

引用格式: 颜钰, 徐粒, 许映军等. 基于MODIS的渤海海冰资源量估算[J]. 资源科学, 2017, 39(11): 2166-2175. [Yan Y, Xu L, Xu Y J, et al. The estimate of sea ice resources in the Bohai Sea based on MODIS data[J]. *Resources Science*, 2017, 39(11): 2166-2175.] DOI: 10.18402/resci.2017.11.14

基于MODIS的渤海海冰资源量估算

颜钰^{1,2,3}, 徐粒^{1,2,3}, 许映军^{1,2,3}, 李倩^{1,2,3}, 陶军^{1,2,3}, 顾卫^{1,2,3}

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 北京师范大学地理科学学部减灾与应急管理研究院, 北京 100875;

3. 北京师范大学海岸带与海冰研究中心, 北京 100875)

摘要: 本文基于MODIS卫星遥感数据对渤海海冰资源量进行估算。利用面向对象特征提取法提取海冰面积, 运用反照率反演模型计算海冰厚度, 进而计算出海冰资源量, 并利用ArcGIS对2012冬季至2013年春季渤海海冰资源量时空变化特征进行分析。研究发现: 渤海海冰资源量年内变化大, 2012冬季至2013年春季资源量为0.84~50.83亿m³。12月及3月海冰资源量小, 1月和2月资源量储量丰富, 峰值出现在1月中旬。渤海海冰资源量空间差异很大, 资源量分布呈辽东湾>渤海湾>中间区>莱州湾。辽东湾海冰资源量占渤海海冰资源量的76.72%, 是渤海海冰资源的主要贡献者。此外, 海冰资源量受气温影响较大, 气温变化会在2天后导致资源量的变化。

关键词: 渤海; 海冰资源; 海冰资源量; MODIS; 时空分布

DOI: 10.18402/resci.2017.11.14

1 引言

渤海是三面环陆的半封闭浅海, 是北半球纬度最低的季节性结冰海域, 通常年份结冰期为每年的12月至次年3月^[1]。一方面, 环渤海地区是中国最重要的经济区之一, 其周边沿海地带拥有丰富的渔业和油气资源, 海冰灾害对渤海的水产养殖、海洋运输、近海油田作业和沿岸核电站、跨海大桥等海洋工程经济活动造成严重危害, 尤其重冰年会造成巨大经济损失^[2-4]。另一方面, 随着经济社会发展, 环渤海地区面临着严重的淡水资源匮乏问题, 该区域人均水资源量不足350m³, 远低于世界人均水资源量(8300m³)^[5]。渤海海冰具有盐度低、数量大和可再生等资源特性, 海冰资源淡化与利用可缓解中国北方地区水资源短缺局面^[6]。因此, 海冰资源研究可为区域非常规水资源开发和海冰减灾的潜在工程措施提供参考。

“海冰资源淡化”的科学设想由史培军于1996

年首次提出, 关于海冰资源量估算的研究集中在国内^[7]。顾卫等提出气候统计法估算辽东湾海冰资源量, 通过建立水深、经度、离岸距离、负积温与冰厚的回归关系进行估算^[8]。谢锋等利用NOAA/AVHRR数据建立了基于反照率的海冰厚度反演模型, 估算了辽东湾海冰资源量^[9]。Yuan等利用AVHRR数据测算1987—2009年冬季渤海海冰资源量^[10], 年最大日储量的变化幅度在13亿~60亿m³之间。近年随着遥感技术快速发展, 与其他遥感数据相比, MODIS数据由于其高时间分辨率、高光谱分辨率、中等空间分辨率和大规模覆盖等优势而逐步被应用到海冰监测中^[11]。吴龙涛等利用MODIS数据对渤海海冰面积和密集度等参数反演, 对不同厚度、密集度的海冰可较好区分, 相对AVHRR和HY-1A数据有更好的效果和应用价值^[12]。郭衍涛等基于MODIS影像对2012年冬季渤海海冰面积变化特征进行了分析^[13]。然而目前尚未有基于MODIS

收稿日期: 2016-12-01; 修订日期: 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41571510); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014KJJCB02)。

作者简介: 颜钰, 男, 广西河池人, 博士生, 主要从事海冰资源开发研究。E-mail: yanyu@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 顾卫, E-mail: weigu@bnu.edu.cn

2017年11月

的海冰资源量研究。因此,本文在前人研究基础上,建立了基于MODIS遥感影像数据估算渤海海冰资源量的方法,其中海冰面积和厚度分别使用面向对象特征提取法和基于反照率的海冰厚度反演模型计算,此外还对年内海冰资源量时空变化特征进行分析。

2 研究区概况

渤海由辽东湾、渤海湾、莱州湾和渤海中间区四部分海域组成,面积为7.49万 km^2 ,海岸线长2670km,周边有天津、大连、营口、锦州、秦皇岛和东营等城市(图1)。渤海平均水深为18m,平均海水温度范围介于 0°C (2月)至 21°C (8月)之间^[14]。渤海海水平均盐度为30‰,是中国沿海盐度最低的海域,且环渤海地区有数十条河流汇入,受汇入淡水影响,河口地区盐度可低至25‰,盐度越低越利于海水冻结。另外,渤海是一个内海,其与外海海水交换作用缓慢,表层海水温度深受当地气候影响,冬季冷空气入侵使得海水易失去大量热量而结冰^[15]。

3 数据来源与方法

3.1 数据来源

2012-2013年冬季是近30年来渤海冰情最严重的年份之一。初冰日为2012年12月8日,终冰日为2013年3月15日,冰期长达98天。故本文选取

2012年冬季至2013年春季的MODIS遥感影像进行研究。经辐射定标的MODIS影像数据(L1B MOD021KM产品,1km空间分辨率)可通过美国航空航天宇航局(NASA)戈达德航天中心网站^[16]下载。卫星每天经过研究区渤海的时间为北京时间10:00时~11:00时。本文下载了2012年11月至2013年3月累计151幅图像,剔除无冰、数据质量差和被云覆盖的图像,累计15张图像被选中。

气象数据来源于国家气象信息中心中国气象数据网^[17],包括渤海沿岸5个气象站点(锦州、秦皇岛、大连、塘沽、龙口)的日均气温,并可通过上述气象数据计算累积冻冰度日(Cumulative Freezing Degree Days, CFDD)。MODIS数据大气校正过程中所需的当日能见度数据由Weather Underground历史天气数据查询网站^[18]下载。

3.2 数据处理

3.2.1 数据预处理

在对MODIS数据进行面积提取和厚度估算之前,需对图像进行几何校正、格式转换和大气校正等预处理过程。图像预处理流程如图2所示。同时为方便海冰信息提取,需对海陆分界进行矢量化处理。

首先,经过辐射校正的MODIS L1B图像需几何校正。使用ENVI提供的“Georeference MODIS”工具去除图像的“蝴蝶效应”,即一种由图像像素重叠引起的几何失真现象。其次,编辑头文件并将中心波长信息添加到对应的波段中(如表1所示)。之后将现有的按波段顺序依次排列的数据格式转换为大气校正所需的波段按行交叉或波段按像元交

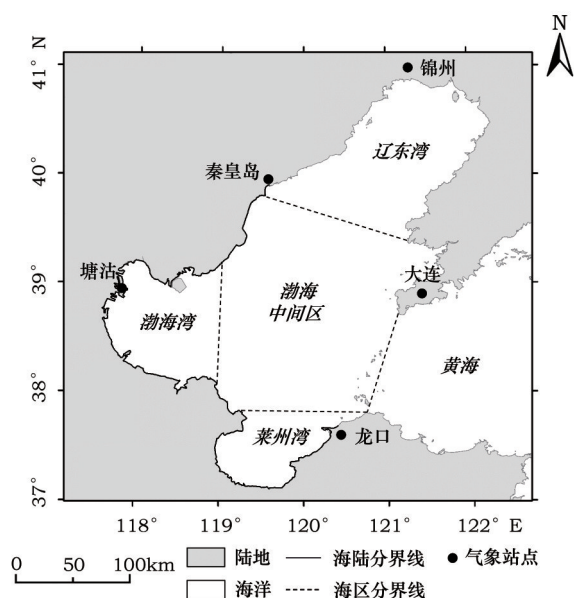


图1 研究区地理位置

Figure 1 Location of the study area

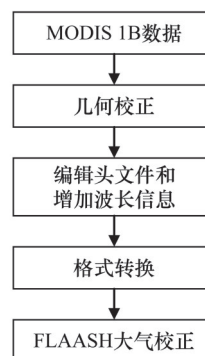


图2 预处理流程

Figure 2 Pre-processing flow chart

表1 MODIS L1B 图像前七个波段的带宽和中心波长

Table 1 Bandwidths and central wavelengths of first seven bands

in MODIS L1B image		
波段序列	带宽/nm	中心波长/nm
波段1	620~670	650
波段2	841~876	860
波段3	459~479	469
波段4	545~565	555
波段5	1 230~1 250	1 240
波段6	1 628~1 652	1 645
波段7	2 105~2 155	2 135

叉格式。最后,使用ENVI内嵌的辐射传输模型模块(FLAASH模块)进行大气校正。FLAASH大气校正模块可很好地还原地物真实反射率,并可精确补偿大气影响,是高光谱影像反演的首选模型^[11]。表2为本研究FLAASH大气校正过程中一幅MODIS L1B影像的输入参数。

3.2.2 海冰面积提取

海冰资源量估算分为面积提取和厚度反演两部分。本研究采用基于样本的面向对象分类方法提取海冰面积。该方法可充分利用地物光谱、几何、纹理及空间关系等特征,对目标对象进行多尺度分割,一定程度上减少了“异物同谱”和“同物异谱”的现象^[9]。海冰面积提取的主要步骤包括图像分割合并以及基于样本的图像分类。首先将影像分割为多个对象或像素组。为了正确描绘海冰特征,图像分割尺度和合并尺度两个参数根据实际效果进行取值,分割尺度与海冰的最小尺寸相关,合并尺度则表示类相似度,本研究两个参数设置范围分别在10~20和70~90区间内。之后进行基于样本的图像分类:首先建立海冰、海水、陆地、云等四个类别,并选择一定数量的样本;分类过程考虑光谱、纹理、几何形状及空间关系等样本属性特征;分类方法选择K邻近法,与传统的最近邻法相比,K近邻法的敏感异常和噪声数据更小,使得分类结果更加

准确^[20,21]。完成上述步骤后输出Shapefile文件,通过目视解译作进一步校正,去除明显错分的海冰多边形,最终输出所需的海冰覆盖区域。基于样本的面向对象分类方法提取海冰面积准确度可达90%~95%^[20,21]。

3.2.3 海冰厚度反演

海冰厚度与海冰反照率之间呈现良好的指数关系,尤其对于一年冰或冰厚小于1m的海冰而言,海冰反照率反演模型具有时间和空间上的优势^[10]。海冰厚度与反照率之间的关系式可表达如下^[9,10]:

$$\alpha_h = \alpha_{\max} [1 - k \cdot \exp(-\mu_\alpha h)] \quad (1)$$

式中 h 为冰厚(m); α_h 为与海冰厚度相关的海冰反照率; α_{\max} 为无限大冰厚所对应反照率; k 为与海冰反照率 α_{\max} 和海水反照率 α_{sea} 相关的相关系数, $k = 1 - \alpha_{\max} / \alpha_{\text{sea}}$; μ_α 为关于反照率的衰减系数(m^{-1}),由现场观测得到, α_{\max} , α_{sea} , μ_α 由不同地区的实际海冰条件确定,本次研究中分别取0.700, 0.100和1.209,其中可能会有15%左右的误差^[8-10]。公式(1)中反演海冰厚度所使用的海冰宽波段反照率 α_h 可从MODIS数据中反演得到。 α_h 从大量数据集的线性回归模型中所得,且这一方法被证明是广泛有效的,并使用现场观测数据进行验证^[22]。 α_h 的计算公式为:

$$\alpha_h = 0.160\alpha_1 + 0.291\alpha_2 + 0.243\alpha_3 + 0.116\alpha_4 + 0.112\alpha_5 + 0.081\alpha_7 - 0.0015 \quad (2)$$

式中 α_1 — α_5 及 α_7 是1~5和7波段的海冰反照率。之前的研究表明海冰反照率模型是准确的,模型反演的海冰厚度与实测厚度相对误差很小,均方根误差仅为0.02^[22]。

3.2.4 海冰资源量计算

根据上述所提取的海冰面积和反演的海冰厚度可计算出渤海海冰资源储量,如公式(3):

$$V = A \cdot \bar{h} \quad (3)$$

式中 V 为海冰资源量(m^3); A 为海冰面积(m^2); \bar{h}

表2 FLAASH大气校正影像输入参数示例

Table 2 Input parameters for an example imagery in FLAASH atmospheric correction

成像高度	中心纬度	中心经度	地面高程	传感器类型	像元大小
705km	38.97°	114.75°	1m	MODIS	1km
过境日期	过境时间	大气模型	气溶胶模型	气溶胶反演	初始能见度
2013-1-3	3:15 GMT	中纬-冬天	海洋	2-Band (K-T)	14km

2017年11月

为遥感影像反演的所有海冰像元的平均厚度(m)。

3.3 气象参数计算

海冰生消过程与局地气温息息相关,尤其是累积冻冰度日(CFDD)与累积融冰度日(CTDD)等参数,CFDD和CTDD分别为日平均气温低于或高于冰点的度数在一定时间范围的累积,是衡量天气有多冷且持续多久的重要参数^[11,23,24],具体计算公式定义如下:

$$CFDD = \int_{t=d_s}^{t=d_e} (T_f - T_a) dt \quad (4)$$

$$CTDD = \int_{t=d_s}^{t=d_e} (T_a - T_f) dt \quad (5)$$

$$\theta = CFDD - 3 \times CTDD \quad (6)$$

式中CFDD和CTDD分别是累积冻冰度日与累积融冰度日($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$); θ 为累积融冰度日与3倍累积冻冰度日的差值($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$); T_a 为局地海域气温日均温($^{\circ}\text{C}$),本文中选取渤海沿岸5个气象站; T_f 为渤海海冰冻结和融化的临界温度,本文中选取 -1.8°C ^[9]; t 为自12月1日起的自然日(day); d_s 和 d_e 分别是研究期间开始和结束日期。

4 结果与讨论

4.1 海冰面积

2012年12月8日至2013年3月4日,依据MODIS影像中有效日期的渤海海冰面积和厚度时空分布如图3所示。自2012年12月8日起,海冰由北向南逐步冻结,先在辽东湾出现,然后逐渐向南扩展到渤海湾,最终到达莱州湾。同时,海冰先沿海岸线冻结,之后逐步从向中部扩展,并且海冰大部分分布于处在高纬的辽东湾海区。各图像中海冰覆盖面积占整个渤海海域面积的百分比列于表3(见第2171页)。2012年冬季至2013年春季渤海海冰发展历程简述如下:12月初,辽东湾北部最先出现海冰。12月下旬和1月上旬,由于温度急剧下降,海冰发展迅速,覆盖面积逐步扩大到渤海湾和莱州湾,海冰面积占比从12月初的1.96%增加到1月上旬的28.16%。1月17日,海冰面积达到整个冬季的最大值(2.26万 km^2),占整个渤海面积的30.20%。1月下旬至2月初,海冰面积因平均气温升高而减小,2月初海冰面积减少到15.89%。2月中旬,冷空气作用导致海冰面积再次扩大,面积占比增加到23.70%。2月末至3月初,随着气温逐渐

升高,海冰自南向北逐渐消融,3月初海冰全部融化。

利用2012年12月8日至2013年3月4日的渤海海冰面积及其沿岸5个气象站同期气温资料,对海冰面积和气温的相关关系进行分析。研究发现,渤海海冰面积变化滞后于气温变化,且海冰面积与两天前平均气温的负相关性最好(图4, $r=-0.59$, $p=0.02$),表明2012年冬季至2013年春季渤海气温变化可在2天后导致海冰面积增长或减小,即呈现出2天的滞后效应。

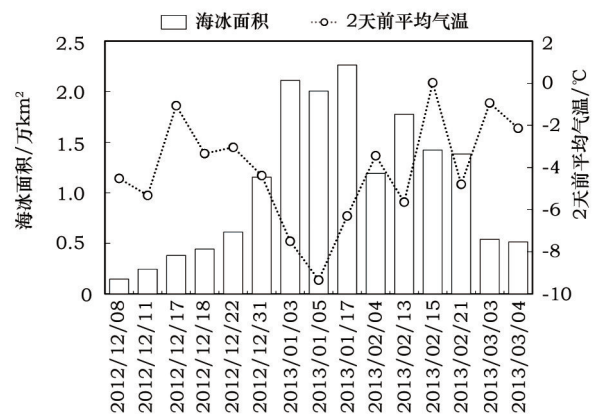


图4 渤海海冰面积与2天前气象站平均气温变化趋势

Figure 4 Sea ice coverage in the Bohai Sea and the average temperature of meteorological stations in the previous 2 days

4.2 海冰厚度

图3中海冰厚度变化特征由不同灰度值表示,海冰厚度平均值列于表3。渤海海冰平均厚度范围为5.69~23.75cm。1月下旬至2月中旬,渤海海冰达到盛冰期,其平均厚度达到最大值(约20cm);而在海冰冻结初期(12月)和融化阶段(2月下旬至3月初),海冰相对较薄,厚度约为5~12cm。此外,不同海湾之间海冰厚度差异明显,辽东湾冰厚要大于渤海湾和莱州湾,是渤海冰厚最大的区域,且三个海湾均是沿海岸冰更厚。

利用CFDD和CTDD估算海冰厚度的Lebedev和Zubov经验模型是国际上广泛使用的冰厚模型^[11,25]。由于大范围现场观测的冰厚数据难以获取,本文将这两个经验模型与本研究估算得到的海冰厚度值进行比较。两个模型的计算公式如下:

Lebedev模型:

$$h = 1.33\theta^{0.58} \quad (7)$$

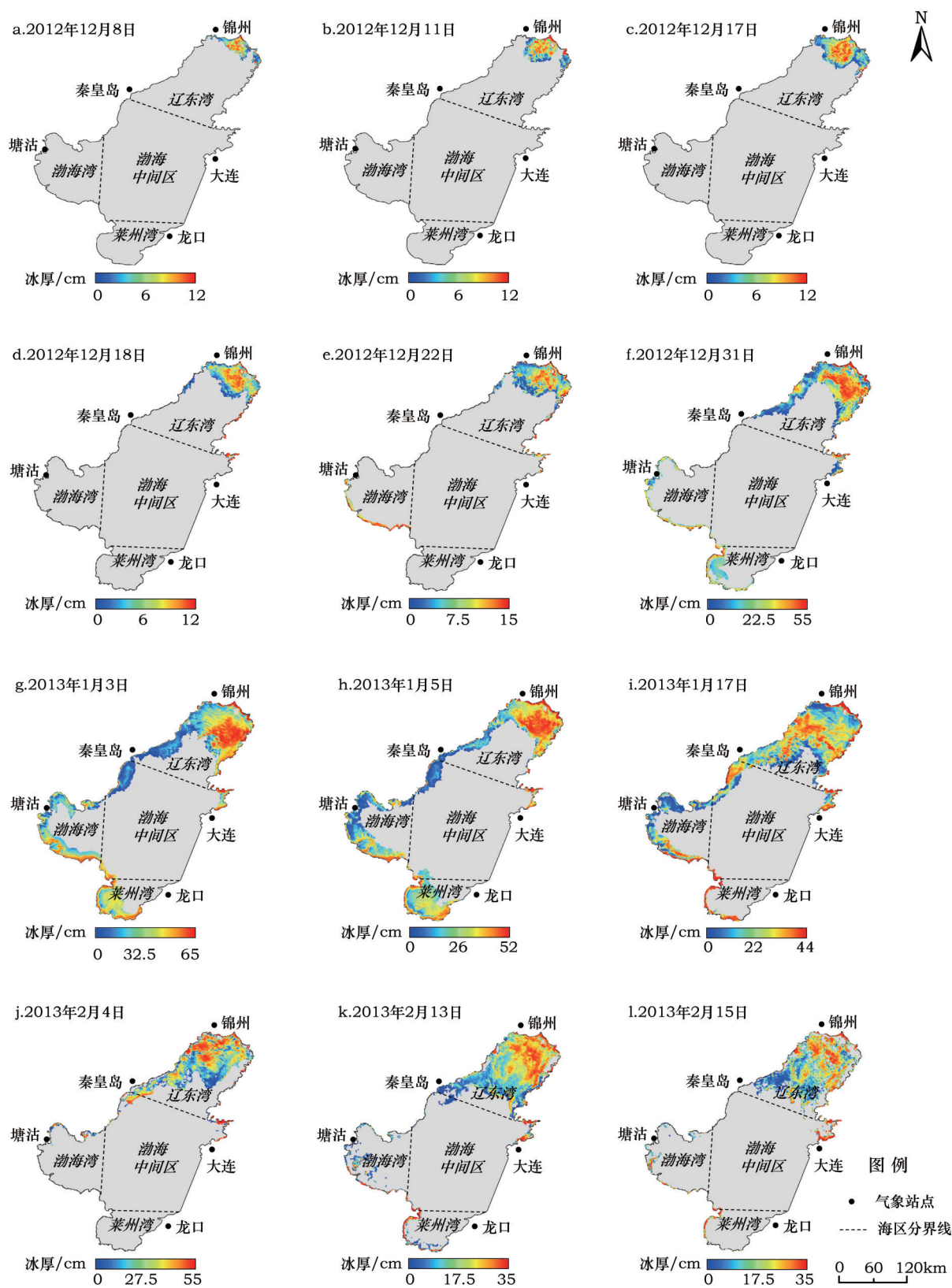


图3 2012年冬季至2013年春季渤海海冰面积和厚度时空分布

Figure 3 The spatiotemporal distribution of sea ice coverage and thickness in the Bohai Sea from 2012 to 2013

2017年11月

表3 2012年冬季至2013年春季渤海海冰参数及气象要素

Table 3 The parameters of Bohai Sea ice and meteorological elements in 2012/13

日期	图像编号	面积 /km ²	面积占比 /%	冰厚度 /cm	冰资源量 /亿 m ³	CFDD /(°C·day)	θ (°C·day)
2012/12/08	A2012343.0235,A2012343.0240	1 471	1.96	5.69	0.84	13.48	13.48
2012/12/11	A2012346.0310	2 446	3.26	6.40	1.57	23.06	23.06
2012/12/17	A2012352.0230	3 801	5.07	7.75	2.95	23.12	12.76
2012/12/18	A2012353.0315	4 433	5.92	7.67	3.40	28.08	17.72
2012/12/22	A2012357.0250	6 117	8.16	6.96	4.26	37.20	26.12
2012/12/31	A2012366.0245	11 544	15.41	16.56	19.12	86.10	75.02
2013/01/03	A2013003.0315	21 103	28.16	18.21	38.43	108.42	97.34
2013/01/05	A2013005.0300,A2013005.0305*	20 053	26.76	17.25	34.59	120.06	108.98
2013/01/17	A2013017.0325,A2013017.0330*	22 631	30.20	22.46	50.83	172.34	161.26
2013/02/04	A2013035.0315	11 903	15.89	23.75	28.27	198.00	171.32
2013/02/13	A2013044.0310	17 761	23.70	19.50	34.63	229.36	199.04
2013/02/15	A2013046.0255	14 220	18.98	17.88	25.43	231.34	201.02
2013/02/21	A2013052.0220	13 834	18.46	19.81	27.41	232.94	212.52
2013/03/03	A2013062.0255	5 397	7.20	11.87	6.41	206.02	113.90
2013/03/04	A2013063.0340	5 149	6.87	12.66	6.52	200.14	96.26

注:*表示两幅图像拼接。

Zubov 模型:

$$h^2 + 50h = 8\theta \tag{8}$$

图5为Lebedev和Zubov冰厚模型估算结果对比图。本研究利用MODIS获取的海冰厚度数据与Lebedev和Zubov模型预测结果接近,大部分数据点位于Lebedev和Zubov曲线之间。高θ值(>200°C·day)所对应的冰厚偏低的几个数据点可能是由于二月中下旬至三月上旬,平均气温增长较快,导致海冰快速融化,而此时冰厚模型中的θ值变化速率与海冰实际融化速率存在一定差异。因此本文也根据估算数据得出了2012年冬季至2013年春季海冰厚度增长方程,如公式(9)所示,且方程通过置信度0.01显著性水平检验,决定系数达0.87。

$$h = 1.96\theta^{0.44} \tag{9}$$

4.3 海冰资源量

2012年冬季至2013年春季整个渤海海冰的资源量列于表3。渤海海冰资源量年内变化大,资源量从2012年12月8日的0.84亿m³增加到2013年1月17日的50.83亿m³。12月中上旬,海冰资源量不足5亿m³;12月下旬至1月上旬,气温迅速下降使得海冰资源量得以快速累积,到1月17日达到整个冰期海冰资源量储量最大的一天;1月下至2月中上

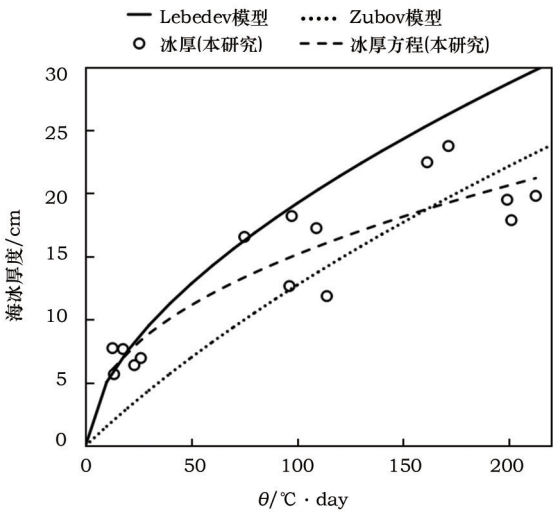


图5 本研究估算海冰厚度与Lebedev和Zubov冰厚模型对比图

Figure 5 The comparison between sea ice thickness in this study and the predictions from Lebedev(solid line)and Zubov model(dotted line)

旬气温有所回升,使得2月的海冰资源量大致保持在30亿m³;2月下旬和3月初,气温迅速上升,海冰资源量下降至7亿m³以下。海冰资源量与2天前气象站平均气温变化情况如图6所示,可以看出海冰资源量受气温影响较大,通过0.05的显著性检验,

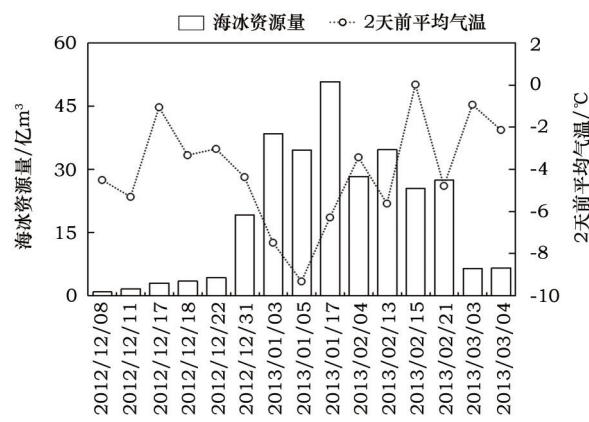


图6 渤海海冰资源量与2天前气象站平均气温变化趋势

Figure 6 Sea ice volume of the Bohai Sea and the average temperature of meteorological stations in the previous 2 days

海冰资源量与气温呈中度相关关系($r=-0.56$)。

为更好地了解渤海海冰资源量的空间分布特征,本研究对15幅影像中不同海区的海冰资源量进行统计分析。如图7和图8所示,4个海区的海冰资源量差异很大。海冰资源量分布呈辽东湾>渤海湾>中间区>莱州湾。从初冰期至终冰期变化过程中,只有辽东湾海区一直有海冰分布,辽东湾海冰资源量占渤海海冰资源量的76.72%,为主要的海冰资源富集区。这是因为辽东湾所处纬度位置为最高的,平均气温也比其他区域要低。其余3个区域海冰资源总量只占23.28%,且渤海湾、渤海中间区和莱州湾海冰资源总量接近,占比均为7%~8%。因此辽东湾的海冰资源量在整个渤海海冰资源储量中占重要地位,是渤海海冰资源的主要贡献者。

此外,本文还与前人所作研究进行对比,如表4所示。2012年冬季至2013年春季渤海海冰资源量小于2009年冬季至2010年春季^[26](重冰年),但与1987—2009年^[10]相比,该年份海冰资源量处于高储

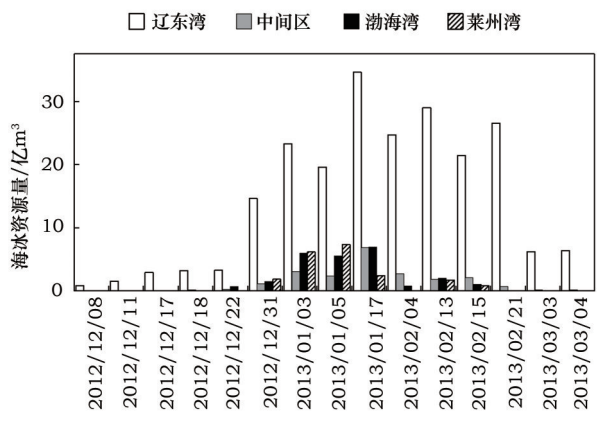


图7 渤海不同区域海冰资源量分布

Figure 7 Sea ice volume of the Bohai Sea in different zones

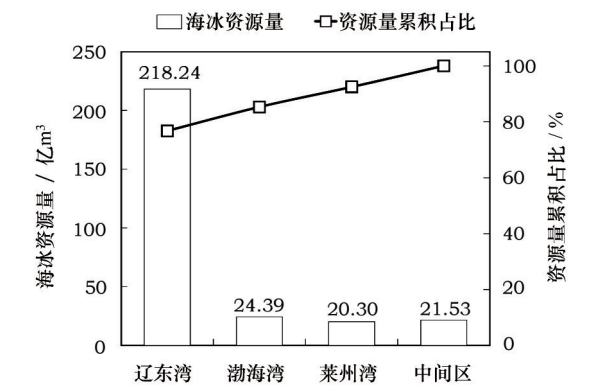


图8 渤海不同区域海冰累积资源量分布

Figure 8 Cumulative sea ice volume of the Bohai Sea in different zones

量年份。2012年冬季至2013年春季辽东湾海冰资源量与2000年特定日期^[8,9]的海冰资源量相比,资源量大小接近,且最大海冰资源量均大于30亿 m^3 。

5 结论

本文基于MODIS卫星遥感数据,利用面向对象特征提取法提取海冰面积,运用反照率反演模型计算海冰厚度,进而计算出海冰资源量,并分析了

表4 各年份海冰资源量对比

Table 4 Comparison of sea ice volume in different years in the Bohai Sea

年份(日期)	冰情等级#	研究区域	图像类型	资源量/亿 m^3	文献来源
2012年冬季至2013年春季	3.5	渤海	MODIS	0.84~50.83	本研究
2012年冬季至2013年春季	3.5	辽东湾	MODIS	0.84~34.61	本研究
2009年冬季至2010年春季	4.0	渤海	NOAA/AVHRR	4.40~63.00	Liu等 ^[26]
1987年-2009年*	1.0~4.0	渤海	NOAA/AVHRR	13.00~60.00	Yuan等 ^[10]
2000年1月30日	3.5	辽东湾	NOAA/AVHRR	38.15	谢锋等 ^[9]
2000年1月18日	3.5	辽东湾	NOAA/AVHRR	17.30	顾卫等 ^[8]

注: #数据来源于国家海洋局历年海洋灾害公报^[7]; *为1987-2009年资源量数据为每年最大日储量。

2017年11月

2012年冬季至2013年春季渤海海冰资源量时空变化特征,主要结论如下:

(1)渤海海冰自北向南逐步冻结,先在辽东湾出现,然后逐渐向南扩展到渤海湾,最终到达莱州湾。同时,海冰先沿岸线冻结并逐步从向中部扩展,且大部分分布于高纬的辽东湾海区。2012年冬季至2013年春季渤海海冰面积占比在1.96%~30.20%之间变化,且气温变化在2天后导致面积的变化,呈现出2天滞后效应。

(2)估算的海冰厚度与Lebedev和Zubov经验模型预测接近。研究期间所估算渤海海冰平均厚度范围为5.69~23.75cm。1月下旬至2月中旬,平均海冰厚度最大,且不同海湾之间海冰厚度差异明显。

(3)渤海海冰资源量年内变化大,2012年冬季至2013年春季海冰资源量范围为0.84~50.83亿 m^3 。12月及3月海冰资源量均较小,1月和2月海冰资源量储量较丰富,海冰资源量峰值出现在1月中旬。海冰资源量受气温影响较大,气温变化会在2天后导致资源量的变化。海冰资源量空间差异很大,资源量分布呈辽东湾>渤海湾>中间区>莱州湾。辽东湾海冰资源量占渤海海冰资源量的76.72%,是渤海海冰资源的主要贡献者。

本文所使用方法适用于对整个冬季海冰资源量的宏观把握,然而受云层遮挡影响,冬季MODIS卫星影像数量较少,未来需结合其他观测手段(如岸基雷达等)获得完整冰情演变规律,开展整个冬季海冰资源量的逐日变化情况分析和精细化评估。

参考文献(References):

- [1] 李澜涛,刘成玉,顾卫,等. 渤海海冰淡化利用研究进展与问题[J]. 海洋通报,2012,31(1): 105-112. [Li L T, Liu C Y, Gu W, et al. Research progress and problems in desalination and utilization of sea ice in Bohai Sea[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(1): 105-112.]
- [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. [Wu H, Xia Y, Xu Y J, et al. Analysis on the spatial-temporal feature of sea ice disaster in the Bohai Sea since 2004[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(5): 81-87.]
- [3] 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 B K, Cao C H, Jiang C B, et al. A study on risk assessment and zoning of sea ice disaster in China[J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(2): 42-46.]
- [4] 许宁,陈伟斌,刘雪琴,等. 海洋工程海冰灾害风险排查技术的初步探讨[J]. 数学的实践与认识,2015,45(1): 144-150. [Xu N, Chen W B, Liu X Q, et al. Primary analysis on risk observation technique of sea ice disaster for offshore structures[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2015, 45(1): 144-150.]
- [5] Li L, Gu W, Liu C, et al. Suitability of locations in the Bohai Sea, China, for the exploitation of sea ice as a freshwater resource[J]. *Annals of Glaciology*, 2013, 54(62): 267-272.
- [6] 史培军,顾卫,王静爱,等. 海冰资源淡化研究与利用技术开发[J]. 资源科学,2010,32(3): 394-404. [Shi P J, Gu W, Wang J A, et al. Development of technology for sea ice desalination and utilization of sea ice resources[J]. *Resources Science*, 2010, 32(3): 394-404.]
- [7] 史培军,哈斯,袁艺,等. 渤海海冰作为淡水资源:脱盐机理与可利用价值[J]. 自然资源学报,2002,17(3): 353-360. [Shi P J, Ha S, Yuan Y, et al. The desalinization of Bohai sea ice and its use value as fresh water resource[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 353-360.]
- [8] 顾卫,张秋义,谢锋,等. 用气候统计方法估算辽东湾海冰资源量的尝试[J]. 资源科学,2003,25(3): 9-16. [Gu W, Zhang Q Y, Xie F, et al. Estimation of the amount of sea ice resources in Liaodong Gulf by climate statistics[J]. *Resources Science*, 2003, 25(3): 9-16.]
- [9] 谢锋,顾卫,袁艺,等. 辽东湾海冰资源量的遥感估算方法研究[J]. 资源科学,2003,25(3): 17-23. [Xie F, Gu W, Yuan Y, et al. Estimation of sea ice resources in Liaodong gulf using remote sensing[J]. *Resources Science*, 2003, 25(3): 17-23.]
- [10] Yuan S, Gu W, Xu Y, et al. The estimate of sea ice resources quantity in the Bohai Sea based on NOAA/AVHRR data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 31(1): 33-40.
- [11] Su H, Wang Y. Using MODIS data to estimate sea ice thickness in the Bohai Sea(China) in the 2009-2010 winter[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(10): C10018.
- [12] 吴龙涛,吴辉斌,孙兰涛,等. MODIS渤海海冰遥感资料反演[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2006,36(2): 173-179. [Wu L T, Wu H D, Sun L T, et al. Retrieval of sea ice in the Bohai Sea from MODIS data[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2006, 36(2): 173-179.]
- [13] 郭衍游,谢宏全,杨光. 基于MODIS影像渤海2012年海冰变化分析[J]. 海洋科学,2014,38(6): 60-64. [Guo Y Y, Xie H Q, Yang G. Variation analysis of sea ice in the Bohai Sea in 2012 based on MODIS[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(6): 60-64.]

- [14] Li N, Gu W, Shi P, *et al.* Reducing vulnerability to severe water shortage in Northeast China: using satellite remote sensing to determine the extent of Bohai sea ice reserves[J]. *Water International*, 2007, 32(3): 483-493.
- [15] 孙劭, 苏洁, 史培军. 2010年渤海海冰灾害特征分析[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(6): 87-93. [Sun S, Su J, Shi P J. Features of sea ice disaster in the Bohai Sea in 2010[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(6): 87-93.]
- [16] NASA Goddard Space Flight Center. Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System (LAADS) Distributed Active Archive Center (DAAC) Data [EB/OL]. (2015-11-18)[2016-12-01]. <https://earthdata.nasa.gov/about/daacs/daac-laads>.
- [17] 国家气象信息中心. 中国地面气候资料日值数据集(V3.0) [EB/OL]. (2016-02-15)[2016-12-01]. http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html. [National Meteorological Information Center. Dataset of Daily Climate Data from Chinese Surface Stations for Global Exchange (V3.0)[EB/OL]. (2016-02-15)[2016-12-01]. http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/URF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html.]
- [18] The Weather Company, LLC. Weather Underground [EB/OL]. (2016-02-16)[2016-12-01]. <https://www.wunderground.com/>.
- [19] 王彩艳, 王璠玲, 王介勇, 等. 基于面向对象的海岸带土地利用信息提取研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(9): 1589-1597. [Wang C Y, Wang A L, Wang J Y, *et al.* Coastal zone land use information extraction based on object-oriented classification method[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(9): 1589-1597.]
- [20] Zhao Z Y, Liu Z, Gong P. Automatic extraction of floating ice at Antarctic continental margin from remotely sensed imagery using object-based segmentation[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(4): 622-632.
- [21] Miao X, Xie H, Ackley S F, *et al.* Object-based detection of Arctic sea ice and melt ponds using high spatial resolution aerial photographs[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2015, 119: 211-222.
- [22] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: algorithms[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76(2): 213-238.
- [23] Zhang N, Wu Y, Zhang Q. Forecasting the evolution of the sea ice in the Liaodong Bay using meteorological data[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, 125: 21-30.
- [24] Tamura-Wicks H, Toumi R, Budgell W P. Sensitivity of Caspian sea-ice to air temperature[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, 141(693): 3088-3096.
- [25] Maykut G A. The Geophysics of Sea Ice[M]. New York: Springer, 1986.
- [26] Liu C, Gu W, Chao J, *et al.* Spatio-temporal characteristics of the sea-ice volume of the Bohai Sea, China, in winter 2009/10 [J]. *Annals of Glaciology*, 2013, 54(62): 97-104.
- [27] 国家海洋局. 中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2016-03-24)[2016-12-01]. <http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyzhgb/> [State Oceanic Administration. China marine disaster bulletin [EB/OL]. (2016-03-24)[2016-12-01]. <http://www.soa.gov.cn/zwgk/hygb/zghyzhgb/>]

The estimate of sea ice resources in the Bohai Sea based on MODIS data

YAN Yu^{1,2,3}, XU Li^{1,2,3}, XU Yingjun^{1,2,3}, LI Qian^{1,2,3}, TAO Jun^{1,2,3}, GU Wei^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Faculty of Geographical Science, Beijing 100875, China;

3. Coastal Zone and Sea Ice Research Center, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: To investigate sea ice resources in the Bohai Sea, we used MODIS satellite remote sensing data to examine the spatio-temporal variations of sea ice volume. Sea ice area was extracted by using the ENVI feature extraction method, the sea ice thickness was estimated based on the exponential albedo model, and then sea ice volume was calculated. In addition, the spatio-temporal characteristics of sea ice volume were analyzed with the aid of ArcGIS. The results show that the sea ice formed and expanded from north (Liaodong Bay) to south (Laizhou Bay), and the sea ice coverage varied from 1.96% to 30.20% in the whole Bohai Sea. The values of estimated sea ice thickness were reliable, which was in accordance with the predictions based on Lebedev and Zubov empirical models, and the average sea ice thickness ranged from 5.69 to 23.75 cm. The sea ice volume varied greatly during the 2012/13 winter, ranging from 0.84×10^8 to $50.83 \times 10^8 \text{ m}^3$. The sea ice volume was small in December and March, while it was large in January and February, especially in mid-January, there appeared a peak of sea ice volume. The spatial distribution of sea ice resources in the Bohai Sea was also uneven, with the descending order of Liaodong Bay > Bohai Bay > Central Zone of the Bohai Sea > Laizhou Bay. The largest sea ice volume was found in Liaodong Bay (accounting for ~76.72% of the entire Bohai Sea). The Liaodong Bay was the main contributor to the sea ice resources of the whole sea area. In addition, we explored the relationship between the sea ice distribution and the real-time meteorological data. The sea ice volume was significantly affected by the air temperature and a 2-day lag effect was found, namely, the variations of sea ice volume may lag behind a weather event for approximately 2 days for the study period.

Key words: Bohai Sea; sea ice resources; sea ice volume; MODIS; spatio-temporal characteristics