

桑沟湾海冰厚度遥感反演研究

谷洪钦¹, 毕海波^{2,3}, 黄海军^{2,3}

(1. 国核电力规划设计研究院, 北京 100095; 2. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071; 3. 国家海洋科学实验室, 山东 青岛 266237)

摘要: 为解决现场调查数据覆盖不足的问题, 利用卫星遥感数据(Landsat TM 和 ETM+)对桑沟湾海域的海冰厚度进行了反演。与 Zubov 模型计算结果相比, 本反演结果与之接近(相关系数 0.89)。由遥感影像提取结果看出, 桑沟湾海冰厚度随时间和空间变化明显。在轻冰年份, 桑沟湾基本无冰。在偏重冰年和重冰年份, 桑沟湾出现大量浮冰, 并且海冰在水动力和风应力的作用下, 呈现由近岸到离岸冰厚不断减小的趋势。重冰年份桑沟湾南侧由于受潮汐和风力推动作用发生挤压变形, 近岸出现平均冰厚较大的海冰(20 cm), 桑沟湾中部也出现平均厚度约 5~10 cm 的海冰。

关键词: 海冰; 桑沟湾; 遥感

中图分类号: X87 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2016)09-0079-06

doi: 10.11759/hyxx20160510001

海冰主要由冰晶体、水、卤水、气泡组成。海冰物理结构以及组分是造成海冰厚度变化的重要因素。海冰物理特征(比如, 颜色、类型和内部构造)随着海冰厚度变化表现亦不同。有研究获取了海冰厚度和反照率之间的经验关系^[1-2]: 一般而言, 较厚的海冰具有较高的表观反照率^[3], 能够反射较多的太阳辐射; 较薄的海冰因其反照率^[4]偏低, 从而能够吸收较多的太阳辐射能量, 最终引起海冰融化。Allison 等^[5]研究了卫星遥感数据反演得到的海冰反照率与海冰厚度的相关性^[6]。Li 等^[7]应用渤海地区海冰反照率来区分海冰厚度分布情况。此外, 为克服地面采样不足, Hua 和 Wang^[8]利用 MODIS 数据提取的遥感反射率和海冰厚度之间的稳定关系获取了渤海地区海冰厚度时空变化信息。

本文选取山东省荣成市桑沟湾海域的海冰(122°25'~122°33'E, 37°2'~37°5'N), 利用陆地资源(Landsat TM 和 ETM+)观测数据首次进行了该地区海冰厚度的提取实验, 并将得到的结果与著名的 Zubov 模型结果进行了比对。一般而言, 桑沟湾海域海冰每年冬天大概 12 月~次年 2 月出现结冰现象。但是, 不时出现极端天气比如 2010 年冬天出现具有代表性的严重结冰情况, 使得桑沟湾海水大范围结冰, 冰厚度较常年显著增加, 对当地养殖业造成了重大影响。本研究的结果能提供海冰空间分布信息, 便于决策部门及时了解冰情, 为制定防灾减灾措施提供依据。

1 数据与方法

1.1 数据介绍

已有研究使用多种遥感卫星数据进行海冰参量提取, 比如 NOAA/AVHRR^[9], MODIS^[10], 以及 GF-1 卫星^[11]。本研究中选取了 Landsat TM 数据和 ETM+ 数据进行桑沟湾海冰厚度反演。两种传感器的工作波段具有相似性, 其基本参数见表 1。研究成果覆盖了轻冰年、常冰年、重冰年时期的桑沟湾海冰分布情况。

陆地卫星(Landsat)是美国宇航局发射的用来获取卫星图像的一种遥感平台。自 1972 年起, 美国宇航局一共发射了 8 颗陆地卫星。1984 年发射的 Landsat-5 TM, 共有 7 个波段, 其中 TM6 为热红外波

收稿日期: 2016-05-10; 修回日期: 2016-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41406215); 石岛湾核电站址海工工程海冰观测分析专题项目(2015HA00271S); 中国博士后基金面上项目(2014M561971); 中国科学院海洋研究所开放基金(MGE2013KG07)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41406215; Specific Program for Sea Ice Observation of Nuclear Electrical Plant in the Shidao Bay, No. 2015HA00271S. Postdoctoral Science Foundation of China, No. 2014M561971; Open fund for the Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, No. MGE2013KG07]

作者简介: 谷洪钦(1971-), 男, 山东菏泽人, 高级工程师, 硕士, 主要从事核电站前期规划咨询、水文气象研究工作, 电话: 18910853670, E-mail: gis03010501@163.com; 毕海波, 通信作者, 助理研究员, 博士, 主要从事海冰遥感研究, E-mail: bhh@qdio.ac.cn

段, 其空间分辨率为 120 m, 其他波段分辨率为 30 m; 1999 年发射的 Landsat-7 ETM+增加了一个 15 m 分

辨率的彩色通道, 同时将热红外通道的分辨率提高到 60 m。

表 1 陆地卫星 TM 和 ETM+测传感器的主要设计参数
Tab. 1 Instrument parameters of Landsat TM and ETM+ satellites

卫星轨道高度(km)	重访周期(d)	地面宽度(km)	工作谱段(μm)	地面分辨率(m)
705	16	185	TM1: 0.45~0.52	30
705	16	185	TM2: 0.52~0.60	30
705	16	185	TM3: 0.62~0.69	30
705	16	185	TM4: 0.76~0.96	30
705	16	185	TM5: 1.55~1.75	30
705	16	185	TM7: 2.08~3.35	30

1.2 方法

1.2.1 遥感数据预处理

经过几何校正的 Landsat 数据可以从马里兰大学数据中心下载。

1.2.1.1 辐射定标

根据头文件数据, 将量化值 d 转换为辐亮度(L)。

$$L = dG_a + C \quad (1)$$

式中, G_a 为增益, C 为偏移量。

1.2.1.2 大气校正

利用遥感图像处理软件 ENVI v5.1 的 FLAASH (Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)大气校正模型, 对 HJ 和 Landsat 卫星数据进行大气校正, 获得表面反射率数据。FLAASH 的核心模型是基于辐射传输模型 MODTRAN4 的一种大气校正模型, 它适合于多光谱和高光谱遥感影像校正和反射率信息提取。FLAASH 校正过程中使用的参数比如: 成像时间、传感器高度、中心经纬度等辅助数据以从遥感影像头文件中读取。

公式(2)描述了表面观测像元辐亮度的标准方程(太阳短波波段)。在 FLAASH 模型大气校正的基础上, 便可根据此方程反演表现观反射率。

$$L = \frac{A\rho}{1-\rho_e} + \frac{B\rho_e}{1-\rho_e S} + L_a \quad (2)$$

式中, ρ 是像元的表现观反射率, ρ_e 是观测像元的邻近像元的表现观反射率, S 是大气的半球反照率, L_a 是大气散射辐亮度, A 和 B 是与大气、观测几何有关的系数, 该系数与观测表面情况无关。上述变量与波段相关。

式(2)中的右边三项分别代表进入传感器的地面直接反射信号、经大气散射进入传感器的地面反射信号以及大气后向散射信号。参数 A, B, S, L_a 的取值

与观测路径的水汽含量、气溶胶光学厚度密切相关。这些参数可由 MODTRAN4 辐射传输模型计算获取。将这些参数信息代入式(2)即可得到观测像元的表现观反射率信息。

1.2.1.3 几何精校正

利用已经过几何精确校正的影像, 选取一定数量控制点, 对 Landsat 卫星影像进行几何精校正, 误差控制在 0.5 像元。

1.2.1.4 海域范围提取

在遥感数据标准假彩色合成图像上, 陆地以土黄色为主, 色调不均一(图 1); 海冰颜色显示为蓝白相间、纹理较细且随机分布(图 1)。

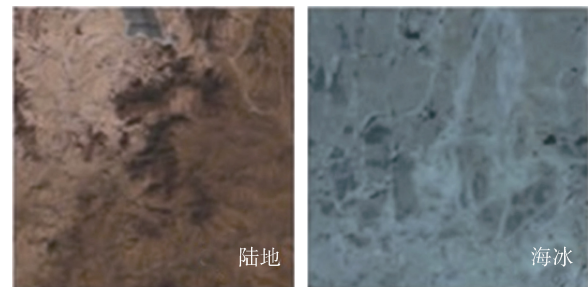


图 1 遥感影像中的不同地物解译标志

Fig. 1 Typical representations of land and sea ice used in satellite image classification

基于海冰光谱特征和解译特征, 构建了基于陆地卫星数据的海冰指数 I_s [12]:

$$I_s = b_4/b_2 \quad (3)$$

式中, b_4, b_2 分别为利用内部平均法计算得到的 Landsat 第四波段和第二波段相对反射率。该指数可以有效地去除海岸附近陆地的影响。对于本文使用的海冰分割方法介绍, 有兴趣的读者可以进一步详见文献[13]。

1.2.2 冰厚反演算法

有实验结论表明, 随着海冰厚度的增加(由 2 cm 增加到 9 cm), 海冰的反照率可由 0.11 增加到 0.24^[2, 5]。根据实验结果, 可建立海冰厚度和反照率之间的经验指数关系式^[2]:

$$\alpha(h) = \alpha_{\max}(1 - \kappa^{-\mu h}) \quad (4)$$

式中, h 为海冰厚度, $\alpha(h)$ 为厚度为 h 的海冰对太阳短波辐射谱段(宽波段)的反射率, α_{\max} 是无限大冰厚对应的海冰的反射率(0.7), κ 是相关系数($\kappa = 1 - \alpha_{\text{sea}}/\alpha_{\max}$), μ 是关于反射率的衰减系数。

由公式(4)可以看出, 如果要反演冰厚, 需先获取宽波段海冰反射率 (h)。宽波段反射率可由卫星影像波段反射率(窄波段反射率)计算获取。

以下简单介绍窄波段和宽波段的计算方法:

1) 窄波段反射率计算

窄波段的表观反照率(α)可定义为表面向上辐射能量通量(F_u)与向下辐射能量(F_d)的比值, 是一个无量纲的参量:

$$\alpha = F_u / F_d \quad (5)$$

$$\alpha(\theta_i, \Lambda) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_u(\theta_i, \Lambda)}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F_d(\theta_i, \Lambda)} \quad (6)$$

其中, Λ 代表波段范围(λ_1, λ_2), θ_i 是太阳天顶角(SZA)。

利用 MODTRAN 模型, 对每种大气状况和太阳几何状况在 3 种反射率情况下($r = 0.0, 0.5, 0.8$)进行输入参量估算, 获取的参量可用于辐照度计算。假定表面反射属于兰伯特反射, 则地球表面向下和向上辐照度则可表示为

$$\begin{cases} F_d = F_0 + \frac{r_s}{1-r_s r} \pi \mu_i E_0 \gamma(\mu_i) r \\ F_u = L_p + \frac{r_s}{1-r_s r} \pi \mu_i E_0 \gamma(\mu_i) \gamma(\mu_v) \end{cases} \quad (7)$$

式中, μ_i 是太阳天顶角, μ_v 是观测天顶角, F_0 是下行辐照度, L_p 是无表面反射情况下的路径辐照度, r_s 是地表反射率, r 是大气半球反照度, E_0 是表观下行辐照度, $\gamma(\mu_i)$ 和 $\gamma(\mu_v)$ 是太阳照射路径和观测路径的大气透射率。

根据上述 3 种条件下的 MODTRAN 模型运算得到 6 个方程组, 联立求解得到输入参量值, 包括 $F_0, L_p, r, E_0, \gamma(\mu_i)$ 和 $\gamma(\mu_v)$ 。然后可将其用于公式(7), 计算得到地表下行和反射辐照度, 从而获得 Landsat 多光谱窄波段反照率信息。

2) 宽波段反照率计算

宽波段反照率可由窄波段反照率求得。比如,

Liang 等^[14]通过大量实验得到多光谱窄波段与宽波段反照率转化模型模型:

$$\alpha = 0.356\alpha_1 + 0.130\alpha_3 + 0.373\alpha_4 + 0.085\alpha_5 + 0.072\alpha_7 - 0.0078 \quad (8)$$

其中, α 为宽波段反照率, $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_7$ 分别是指本文所用遥感数据第 1、3、4、5、7 波段的反照率。将上述反照率计算结果代入公式(4)可求解海冰厚度。

2 结果与分析

2.1 与 Zubov 模型结果比较

由于缺少同期实测数据, 本文将反演结果与 Zubov 模型计算结果进行了比对。Zubov 模型涉及两个主要参量(Freezing Degree Days, 冻冰日 D_{FD} 和 Thawing Degree Days, 融冰日 D_{TD})。 D_{FD} 和 D_{TD} 分别是值日平均气温低于冰点(-2.0°C)和高于融冰点(0°C)的天数, 对应日期的累计气温(Cumulative Degrees)分别表示为 C_{FD} 和 C_{TD}

$$C_{FD} = \sum_{D_s}^{D_e} (T_O - T_{AF}) \quad (9)$$

$$C_{TD} = \sum_{D_s}^{D_e} (T_{AT} - T_O') \quad (10)$$

$$\theta = C_{FD} - 3C_{TD} \quad (11)$$

其中, T_O 和 T_O' 分别是冰点和融冰点, T_{AF} 和 T_{AT} 分别是指低于冰点和高于融冰点的日平均气温, 上述参数可由附近石岛气象站提供数据获取。 D_s 和 D_e 分别是海水结冰起始日和结束日。 θ 是用来描述结冰日和融冰日对海冰厚度贡献的参量。Zubov 模型可以表示为以 θ 为变量的一元二次方程^[15]:

$$H^2 + 50H = 8\theta \quad (12)$$

其中, H 是模型计算的桑沟湾调查海域的平均海冰厚度。根据该模型计算所得 2009~2010 年冬季不同日期的桑沟湾区域平均海冰厚度, 如表 2 所示。

如图 2 所示, 本文将 2003~2010 年的 Landsat-5 和 7 共 35 景遥感影像的海冰厚度反演结果与同期 Zubov 模型计算结果进行了比较。从图 2 中可以看出, 大部分数据集中于拟合直线的两侧对称分布, 说明本文的反演结果与模型结果之间存在较好的一致性(相关系数为 0.89)。同时, 遥感反演结果与朱可夫模型计算结果的拟合方程为 $y = 0.97x + 0.40$, 说明本文遥感数据反演结果相对于模型数据略小。

2.2 海冰厚度空间分布情况

反演结果如图 3 所示, 海冰厚度在轻冰年(图 3,

表 2 2009~2010 年冬季桑沟湾平均海冰厚度(Zubov 模型计算结果)

Tab. 2 Sea ice thickness over the Sanggou Bay estimated using Zubov's model

日期(年-月-日)	θ	桑沟湾平均海冰厚度(cm)
2009-12-05	4.2	0.7
2009-12-17	17.3	2.6
2009-12-23	39.4	5.7
2010-01-06	45.6	6.5
2010-01-15	100.9	12.8
2010-01-22	110.2	13.8
2010-01-24	113.4	14.1
2010-01-26	118.1	14.6
2010-01-28	112.5	14.1
2010-01-31	120.9	14.9
2010-02-03	140.8	14.1
2010-02-12	151.9	16.8
2010-02-16	152.5	17.9
2010-02-19	102.3	13.0
2010-03-01	100.4	12.8
2010-03-07	104.9	13.3
2010-03-09	90.1	11.7

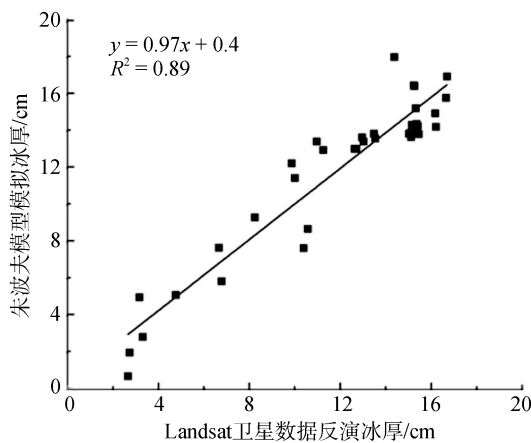


图 2 Landsat 卫星遥感反演冰厚与朱波夫模型模拟冰厚的比较

Fig. 2 Comparison of sea ice thickness retrieved from Landsat imagery with Zubov model simulations

1989 年 1 月 5 日遥感解译结果, 分布在桑沟湾大坝向陆一侧一般位于 5~10 cm, 偏重冰年(图 3, 2000 年 2 月 9 日)和重冰年(图 3, 2010 年 1 月 17 日), 由于负积温增加, 海冰厚度也随之增加, 大多数位于 10~20 cm。从空间分布来看, 沿岸区域海冰反照率高, 海冰厚度大, 厚度向海一侧递减。在冰情较轻的年份, 桑沟湾基本上无海冰出现。在重冰年份海

冰能够占据桑沟湾面积的 2/3, 近岸甚至出现冰厚平均 ≥ 20 cm 的海冰。同时从海冰厚度分布也可以看出, 在一些海水动力弱的岬湾区域, 可能会出现较厚的海冰, 而在桑沟湾的中部开阔海域, 海冰平均厚度一般为 5~15 cm。

相比较为开阔的桑沟湾而言, 八河水库相对封闭, 海水动力环境弱, 每年冬天都会出现结冰现象。图 3 中 1989 年和 2015 年冬季都显示八河水库被海冰覆盖, 但是桑沟湾海域基本无冰。2000 年冬季, 该水库内部只出现部分厚度小于 7.5 cm 的海冰覆盖。现场观测发现风应力和潮汐对整个调查区域的海冰分布起调控作用, 受其影响海冰分布支离破碎。

3 讨论和结语

相对于渤海和北黄海海冰来讲, 桑沟湾虽然处于南端, 但因湾内海水动力较弱, 在较冷的天气状况下基本上每年都出现结冰现象。海水结冰对当地养殖业产生重大影响。另外, 结冰现象也可能对其南部的石岛湾核电厂的运转产生一定影响。卫星遥感在海冰监测中具有高空间覆盖的独特优势。鉴于此, 本文利用陆地卫星对山东省荣成市辖区的桑沟湾海域进行海冰厚度反演实验。

实验选取了不同冰情年份(轻冰年、偏重冰年和重冰年)的典型卫片, 进行了海冰厚度提取。卫星反演结果表明, 轻冰年桑沟湾海域基本无冰, 但是八河水库相对封闭, 内部水动力条件弱, 一般会出现平均厚度小于 5 cm 的薄冰。偏重冰年和重冰年份, 桑沟湾出现较大范围的浮冰, 平均厚度 10~15 cm, 近岸海冰较厚(20 cm), 远岸方向海冰厚度逐渐降低。产生这种海冰厚度分布模式主要是由潮流和风的运移造成的。两种外力即可将海冰朝岸方向运移, 海冰挤压叠加, 冰厚增加, 或者可将海冰朝外海方向运输, 直至融化消失。

由于缺少现场实测冰厚数据, 本文将卫星遥感反演结果与模型数据进行了比对。比较结果显示两种数据一致性高, 相关性好(相关系数=0.89), 一定程度上说明本文反演结果的有效性。总体上来讲, 卫星遥感数据能够初步完成对桑沟湾海域海冰监测任务, 反演结果可用于海冰监测, 为有关部门制定防灾减灾措施提供依据。但是, 也必须认识到后续实测数据进一步验证的必要性, 为冰厚算法误差确定和反演模型改良奠定基础。

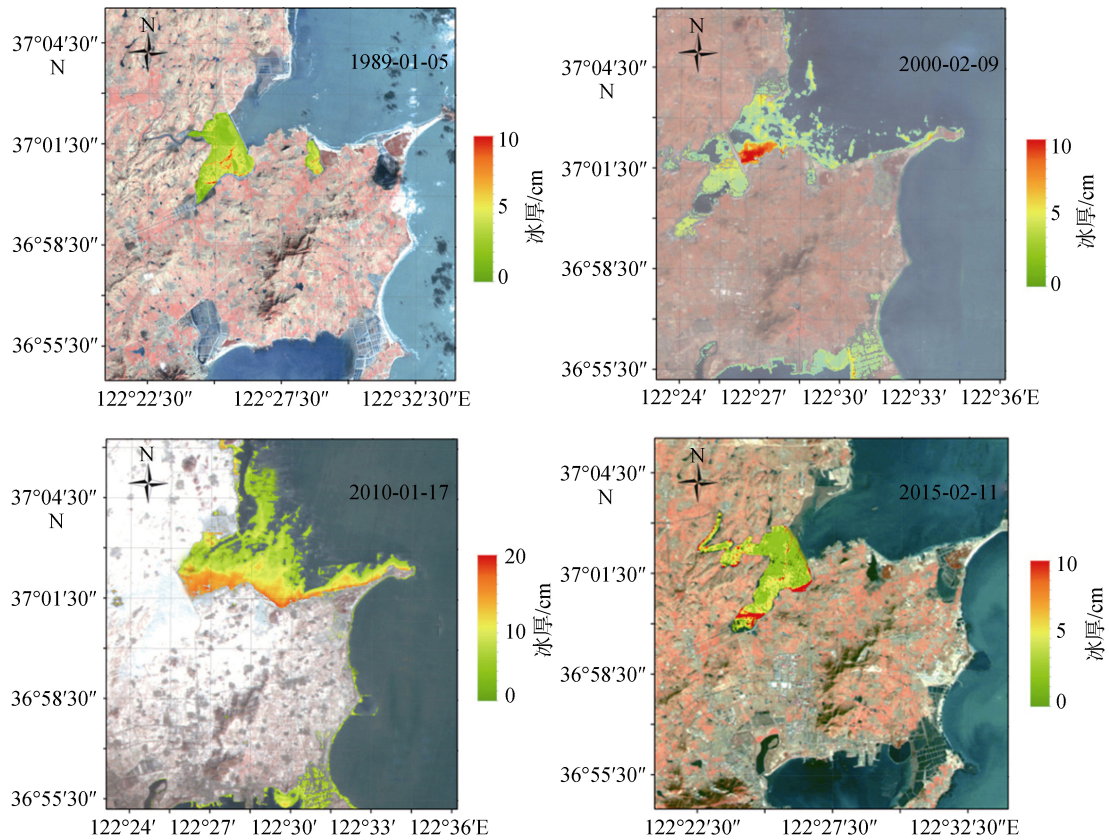


图 3 海冰厚度反演结果

Fig. 3 Sample results of retrieved sea ice thickness

参考文献:

- [1] Grenfell T C, Perovich D K. Spectral albedos of sea ice and incident solar irradiance in the southern Beaufort Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89(C3): 3573-3580.
- [2] Grenfell T C. A radiative transfer model for sea ice with vertical structure variations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96(C9): 16991-17001.
- [3] 许占堂, 杨跃忠, 王桂芬, 等. 辽东湾海冰反射特性[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(7): 1902-1907.
Xu Zhantang, Yang Yuezhong, Wang Guifen, et al. Spectral characteristics of sea ice in the Liaodong Bay[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(7): 1902-1907.
- [4] 柯长青, 谢红接, 雷瑞波, 等. 北极海冰的光谱特征分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(04): 1081-1084.
Ke Changqing, Xie Hongjie, Lei Ruibo, et al. Spectral features of Arctic sea ice[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(04): 1081-1084.
- [5] Allison I, Brt R E, Warren S G. East Antarctic sea ice: Albedo, thickness distribution, and snow cover[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 1993, 98(C7): 12417-12429.
- [6] 李宁, 谢峰, 顾卫, 等. 渤海海冰反射光谱基本特征的观测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(2): 356-360.
Li Ning, Xie Feng, Gu Wei, et al. Reflection spectral investigation in the Bohai Sea[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(2): 356-360.
- [7] Li N, Xie F, Gu W, et al. Using remote sensing to estimate sea ice thickness in the Bohai Sea, China based on ice type[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(17): 4539-4552.
- [8] Hua S, 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): 995-1000.
- [9] 国巧真, 顾卫, 孙从容, 等. 基于遥感数据的渤海海冰面积提取订正模型研究[J]. *海洋科学*, 2008, 32(8): 70-75.
Guo Qiaozheng, Gu Wei, Sun Congrong, et al. Sea ice area retrieval based on a correction model using remote sensing observations[J]. *Marine Sciences*, 2008, 32(8): 70-75.
- [10] 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 Yanyou, Xie Hongquan, Yang Guang. Temporal changes of Bohai Sea ice in 2012 based on MODIS imagery[J]. Marine Sciences, 2014, 38 (6): 60-64.
- [11] 张晰, 张杰, 孟俊敏. Landsat-8 与 GF-1 卫星渤海海冰探测能力对比研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(2).
 Zhang Xi, Zhang Jie, Meng Junmin. Comparison of monitoring performance between Landsat-8 and GF-1 satellites[J]. Marine Sciences, 2015, 39(2): 50-56.
- [12] 陈伟涛, 和海霞, 黄河, 等. 基于 HJ-1 CCD 数据的海冰时空特征分析——以渤海辽东湾为例[J]. 安全与环境工程, 2014, 21(5): 121-125.
 Chen Weitao, He Haixia, Huang He, et al. Temporal and spatial analysis of sea ice using HJ-1 CCD imagery: a case study in Liaodong Bay. Safety and Environmental Engineering, 2014, 21(5): 121-125.
- [13] 兰志刚, 靳卫卫, 朱明亮, 等. 基于高斯混合模型的海冰图像非监督聚类分割研究[J]. 海洋科学, 2011, 35(11): 97-100.
 Lan Zhigang, Jin Weiwei, Zhu Mingliang, et al. A non-supervised classification of sea ice imagery based on a Guass-mixing model[J]. Marine Sciences, 2011, 35(11): 97-100.
- [14] Liang S, Shuey C J, Russ A L, et al. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84(2): 25-41.
- [15] Xie F, Wei G U, Yuan Y, et al. Estimation of sea ice resources in Liaodong gulf using remote sensing[J]. Resources Science, 2003, 25(3): 17-23.

Sea ice thickness in the Sanggou Bay retrieved from satellite observations

GU Hong-qin¹, BI Hai-bo^{2, 3}, HUANG Hai-jun^{2, 3}

(1. State Nuclear Electric Power Planning Design and Research Institute, Beijing 100095, China; 2. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Foundation of Laboratory for Marine Geology, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266237, China)

Received: May 10, 2016

Key words: sea ice; the Sanggou Bay; remote sensing

Abstract: Sea ice is frequently observed in the Sanggou Bay and has significant influence on the local aquaculture community. Due to the absence of field measurements and due to rigid winter conditions that make it too hostile to conduct in-situ observations, we make use of satellite images to estimate sea ice thickness. Comparative results suggest that our estimations agree well with results from a robust model with a mean bias of 2 cm, standard deviation of 6 cm, and correlation coefficient of 0.76. Spatiotemporal behavior is clearly reflected in our satellite-derived thickness. Under warmer conditions, there is basically no ice in the bay. In years of moderate-to- low temperatures, the bay may be broadly covered by ice floes. The declining trend from onshore to offshore is obvious. In particular, in heavy ice years, the southern Sanggou Bay is dominated by sea ice with a mean thickness of 20 cm due to the effects of tides and winds.

(本文编辑: 刘珊珊)