

# 渤海和黄海北部工程设计冰厚变化趋势分析

王安良<sup>1</sup>, 赵倩<sup>1</sup>, 隋俊鹏<sup>1</sup>, 唐茂宁<sup>1</sup>, 王慧<sup>2</sup>, 刘煜<sup>1</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 2. 中国电建集团 中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

**摘要:**针对渤海和黄海北部沿岸风电、光伏和核电等新兴能源中的工程海冰设计问题,本文研究了重现期冰厚及其在气候背景下的变化趋势。本文分析72 a冰级时间序列表明渤海和黄海北部总体冰情等级呈明显下降趋势;在此影响下,基于20 a渤海和黄海北部海冰多源观测数据和精细化海冰数值预报资料,研究发现不同重现期冰厚较之前海冰区划值存在不同程度的降低。此外,不同场址设计冰厚受当地海洋环境条件影响较大,单一参考海冰区划值可能存在较大误差。研究表明:针对特定作业地点的工程设计冰厚,需要有针对性地开展精细化评估并考虑气候背景变化的影响,才能为相关工程海冰参数设计提供更加可靠的依据。

**关键词:**渤海; 黄海北部; 工程海冰; 冰情; 设计厚度; 变化趋势; 重现期; 海冰区划

**DOI:** 10.11990/jheu.202208041

**网络出版地址:** <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240131.1020.008>

**中图分类号:** TV122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2024)04-0659-06

## The trend of sea ice design thickness for the Bohai Sea and Northern Huanghai Sea

WANG Anliang<sup>1</sup>, ZHAO Qian<sup>1</sup>, SUI Junpeng<sup>1</sup>, TANG Maoning<sup>1</sup>, WANG Hui<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>1</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting (Ministry of Natural Resources), Beijing 100081, China; 2. Zhongnan Engineering Corporation Limited (Power China), Changsha 410014, China)

**Abstract:** In recent years, clean energy such as wind power, photovoltaic and nuclear power has been widely developed in the coastal waters of the Bohai Sea and the northern Yellow Sea. This paper focuses on investigating the sea-ice thickness of return period. Ice grades of time series for past 72 years significantly declines for the researched regions. Based on the multi-source observation data and refined numerical forecast data of sea ice in the past 20 years, this paper analyzes the ice conditions for this area. The results show that the ice grades present a downward trend for past more than 20 years. Under the influence of this general trend, the ice thicknesses decrease for different return periods comparing with the thicknesses from the sea ice zones. The design ice thickness of different sites is greatly affected by the local marine environmental conditions. In order to satisfy the needs of ocean engineering, it is necessary to assess sea ice parameters by updating the time series of yearly maximum thickness.

**Keywords:** Bohai Sea; Northern Huanghai Sea; engineering sea ice; sea ice condition; sea ice design thickness; evolution trend; return period; sea ice zones

近年来,风电、光伏和核电等清洁能源项目在渤海和黄海沿岸海域广泛兴起,这类工程在设计、建造和后期运营过程中将不同程度受到海冰的影响<sup>[1]</sup>。海冰厚度、速度和强度等工程设计参数的选取,会影响到工程建造和运维的成本。此类工程厂址一般离岸较近,海水深度较浅,水动力环境较为复杂,使得

不同工程点间海冰的生消、漂移、重叠和堆积等热力学和动力学过程差异较大<sup>[2-3]</sup>。同时,在全球气候总体变暖的背景下,渤海和黄海北部的总体冰情也呈现减弱的趋势<sup>[4-5]</sup>。因此,合理选取工程作业点的海冰设计参数,不仅需要考虑到场址附近独特的海冰热力和动力学过程,还需要评估最近几十年海冰冰情的变化趋势。

渤海和黄海北部海冰工程设计参数区划是各类海洋工程设计冰厚的主要参考依据。以渤海油气平台建设作为主要应用目标,吴辉碁等<sup>[6]</sup>和 Yang<sup>[7]</sup>将

收稿日期:2022-08-24. 网络出版日期:2024-02-01.  
基金项目:国家自然科学基金项目(42176208).  
作者简介:王安良,男,高级工程师;  
刘煜,男,正高级工程师.  
通信作者:刘煜,E-mail:liuyu@nmeff.cn.

渤海和黄海北部划分为 21 个冰区,每个冰区赋予不同的工程海冰设计参数<sup>[6-7]</sup>。随后,利用气温、冰温、冰期和冰厚换算得到的冰孔隙率,海冰物理和力学参数在渤海工程分区中得到了进一步的研究<sup>[8-9]</sup>。孙邵等<sup>[10-11]</sup>基于海冰对海上和沿岸经济活动的影响,利用权重分析方法将不同海域划分了风险等级。袁本坤等<sup>[12]</sup>利用相似的权重分析方法,以海冰厚度、密集度及冰期等数据为基础,把我国主要结冰海域综合划分为 7 个风险区,为我国的海冰灾害风险管理和防灾减灾规划等提供了依据。目前工程海冰参数设计区划在制定过程中大多依据 2000 年之前的数据,较难反映现阶段全球气候变暖背景下渤海和黄海北部冰情的变化规律。同时,受制于当时的观测条件和手段,在制定规范中所利用的数据较为有限,海冰灾害区划的客观性较差。近 20 年来,渤海沿岸大范围港口建设和围填海工程也会在局地影响海冰的热力-动力学过程<sup>[13]</sup>。

目前,渤海和黄海北部沿岸工程作业迫切需要发展一种海冰环境参数评估系统,为具体工程作业点提供工程海冰参数的精细化评估。综合考虑海冰冰期、厚度、速度和强度等参数的影响,Xu<sup>[14]</sup>等提出了一种针对冰区海洋平台结构的风险指数评估方法,但该方法主要关注已建成海洋平台在海冰作用下的结构响应,海冰环境参数仅作为输入变量而未展开相关研究。Wang<sup>[1]</sup>针对沿岸风电场设计,提出了一套工程海冰环境设计参数评估系统,集合了近 20 多年来卫星遥感、现场监测和数值预报等多源数据,对冰期、重现期冰厚和冰强度等参数进行评估,在工程应用中取得了良好效果。

本文基于精细化预报结果和卫星观测反演数据,利用工程海冰参数评估系统,统计分析渤海和黄海北部冰情整体变化特征;重点对设计冰厚近年来的变化趋势进行对比研究,为相关沿岸海洋工程海冰设计参数的确定提供依据。

## 1 重现期冰厚评估数据和方法

### 1.1 研究海域位置

本文比较分析渤海和黄海北部总体冰情变化趋势。然后,对近些年风电场建设活动开展较多的渤海莱州湾和黄海北部 3 个作业点进行分析,其位置分布如图 1 所示。其中,A 点位于庄河海域,按照《渤海海冰设计作业条件》海冰区划边界,该点在 19 区一侧,接近 18 区和 19 区的分界线。莱州湾内 B 点和 C 点分别处于莱州海域和东营海域,但均处于海冰 10 区范围内。

### 1.2 海冰业务化预报和观测数据

本文冰厚数据主要来自于 MODIS 卫星海冰图

像反演结果和国家海洋环境预报中心的业务化小区域高精度海冰数值预报<sup>[1,15]</sup>。搜集整理了 1997-2022 年渤海及黄海北部 1 500 多幅冬季卫星遥感图像,进行海冰分布和冰厚分析。同时,借助分辨率 50 m 的高清 HY-1C 和 HY-1D 海冰图像,对重叠冰和堆积的情况进行判别和分析。

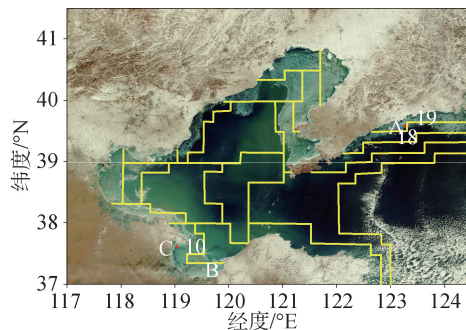


图 1 海冰作业区划图<sup>[6]</sup>与本文研究工程点 A (庄河)、B (莱州)和 C (东营)

Fig. 1 Sea ice zones<sup>[6]</sup> and the study projects of A (Zhuanghe), B (Laizhou) and C (Dongying) in this paper

目前,利用可见光和近红外通道大面反演冰厚在国际上仍然是一个难题。通常来讲,在没有雪覆盖的裸冰区域,厚冰反照率高,薄冰反照率低。但是反照率和冰厚并不存在固定的对应关系,且和冰类型密切相关。根据以往对 MODIS 各通道直方图分布分析研究表明,红光通道(645 nm)与蓝光通道(412 nm)海冰所对应的反射率变化范围较大<sup>[16]</sup>,即这 2 个通道对海冰厚度或者类型有着较好的分辨能力。同时,卫星遥感图像上这 2 个通道在海冰区也显示出较好的层次变化。结合大量现场观测数据,本文通过 MODIS 图像反射与我国渤海相应海冰冰厚实测数据对比,确定了冰厚值所对应的反射率即分段线性节点,作为冰厚反演的默认值。此外,考虑渤海和黄海北部海冰区域和季节性差别,本文开发的业务化海冰厚度反演系统基于每日海洋平台和观测站点的冰厚,还可以对反演冰厚进行客观订正,如图 2 所示。该系统采用上述分段线性计算冰厚的方法,并在应用过程中考虑海冰类型与实测海冰数据,得出不同海冰类型的冰厚与反照率关系,以此提高海冰冰厚的反演精度,为渤海和黄海北部海冰数值模式提供准确的海冰厚度初始场。

国家海洋环境预报中心中尺度渤海和黄海北部海冰数值模式业务化运行了近 30 a<sup>[1,15]</sup>,为防止海冰灾害的发生提供了重要的保障,在此过程中也积累了大量的历史数据,如图 3 所示。

但中尺度海冰预报模式分辨率仍然难以满足冬季海上生产和局地海域经济活动对精度要求,为此该中心近年来开发了适用于工程作业保障的定点小

区域高精度海冰数值预报模型。根据工程作业点小区域冰情预报特点,通过对不同海冰模式的分析比较,确定利用较为成熟的弹粘塑性海冰模式对工程作业点区域海冰进行数值模拟。该预报模式主要有以下特点:1)考虑了海冰的弹性作用。因为对于小尺度海冰,弹性效应较为明显,应充分考虑海冰在小应变和小应变率条件下的弹性力学行为,以提高海冰动力学的计算精度;2)对短时间的水文和气象强迫场变化反映更为迅速和准确;3)高分辨率可有效地预报工程作业点区域海冰环境参数。该模型可针对特定工程作业点及邻近海域,开展海冰厚度、密集度、冰速、海冰的物理力学性质等参数以及危险冰块的漂移轨迹等参数的预报。以上 2 种类型海冰模式数据相互补充,可为大面积平整冰和局地动力学作用下的海冰再分布评估提供准确可靠的数据支撑。

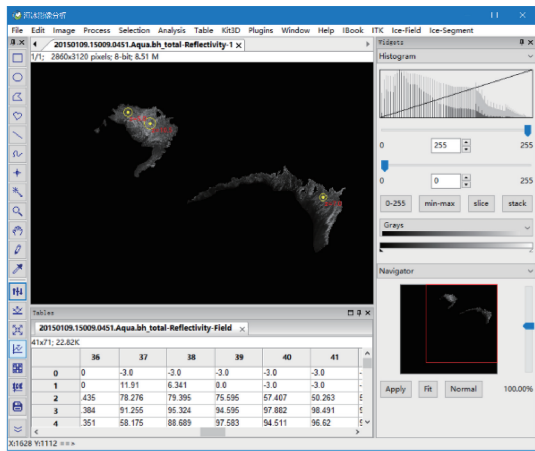


图 2 海冰厚度客观订正反演系统

Fig. 2 Retrieval system of sea ice thickness with objective revision

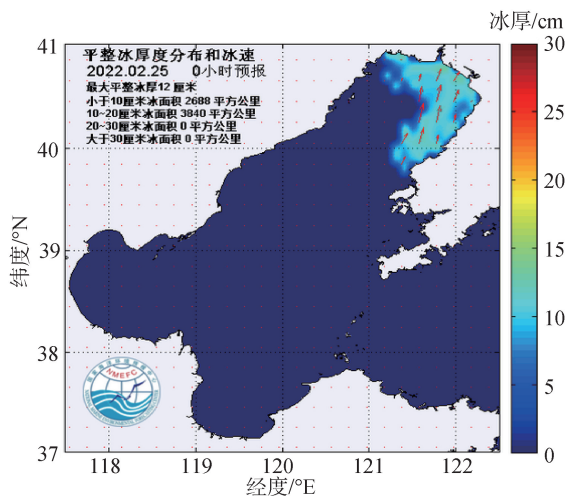


图 3 海冰业务化数值预报产品

Fig. 3 Production of operational numerical forecasting

### 1.3 海冰厚度重现期极值统计

本文海冰厚度极值是指海冰厚度年度出现的极大值,其与海洋防灾减灾、海洋航行和海洋工程

设计等有密切关系,是寒区海洋工程设计中重点关注的设计参数之一。以  $f(x)$  和  $F(x)$  分别代表海冰厚度随机变量极值海冰厚度  $X$  的概率密度函数和分布函数,以  $x_p$  代表一个取值,则  $X > x_p$  的概率为:

$$P\{X \geq x_p\} = \int_{x_p}^{\infty} f(x) dx = 1 - F(x_p) \quad (1)$$

而  $X > x_p$  的概率为:

$$P\{X < x_p\} = \int_{-\infty}^{x_p} f(x) dx = F(x_p) \quad (2)$$

则  $P(X > x_p)$  的倒数:

$$N = 1/p = 1/(1 - F(x_p)) \quad (3)$$

式中:  $N$  为事件  $X > x_p$  的重现期;  $x_p$  为重现期为  $N$  年的极值。

在工程设计上,  $p$  常称为  $X$  的设计频率,一般取  $p=0.1, 0.05, 0.02, 0.01$ , 相应的重现期为  $N=10, 20, 50, 100$  a。海洋工程设计上取冰厚的设计频率为 0.01, 则设计冰厚为重现期为 100 a 的年极值冰厚,俗称百年一遇冰厚。因此,海冰厚度重现期极值统计分析的主要任务是根据变量的特点和已有的计算能力选定年极值的分布形式,再以已有年极值的实测数据为统计样本来确定分布形式中的参量,然后按由指定的  $N = 1/p$  计算重现期为  $N$  年的年极大值  $x_p$ , 或由指定的  $N$  计算重现期为  $N$  年的年极小值  $x_p$ 。

本文采用 Weibull 分布来研究海冰厚度重现期。相较于 Pearson-III 型分布和 Gumbel 分布, Weibull 分布因多了一个参量自由度,从而有较大的灵活性和更适合于拟合实测数据的经验分布,适用范围较广。Weibull 概率密度分布函数为:

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \exp\left\{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c\right\}, & x \geq a \\ 0, & x < a \end{cases} \quad (4)$$

式中  $a, b, c$  为待定拟合参量,且  $b, c \geq 0$ 。本文将利用年最大冰厚进行拟合获取相关参数。

### 1.4 工程海冰设计参数评估方法

国家海洋环境预报中心以近 20 多年渤海和黄海北部海冰多源观测数据和多尺度海冰精细化数值预报资料为基础,建立了一套寒区工程海冰设计参数评估系统。该系统在典型海上风电工程海域进行了成功应用<sup>[1]</sup>。系统评估流程如图 4 所示。该系统有效集成了不同分辨率卫星图像、现场调查和视频监控数据,较为准确地评估作业海域冰日、浮冰分布和堆积重叠特征,利用 20 多年不同分辨率海冰业务化运行平台积累的海冰要素数据,分析作业点海冰的动力学特性,统计海冰厚度和海冰速度的联合概率密度函数;并结合海冰物理学性质试验结果,计

算海冰重现期压缩强度和弯曲强度,实现对寒区海洋结构工程关键海冰环境参数的准确评估。

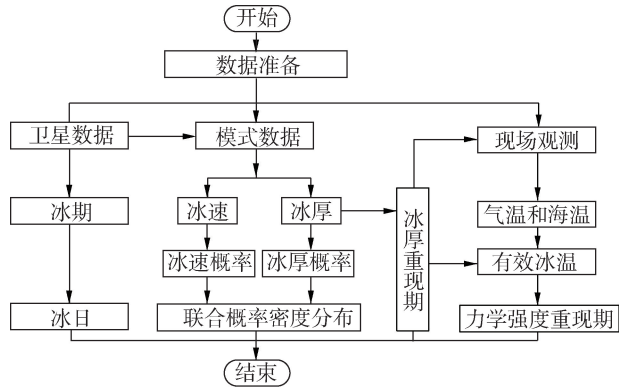


图 4 工程海冰设计参数评估流程

Fig. 4 Assessment procedure for sea ice engineering parameters

本文利用该系统对工程场址的年最大平整冰厚进行评估,形成了 1997–2022 年 26 组年最大平整冰厚度时间序列,以此对海冰厚度重现期进行分析。从流程图 4 中可以看出,工程海冰参数设计系统综合了卫星、现场观测和数值模式等数据,其中最大平整冰厚是整个评估系统的关键一环。

## 2 海冰变化趋势及重现期冰厚分析

### 2.1 渤海和黄海北部海冰总体变化趋势

冰情等级是以海冰冰缘线作为主要判定依据,综合考虑辽东湾、渤海湾、莱州湾和黄海北部局地海冰冰情,在国家层面上发布用来衡量整个冰期冰情严重程度的指标,其中 1 级和 5 级分别代表最轻和最重冰情。渤海和黄海北部冰期通常跨越 2 个自然年,一般发生在 11 月底至次年 3 月初,严重冰期集中在 1–2 月。

本文共获取了 72 a (1951–2022 年)的海冰冰情等级数据,如图 5 所示。1990 年后冰情等级存在明显下降的趋势,这期间 3 级以上的冰情仅仅发生在 2001 年、2010 年和 2013 年。从 2 组数据统计箱型图中也可以发现,1990–2022 年冰情中位数较 1951–1989 年降低了近 1 个等级,如图 6 所示。3 级冰情在标准中属于平常年份,但近 20 a 出现的频率逐渐变低。以辽东湾最大浮冰外缘线为例(如图 7 所示),近 20 年来最严重的冰情发生在 2009–2010 年达到了 4 级,绝大部分最大浮冰外缘线距离在平均线以上。最近 3 个冰期最大外缘距离与同期相比,大多集中在平均线以下,均未达到海冰最低警报标准,这表明该海域整体冰情仍然处于一个下降的趋势中<sup>[4–5]</sup>。

需要指出的是,海冰等级标准主要是以海冰的覆盖范围作为衡量指标,受到监测手段的限制并未充分考虑海冰厚度的影响。因此即使相同等级的冰

情,现实中也存在冰厚不同的现象。如图 7 所示,盛冰期持续时间存在缩短的趋势,同时在盛冰期内海冰经常会因短暂升温而剧烈消融至不足 18.5 km 的最大海冰缘线范围内。据此可以推测,近 10 a 来该海域海冰厚度总体较薄,在出现短暂回温时会出现大面的消融。因此,即使在相同冰情等级年份内,近些年来海冰的厚度也要相对较薄。

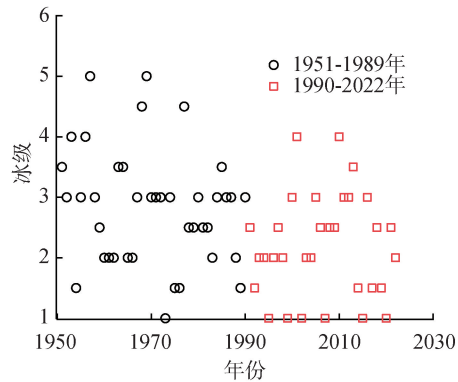


图 5 1950–2022 年渤海和黄海北部冰级分布

Fig. 5 Ice grades of Bohai Sea and Huanghai Sea for 1950–2022

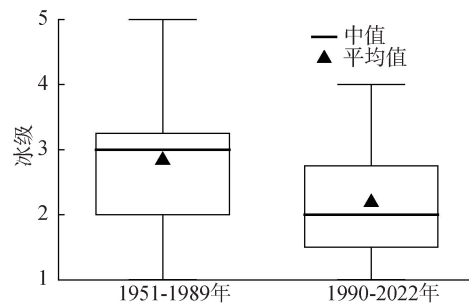


图 6 1990 年前后海冰等级箱型图

Fig. 6 Boxplot for the ice grades grouped by 1990

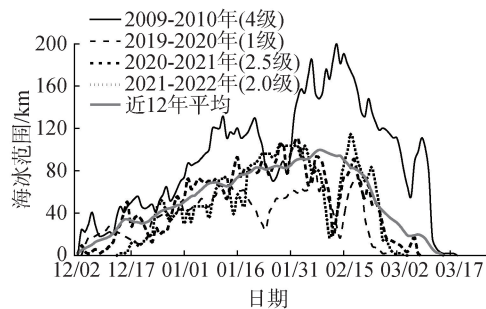


图 7 辽东湾浮冰范围变化趋势

Fig. 7 Trend of daily sea ice marginal for Laizhou Bay

### 2.2 海冰重现期分析

本文主要利用业务化小区域高精度海冰数值预报数据获取工程作业点的年最大冰厚。同时,针对最大冰厚出现的时间段,综合考虑各类卫星数据和现场观测资料,对年冰厚最大值进行适当的修正。最终获得 26 组年最大冰厚数据进行 Weibull 重现期分析,分别得到 5、10、20、50 和 100 a 重现期冰厚分布如图 8 和图 9 所示。同时,将工程点所在《渤海海

冰设计作业条件》分区中的重现期冰厚值也在图 8 和图 9 进行了比较。结果可见本文评估的重现期设计冰厚较海冰区划中的值明显偏低。以风电场设计常采用的 20 a 重现期冰厚为例,本文分析庄河点 20 a 一遇设计冰厚为 25.2 cm,而海冰区划中给出的 18 冰区设计冰厚为 27.3 cm,19 冰区设计冰厚为 40 cm。本文结果比海冰区划推荐设计值小 37%。与庄河点评估结果类似,采用本文方法评估的设计冰厚结果在莱州点比海冰区划推荐结果降低了 20%,在潍坊点降低了 27%。

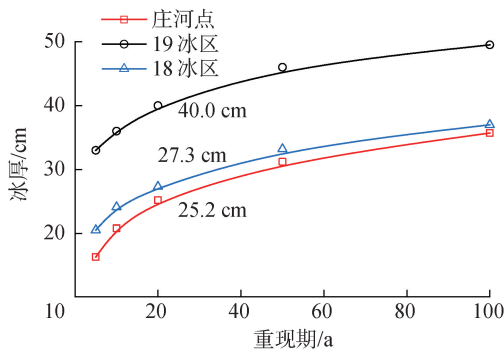


图 8 庄河点海冰重现期厚度评估

Fig. 8 Sea ice thickness of return period for Zhuanghe Point

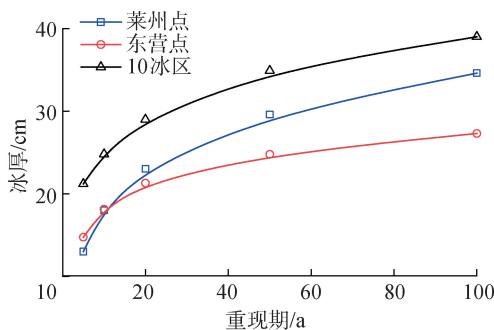


图 9 莱州点和东营点海冰重现期厚度评估

Fig. 9 Sea ice thickness of return period for Laizhou and Weifang Points

庄河点位置处在 19 区,较为接近 18 区和 19 区的分界线,但这 2 个冰区的重现期设计冰厚存在较大的差别,如图 8 所示。这种情况在风电场的设计过程中较为常见,同时也存在工程厂址区域跨越多个海冰分区的状况。此时,仅以海冰分区来选取冰厚参数会增加很大的工程量和建造成本,很难用单一的海冰区划线来界定工程海冰设计参数。尤其,在沿岸海域海冰动力和热力条件较为复杂,时常发生重叠和堆积等较为剧烈海冰再分布过程,需要针对特定的作业点开展设计冰厚的评估工作。

同一海冰分区内的工程作业点,设计海冰厚度也会存在一定差异。莱州点和东营点均处在海冰 10 区范围内,但该冰区跨度范围较大,而且所处沿岸海域岸线和水文条件较为复杂。从图(9)可以看

出,这 2 个工程点的重现期冰厚参数存在差异,尤其在大于 20 a 重现期设计冰厚时差异较大。从本文卫星图像反演推算的年最大冰厚看(图 10),2 个工程点的最大冰厚总体趋势较为接近,说明该海域总体海冰生成条件较为接近。

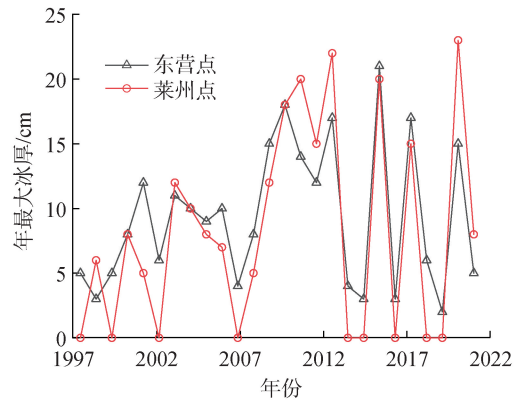


图 10 莱州点和东营点年最大冰厚分布

Fig. 10 Yearly maximum thicknesses of sea ice for Laizhou point and Dongying pint

尽管如此,莱州海域水文条件影响下的海冰动力过程相对剧烈,在风和潮流潮汐作用下平整冰更容易发生堆积的现象(图 11),从而在极端冰厚上表现为东营工程点年最大冰厚较大。莱州工程点更容易出现全年无冰的情况,而东营工程点不会出现全年无冰的状况。这主要与东营工程点所处的独特地理位置有关,其离岸距离相对较小,离黄河口较近,海水的盐度较低,在冷空气作用下较其他海域更容易形成 5 cm 左右冰皮<sup>[17]</sup>。此外,图 11 中的坝体在 2007 年前后建成,该坝体也在一定程度上影响到该海域与外界海洋的热交换过程,使得该工程点的水文条件趋于稳定。在以上条件综合作用下,东营点 10 a 重现期冰厚要较莱州点偏高。总体上来看,由于受到气候变化、海岸条件变迁和独特水文条件的影响,即使在同一冰区范围内,不同作业点也需要有针对性地开展海冰设计厚度的评估。

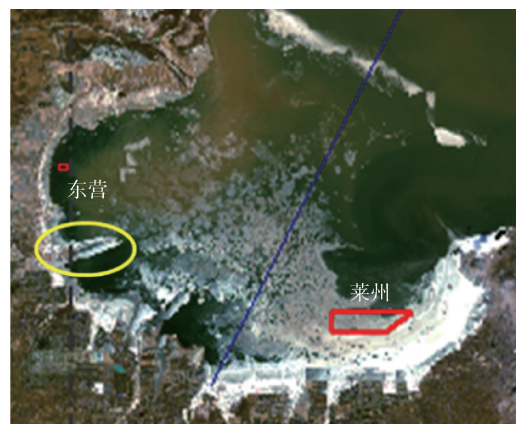


图 11 莱州点和东营点典型海冰分布情况

Fig. 11 Typical distribution of sea ice in Laizhou Point and Dongying Point

### 3 结论

1) 在全球气候变暖大背景下,渤海和黄海北部冰情等级存在降低的趋势。从冰情等级分布上来看,1990-2022 年海冰冰情等级中值要较 1951-1989 年降低了近 1 级,常冰年(3 级)在最近 20 年逐渐成为出现频率较低的等级。

2) 海冰设计参数区划方式在具体工程应用时需要综合考虑多方面的因素。本文中特定工程作业点设计冰厚较之前区划中的数据明显偏低。此外,在工程作业点离岸距离较近,海冰动力和热力学过程较为复杂的海域,需要有针对性地开展工程设计冰厚的评估。

### 参考文献:

- [1] WANG Anliang, TANG Maoning, ZHAO Qian, et al. Analysis of sea ice parameters for the design of an offshore wind farm in the Bohai Sea[J]. *Ocean engineering*, 2021, 239: 109902.
- [2] 屈衍, 张大勇, 许宁, 等. 《中国海冰条件及应用》与 ISO 19906 冰荷载规定比较[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2018, 39(4): 629-634.  
QU Yan, ZHANG Dayong, XU Ning, et al. Comparison of the Ice Load Regulations in ISO 19906 and the Sea Ice Conditions and its application in China[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2018, 39(4): 629-634.
- [3] 孙静琪, 陈笑娟, 李倩, 等. 基于遥感技术的 1988—2018 年渤海海冰冰情时空变化特征[J]. *灾害学*, 2022, 37(1): 178-184, 191.  
SUN Jingqi, CHEN Xiaojuan, LI Qian, et al. Temporal and spatial variation characteristics of sea ice conditions in the Bohai Sea from 1988 to 2018 based on remote sensing technology[J]. *Journal of catastrophology*, 2022, 37(1): 178-184, 191.
- [4] YAN Yu, SHAO Dongdong, GU Wei, et al. Multidecadal anomalies of Bohai Sea ice cover and potential climate driving factors during 1988-2015[J]. *Environmental research letters*, 2017, 12(9): 094014.
- [5] 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.
- [6] 吴辉斌, 杨国金, 张方俭, 等. 渤海海冰设计作业条件[M]. 北京: 海洋出版社, 2001: 12-22.
- [7] YANG G. Bohai sea ice conditions[J]. *Journal of cold region engineering*, 2000, 14(2): 54-67.
- [8] 李志军, 卢鹏, DEVINDER S. 基于海冰物理和力学参数的渤海冰工程分区[J]. *水科学进展*, 2004, 15(5): 598-602.  
LI Zhijun, LU Peng, SODHI D. Ice engineering sub-areas in Bohai from ice physical and mechanical parameters[J]. *Advances in water science*, 2004, 15(5): 598-602.
- [9] 李志军, DEVINDER S S, 卢鹏. 渤海海冰工程设计参数分布[J]. *工程力学*, 2006, 23(6): 167-172.  
LI Zhijun, SODHI D, LU Peng. Distribution of ice engineering design criteria of Bohai[J]. *Engineering mechanics*, 2006, 23(6): 167-172.
- [10] 孙劭, 史培军. 渤海和黄海北部地区海冰灾害风险评估[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(4): 8-13.  
SUN Shao, SHI Peijun. Risk assessment of sea ice disaster in Bohai Sea and North Yellow Sea of China[J]. *Journal of natural disasters*, 2012, 21(4): 8-13.
- [11] GU Wei, LIU Chengyu, YUAN Shuai, et al. Spatial distribution characteristics of sea-ice-hazard risk in Bohai, China[J]. *Annals of glaciology*, 2013, 54(62): 73-79.
- [12] 袁本坤, 曹丛华, 江崇波, 等. 我国海冰灾害风险评估和区划研究[J]. *灾害学*, 2016, 31(2): 42-46.  
YUAN Benkun, CAO Conghua, JIANG Chongbo, et al. A study on risk assessment and zoning of sea ice disaster in China[J]. *Journal of catastrophology*, 2016, 31(2): 42-46.
- [13] ZHANG Na, LI Shuai, WU Yongsheng, et al. Effects of sea ice on wave energy flux distribution in the Bohai Sea[J]. *Renewable energy*, 2020, 162: 2330-2343.
- [14] XU Ning, YUAN Shuai, LIU Xueqin, et al. Risk assessment of sea ice disasters on fixed jacket platforms in Liaodong Bay[J]. *Natural hazards and earth system sciences*, 2020, 20(4): 1107-1121.
- [15] WU Huiding, BAI Shan, LI Hai, et al. Modeling and forecasting of Bohai Sea ice[J]. *Journal of cold regions engineering*, 2000, 14(2): 68-80.
- [16] SHI Wei, WANG Menghua. Sea ice properties in the Bohai Sea measured by MODIS-Aqua: 1. Satellite algorithm development[J]. *Journal of marine systems*, 2012, 95: 32-40.
- [17] ZHANG Xuliang, ZHANG Zhaohui, XU Zongjun, et al. Sea ice disasters and their impacts since 2000 in Laizhou Bay of Bohai Sea, China[J]. *Natural hazards*, 2013, 65(1): 27-40.

### 本文引用格式:

王安良, 赵倩, 隋俊鹏, 等. 渤海和黄海北部工程设计冰厚变化趋势分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(4): 659-664.

WANG Anliang, ZHAO Qian, SUI Junpeng, et al. The trend of sea ice design thickness for the Bohai Sea and Northern Huanghai Sea[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2024, 45(4): 659-664.