

# 基于我国第七次北极科学考察—2016年夏季 北极海冰厚度观测与特征分析

孙晓宇<sup>1</sup>, 沈辉<sup>1</sup>, 李春花<sup>1,2</sup>, 田忠翔<sup>1</sup>, 张林<sup>1</sup>, 蔡柯<sup>1</sup>, 付敏<sup>1</sup>

(1.国家海洋环境预报中心,北京 100081; 2.国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验,北京 100081)

**摘要:** 对比电磁感应仪 EM31 观测的海冰厚度和人工钻孔实测数据,EM31 海冰厚度观测平均误差为 14.5 cm,在允许误差范围内,说明 EM31 适用于北极冰厚观测,通过相关分析表明,测量误差与海冰厚度有较强的线性相关性;各冰站海冰平均厚度从 57~246 cm 不等,冰厚分布很不均匀,海冰起伏度差异较大,冰脊明显,说明北极海冰受动力作用影响较大;当海冰厚度达到一定程度之后,海冰粗糙度和起伏度大小主要取决于海冰相互挤压程度和海冰本身硬度。

**关键词:** 北极;科学考察;海冰

**中图分类号:** P731.15 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2017)04-0011-09

## 1 引言

全球气候变暖的大背景下,北极海冰面积退缩显著<sup>[1-4]</sup>,2016年夏季北极海冰最小范围为有卫星遥感记录以来第二低值,人们愈来愈关注该区域的变化。由于北极独特的地理位置以及恶劣的自然环境条件,现场观测难度大,目前多采用卫星遥感和数值模式等手段开展北极地区的科学研究<sup>[1-8]</sup>,但遥感数据和模式的评价和验证等需要现场观测数据的支持,因此进行实地调查和观测必不可少。自1999年7月第一次北极科学考察开始<sup>[9]</sup>,我国利用夏季时间窗口,已经开展了7次北极科学考察,获取了大量珍贵数据,有效提升了科研水平。2016年7月11日“雪龙”号科学考察船从上海出发驶向北极,标志着我国第七次北极科学考察正式拉开了帷幕。本次科学考察涉及到大气、海冰和海洋等多项科学考察内容,国家海洋环境预报中心在此次科学考察工作中主要开展了走航气象、探空以及冰站海冰厚度、冰-气通量等观测,获取了大量一手科学数

据,本文主要基于冰站的电磁感应仪 EM31 海冰厚度观测、雪厚人工观测、人工钻孔冰厚观测等数据,对观测区域海冰厚度分布特征进行了分析。

## 2 站位及数据获取情况

### 2.1 站位情况

按照预定计划本次科学考察共完成6个短期冰站和1个长期冰站的考察工作,短期冰站通常在冰上作业时间不超过1d,长期冰站通常作业时间为3d以上,各个冰站具体作业时间、空间位置、工作量等情况详见图1和表1。短期冰站序号是按照完成时间的先后编排的,其中1—4号短期冰站是在去程中完成考察的,长期冰站所处纬度最高,8月4日5时40分(世界时,下同)开展长期冰站的第一次海冰厚度观测,当时冰站位置为(164°15.75'W,82°45'N),8月13日22时10分开展长期冰站的第二次海冰厚度观测时,海冰已随着风和洋流漂移至159°49.32'W,82°52.95'N。完成长期冰站作业后,在回程过程中

收稿日期: 2016-10-21; 修回日期: 2017-01-20。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41376188); 国家重点研发计划课题(2016YFC1402707, 2016YFC1402702, 2016YFC1402705); 南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE-03-01)。

作者简介: 孙晓宇(1977-),男,副研究员,博士后,主要从事海岸带GIS与RS相关研究。E-mail:sunxy@reis.ac.cn

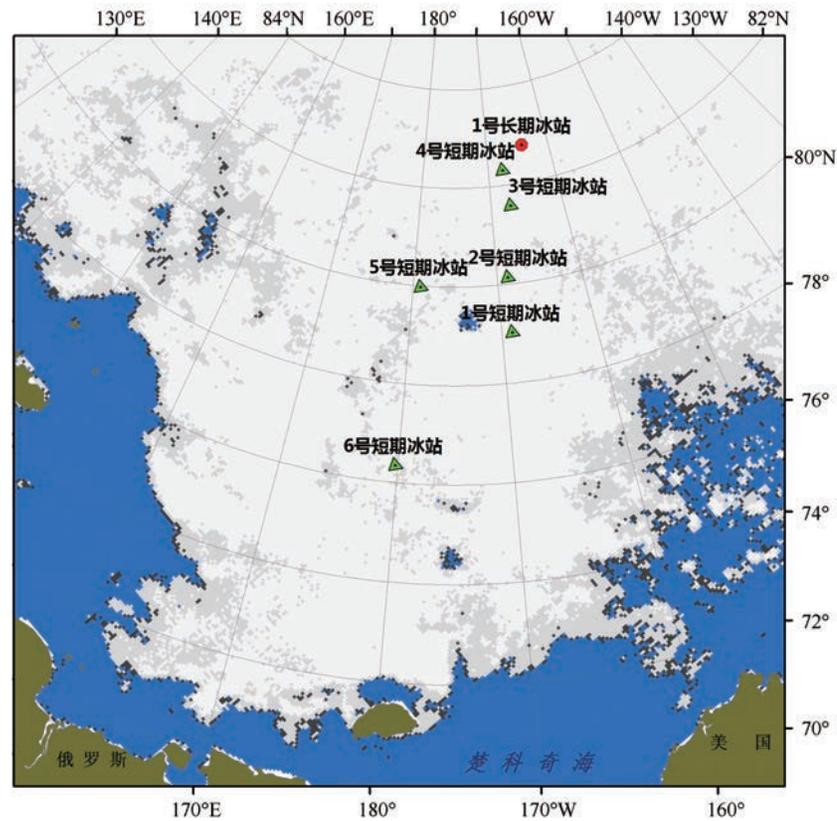


图1 冰站位置分布图(底图为2016年7月25日海冰密集度图,引自 <https://seaice.uni-bremen.de>)

表1 冰站及作业信息

冰站	作业时间/ (月/日/时/分)	经度/W	纬度/N	断面数/个	断面长度/m	钻孔数/个	EM31平均 绝对误差/m
长期冰站	8/10/5/40	164°15.75'	82°45'	13	80	64	0.098
长期冰站	8/13/22/10	159°49.32'	82°52.95'	13	80	0	/
1号短期冰站	8/4/1/30	169°07.37'	78°59.52'	1	100	6	0.062
2号短期冰站	8/4/23/00	169°0.18'	80°6.77'	1	100	10	0.348
3号短期冰站	8/6/4/00	167°37.1'	81°32.99'	2	100/40	10	0.153
4号短期冰站	8/6/22/00	168°9.18'	82°16.98'	2	90/100	30	0.078
5号短期冰站	8/17/22/00	179°21.02'	79°56.55'	2	100/60	18	0.126
6号短期冰站	8/19/23/00	179°35.90'	76°18.66'	2	100/100	4	0.15

开展了第5和第6号短期冰站的考察作业,第6号短期考察冰站所处纬度最低(76°18.66'N)。

## 2.2 数据获取情况

本次科学考察共完成EM31冰厚和人工雪厚36条断面的观测,获取数据记录1890条;完成142个海冰钻孔冰厚人工观测,获取数据记录284条。

按照第七次北极科学考察计划,采取EM31以

及人工观测的方式开展了两次长期冰站冰雪观测,第一次海冰厚度观测工作起始时间为2016年8月10日5时40分,测量内容包括EM31冰厚、人工冰厚、雪厚。第二次海冰厚度观测工作起始时间为2016年8月13日22时10分,测量内容主要为EM31测冰厚和雪厚。长期冰站共测量80m断面13条(见图2),并完成64个人工钻孔冰雪厚度测量。

6次短期冰站起始时间分别为8月4日1时30



图2 长期冰站作业区分布图

分、8月4日23时、8月6日4时、8月6日22时、8月17日22时和8月19日23时,第1、2个短期冰站分别完成了1个EM31断面的测量工作,其余4个短期冰站都完成了2条EM31断面的测量,所有短期冰站共完成78个钻孔冰厚测量工作,其中1号短期冰站6个,2号短期冰站10个,3号短期冰站10个,4号短期冰站30个,5号短期冰站18个,6号短期冰站4个,其余测量内容与长期冰站一致。

### 2.3 仪器设备情况

EM31主要是根据海冰电导率和海水电导率之间的明显差异,利用电磁场原理精确探测仪器至冰水交界面的距离,以实现海冰厚度的测定。EM31是单频观测,频率为9.8 kHz,线圈天线长度为3.66 m。利用预安装的ICE软件,并根据实测海水电导率输入软件中,仪器直接读出海冰底面到EM31之间的视距和视电导率,经预处理等校正后,再反演出仪

器到冰水界面之间的真实距离。积雪和海冰的总厚度可以通过仪器到冰水界面距离减去仪器与积雪面的距离得到。

## 3 数据分析

### 3.1 长期冰站数据分析

所选观测区左下方有个明显的 $-45^\circ$ 角走向的冰脊存在,其他区域海冰厚度比较平均,只是垂直冰脊方向有一个微弱的隆起,研究区左上角和右上角海冰最薄(见图4)。

与人工钻孔冰厚测量相比较,长期冰站EM31冰厚测量平均绝对误差为9.8 cm,总体上略小于人工观测值。其中44个点误差都在10 cm以内,16个点误差大于10 cm,4个点误差小于-10 cm,误差分布见图3。

由于两个时次EM31冰厚观测之间有一次较大的风雪天气过程,造成观测点标志物部分损毁,因此第二次测量与第一次测量从第六个断面开始在空间上无法很好的重合,两次长期冰站冰厚空间分布如图4所示,由冰脊的位置可以明显看出第二次观测中冰脊左侧测量范围有所增大。第一次测量中所有断面冰厚平均值为130.2 cm,第二次测量平均冰厚为133.3 cm,较第一次测量平均冰厚增加了3.1 cm,这与第二次测量的冰脊范围大于第一次有直接关系。

### 3.2 短期冰站数据分析

以钻孔数据为准对EM31冰厚测量进行评价,

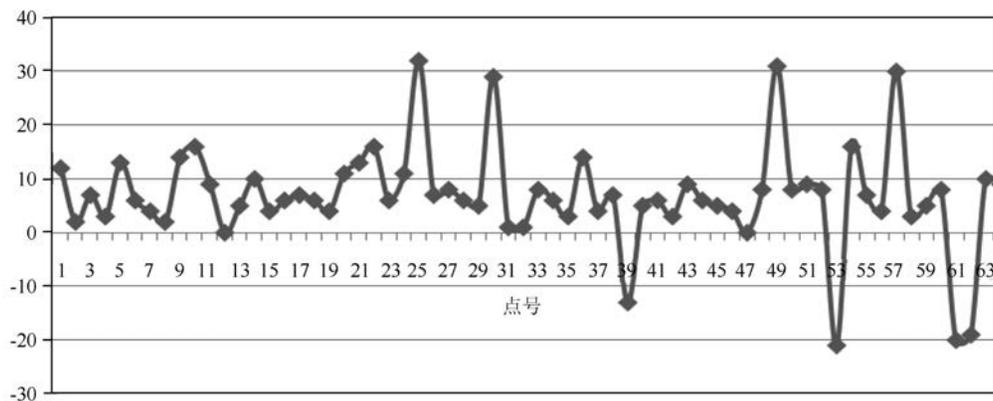


图3 EM31测量冰厚误差图(单位:cm)

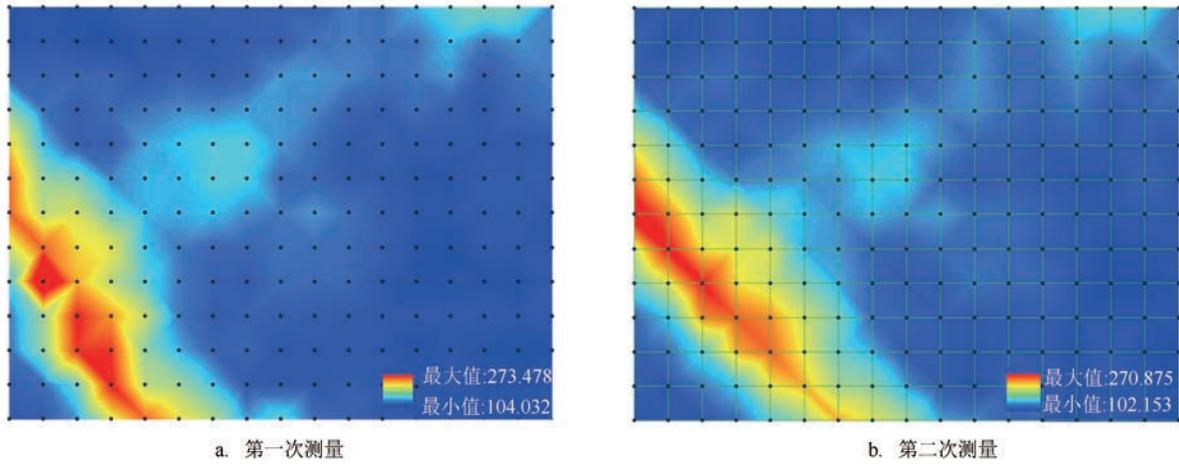


图4 长期冰站冰厚空间分布图(单位:cm)

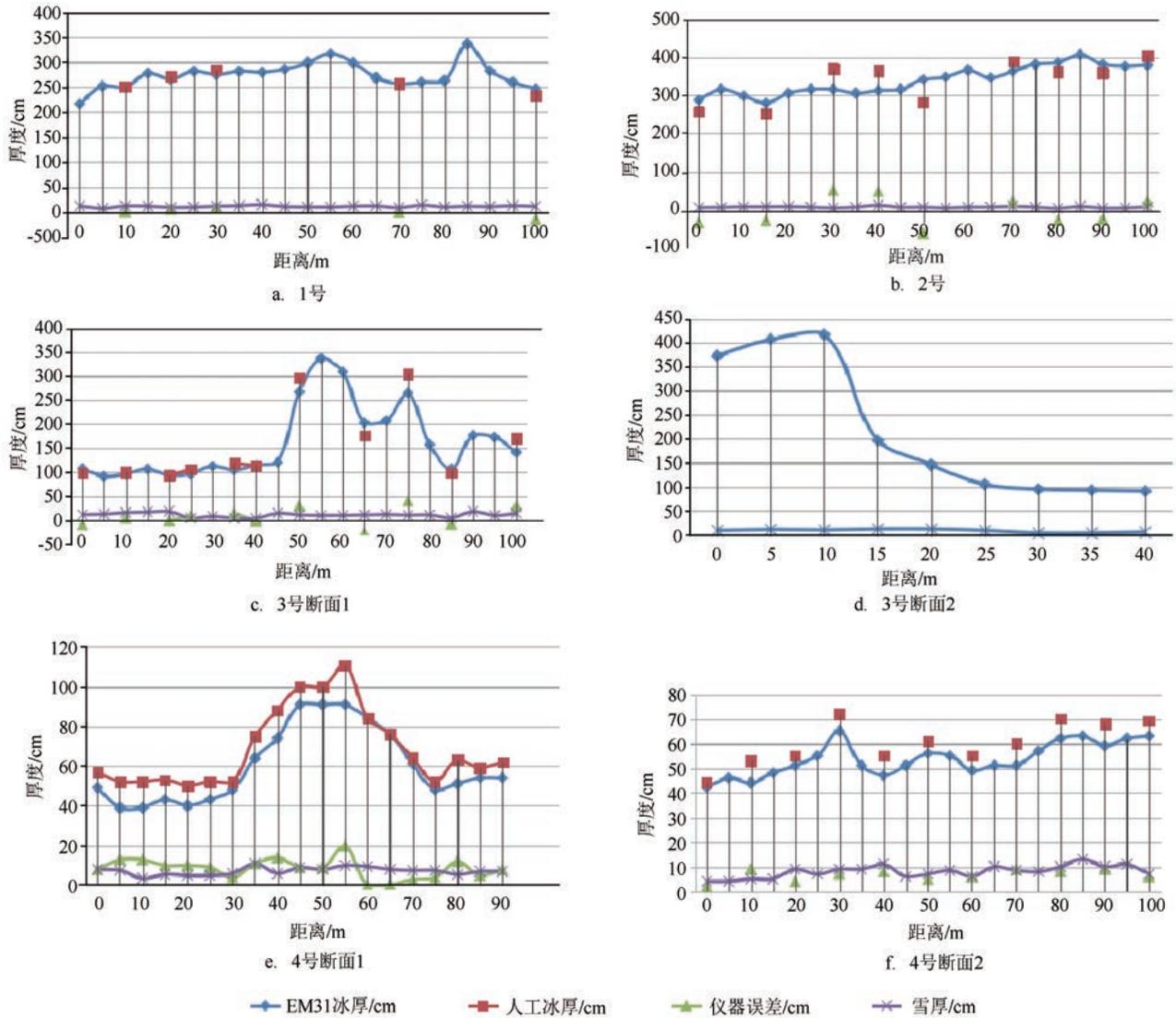


图5 各短期冰站测量情况

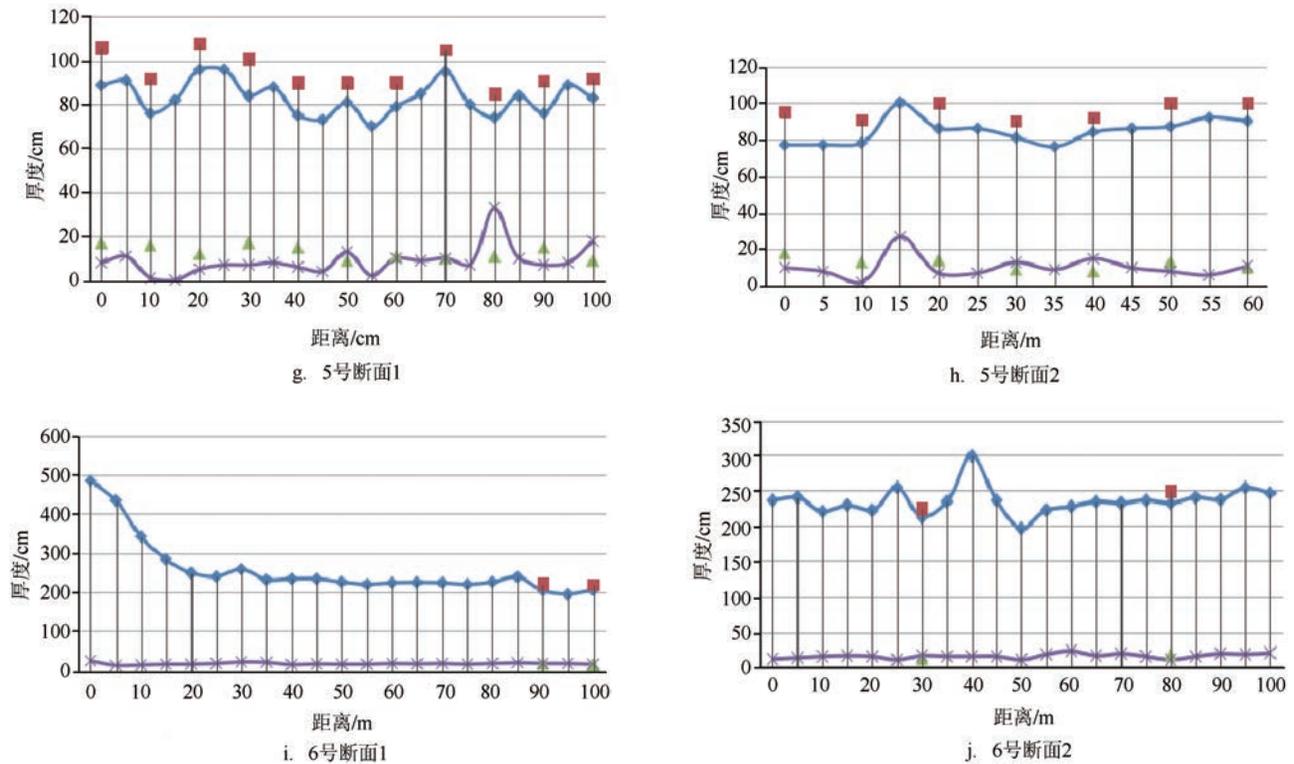


图5 (续)

第1、4号短期冰站平均绝对误差最小,不到10 cm,第2号短期冰站平均绝对误差最大,达到34 cm。短期冰站具体测得的数据内容见图5。

1号短期冰站所选断面海冰厚度比较平均(见图5a),20个EM31测量的冰厚值有18个在2~3 m之间,只有两个点超过3 m,其中第17号点处于冰脊处,冰厚3.4 m,1号冰站EM31测量平均绝对误差为6.2 cm。

2号短期冰站海冰平均厚度要高于1号冰站(见图5b),基本处于3~4 m之间,所选断面从1号点到20号点海冰厚度有个微弱的上升趋势,该冰站断面没有明显的冰脊存在,最厚冰为4.1 m,EM31测量平均绝对误差为34 cm。

3号短期冰站冰厚分布比较复杂(见图5c、d),完成了100 m和40 m两条垂直分布断面的测量,交叉点处在100 m断面的40 m处,两端各20 m。100 m断面在55 m、75 m和95 m处有3处冰厚分别为3.36 m、2.64 m和1.72 m的冰脊存在,其余测量点冰厚都在1 m左右。40 m断面前3个测量点冰厚都在4 m左右,从第4测量点冰厚逐渐趋于平缓,

6—9号点冰厚为1 m左右,该站在100 m断面进行了11个人工钻孔冰厚测量,EM31测量平均绝对误差为15.3 cm。

4号短期冰站完成了100 m和90 m两条垂直分布断面的测量(见图5e、f),海冰整体厚度不大,最大冰厚仅为1.1 m,最小冰厚仅为0.44 m。90 m断面30~75 m之间有个冰厚上升和下降的变化过程。100 m断面海冰厚度均小于0.7 m,海冰厚度没有剧烈的变化。两个断面进行了32个人工钻孔冰厚测量,EM31测量平均绝对误差为7.8 cm。

5号短期冰站完成了100 m和60 m两条垂直分布断面的测量(见图5g、h),海冰厚度分布较为平均,整体厚度不大,EM31测量最大冰厚仅为1 m,最小冰厚为0.7 m。两个断面进行了18个人工钻孔冰厚测量,EM31测量平均绝对误差为12.6 cm。

6号短期冰站完成了两个100 m垂直分布断面的测量(见图5i、j),EM31测量海冰厚度均在2 m以上,其中最大海冰厚度接近5 m,由于该站冰厚较大,两个断面分别进行了2个人工钻孔冰厚测量,EM31测量平均绝对误差为15 cm。

### 3.3 冰雪厚度的统计及空间分布分析

对7个冰站的平均冰厚、平均雪厚、海冰粗糙度、海冰起伏度等物理属性值进行了统计分析(见表2)。平均冰雪厚度为每个站点实际观测所有冰雪厚度值的平均值;海冰粗糙度为每个站点实际观测所有海冰厚度值的均方差,用来体现冰站海冰厚度的空间不一致性;海冰起伏度为每个冰站所有观测值的最大、最小冰厚差,用来体现冰站海冰厚度的最大起伏程度。

表2 冰站海冰基本状况

名称	平均冰厚/cm	平均雪厚/cm	粗糙度	起伏度
长期冰站	133	16	34	170
1号短期冰站	273	11	26	120
2号短期冰站	340	10	37	126
3号短期冰站	177	11	101	325
4号短期冰站	57	8	14	52
5号短期冰站	84	9	7	30
6号短期冰站	246	16	55	289

2号短期冰站的平均冰厚最大,达到了3.4 m,其次为1号和6号短期冰站,冰厚分别为2.73 m和2.46 m,4号和5号短期冰站海冰平均厚度最小,分别只有0.57 m和0.84 m(见表2)。由于北极夏季冰雪消融的原因,各冰站雪厚均不大,只有长期冰站和6号短期冰站的平均雪厚达到16 cm,其余冰站平均雪厚均在10 cm左右。在利用钢尺测量雪厚以及进行海冰钻孔观测的过程中可以发现,由于夏季表层雪出现反复的消融和冻结的过程,会形成大颗粒

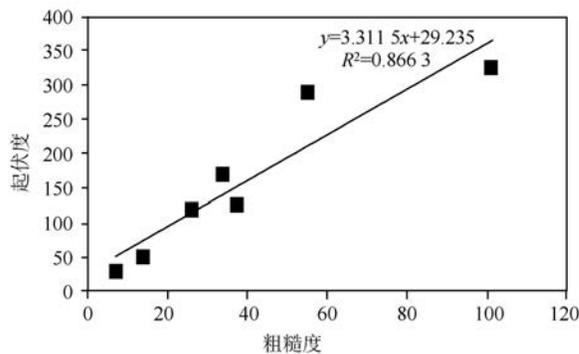
冰晶,进而形成一个硬度介于雪和冰的雪冰过渡层,因此对于确定冰雪边界过程中会有人的主观判断误差存在。本研究中,冰雪的测量采用相同的判别标准,且海冰实际厚度远大于潜在的判别误差,因此对于冰雪厚度的统计分析不会产生显著影响。

海冰粗糙度和起伏度都在一定程度上体现海冰表面的平整程度,粗糙度倾向于刻画小尺度海冰表面平整程度,而起伏度则是在更大空间尺度上描述海冰的平整程度,二者具有明显的线性相关性。本次考察观测的7个冰站两项指标相关系数达到0.93(见图6a)。粗糙度和起伏度主要反映海冰受到外力作用而产生的冰脊情况,而冰脊情况又可在一定程度上反映出海冰曾受外力作用的大小以及海冰本身的硬度。起伏度大小理论上取决于海冰平均厚度,即较大的海冰厚度是出现较大起伏度的必要条件,但二者并没有很好的线性相关性,本次考察所观测的7个冰站平均冰厚与起伏度的相关系数仅有0.35(见图6b),这说明,当海冰厚度达到一定程度之后,其平整程度只取决于外力的作用程度以及本身的硬度。

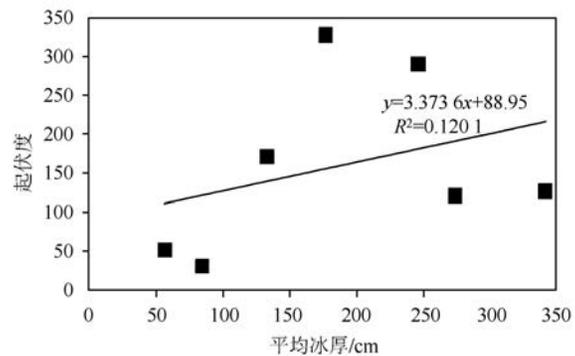
由图7可见,由于采样站点主要呈南北向线型分布,且站点数量较少,研究区海冰物理特征没有体现出明显的纬向分布规律。从现有观测数据来看,西北向(4号短期冰站、5号短期冰站、长期冰站)海冰厚度相对较小,处于中东部的2号冰站冰厚最大;3号短期冰站粗糙度和起伏度最大,其起伏落差达到3.25 m,6号短期冰站次之。

### 3.4 EM31测量误差外因分析

带来测量误差的原因有很多种,有仪器本身的



a. 起伏度与粗糙度



b. 起伏度与平均冰厚

图6 相关性分析

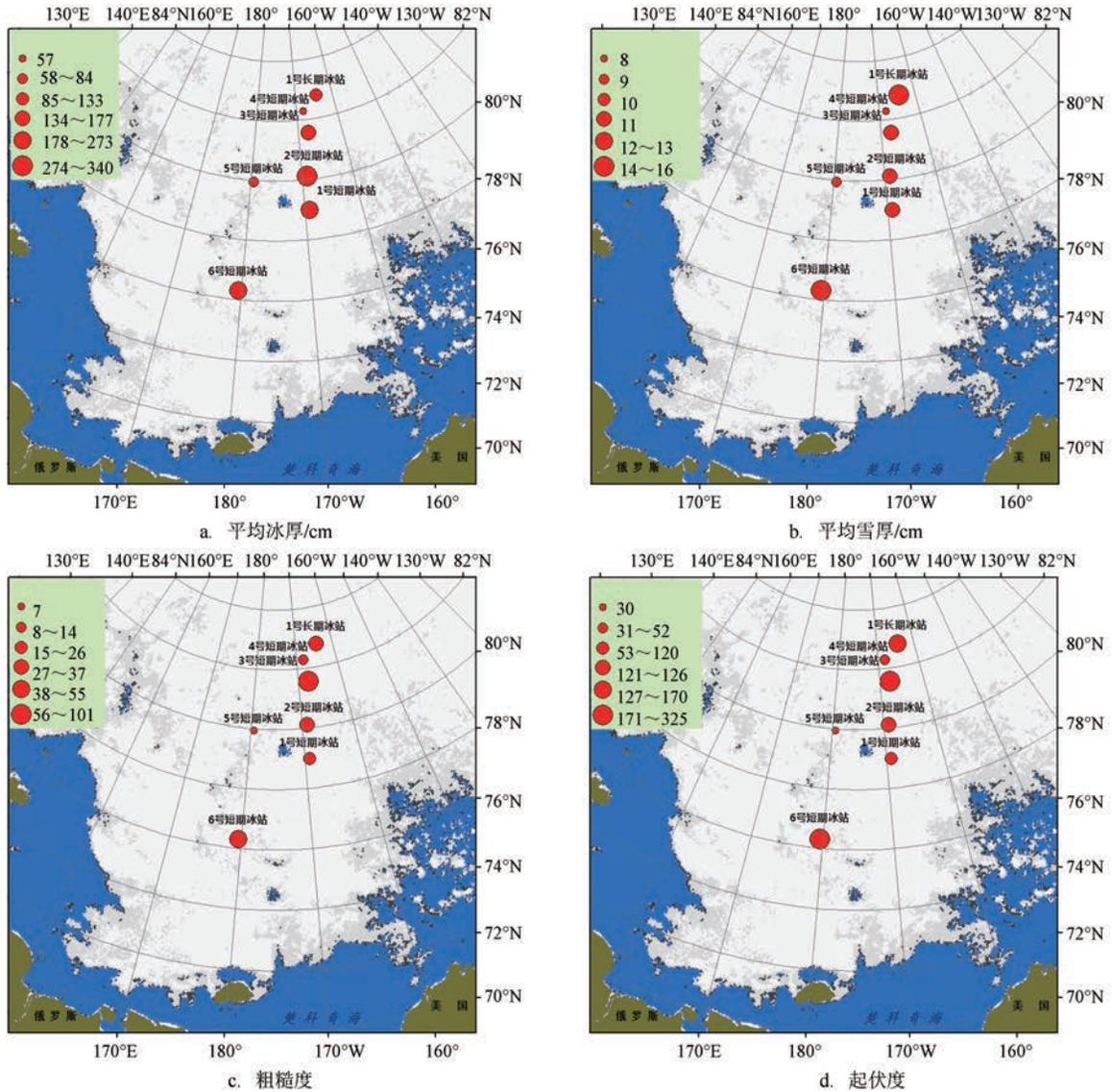


图7 不同物理属性的空间分布(底图为2016年7月25日海冰密集度图,引自 <https://seaice.uni-bremen.de>)

测量精度误差,有人为造成的观测误差,同时也有观测对象的差异所带来的测量误差。本次考察利用EM31进行海冰厚度观测,对观测的冰厚数据利用钻孔数据进行测量误差计算,不同冰站所获得的观测误差也存在一定的差异(见表3)。考虑到仪器本身的误差以及人为观测误差,对不同观测对象具有相近的影响效果,本文对观测对象的差异与测量误差进行了相关性分析,主要分析了冰厚、雪厚、粗糙度和起伏度与测量误差的线性相关性(见图8)。结果表明:测量误差与雪层厚度、粗糙度和起伏度的相关性很弱,相关系数均小于0.3。测量误差与海

冰厚度的线性相关性明显强于其他要素,相关系数为0.624,一定程度上说明随着冰厚的增加,EM31观测的精度整体上有下降趋势。2号冰站海冰平均厚度达到了3.4 m,EM31测量冰厚的平均绝对误差也达到了35 cm,同时4号冰站平均冰厚只有57 cm,其测量误差也不到8 cm(见表3)。1号冰站比较例外,其平均冰厚达到2.7 m,但是冰厚测量的平均绝对误差仅有6.2 cm。因此,虽然测量误差与海冰厚度具有相对较高的线性相关性,但无法排除偏差较大的意外情况发生,对于EM31测量误差的原因,还有待在今后的海冰观测中进一步分析验证。

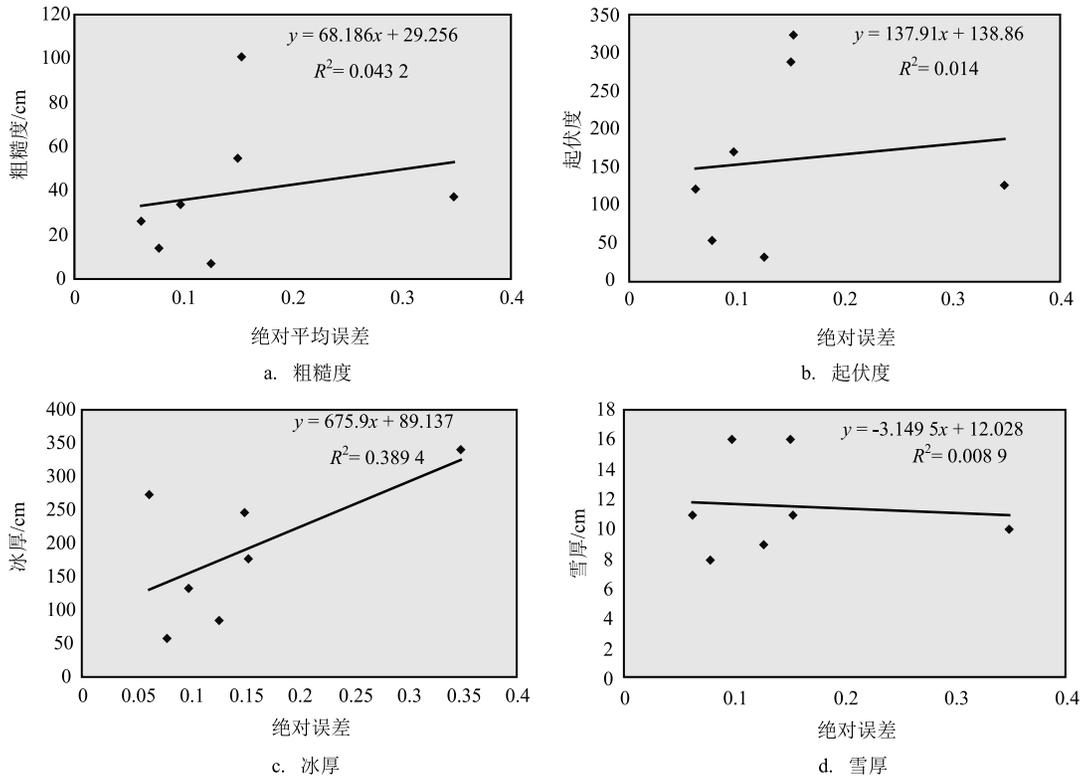


图8 海冰物理属性与绝对平均误差的相关性分析图

表3 测量误差与海冰物理属性

名称	平均绝对误差/cm	粗糙度	起伏度	平均冰厚/cm	平均雪厚/cm
长期冰站	0.098	34	170	133	16
1号短期冰站	0.062	26	120	273	11
2号短期冰站	0.348	37	126	340	10
3号短期冰站	0.153	101	325	177	11
4号短期冰站	0.078	14	52	57	8
5号短期冰站	0.126	7	30	84	9
6号短期冰站	0.15	55	289	246	16
与测量误差的线性相关系数	—	0.207	0.118	0.624	0.094

## 4 小结

国家海洋环境预报中心在本次科学考察中完成了7个冰站的考察工作,获取了珍贵的北极海冰观测数据。通过对海冰观测数据的统计分析,对比钻孔实测数据,各冰站EM31测量冰厚的平均绝对

误差从6~34 cm不等,所有冰站EM31冰厚测量误差平均值为14.5 cm,在允许误差范围内。EM31测量误差与海冰厚度具有一定的线性相关性,相关系数为0.62;各冰站海冰平均厚度从57~246 cm不等,冰厚分布很不均匀,海冰起伏度差异较大,冰脊明显,说明北极海冰受动力作用影响较大。通过相关性分析,起伏度与海冰厚度没有很好的线性相关性,本次考察所观测的7个冰站平均冰厚与起伏度的相关系数仅有0.35,说明当海冰厚度达到一定程度之后,其平整程度主要取决于外力的作用程度以及本身的硬度。

## 参考文献:

- [1] 魏立新,张占海. 北极海冰变化特征分析[J]. 海洋预报, 2007, 24(4): 42-48.
- [2] 柯长青,彭海涛,孙波,等. 2002年—2011年北极海冰时空变化分析[J]. 遥感学报, 2013, 17(2): 459-466, 452-458.
- [3] 薛彦广,关皓,董兆俊,等. 近40年北极海冰范围变化特征分析[J]. 海洋预报, 2014, 31(4): 85-91.
- [4] 张璐,张占海,李群,等. 近30年北极海冰异常变化趋势[J]. 极地研究, 2009, 21(4): 344-352.

- [5] 孟上, 李明, 田忠翔, 等. 北极东北航道海冰变化特征分析研究[J]. 海洋预报, 2013, 30(2): 8-13.
- [6] 武炳义, 高登义, 黄荣辉. 冬春季节北极海冰的年际和年代际变化[J]. 气候与环境研究, 2000, 5(3): 249-258.
- [7] 魏立新, 邓小花, 县彦宗, 等. 2007与2008年夏季北极海冰变化特征及原因的对比分析[J]. 海洋预报, 2013, 30(2): 1-7.
- [8] 沈春, 施伟来. 基于Nimbus-7和DMSF卫星资料的北极海冰变化特征分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(4): 31-43.
- [9] 董兆乾. 中国首次北极科学考察[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1999, 19(3): 38.

## Arctic sea ice observation and characteristic analysis based on the seventh National Arctic Research Expedition in summer 2016

SUN Xiao-yu<sup>1</sup>, SHEN Hui<sup>1</sup>, LI Chun-hua<sup>1,2</sup>, TIAN Zhong-xiang<sup>1</sup>, ZHANG Lin<sup>1</sup>, CAI Ke<sup>1</sup>, FU Min<sup>1</sup>

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, State Oceanic Administration, People's Republic of China, Beijing 100081 China)

**Abstract:** The National Marine Environmental Forecasting Center has participated in the Seventh National Arctic Research Expedition in summer 2016 and completed 36 sections observation at 7 ice stations. The investigation work includes EM31 ice thickness observation, snow thick manual observation and artificial drilling ice thickness observation. Compared the sea ice thickness that measured by EM31 with by manual drilling measurement, the average error of EM31 measured ice thickness is 14.5 cm which is at the allowable error range, indicating that EM31 is suitable for ice thickness observation. The average sea ice thickness of seven ice stations is from 57 cm to 246 cm. The spatial distribution of ice thickness is very uneven. The relief degree of sea ice surface between each ice stations is varied greatly. Research results in the paper indicates that the Arctic sea ice is affected mainly by external force. When the ice reached at a certain thickness, the sea ice roughness and relief degree of sea ice surface is depended mainly on the extent of external squeezing and its intrinsic hardness.

**Key words:** Arctic; scientific expedition; sea ice