

结冰期辽东湾北部海冰和海水中典型污染物分析与评价

王召会^{1,2}, 胡超魁^{1,2}, 田金^{1,2}, 邵泽伟^{1,2},
葛延玮^{1,2}, 吴金浩^{1,2}

(1.辽宁省海洋水产科学研究院, 辽宁 大连 116023; 2.辽宁省海洋环境监测总站, 辽宁 大连 116023)

摘要: 本文根据 2020 年辽东湾斑海豹繁殖地海冰和海水的调查数据, 分析了该海域水质状况, 探讨了其污染物来源, 并将两种介质的污染物浓度进行了对比分析。结果表明, 海冰融化水中石油类浓度明显高于同站位表层海水, 重金属浓度则略高于同站位海水, Pb 和 Zn 是影响海冰重金属污染指数的主要负面因子; 石油类和重金属具有较高的相关性, 重金属各因子之间也具有很好的相关性, 表明它们具有相似的来源及迁移规律, 污染物可能主要来源于北部河口区和近岸港口区; 海冰融化水中污染物浓度在北部河口和中部海域出现多个不规则的高值区, 且与同站位海水无明显相关性。

关键词: 海冰融化水; 斑海豹繁殖地; 水质状况

中图分类号: P734

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2022)01-0059-06

Analysis and evaluation of typical pollutants in sea-ice and sea water in northern Liaodong Bay during icing period

WANG Zhao-hui^{1,2}, HU Chao-kui^{1,2}, TIAN Jin^{1,2}, SHAO Ze-wei^{1,2},
GE Yan-wei^{1,2}, WU Jin-hao^{1,2}

(1.Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Dalian 116023, China; 2.Liaoning Marine Environment Monitoring Station, Dalian 116023, China)

Abstract: The aqueous quality of the melted sea-ice water and surface seawater at 11 same stations in the phoca largha breeding area was investigated in 2020. According to the research data, this project analyzed the quality of the melted sea-ice water, discussed the source of involved pollutants and compared with them in the seawater at the same station. The results turn out that the contaminant concentration of the melted sea-ice water is significantly higher than that of the surface seawater at the same station. Besides, Pb and Zn are proved to be the dominant negative factors that affect the heavy metal pollution index of the sea-ice. The sound correlation reflected between heavy metals as well as petroleum and heavy metal in the water indicated the similar sources and transferring regularity of the involving pollutants and the main source of pollutants should be in the northern estuary and coastal ports. There are many irregular high value areas of pollutant concentration in the northern estuary and the central sea area and no apparent correlation between sea-ice water and seawater at the same station.

Key words: sea-ice melted water; seal breeding area; water quality

海冰是指直接由海水冻结而成的咸水冰, 由固体冰、卤水(包括一些盐类结晶体)和空气的内含物等组成, 具有复杂的内部结构。海冰作为一种特殊的海洋灾害类型, 会造成沿岸及海上的

收稿日期: 2021-07-21, 修订日期: 2021-09-18

基金项目: 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1907109); 大连市杰出青年科技人才项目(2019RJ09); 辽宁省重点研发计划项目(2018228004); 辽宁省海洋与渔业科研项目(201828, 201824)

作者简介: 王召会(1981—), 男, 山东沂水人, 副研究员, 硕士, 主要从事海洋生态环境调查与评价工作, E-mail: 3488526@qq.com

通讯作者: 吴金浩(1982—), 男, 山东新泰人, 研究员, 硕士, 主要从事海洋环境化学研究工作, E-mail: jinhaow@126.com

核电工程、油气勘探、港口工程等构筑物破坏或主体功能丧失,可能造成核泄漏、溢油、危化品泄漏等潜在事故,海冰对经济、生态、社会的影响已被广泛认知^[1-3]。而作为海洋环境的一个重要界面,其融化后的水质状况,在过去并没有引起人们的重视。海冰通过改变表层流场等方式影响污染物的迁移转化,同时也作为污染物载体改变污染物的时空分布范围,尤其近岸和河口等冰情严重海域大多与水质差、污染严重海域重合,是近岸水质考核、污染物跨界运输的重点关注区域^[4]。此外,污染物通过干、湿大气沉降等方式附着在海冰表面,并在海冰融化时进入海水环境,造成二次污染。海冰作为污染物运输媒介的作用至少从20世纪90年代初就被认识到^[5]。冰封期海水受到污染、受污染的海水冻结成冰以及海冰直接受到污染等,都会使海冰冰体内赋存污染物,作为污染物载体的海冰对污染物的动力输运,将显著影响污染物的时空分布。融化的海冰释放出的污染物,无论是固定的还是漂浮的,都会影响当地海水水质和海洋生态系统^[6]。徐学仁等研究了长兴岛沿岸海域海冰融化水水质状况,该海域海冰融化水中除全盐量、氯化物和硫酸盐超标外,其他23项指标均合格^[7];童金炉等研究了夏季楚科奇海河水与海冰融化水组分的空间变化特征,海冰融化水份额呈现随深度增加而降低的趋势^[8]。

辽东湾是位于渤海北部的重要渔业区,被大辽河、双台子河、大凌河、小凌河等众多河流包围,每年冬季都有3~4个月不同程度的结冰现象,一般情况下,海冰分布范围可达渤海面积的1/3,为我国一级保护动物——斑海豹(*Phoca largha*)提供了宝贵的栖息地和繁殖地^[9-10]。另外,渤海北部油气资源丰富,发现的油气田和承载构造较多,是中国最重要的油气产区之一,存在许多海上石油平台,开采规模不断扩大。石油、天然气资源的开发及周边地区陆源污染的不断增加,导致该地区的环境污染日益严重^[11]。然而,对该领域水质状况的研究大多集中在无冰期^[12-13],海冰作为辽东湾生态环境的重要组成部分,是辽东湾环境污染监测、评估和控制中不可缺少的组成部分。

因此,本研究利用2020年辽东湾北部斑海豹繁殖地海冰调查数据,分析了该海域海冰融化水水质状况,并对其石油类和重金属等典型污染物来源进行了初步探讨,对海冰和同站位海水中污染物含量进行了对比分析,旨在为辽东湾斑海豹繁殖地的保护及海洋生态环境的健康发展提供科学依据,也可对渤海污染综合治理提供基础数据和支撑。

1 材料与方法

1.1 调查时间与站位

现场调查于2020年1月在辽东湾斑海豹传统繁殖地的海冰区进行,共设置11个调查站位,如图1所示。采用特制网具采集破冰船周边平整冰样品,现场截取30 cm × 30 cm的冰块,冰厚约为15 cm,用锡箔纸包裹后冷冻储存;同时采用玻璃采水器采集相同站位0.5~1.0 m处表层海水样品,调查项目为辽东湾近岸海域典型污染物,包括石油类和重金属(Cu、Pb、Zn、Cd、Hg和As),每个站位均采集平行样品。

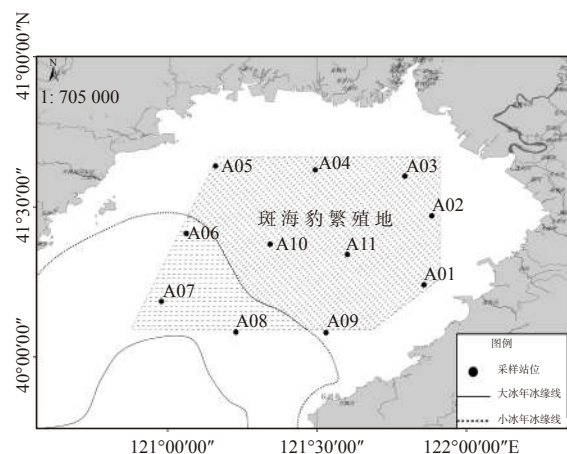


图1 样品采集站位

Fig. 1 Location of sampling stations

1.2 样品分析

海水结冰时,是其中的水冻结,而将其中的盐分排挤出来,部分来不及流走的盐分以卤汁的形式被包围在冰晶之间的空隙里形成“盐泡”,此外,海水结冰时,还会将来不及逸出的气体包围在冰晶之间形成“气泡”^[14]。因此,海冰实际上是淡水冰晶、卤汁和气泡的混合物^[15]。海冰

样品融化后盐度的变化范围为 2.60 ~ 7.83, 均值为 5.75, 目前尚无针对海冰样品进行分析测定的标准^[5], 因此, 本文石油类和重金属的分析按照《海洋监测规范 第 4 部分 海水》(GB 17838.4—2007)进行。

1.3 评价标准和方法

研究海域在辽东湾国家级水产种质资源保护区范围内, 因此, 采用《海水水质标准》(GB 3097—1997)中保护区的评价标准, 即一类海水水质标准进行评价。评价方法采用单因子污染指数法, 计算公式为:

$$A_i = C_i / C_{si} \quad (1)$$

式中: A_i 表示重金属元素 i 的污染指数; C_i 表示重金属元素 i 的实测含量; C_{si} 表示重金属元素 i 的评价标准(取海水水质一类标准作为研究区域各重金属元素评价标准)。

重金属综合污染状况是将同一站位的所有要研究的重金属作为一个统一的整体, 研究这些重金属元素在相互作用的情况下对环境产生的影响, 采用综合污染指数进行评价^[16], 其计算公式为:

$$WQI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

式中: WQI 为水质重金属综合污染指数; n 为参与评价的重金属元素的数量; A_i 表示重金属元素 i 的污染指数。

当 $WQI \leq 1$ 时, 表明该水域无重金属污染; 当 $1 < WQI \leq 2$ 时, 表明该水域重金属为轻度污染; 当 $2 < WQI \leq 3$ 时, 表明该水域重金属为中度污染; 当 $WQI > 3$ 时, 表明该水域重金属为重度污染。

1.4 数据处理

利用相关分析和聚类分析研究海冰污染物的可能来源, 运用 SPSS 18.0 数据软件进行统计分析。利用 Pearson 相关系数分析海冰和海水中污染物的相关关系, 利用离差平方和与欧氏距离作为样本之间接近程度的度量, 对调查站位的因子得分进行聚类分析。站位图和数据图分别采用 ArcGIS 10.2 和 Origin 9.0 绘制。

2 结果与讨论

2.1 污染物调查结果与分析

石油类是成分十分复杂的物质, 含有多种难以被微生物降解的致癌化合物, 其低分子量芳香

族化合物, 通常是研究摄入毒性效应的重要化学物质。海洋是石油类污染物的最终汇聚地, 随着开采、加工、使用石油类化合物总量的增加, 通过各种途径进入海洋的石油类总量日益增加, 石油类污染物已成为近岸海域的主要污染物之一^[17-18]。2020 年, 斑海豹繁殖地海域海冰中石油类浓度变化范围为 0.060 ~ 0.175 mg/L, 均值为 0.120 mg/L(表 1), 站位超标率为 100%, 超标站位均符合第三类海水水质标准; 同站位海水中石油类浓度变化范围为 0.035 ~ 0.072 mg/L, 均值为 0.045 mg/L, 站位超标率为 18.2%, 超标站位均符合三类海水水质标准; 高值区出现在近岸港口区海域, 海冰融化水中石油类浓度明显高于同站位海水(图 2)。石油溢入海洋后因密度远低于海水密度, 一般以油膜的状态漂浮在海面, 只有小部分会以分子形式溶解于海水, 在海冰形成过程中, 通过粒子的捕获, 漂浮在水面上和吸附在悬浮泥沙的石油类首先进入海冰^[2], 聚集的石油类就会很快被封裹在冰层里, 因此, 同站位海冰中石油类浓度可能要高于海水中的浓度。

表 1 海冰融化水与海水中污染物浓度统计

Tab.1 Statistical table of pollutants in sea ice and sea water

项目	2020(n=11)	
	海冰	海水
石油类/mg·L ⁻¹	0.120 ± 0.045	0.045 ± 0.012
Cu/μg·L ⁻¹	2.09 ± 0.38	1.81 ± 0.08
Pb/μg·L ⁻¹	1.58 ± 0.27	1.44 ± 0.44
Cd/μg·L ⁻¹	0.47 ± 0.06	0.43 ± 0.06
Zn/μg·L ⁻¹	20.7 ± 1.37	18.7 ± 1.48
As/μg·L ⁻¹	1.94 ± 0.54	1.52 ± 0.50
Hg/μg·L ⁻¹	0.030 ± 0.007	0.023 ± 0.004

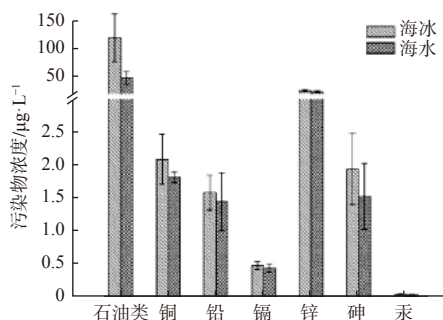


图 2 污染物含量柱状分布

Fig. 2 Columnar distribution of pollutant concentrations

重金属是具有潜在危害的重要污染物,会对海洋生物产生急性或慢性毒害作用。2020 年研究海域海冰融化水和同站位海水中重金属浓度统计如表 1 所示,6 项重金属因子在海冰融化水中的浓度均高于同站位海水(图 2)。其中,海冰融化水中的 Cu、Cd、As 和 Hg 均符合一类海水水质标准,Pb 的站位超标率为 100%,均符合二类海水水质标准;Zn 的站位超标率为 81.8%,均符合二类海水水质标准。同站位海水中,Cu、Cd、As 和 Hg 均符合一类海水水质标准,Pb 的站位超标率为 81.8%,均符合二类海水水质标准;Zn 的站位超标率为 9.1%,均符合二类海水水质标准。2020 年研究区域海冰融化水的 WQI 值为 0.57~0.75,均小于 1,表明研究海域海冰中各重金属浓度分布不均匀,整体处于较低水平;如果重金属评价污染分指数高于 1,则其对重金属综合评价产生直接的负面影响,所以将污染分指数高于 1 的重金属因子确定为影响水体重金属综合污染指数的主要负面因子,各重金属评价因子中, A_{Pb} 的范围为 1.16~2.07,各站位污染分指数均大于 1; A_{Zn} 的范围为 0.91~1.17,81.8% 的站位污染分指数大于 1,其他重金属因子污染指数均小于 1,因此,Pb 和 Zn 是影响研究海域海冰重金属污染指数的主要负面因子。

2.2 海冰和海水中污染物分布特征

图 3 为海冰融化水和同站位海水中污染物总量(石油类与重金属浓度之和)平面分布图。由图 3 可见,海冰融化水中污染物浓度在北部河口和中部海域出现多个不规则的高值区,低值区出现在南部海域,整体无明显的变化趋势,而海水中污染物浓度高值区出现在东部繁殖地边缘,低值区出现在西南部外海,整体呈由东向西南梯度递减的变化趋势。采用 Pearson 相关分析法对同站位海水和海冰中石油类浓度进行相关性分析,结果发现,7 项污染物因子的两两相关系数介于-0.364 和 0.395 之间(表 2),均无显著相关性。积冰的形成,其物理过程比较复杂,根据积冰的流动性,可将其分为固定冰和漂流冰^[19]。研究海域主要为漂流冰,主要由辽河口和大辽河口的碎冰,在空气流动和海流共同作用下漂浮而来,与航道破冰船破坏后形成的碎冰,重新冻结

形成浮冰,积冰表面和底面呈不规则状态,悬沙是重金属迁移转换的载体,重金属的浓度特征与悬沙浓度有着非常密切的联系^[20]。有研究指出,随着结冰期的到来,海水中高达 50% 的污染物会被困在冰晶基体中^[21],冰层里面会包裹河口区的吸附有污染物的悬浮泥沙,形成了污染物的海冰载体,海冰对污染物进行动力输运,这将显著影响污染物的时空分布,因此,海冰融化水中污染物浓度无明显的站位分布特征和变化规律。

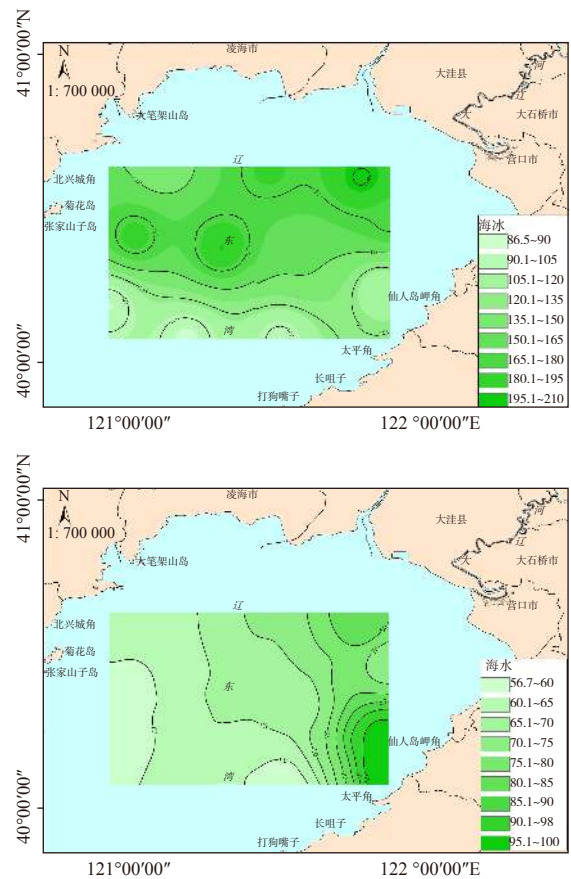


图 3 海冰和海水中污染物总量平面分布

Fig. 3 Total pollutant distribution of sea water and sea ice

表 2 海冰与同站位海水污染物浓度相关系数

Tab.2 Correlation coefficient of pollutants between sea ice and seawater

污染物	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Oil
相关系数	0.169	0.192	-0.364	0.183	-0.229	-0.128	0.395

2.3 污染物来源分析

对调查海域石油类和重金属浓度进行 Pearson 相关分析,结果如表 3 和表 4 所示,石油类和大

多数重金属元素之间具有较高的相关性, 大多数重金属因子之间也具有很好的相关性, 体现了相似的来源及迁移规律。其中, 海冰融化水中重金属 Pb 与 As、Pb 与 Cd、Zn 与 Cd、同站位海水中 Hg 与 As 在 0.01 水平上显著相关, 这是由于这些重金属因子的地球化学性质十分相似, 具有类似的来源, 常共生^[22]; 海冰融化水中石油类与重金属 Hg、Cu 在 0.05 水平上显著相关, 海水中石油类与重金属 Pb 在 0.05 水平上显著相关, 石油是由链烷烃、环烷烃、芳香烃及少量非烃化合物构成的复杂混合物^[23], 除有机污染物外, 石油中含有 30 多种重金属元素^[24], 说明辽东湾石油污染物的输入会伴随着重金属的输入, 重金属与石油类可能具有相似的输入源, 因此, 重金属来源也可能与输入辽东湾的石油或燃油的使用有关。

表 3 斑海豹繁殖区海冰中污染物相关分析

Tab.3 Results of correlation analysis of contaminants in sea ice

项目	Hg	As	Cu	Pb	Cd	Zn	Oil
Hg	1.00						
As	0.31	1.00					
Cu	0.40	0.64*	1.00				
Pb	0.30	0.80**	0.66*	1.00			
Cd	0.37	0.63*	0.57	0.76**	1.00		
Zn	0.62*	0.59	0.38	0.67*	0.78**	1.00	
Oil	0.63*	0.38	0.68*	0.43	0.46	0.59	1.00

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

表 4 斑海豹繁殖区海水中污染物相关分析

Tab.4 Results of correlation analysis of contaminants in seawater

项目	Cu	Pb	Cd	Zn	As	Hg	Oil
Cu	1.00						
Pb	0.15	1.00					
Cd	0.47	0.67*	1.00				
Zn	0.79	0.11	0.57*	1.00			
As	0.50	0.56*	0.26	0.15	1.00		
Hg	0.56*	0.43	0.20	0.37	0.83**	1.00	
Oil	0.20	0.58*	0.50	-0.06	0.19	-0.03	1.00

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

将 2020 年斑海豹繁殖区海冰内污染物因子进行聚类分析, 结果见图 4, 调查海域海冰内污

染物可分成 3 类。其中, 第一类包括 7#站位在内的 5 个采样点, 分布在辽东湾斑海豹繁殖地的中部海域; 第二类包括 10#站位在内的 3 个采样点, 分布在调查区域周围边缘海域; 第三类包括 4#站位在内的 3 个采样点, 大体分布于斑海豹繁殖地北部河口区。第一类的 5 个采样点分布在斑海豹繁殖地边缘, 临近营口港港口航运区, 因此港口航运可能为其污染物主要输入源, 其他 6 个采样点分布在斑海豹繁殖地北部和中部海域, 邻近辽河、大辽河和大凌河河口区, 因此, 陆源可能为其污染物主要输入源。

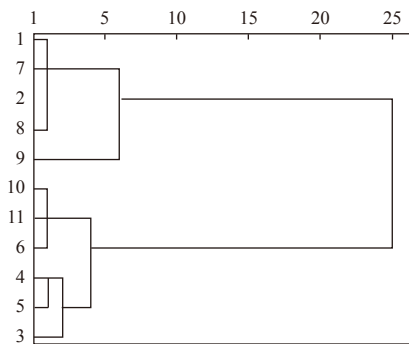


图 4 斑海豹繁殖地海冰聚类分析

Fig. 4 Hierarchical clustering analysis on sea ice in breeding ground of spotted seal

辽宁省沿辽东湾海域直接入海有名可查的河流有 60 余条, 流域面积在 500 km² 以上的有 10 条。这些河流携带上游地区污染物通过河口排入研究海域, 形成入海污染源, 2017 年, 环辽东湾主要入海河流辽河、大辽河、大凌河、六股河、复州河入海污染物总量为 36.9 万吨, 其中石油类 1720.1 吨, 重金属 322.4 吨^[25], 为辽东湾污染物主要来源。海冰中污染物可能是由于入海污染物吸附在悬浮泥沙上进入海冰, 辽东湾北部海域的辽河油田采油带为我国重要海上采油区, 近年来, 该海域石油勘探和开发过程虽无重大溢油事故发生, 但由于石油勘探和开发活动固有的溢油风险和其他海域已发生的溢油灾害, 该海域重大溢油风险依然存在^[26]。

3 结论

(1) 2020 年, 斑海豹繁殖地海域海冰融化水中石油类浓度变化范围为 0.060 ~ 0.175 mg/L, 均

值为 0.120 mg/L, 站位超标率为 100%, 同站位海水中石油类浓度变化范围为 0.035 ~ 0.072 mg/L, 均值为 0.045 mg/L, 站位超标率为 18.2%, 超标站位均符合三类海水水质标准; 海冰中石油类浓度明显高于同站位海水。6 项重金属因子在海冰融化水中的浓度均高于同站位海水, 其中, 海冰融化水中 Cu、Cd、As 和 Hg 均符合一类海水水质标准, 超标因子均符合二类海水水质标准。海冰的 *WQI* 值为 0.57 ~ 0.75, 均小于 1。

(2) 海冰融化水中污染物浓度在北部河口和中部海域出现多个不规则的高值区, 低值区出现在南部海域, 整体无明显变化趋势, 而海水中污染物浓度高值区出现在东部繁殖地边缘, 低值区出现在西南部外海, 整体呈由东向西南梯度递减的变化趋势。海冰融化水与同站位海水中污染物浓度均无显著相关性。

(3) 石油类和重金属具有较高的相关性, 重金属各因子之间也具有很好的相关性, 体现了它们相似的来源及迁移规律。根据聚类分析, 研究海域海冰中的污染物可能来自两个污染源, 其中分布在斑海豹繁殖地边缘的 5 个采样点的污染物主要来源于港口航运, 其他 6 个采样点分布在斑海豹繁殖地北部和中部海域, 陆源可能是其污染物主要输入源。

参考文献:

- [1] 陈伟斌. 辽东湾固定冰形态特征与成因初探[J]. 海洋环境科学, 1990, 9(4): 40-45.
- [2] 陈伟斌. 海冰与孤立桩相互作用的数值模拟[J]. 海洋学报, 1996, 18(4): 114-119.
- [3] COLE D M, SHAPIRO L H. Observations of brine drainage networks and microstructure of first-year sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C10): 21739-21750.
- [4] 杨国金. 海冰工程学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000: 266-268.
- [5] WANG F Y, PUĆKO M, STERN G. Transport and transformation of contaminants in sea ice[M]. //THOMAS D N. Sea Ice. 3rd ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd., 2017.
- [6] PFIRMAN S L, EICKEN H, BAUCH D, et al. The potential transport of pollutants by Arctic sea ice[J]. *Science of the Total Environment*, 1995, 159(2/3): 129-146.
- [7] 徐学仁, 陈伟斌, 刘现明, 等. 长兴岛沿岸海域海冰融化水水质状况[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(2): 33-36.
- [8] 童金炉, 陈敏, 潘红, 等. 夏季楚科奇海水与海冰融化水组分的空间变化特征[J]. 海洋学报, 2014, 36(10): 90-102.
- [9] 韩家波, 鹿志创, 田甲申, 等. 基于卫星信标跟踪的斑海豹放流效果研究[J]. 兽类学报, 2013, 33(4): 300-307.
- [10] 韩家波, 王炜, 马志强. 辽东湾北部双台子河口的斑海豹[J]. 海洋环境科学, 2005, 24(1): 51-53.
- [11] 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 等. 2004—2008年辽东湾水质污染特征分析[J]. 环境科学研究, 2010, 23(8): 987-992.
- [12] 王萧, 张文思, 迟光希, 等. 辽东湾及其附近海域重金属污染研究进展[J]. 环境化学, 2019, 38(10): 151-160.
- [13] 王修林, 邓宁宁, 李克强, 等. 渤海海域夏季石油烃污染状况及其环境容量估算[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(4): 14-18.
- [14] 丁德文. 工程海冰学概论[M]. 北京: 海洋出版社, 1999: 25-51.
- [15] 赵进平, 史久新, 金明明, 等. 楚科奇海融冰过程中的海水结构研究[J]. 地球科学进展, 2010, 25(2): 154-162.
- [16] 常旭, 马迎群, 杨晨晨, 等. 大辽河主要污染源重金属特征及污染评价[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(5): 32-38.
- [17] 闫峰, 张鹰. 江苏省海洋石油污染的现状和对策[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2004, 27(1): 94-97.
- [18] 陈建秋. 中国近海石油污染现状、影响和防治[J]. 节能环保, 2002(3): 15-17.
- [19] 宋守奎. 冰区溢油特点分析及应急策略探讨[J]. 中国水运, 2007, 7(9): 18-20.
- [20] 杜佳, 王永红, 黄清辉, 等. 珠江河口悬浮物中重金属时空变化特征及其影响因素[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 625-632.
- [21] PUĆKO M, STERN G A, MACDONALD R W, et al. α - and γ -Hexachlorocyclohexane measurements in the brine fraction of sea ice in the Canadian high arctic using a sump-hole technique[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(24): 9258-9264.
- [22] 宋永刚, 田金, 吴金浩, 等. 春季和夏季辽东湾表层沉积物中重金属的分布及来源[J]. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1407-1415.
- [23] YANG G P. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the South China Sea[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 108(2): 163-171.
- [24] DAVYDOVA S. Heavy metals as toxicants in big cities[J]. *Microchemical Journal*, 2005, 79(1/2): 133-136.
- [25] 辽宁省海洋与渔业厅. 2017年辽宁省海洋生态环境状况公报[R]. 沈阳: 辽宁省海洋与渔业厅, 2018.
- [26] 王召会, 吴金浩, 胡超魁, 等. 辽东湾水体中石油类的时空分布特征和污染状况[J]. 渔业科学进展, 2016, 37(3): 20-27.