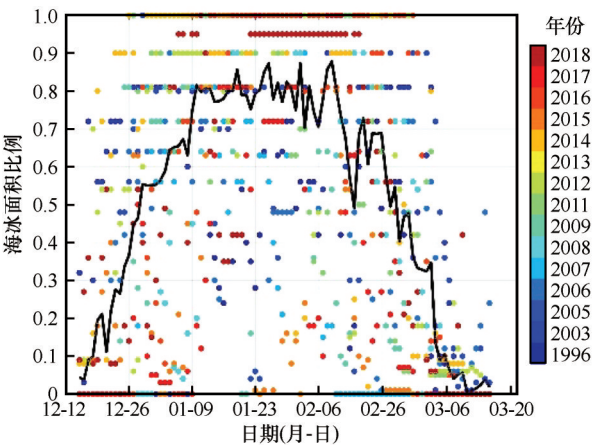


图7 鲑鱼圈海冰分布面积比例  
Fig. 7 Proportion of sea ice distribution area at Bayuquan

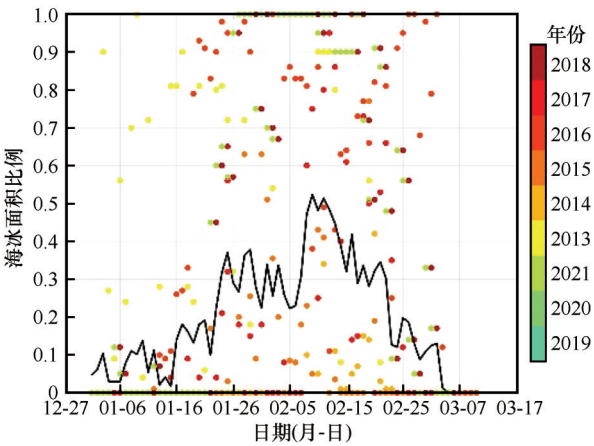


图8 温坨子海冰分布面积比例  
Fig. 8 Proportion of sea ice distribution area at Wentuozi

可以发现,鲑鱼圈站平均分布面积比例呈现增大期、稳定期与减少期。自12月12日至次年1月9日前后,海冰冰范围逐渐增大,为增大期(对应初冰期);自1月9日前后至2月8日前后,海冰范围维持稳定(80%左右),为稳定期(对应盛冰期);自2月

8日前后至3月15日前后,海冰范围逐渐减小,为减少期(对应融冰期)。温坨子站与鲑鱼圈站类似,同样表现出增大—稳定—减少的规律。自1月1日前后,温坨子站出现海冰,至2月8日前后海冰分布范围逐渐增加(初冰期);2月8日前后至2月13日前后,海冰范围处于高峰期,此时海冰分布范围维持在40%以上(盛冰期);2月13日前后至3月初,海冰分布范围逐渐减小至0(融冰期)。对比鲑鱼圈与温坨子数据,温坨子站海冰分布范围与存在时间明显小于鲑鱼圈站,且温坨子海冰分布范围波动性强于鲑鱼圈。

2.4 结冰期

初冰日是观测海域第一次观测到海冰的日期。以现场观测经验,初冰日海冰有外部输运与本地生成两种情景。初冰日为外部输运情况下时,本地热力学条件尚未达到海冰生成的条件,海冰由北部海域动力输运而来,此时本地观测水温尚未达到冰点;初冰日为本地生成海冰情况下时,区域快速降温,大风使辽东湾海水上下快速混合,水温快速抵达冰点,冷空气过境后平静海面快速形成海冰。由于鲑鱼圈站水温观测数据的缺失,本文以温坨子站初冰日为例,对初冰日的水温观测结果进行分析,结果见表3。可以发现,初冰日前一日大多对应大风天气,此时降温与大风促使海水上下混合,海水温度快速降低;在初冰日,风速降低,海面变得平静,海冰快速生成,或周边浅水海域生成的海冰输运至观测站点。

表3 温坨子站初冰日的环境要素					
Table 3 Environmental elements of first-ice date at Wentuozi Station					
年份	水温/℃	初冰日		初冰日前一日	
		风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风向	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风向
2014	-1.4	8	N	14	N
2015	-1.4	4	N	15	N
2016	-0.8	3	N	15	NE
2017	-0.2	8	N	14	NE
2018	-0.4	6	NE	12	NE
2019	-1.0	4	NE	8	NE
2020	0.4	0	C	5	NE
2021	-0.6	3	NW	12	NE

注: 风速为0时, 风向记作C。

盛冰期是每年冰情最重的时期,观测海域基本被海冰覆盖,此时动力因素对区域海冰冰情影响较小,气温、水温等热力因素对区域冰情起主要

的作用。

融冰期是区域海冰逐渐融化的时期。以鲅鱼圈与温坨子等站点观测经验,观测区域海冰融冰过程分为两部分,包括浮冰融化与辽东湾东岸海湾内沿岸冰融化。为定量描述融冰期与终冰日时间,有必要对上述两部分海冰的融化过程进行阐述。一般而言,融冰期以偏南风为主,浮冰在动力作用下输运至无冰海域,此时冰温升高后海冰内部盐泡逐渐增多形成大量卤水通道,松散的海冰快速融化消失。与之不同的是,辽东湾东岸海湾内沿岸冰融化明显慢于浮冰融化。对本文的五个站点进行分析,八仙岛海域为典型沿岸固定冰聚集区;鲅鱼圈站、温坨子站、江石底站受营口港、电站取水、江石底渔港的影响,水深较大,冬季大多以浮冰为主。基于此,本文以八仙岛站进行终冰日分析,结果见表4。可以发现,近岸海湾海域的终冰日一般情况为大潮与离岸风的叠加。这是因为盛冰期时,固定冰受动力影响堆积严重,冰厚明显高于浮冰;同时,受潮汐影响,搁浅冰在小潮期基本不受下表面热源影响,这部分海冰下表面缺乏下海水侵蚀,导致海冰融化明显偏慢。当海冰遇到大潮条件时,海冰被海水浮起,并在南风的作用下将其推入水中,进而在动力作用下在附近海域输运(可能会影响其他观测站点)并快速融化。上述融冰过程决定了辽东湾东岸终冰日一般由海湾内大面积堆积冰的融化收尾。

表4 八仙岛站终冰日的环境要素

Table 4 Environmental elements of the final-ice date at Baxiandao Station

年份	风速/(m·s <sup>-1</sup> )	风向	潮汐
2016	10.2	SE	小潮
2017	4.3	S	大潮
2018	5.6	S	大潮
2019	6.1	SW	大潮
2020	3.5	SE	大潮
2021	7.1	SW	小潮

依据1951年以来营口气象站与1956年以来瓦房店气象气温变化数据(图2~3),可以发现1990年以后站点附近海域气温明显升高。将1990年之前的结冰期数据与1990年之后的结冰期数据进行比较,对气候变化背景下的冰情演变研究有着重要意义。基于这一背景,本文对近几年鲅鱼圈与温坨子附近海域海冰结冰期进行统计分析,结果见图9~

10。可以发现,鲅鱼圈平均有冰天数为72.7天,平均初冰日为12月22日,平均终冰日为3月5日;温坨子海域平均有冰天数为30.9天,平均初冰日为1月12日,平均终冰日为2月22日。根据1990年之前的统计数据,鲅鱼圈平均初冰日为11月19日,平均盛冰日为1月4日,平均融冰日为3月2日,平均终冰日为3月21日,平均有冰天数为124天;长兴岛(与温坨子站距离较近)平均初冰日为1月10日,平均盛冰日为2月3日,平均融冰日为2月18日,平均终冰日为3月16日,平均有冰天数为66天<sup>[13]</sup>。对上述数据进行对比,结果见表5。可以发现,鲅鱼圈站有冰天数的减少时间明显大于温坨子站,海冰冰情对气温的响应呈现非线性的规律;12月鲅鱼圈站升温幅度大于温坨子站,鲅鱼圈站初冰日推迟时间明显大于温坨子站;3月温坨子站升温幅度大于鲅鱼圈站,鲅鱼圈站终冰日提前时间明显小于温坨子站。

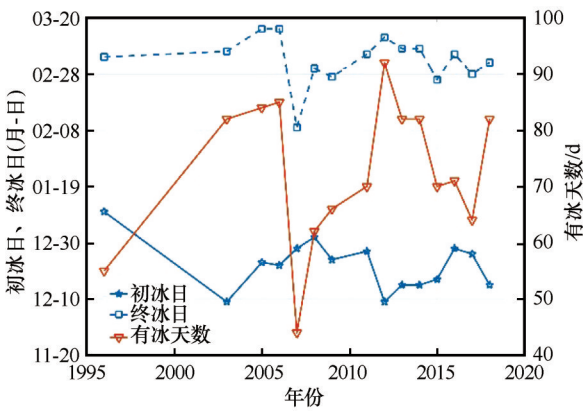


图9 鲅鱼圈站初冰日、终冰日与有冰天数年际变化  
Fig. 9 Interannual variation of first-ice date, final-ice date and ice period at Bayuquan Station

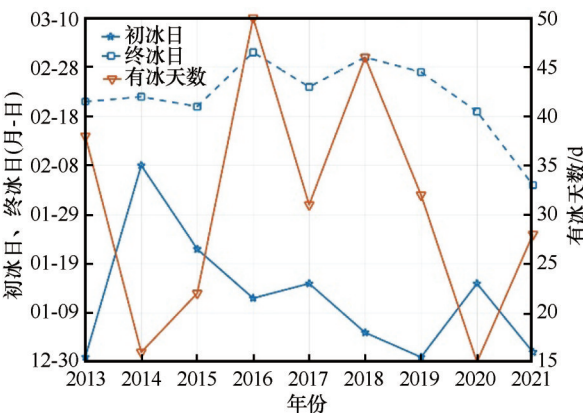


图10 温坨子站初冰日、终冰日与有冰天数年际变化  
Fig. 10 Interannual variation of first-ice date, final-ice date and ice period at Wentuozi Station



表5 鲛鱼圈站和温坨子站近年冰情与1990年之前比较

Table 5 Ice conditions in recent years compared with those before 1990 at Bayuquan Station and Wentuozi Station

站点	初冰日	盛冰日	融冰日	终冰日	有冰天数
鲛鱼圈站	推迟33天	推迟5天	提前22天	提前16天	减少51.3天
温坨子站	推迟2天	推迟5天	提前9天	提前22天	减少35.1天

3 结论

本文以渤海冰情最重的辽东湾东岸为研究区域,以鲛鱼圈雷达海冰观测站的气象数据、冰量、密集度数据与温坨子附近四个站点的气象、水温、冰量、密集度观测数据为基础,结合站点附近气象站的长期气温数据,对辽东湾东岸冰情基本特征进行了统计分析,并与1963—1988年数据进行对比,得到以下结论:

(1)对鲛鱼圈站1月与2月4级风( $5.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )以上数据进行数据分析。对于偏北风,2016年以来呈现由N、NNE向NE转变,2016年冬季风向以N、NNE、NE为主,2020与2021年冬季风向以NE为主;对于偏南风,2016年以来主风向由SSW向WSW转变。

(2)对温坨子表层水温数据进行分析,发现水温表现出三个阶段,即降温期(12月至次年1月中旬)、平稳期(1月下旬至2月中旬)、回温期(2月下旬);当气温低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水温基本维持在 $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 附近,当气温处于 $-10\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时水温基本分布于 $-1.4\sim-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 区间,当气温处于 $-5\sim5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时观测点水温基本分布于 $-1.4\sim3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)对鲛鱼圈与温坨子海冰分布面积比例数据进行分析,发现鲛鱼圈站12月12日至次年1月9日前后海冰范围逐渐增大,1月9日前后至2月8日前后海冰范围维持稳定(80%左右),2月8日前后至3月15日前后,海冰范围逐渐减小;温坨子站与鲛鱼圈站类似,1月1日至2月8日前后海冰分布范围逐渐增加,2月8日前后至2月13日前后海冰范围处于高峰期,2月13日前后至3月初海冰分布范围逐渐减小至0(融冰期)。

(4)对结冰期进行分析,发现初冰日之前有大风过程,终冰日一般对应大潮叠加离岸风;相比1963—1988年海冰结冰期特征,本文观测数据的结冰期明显缩短(鲛鱼圈站缩短51.3天,温坨子站缩短35.1天)。

参考文献(References):

[1] Bai Shan, Liu Qinzhen, Li Hai, et al. Sea ice in the Bohai

Sea of China[J]. Marine Forecasts, 1999, 16(3): 1-9. [白珊,刘钦政,李海,等. 渤海的海冰[J]. 海洋预报, 1999, 16(3): 1-9.]

[2] Ding Dewen. Introduction to engineering sea ice[M]. Beijing: China Ocean Press, 1999. [丁德文. 工程海冰学概论[M]. 北京: 海洋出版社, 1999.]

[3] Timco G W, Weeks W F. A review of the engineering properties of sea ice[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(2): 107-129.

[4] Li Zhijun, Kang Jiancheng, Pan Yibin. Characteristics of the Bohai Sea and Arctic sea ice fabrics and crystals[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2003, 25(6): 48-53. [李志军,康建成,蒲毅彬. 渤海和北极海冰组构及晶体结构特征分析[J]. 海洋学报, 2003, 25(6): 48-53.]

[5] Huang Yan, Shi Qingzeng, Song An. Model test study of the interaction between ice and a compliant vertical narrow structure[J]. Cold Regions Science and Technology, 2005, 49(2): 151-160.

[6] Huang Yan, Yu Mu, Tian Yufeng. Model tests of four-legged jacket platforms in ice: part 1. model tests and results[J]. Cold Regions Science and Technology, 2013, 95(11): 74-85.

[7] Li Zhijun, Dong Jiwu, Lu Zhiqiang, et al. Ice forces on conical structures and shielding relation between conical structures[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 514-519. [李志军,董吉武,芦志强,等. 海冰对圆台结构的作用力及结构相互遮蔽关系[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 514-519.]

[8] Qu Bin, Kang Shichang, Chen Feng, et al. Lake ice and its effect factors in the Nam Co basin, Tibetan Plateau[J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis, 2012, 8(5): 327-333. [曲斌,康世昌,陈锋,等. 2006—2011年西藏纳木错湖冰状况及其影响因素分析[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(5): 327-333.]

[9] Hu Chunli, Li Ji, Guo Tingting, et al. Variation characteristics of winter cold wave events in Northeast China and its response to regional climate warming during 1961—2016[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6): 1755-1763. [胡春丽,李辑,郭婷婷,等. 1961—2016年东北地区冬季寒潮事件变化特征及其对区域气候变暖的响应[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6): 1755-1763.]

[10] Yan Qi, Tian Li, Li Shuang, et al. Multiple-time scale variations and impact factors of regional cold air in Liaoning Province[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(2): 379-387. [阎琦,田莉,李爽,等. 辽宁区域性冷空气多时间尺度变化特征及影响因素[J]. 冰川冻土, 2016, 38(2): 379-387.]

[11] Li Feng, Jiao Meiyun, Ding Yihui, et al. Climate change of Arctic atmospheric circulation in last 30 years and its effect on strong cold events in China[J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(2): 209-219. [李峰,矫梅燕,丁一汇,等. 北极区近30年环流的变化及对中国强冷事件的影响[J]. 高原气象, 2006, 25(2): 209-219.]

[12] Zhou Xiaoyu, Zhao Chunyu, Wang Ying, et al. Variation characteristics of extreme temperature events in Liaoning Prov-

- ince, 1961—2012[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(4): 876-887. [周晓宇, 赵春雨, 王颖, 等. 1961—2012年辽宁省极端气温事件气候变化特征[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 876-887.]
- [13] Ma Yuxian, Cheng Bin, Xu Ning, et al. Long-term ice conditions in Yingkou, a coastal region northeast of the Bohai Sea, between 1951/1952 and 2017/2018: modeling and observations[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 182.
- [14] Yan Yu, Uotila P, Huang Kaiyue, et al. Variability of sea ice area in the Bohai Sea from 1958 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136164.
- [15] Gong Daoyi, Kim Seongjoong, Ho Changhoi. Arctic Oscillation and ice severity in the Bohai Sea, East Asia[J]. *International Journal of Climatology*, 2007, 27(10): 1287-1302.
- [16] Zang Hengfan, Zhang Qiwen. Ice conditions analysis of Bohai Sea and north area of Yellow Sea in winter season during 1982—1983[J]. *Marine Forecast Service*, 1984, 1(1): 43-49. [臧恒范, 张启文. 1982~1983年冬季渤海及黄海北部的冰情分析[J]. *海洋预报服务*, 1984, 1(1): 43-49.]
- [17] Wang Xiangyu. Ice periods and extent in the Bohai Sea and northern Huanghai Sea[J]. *Marine Forecasts*, 1991, 8(1): 43-50. [王相玉. 渤、黄湖北部的冰期和结冰范围[J]. *海洋预报*, 1991, 8(1): 43-50.]
- [18] Wang Anliang, Xu Ning, Ji Shunying. Characteristics of sea ice uniaxial compressive strength around the coast of Bohai Sea[J]. *The Ocean Engineering*, 2014, 32(4): 82-88. [王安良, 许宁, 季顺迎. 渤海沿岸海冰单轴压缩强度的基本特性分析[J]. *海洋工程*, 2014, 32(4): 82-88.]
- [19] Li Zhijun, Meng Guanglin, Sui Jixue. Initial analysis of sea ice uniaxial compression strength for long period in the Liaodong Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1991, 13(4): 571-575. [李志军, 孟广琳, 隋吉学. 辽东湾海冰单轴压缩长期强度的初步分析[J]. *海洋学报*, 1991, 13(4): 571-575.]
- [20] Song Lina, Shi Wenqi, Wang Zizhu, et al. Real time monitoring system for sea ice based on GPS and its application[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(5): 960-965. [宋丽娜, 史文奇, 王紫竹, 等. 基于GPS的海冰实时监测系统及其应用研究[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(5): 960-965.]
- [21] Yuan Shuai, Liu Yongqing, Liu Xueqin, et al. Basic characteristics of sea ice in the Bayuquan region based on the data of shore-based radar[J]. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(5): 528-531. [袁帅, 刘永青, 刘雪琴, 等. 基于岸基雷达数据的鲅鱼圈海域冰情基本特征[J]. *海洋通报*, 2017, 36(5): 528-531.]
- [22] Yuan Shuai, Shi Wenqi, Liu Xueqin, et al. Erratum to: Ice type extraction of rough ice in the eastern coast of Liaodong Bay with shore-based radar[J]. *Natural Hazards*, 2015, 77(2): 1415.
- [23] Yuan Shuai, Liu Chengyu, Liu Xueqin. Practical model of sea ice thickness of Bohai Sea based on MODIS data[J]. *Chinese Geographical Science*, 2018, 28(5): 863-872.
- [24] Yuan Shuai, Liu Chengyu, Liu Xueqin, et al. Research advances in remote sensing monitoring of sea ice in the Bohai Sea[J]. *Earth Science Informatics*, 2021, 14(4): 1729-1743.
- [25] Yang Guojin. *Sea ice engineering*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000: 123-124. [杨国金. *海冰工程学*[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 123-124.]



## Basic characteristics of sea ice environment on the east coast of Liaodong Bay based on field observations

MA Yuxian, XU Ning, YUAN Shuai, LIU Xueqin, SHI Wenqi,  
ZHOU Xue, LIU Yongqing, CHEN Yuan

(National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, Liaoning, China)

**Abstract:** Obtaining air-ice-sea environmental characteristic data has become an important task for field observation in winter, it is used to accurately and quickly carry out regional ice assessment and prediction to meet the needs of sea ice disaster prevention and mitigation. Based on the winter observation data of the Bayuquan Radar Sea Ice Observation Station (15 years) and the sea area near Wentuozi (9 years) on the east coast of Liaodong Bay, the basic characteristics of the sea ice environment such as wind, water temperature and distribution of sea ice are discussed. Analysis of the data of the Bayuquan Station and the winds greater than Level 4 shows that the northerly winds have changed from N, NNE and NE to NE since 2016, and the southerly winds have changed from SSW to WSW since 2016. The water temperature observation data of Wentuozi were analyzed, and it was found that the water temperature showed the cooling period, the stabilization period and the heating period. The cooling period occurred from December to mid-January of the following year, the stabilization period occurred from late January to mid-February, and the heating period occurred in late February. When the air temperature was lower than  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the water temperature was basically maintained near  $-1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; when the air temperature was at  $-10\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , the water temperature was basically distributed in the range of  $-1.4\sim-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; when the air temperature was at  $-5\sim5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the water temperature at the observation point was basically distributed at  $-1.4\sim3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The proportion of ice floes in the visible range of Bayuquan and Wentuozi Stations was analyzed, it was found that the sea ice area showed an increase zone, a stable zone and a decrease zone. Bayuquan Station was an increase zone from December 12 to January 9 of the following year, the sea ice range was a stable zone from around January 9 to February 8, and the decrease zone from around February 8 to around March 15; the Wentuozi Station was similar to the Bayuquan Station. Statistics of ice period in the waters near Bayuquan and Wentuozi are given, and the average first-ice date, final-ice date and ice period of the two locations are given, and compared with historical data. Combined with the analysis of the environmental elements of first-ice date and final-ice date, the regular characteristics of the first ice and the final ice are summarized, and it is of great significance for the assessment of ice conditions in Liaodong Bay.

**Key words:** Bayuquan; Wentuozi; meteorology; water temperature; ice condition characteristics

(责任编辑: 李志军)