

郝光华, 杨清华, 赵杰臣, 等. 2016 年南极中山站固定冰冰厚观测分析[J]. 海洋学报, 2019, 41(9): 26–39, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2019.09.003

Hao Guanghua, Yang Qinghua, Zhao Jiechen, et al. Observation and analysis of landfast ice arounding Zhongshan Station, Antarctic in 2016[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(9): 26–39, doi:10.3969/j.issn.0253–4193.2019.09.003

## 2016 年南极中山站固定冰冰厚观测分析

郝光华<sup>1</sup>, 杨清华<sup>2,3\*</sup>, 赵杰臣<sup>1</sup>, 邓宵<sup>4</sup>, 杨勇<sup>5</sup>, 段培法<sup>6</sup>,  
张林<sup>1</sup>, 李春花<sup>1</sup>, 崔丽琴<sup>7</sup>

(1. 国家海洋环境预报中心 国家海洋局海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081; 2. 中山大学 大气科学学院 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 4. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部/山西省重点实验室, 山西 太原 030024; 5. 安徽省休宁县气象局, 安徽 黄山 245400; 6. 江苏省徐州市气象局, 江苏 徐州 221002; 7. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 极区海冰是全球气候系统的重要组成部分, 南极的固定冰普遍存在于其沿海地区, 中山站周边固定冰一般在 11 月中下旬达到最厚。海冰厚度是海冰的重要参数之一, 2016 年在南极中山站附近 3 个站点 (S1、S2、S3 站点) 共布放了 4 套温度链浮标, 包括 1 套 SIMBA (Snow and Ice Mass Balance Array) 温度链浮标和 3 套太原理工大学温度链浮标 (TY 温度链浮标), SIMBA 温度链浮标每天观测 4 次, TY 温度链浮标每小时观测 1 次。利用浮标观测的温度剖面以及海冰和海水间不同介质温度差异计算得到海冰厚度。在 S3 站点, 同时布放了 SIMBA 温度链浮标和 TY 温度链浮标。温度链浮标计算冰厚和人工钻孔观测冰厚比较结果显示, S1 站点 TY 温度链浮标计算的海冰厚度平均误差和均方根误差分别为 3.3 cm 和 14.7 cm, S2 站点和 S3 站点分别为 6.6 cm、6.9 cm 以及 4.0 cm、4.8 cm。S3 站点的 SIMBA 温度链浮标计算冰厚和人工观测冰厚的平均误差和均方根误差为 8.2 cm 和 9.7 cm。因而 S3 站点 TY 温度链浮标计算的海冰厚度更接近人工观测的结果。进一步对 Stefan 定律海冰生长模型进行对比, 模型计算得到的海冰生长率为 0.1~0.8 cm/d, 生长率快于 TY 温度链浮标的结果, 且受积雪影响明显。相比于卫星遥感反演冰厚的误差和观测时段的限制以及有限的人工观测, 2 种温度链浮标未来对于中山站附近海冰的长期监测均有重要的应用价值。

**关键词:** 海冰温度链浮标; 固定冰; 厚度; 温度; 南极; 普里兹湾

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253–4193(2019)09–0026–14

### 1 引言

在全球变暖的大背景下, 极区海冰作为全球气候系统的重要组成部分对气候产生了重要影响<sup>[1–2]</sup>。南极地区作为地球的主要冷源之一, 极其深刻地影响着全球气候变化<sup>[3]</sup>。相比于北极海冰快速减少<sup>[4–6]</sup>, 尤其是多年冰的快速减少<sup>[7–9]</sup>, 南极整体海冰呈现略有增

加的趋势, 不同海域海冰变化不同<sup>[10]</sup>, 在阿蒙森海和别林斯高晋海一侧呈现减少的趋势, 在罗斯海和印度洋一侧呈现增加的趋势, 罗斯海海冰的增加最为明显<sup>[11–13]</sup>, 威德尔海有明显的季节变化<sup>[14]</sup>。

冰雪覆盖表面具有较高的反照率, 海水的反照率一般小于 0.1, 海冰的反照率可以高于 0.5, 而积雪覆盖表面反照率可以高于 0.85<sup>[15]</sup>, 海冰平衡了海洋与大

收稿日期: 2018–07–26; 修订日期: 2019–01–07。

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFA0605903); 国家自然科学基金(41876212); 极地考察后勤保障。

作者简介: 郝光华(1988—), 男, 山西省长治市人, 工程师, 主要从事极地海冰观测和预报研究。E-mail: haogh@nmefc.cn

\* 通信作者: 杨清华, 男, 教授, 主要从事极地海冰和气象研究。E-mail: yangqh25@mail.sysu.edu.cn

气之间的热量, 强烈制约着海气热量交换<sup>[16]</sup>, 进而影响地球辐射平衡。由于南极是海洋包围着的陆地, 海冰多存在于陆地边缘以及海湾, 主要以季节性海冰为主, 冬季结冰, 夏季随着温度升高而破碎、融化。相比于北极海冰, 南极海冰冰厚较薄, 雪厚较厚<sup>[15]</sup>。由于极区冰厚获取手段有限, 卫星反演可以得到海冰密集度, 但海冰厚度尚难以准确获得, 尤其缺少高分辨率的海冰厚度分布信息。南极海冰冰厚的观测更有限<sup>[17]</sup>, 基于 ICESat 计算的南极海冰厚度绝对误差为 23 cm<sup>[18]</sup>。目前人工目测是获取海冰厚度的主要手段<sup>[19]</sup>; 基于 ASPeCt (Antarctic Sea Ice Processes and Climate) 的人工观测是主要手段之一, 但是其数据难以有效分析海冰的长时间变化<sup>[20]</sup>; 基于 EM31 型电磁感应海冰厚度探测仪 (EM31) 观测冰厚误差较大, 尤其对薄冰冰厚的观测<sup>[21]</sup>。

固定冰普遍存在于南极沿海地区, 在南半球冬季海冰范围最大时, 固定冰约占南极海冰总体积的 14%~20%<sup>[22]</sup>, 由于附着于海岸、冰架前沿, 其冰厚相对于浮冰更厚, 维持的时间更长。中国中山站位于东南极普里兹湾, 其附近海域被固定冰所覆盖, 周边固定冰一般在 11 月中下旬达到最厚<sup>[23]</sup>。“雪龙”船每年于 12 月初到达中山站时, 由于其沿岸固定冰的存在, 无法靠近中山站; 而且往往由于无法确定固定冰的冰况, 对船舶的航行和保障物资的冰上运输都构成了严重影响。目前对中山站沿岸固定冰的属性, 尤其是其冰厚缺乏长期连续广泛的有效监测。

国际上包括中国在内的 9 个国家在 2007–2009 年国际极地年期间发起了获取南极长期固定冰观测数据的固定冰观测网计划 (The Antarctic Fast Ice Network, AFIN)<sup>[24]</sup>。中国科考人员自第 22 次南极考察起, 便开展了中山站固定冰的观测, 包括冰厚的人工观测等。曾发展了磁致位移、电阻式和热电阻丝等 3 种定点冰厚观测技术并应用于南极固定冰观测<sup>[25]</sup>, 并在中国第 22 次南极考察期间使用了低频地球物理电磁感应海冰观测<sup>[26]</sup>, 还曾在 2005–2006 年在中山站附近成功实施了固定冰生消过程观测<sup>[27]</sup>, 以及 2014 年和 2015 年连续的使用基于 SIMBA (Snow and Ice Mass Balance Array) 温度链浮标的固定冰观测<sup>[28]</sup>。中国第 32 次南极考察期间, 在中山站附近固定冰区 3 个站点开展了连续的冰厚观测。在 3 个站点开展人工钻孔冰厚观测的同时, 还分别布置了两种类型共 4 套温度链浮标进行连续观测, 利用温度链浮标获取长时间连续海冰厚度。相比于走航观测、电磁感应、微波遥感等手段, 在中山站附近有限范围内使用温度

链浮标可以保证较高的时间分辨率, 不仅有利于南极固定冰的科学研究, 也对我国南极科考保障具有重要意义。本文利用中国第 32 次南极考察中山站越冬考察期间基于 SIMBA 温度链浮标和太原理工大学温度链浮标 (TY 温度链浮标) 获取的冰厚与人工钻孔观测冰厚进行了比较, 并用于研究固定冰厚度季节变化规律以及固定冰生长热力模型的验证, 这为将来进一步利用温度链浮标数据进行固定冰监测积累了基础数据和参考经验。

## 2 现场观测与仪器介绍

### 2.1 观测现场介绍

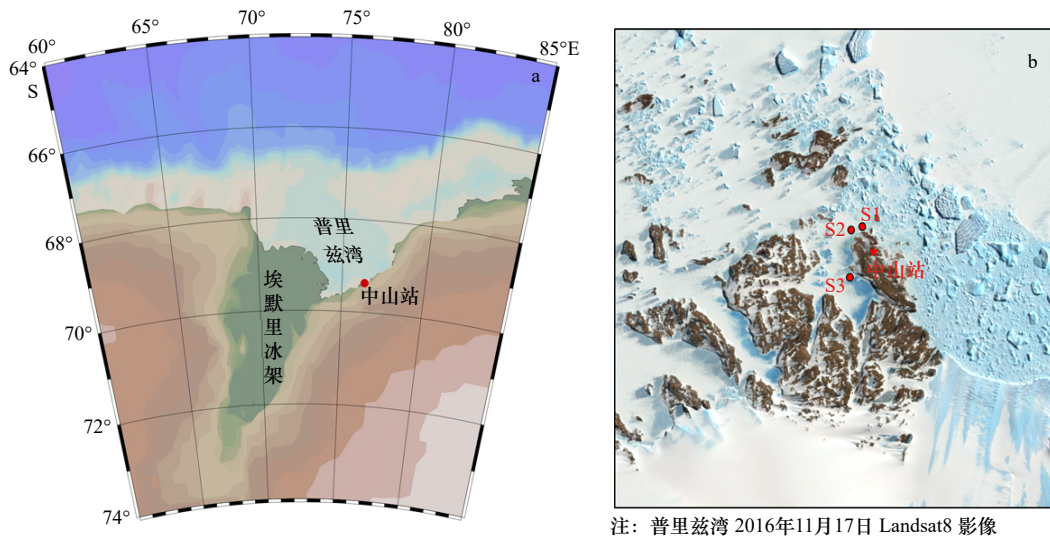
2016 年 4–11 月在中山站附近固定冰上 3 个站点开展了人工冰厚观测和温度链浮标连续观测 (图 1)。其中站点 S1 是中山站传统的固定冰观测位置 (69°22′07.6″S, 76°21′43.8″E), 与站区直线距离约 600 m。站点 S2 位于中山站西北方向的海冰上 (69°22′11.0″S, 76°21′19.2″E), 与站区直线距离约 700 m, 站点 S3 位于内拉峡湾 (69°22′45.3″S, 76°21′26.7″E), 与站区直线距离约 1 km。内拉峡湾由于地形的作用, 夏季海冰破碎, 但是很难融化, 3 月之后又冻结在一起, 主要由多年冰构成, 观测其多年冰的冰厚变化。

在 2016 年的观测中, 3 个站点各布放了 1 套太原理工大学冰情监测课题组研制的温度链浮标 (TY 温度链浮标), 在 S3 站点还布放了 1 套 SIMBA 温度链浮标, 但是由于 S1 站点的 TY 温度链浮标很快出现问题, 因此没有获取长时间的连续观测数据。3 个站点于 2016 年 4 月 22 日开始观测, 一直持续到 11 月 22 日观测结束。

本文所使用的人工观测冰厚数据为打孔观测, 测量精度约  $\pm 0.5$  cm, 根据天气状况每 7 天左右分别在 3 个站点测量。温度链浮标安装前于 4 月 16 日测得的 S1、S2、S3 站点冰厚分别为 70.0 cm、100.0 cm 和 94.0 cm, 雪厚分别为 10.0 cm、10.0 cm 和 3.0 cm。气温数据和风速数据分别来自 S1 站点的自动气象站以及中山站气象台观测的数据 (图 2), 安装时天气状况少云, 平均气温为  $-19.0^{\circ}\text{C}$ , 平均风速为 5.9 m/s, 整个观测期间平均气温  $-16.1^{\circ}\text{C}$ , 最低气温  $-48.1^{\circ}\text{C}$ , 最高气温  $9.7^{\circ}\text{C}$ , 11 月之后气温开始在  $0^{\circ}\text{C}$  以上; 平均风速 5.8 m/s, 最大风速 27.1 m/s。

### 2.2 SIMBA 温度链浮标

SIMBA 温度链浮标是苏格兰海洋学会下属的 SRSL 公司 (<http://www.srsl.com/>) 研发的 温度链浮标, 由两部



注: 普里兹湾 2016 年 11 月 17 日 Landsat8 影像

图 1 中山站固定冰常规站点示意图

Fig. 1 Map of the location of the landfast ice observation site

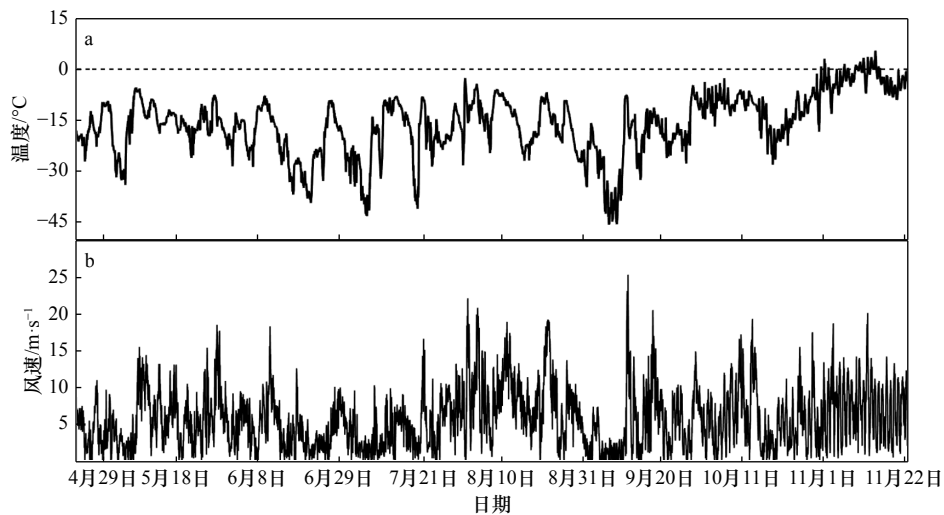


图 2 2016 年 4 月 22 日至 11 月 22 日每小时的海表 (2 m) 气温 (a) 和风速 (b) 时间序列

Fig. 2 Time series of hourly sea surface (2 m) air temperature (a) and wind speed (b) over the period between April 22 and November 11 in 2016

分组成,分别为机箱和温度链。机箱为电源和控制部分,内置 GPS 和铱星模块,通过 GPS 获取经纬度信息,可以得到浮标的轨迹;铱星模块可以将观测数据定期传输回国内。温度链部分垂直布放在海冰内,长 480.0 cm,内置 240 个温度传感器,间距为 2.0 cm,温度传感器分辨率为 0.062 5℃,测量精度为 0.1℃。布放时冰上部分约为 1.0 m,记录从大气到海水的垂直温度剖面,观测时间间隔设为 6 h。

### 2.3 TY 温度链浮标

TY 温度链浮标由太原理工大学冰情监测课题组研制,其由两部分组成,控制单元和温度链,控制单元记录存储温度链测量的值。温度链长度为 300.0 cm,

内置 250 个温度传感器,其分辨率为 0.062 5℃,测量精度为 0.5℃,间距为 1.0 cm。温度链垂直布放在海冰内,记录从大气到海水的垂直温度剖面,观测时间间隔设为 1 h。为了方便比较,本文中选取了每天 4 次和 SIMBA 温度链浮标相同时次的的数据。

### 2.4 算法介绍

图 3 显示了 S3 站点 SIMBA 和 TY 温度链浮标于 2016 年 5 月 1 日观测到的温度剖面示例,4 个时次的空气、海冰和海水温度间具有明显的差别,海冰温度呈现较大梯度,海冰和海水界面具有明显的转折。对于图示所在 4 个时刻, SIMBA 温度链浮标观测的海水温度保持在 -1.7~-1.6℃ 之间,而 TY 温度链浮标

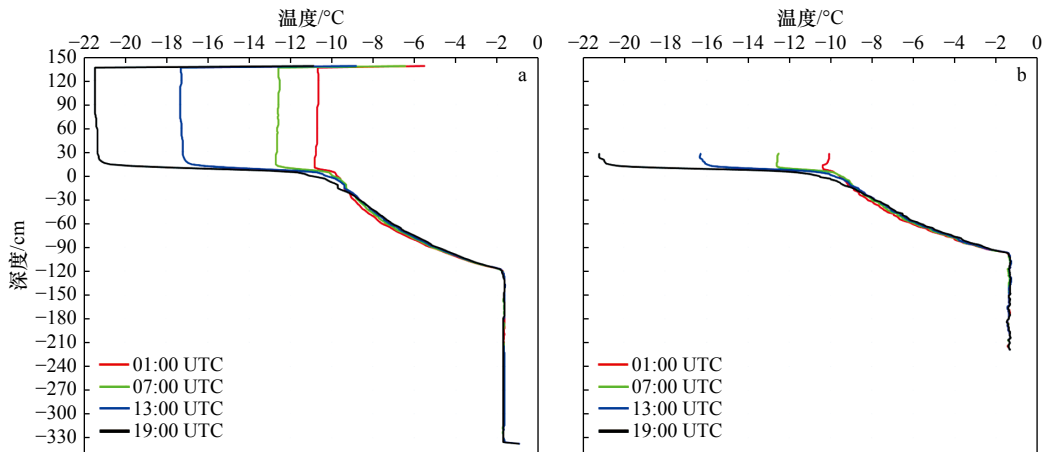


图3 2016年5月1日S3站点SIMBA温度链浮标观测的温度剖面示例(a), 传感器间隔为2.0 cm; TY温度链浮标观测到的温度剖面示例(b), 传感器间隔为1.0 cm

Fig. 3 Four times daily measured temperature profiles at S3 Station on May 1, 2016 from SIMBA buoy with 2.0 cm interval (a) and TY buoy with 1.0 cm interval (b)

横坐标表示传感器观测的温度, 纵坐标表示传感器的深度, 0表示安装时冰面的位置

The X-axis represent the temperature observed by the sensors, the Y-axis represent the depth of the sensors, and the 0 represent the sea initial sea ice surface when setup

观测的海水温度在 $-1.4\sim-1.3^{\circ}\text{C}$ 之间, 海水温度变化很小, 两者的差别是由于温度链的测量精度造成的。结合图3以及安装时的记录可以判断海冰上表面对应传感器分别为75和22, 海冰/海水界面对应传感器为132和128, 其对应的冰厚分别为114.0 cm和106.0 cm。由于布放时间为4–11月, 主要的时间集中在海冰冻结季节, 本文假设海冰上表面不变。对于海冰/海水界面的判断, 首先对温度剖面数据进行质量控制, 利用上述同样的方法绘制每天的温度剖面图, 通过图像可以确定海冰/海水界面的位置均在100.0 cm以下, 结合海水冰点, 选取100.0 cm以下范围内梯度最大且和海水冰点差异最小的位置作为海冰/海水界面, 对于夏季融冰季节, 准确识别的难度加大, 在海冰/海水界面自动识别的基础上, 结合人工经验对比分析确定海冰/海水界面的位置, 通过上表面和海冰/海水界面传感器的编号计算得到海冰厚度。由于积雪界面复杂, 相对误差较大; 而且受到风、地形以及观测设备自身阻挡等的影响较大, 尤其是温度链的冰上部分, 在风的作用下会造成雪的堆积, 造成使用类似计算海冰厚度的方法计算得到的积雪厚度仅能代表此位置的积雪厚度, 不具有代表性, 因此, 本文暂不做讨论。

### 3 观测结果分析

中山站附近的固定冰在12月底到1月份前后会经历一个快速变化的过程, 随着气温升高以及风浪的作用, 1月中旬出现明显的破碎, 2月份海冰基本以浮

冰状态存在, 3月上旬随着气温降低, 海水会重新冻结, 3月底基本冻结, 包括新冻结的当年冰和重新冻结在一起的多年冰, 11月底到12月初开始再次融化, 1月份左右开始破碎, 循环往复。

#### 3.1 S1 站点观测结果

S1 站点共获取31组人工海冰观测数据。由于4月份仪器安装, 观测次数比较少, 5月之后基本每7天观测一次。S1 站点海冰为夏季海冰破碎之后重新冻结而成, 以一年冰为主, 每次钻取冰洞测量冰厚、干舷厚度等数据。其最小冰厚为52.5 cm, 出现在4月29日, 最大冰厚181.5 cm, 出现在10月18日, 平均冰厚126.2 cm(图4)。4月和5月份, 海冰呈现负增长, 可能是由于人工打孔观测位置选取的原因造成的, 6月份海冰增长最快, 11月份海冰厚度基本保持稳定, 说明海冰开始融化。

S1 站点的TY温度链浮标在观测期间共获取了71 d的有效观测数据(图5), 6–9月期间由于温度链的电池故障以及可能的电路故障, 几乎没有正常工作。通过有限的观测数据和人工观测比较, TY温度链浮标在开始阶段计算的冰厚较观测较厚, 平均大于人工观测冰厚27.0 cm, 结束阶段冰厚偏小, 平均小于人工观测9.0 cm, 但是TY温度链计算的平均海冰厚度140.0 cm, 基本接近人工观测的结果126.2 cm, 平均误差和均方根误差分别为3.3 cm和14.7 cm。由于和人工观测对应时间的TY温度链浮标只有12 d的数据以及浮标本身计算冰厚的差异, 因而均方根误差比

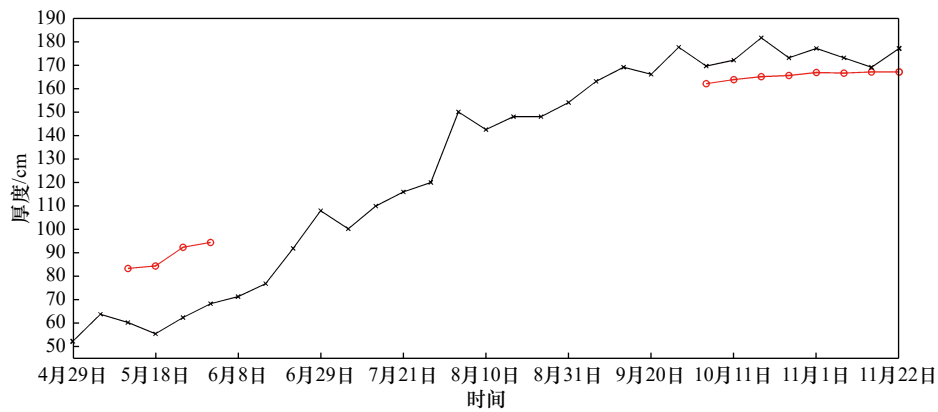


图4 S1 站点人工观测冰厚(黑线)和TY 温度链冰厚(红线)比较

Fig. 4 Comparison of ice thickness between borehole in situ (black line) and TY buoy (red line) on S1 Station

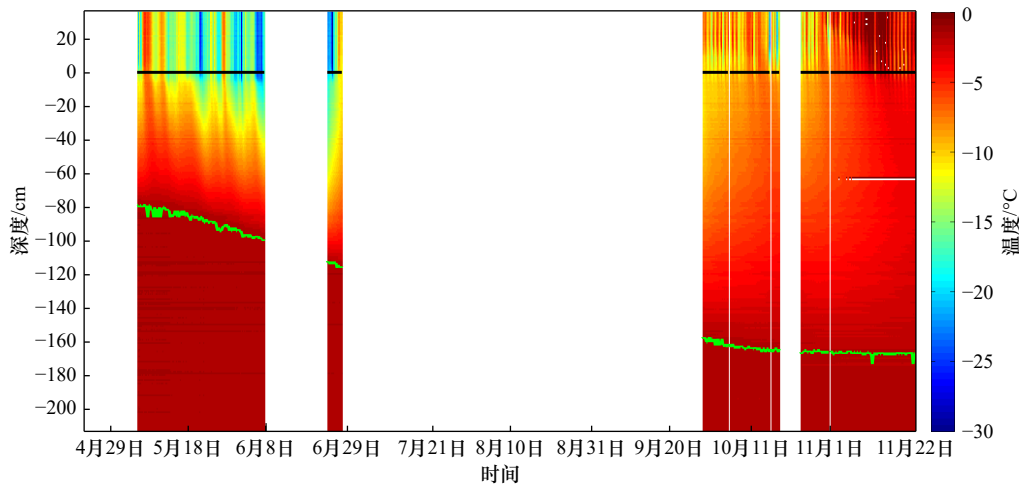


图5 2016 年 S1 站点 TY 温度链浮标观测的自上而下大气-海冰-海洋温度剖面随时间的变化

Fig. 5 Temperature evolution for the surface air-ice-ocean system from the TY buoy observations on S1 Station in 2016

黑线为海冰上表面, 绿线为海冰/海水界面

The black and green lines represent the initial sea ice upper surface and the ice-sea interface, respectively

较大。在 S1 站点, 2014 年和 2015 年观测的初始冰厚分别为 47.0 cm 和 39.0 cm, 分别在 4 月 25 和 29 日, 接近 2016 年的观测时间; 最大冰厚分别为 160.0 cm 和 144.0 cm; 平均冰厚分别为 121.0 cm 和 94.0 cm, 海冰厚度有明显的年际变化, 这可能与观测时选择的海冰状况有关, 同时海冰生长率以及最大冰厚还受表面积雪的影响<sup>[27]</sup>。

### 3.2 S2 站点观测结果

S2 站点共获取了 31 组人工海冰观测数据, 最小和最大冰厚为 98.0 cm 和 172.0 cm, 分别出现在 6 月 1 日和 10 月 25 日, 平均冰厚为 133.9 cm(图 6), 5 月份海冰开始增长, 到 11 月海冰开始融化。S2 站点安装的 TY 温度链浮标共获取了 215 d 的观测数据(图 7), 海冰/海水界面的深度随着时间明显增加(图 7), 冬季大气最低温度低至  $-48.1^{\circ}\text{C}$ , 海冰表面温度低至

$-29^{\circ}\text{C}$ , 海冰内部温度梯度明显。海冰上部分温度受到气温的影响, 温度较低, 海冰内部温度差异大, 6 月至 7 月下旬冰内温度差异最大, 平均温差  $12.6^{\circ}\text{C}$ , 6 月 22 日冰内最大温差  $27.6^{\circ}\text{C}$ ; 随着气温的升高, 海冰内部温度差异变小, 7 月下旬至 8 月中旬海冰内部温度差异减小, 平均温差  $8.2^{\circ}\text{C}$ , 10 月底开始保持稳定, 平均温差  $5.2^{\circ}\text{C}$ 。10 月下旬随着气温的升高, 在 10 月 30 日升至  $0^{\circ}\text{C}$  以上, 海冰表面融化显著, 11 月份之后, 海冰表面温度升高, 11 月中旬之后海冰内部处于恒温状态, 平均温差  $4.0^{\circ}\text{C}$ 。

为了检验 TY 温度链浮标的结果, 本文选取了和人工观测相同日期的数据进行了比较(图 6), TY 温度链浮标计算冰厚略大于人工观测冰厚, 与人工观测冰厚变化趋势保持一致。11 月人工观测冰厚保持基本不变, TY 温度链浮标计算的冰厚也体现了相同的

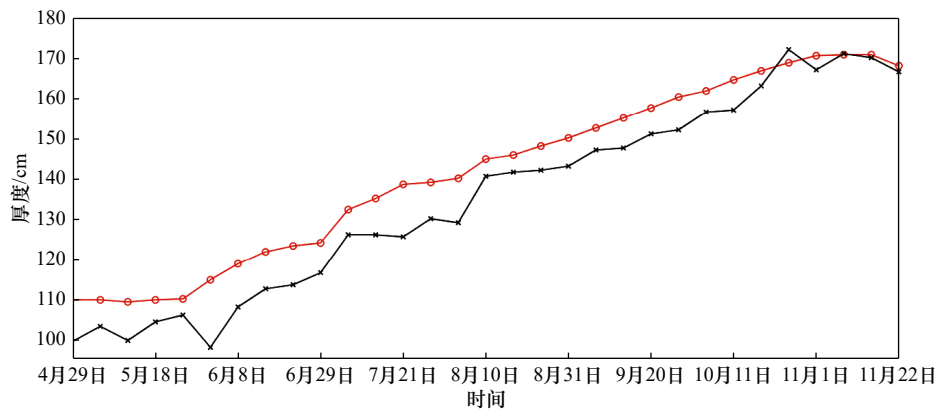


图6 S2 站点人工观测冰厚(黑)和TY 温度链冰厚(红)比较

Fig. 6 Comparison of ice thickness between borehole in situ (black line) and TY buoy (red line) on S2 Station

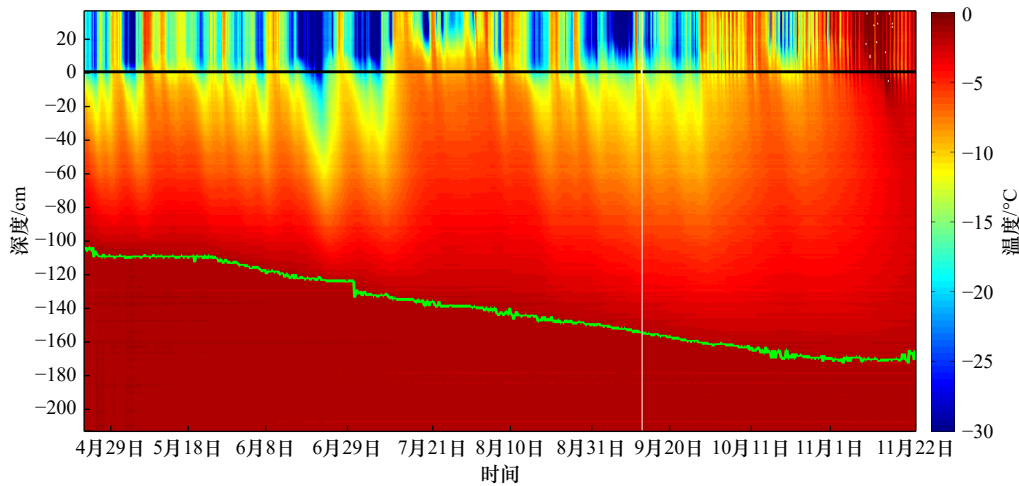


图7 2016年S2 站点TY 温度链浮标观测的自上而下大气-海冰-海洋温度剖面随时间的变化

Fig. 7 Temperature evolution for the surface air-ice-ocean system from the TY buoy observations on S2 Station in 2016

黑线为海冰上表面, 绿线为海冰/海水界面

The black and green lines represent the initial sea ice upper surface and the ice-sea interface, respectively

特征。TY 温度链浮标计算冰厚和人工观测冰厚比较的平均误差和均方根误差分别为 6.6 cm 和 6.9 cm。由于 11 月之后气温上升(图 2a), 海冰上表面出现融化, 海冰上表面会发生一定变化, 同时由于冰底温度和海水温度的差异减小, 因而会加大 TY 温度链浮标计算冰厚的误差。

### 3.3 S3 站点观测结果

S3 站点位于内拉峡湾口, 在此处分别安装了 SIMBA 温度链浮标和 TY 温度链浮标。在观测期间人工测得的最小和最大冰厚分别为 94.0 cm 和 181.5 cm, 分别出现在 4 月 16 日和 11 月 1 日, 平均冰厚 141.6 cm (图 8)。从 4 月份观测开始, 海冰一直保持增长, 6 月份海冰增长达到最大, 11 月份出现负增长。TY 温度链浮标共获取了 215 d 的观测数据, SIMBA 温度链浮标在 9 月 15 日至 10 月 20 日期间不能正常工作, 共观

测到 179 d 的数据。随着气温的降低, 海冰/海水界面的深度随着时间明显增加(图 9, 图 10), 海冰内部温度梯度也随之加大, 6 月至 7 月下旬 SIMBA 和 TY 温度链浮标观测的平均温差分别为 9.8°C 和 14.4°C。7 月下旬至 8 月中旬, 随着气温的升高(图 2a), 海冰内部温度梯度减少, SIMBA 和 TY 温度链浮标观测平均温差分别为 5.4°C 和 9.4°C, 内部变化差异减小, TY 温度链浮标和 SIMBA 温度链浮标数据显示相同的变化, 而且 S2 站的观测也显示的相同的变化, 在 11 月之后, 海冰内部温度趋于恒温, 分别为 3.5°C 和 5.0°C。

SIMBA 温度链浮标由于其便携性、观测的持续性以及数据及时有效的回传, 在极地海冰的监测中广泛使用<sup>[29]</sup>, 此次 TY 温度链浮标是首次应用在极地。本文选取了温度链最上层 10.0 cm, 整个冰层以及冰

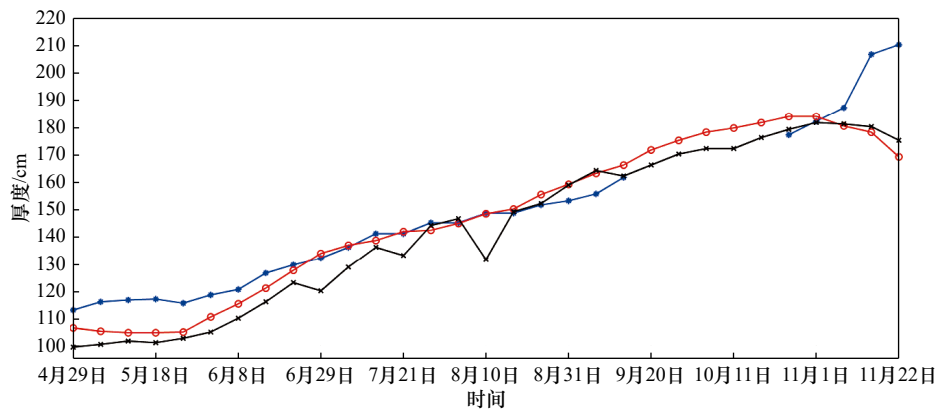


图 8 S3 站点人工观测冰厚(黑线)和 TY 温度链冰厚(红线)以及 SIMBA 温度链冰厚(蓝线)比较

Fig. 8 Comparison of ice thickness by borehole in situ (black line), SIMBA buoy (blue line) and TY buoy (red line) on S3 Station

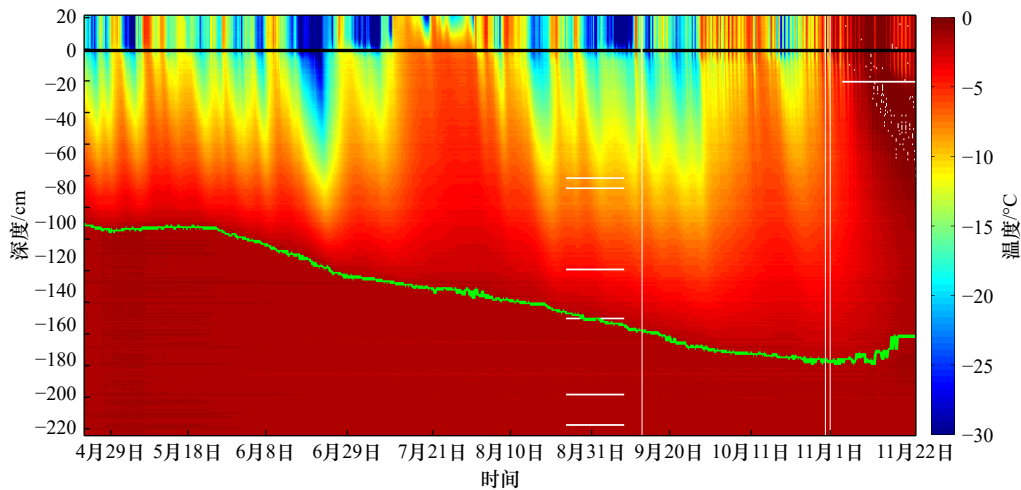


图 9 2016 年 S3 站点 TY 温度链浮标观测的自上而下大气-海冰-海洋温度剖面随时间的变化

Fig. 9 Temperature evolution for the surface air-ice-ocean system from the TY buoy observations on S3 Station in 2016

黑线为海冰上表面, 绿线为海冰/海水界面

The black and green lines represent the initial sea ice upper surface and the ice-sea interface, respectively

层底部以下 10.0 cm 传感器测得温度的平均值作为空气, 海冰和海水温度, 对 SIMBA 与 TY 温度链浮标测得的观测数据进行了比较(图 11)。在空气、海冰和海水中的 TY 温度链浮标和 SIMBA 温度链浮标的平均和均方根差异分别为  $0.4^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.8^{\circ}\text{C}$ ,  $0.3^{\circ}\text{C}$ ;  $2.0^{\circ}\text{C}$ ,  $1.5^{\circ}\text{C}$ ,  $0.3^{\circ}\text{C}$ 。在空气和海水中的 TY 温度链浮标的平均温度大于 SIMBA 温度链浮标的温度, 在海水中两者的差异最小, 在海冰中 TY 温度链浮标温度小于 SIMBA 温度链浮标的温度。与 S1 站点自动气象站观测的气温相比较, TY 温度链和 SIMBA 温度链浮标的平均误差分别为  $3.8^{\circ}\text{C}$  和  $3.3^{\circ}\text{C}$ , 均方根误差分别为  $4.7^{\circ}\text{C}$  和  $3.8^{\circ}\text{C}$ 。

两种温度链浮标计算的冰厚和人工观测冰厚变化一致(图 8), 在 11 月, TY 温度链浮标冰厚反映出了与观测一致的变化, 海冰厚度略有减小; 而 SIMBA

温度链浮标误差较大, 主要是由于其温度传感器间隔为 2.0 cm, 海冰融化造成了海水/海冰界面难以准确识别, 以及算法依靠温度梯度判断海冰/海水界面, 造成了海冰/海水界面识别的误差, 因而造成了更大的冰厚误差。SIMBA 温度链浮标计算的海冰厚度同人工观测的海冰厚度数据相比较, 平均误差和均方根误差分别为 8.2 cm 和 9.7 cm, TY 温度链浮标的平均误差和均方根误差分别为 4.0 cm 和 4.8 cm。TY 温度链浮标测得冰厚在 S2 站点和 S3 站点分别同人工观测的误差接近, 其测得冰厚更加接近人工观测的结果。

#### 4 站点数据比较

在观测开始阶段, S1 站点海冰最薄, S2 和 S3 站点海冰厚度接近(图 12), 受极夜期间持续低温的影响, S1 站点在 7 月底海冰厚度增长明显, 从最初的

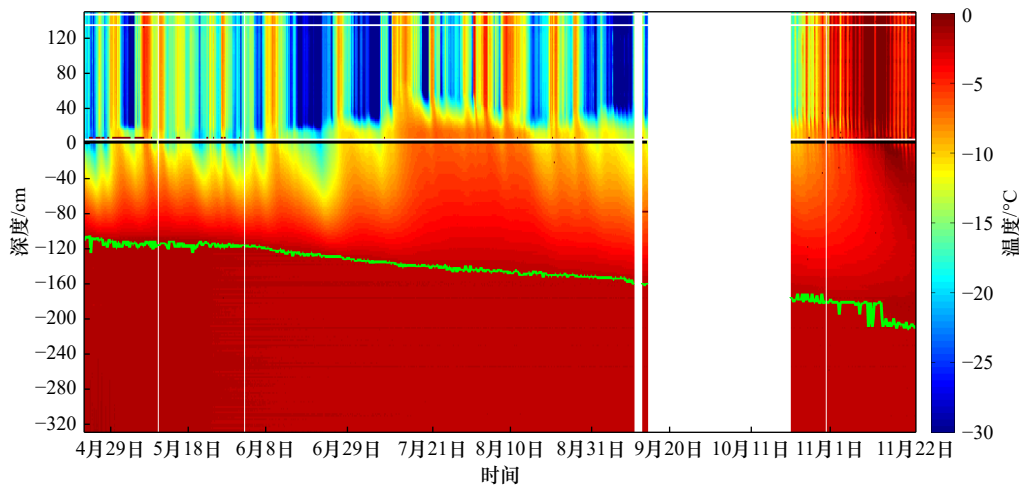


图 10 2016 年 S3 站点 SIMBA 温度链浮标观测的自上而下大气-海冰-海洋温度剖面随时间的变化

Fig. 10 Temperature evolution for the surface air-ice-ocean system from the SIMBA buoy observations on S3 Station in 2016

黑线为海冰上表面, 绿线为海冰/海水界面

The black and green lines represent the initial sea ice upper surface and the ice-sea interface, respectively

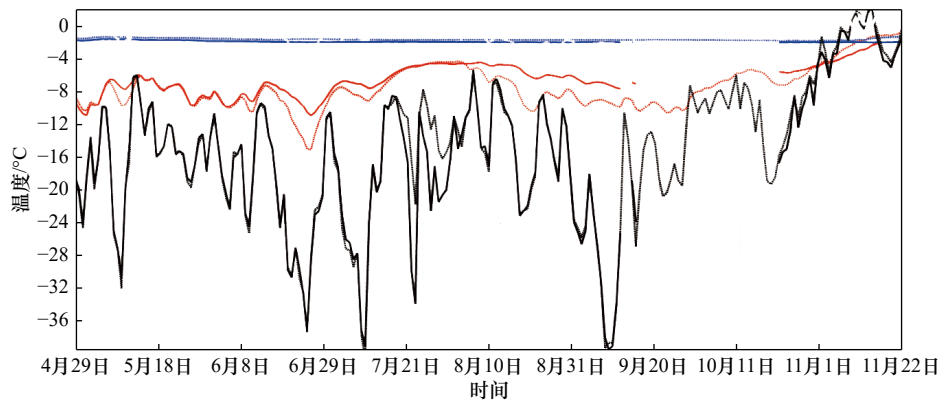


图 11 S3 站点 TY 温度链浮标(虚线)与 SIMBA 温度链浮标(实线)在空气(黑线)、海冰(红线)和海水(蓝线)中测得的温度比较

Fig. 11 Comparison between temperature observations detected by TY buoy (dashed line) and SIMBA buoy (solid line) for air (black line), sea ice (red line) and sea water (blue line)

52.5 cm 增长至 8 月 2 日的 150.0 cm, 9 月下旬之后, 3 个站点的冰厚基本保持一致。在 10 月下旬之后, 由于升温导致海冰和海水温度的差异变小, 海冰/海水界面的判断误差增加, 导致温度链浮标计算的冰厚误差增加。3 个站点人工观测最大和最小冰厚分别为 181.5 cm 和 52.5 cm, 平均冰厚 135.4 cm, 温度链浮标计算最大和最小冰厚分别为 210.0 cm 和 79.0 cm, 平均冰厚 141.1 cm。最大冰厚和最小冰厚同人工观测差别较大, 主要是由于人工冰观测冰厚最小值出现在 S1 站点, 而此时 TY 温度链未能正常工作, 冰厚最大值的差异则主要是由于融化季使用温度链计算海冰厚度不准造成的。但是人工观测冰厚和温度链计算冰厚平均值非常接近, 能够反映整体的固定冰状况, 适合用于中山站附近固定冰的连续监测。

固定冰的增长主要受到热力因素的影响, 分别对 S2 和 S3 站点 TY 温度链浮标测得冰厚(由于 S1 站点时间序列很短)和 S1 站点自动气象站的气温做相关性分析, 其相关系数分别为 0.33 和 0.30, 但是同负积温做相关性分析, 其相关系数均为 -0.99, 此处负积温为温度链浮标观测同时刻的气温值进行累加, 可见持续的低温环境是固定冰增长的最主要因素。整个观测期间 S2 站点海冰平均生长率为 0.3 cm/d, S3 站点 TY 温度链浮标和 SIMBA 温度链浮标浮标得到的海冰生长率分别为 0.3 cm/d 和 0.5 cm/d。周平均海冰生长率(图 13)显示 S2 和 S3 站点海冰在 6 月和 9 月增长较快, 这主要是受到气温变化的持续影响(图 2a), 6 月份为极夜, 持续低温, 9 月份受到天气过程的影响, 出明显的大风降温天气。每小时平均的冰内温度

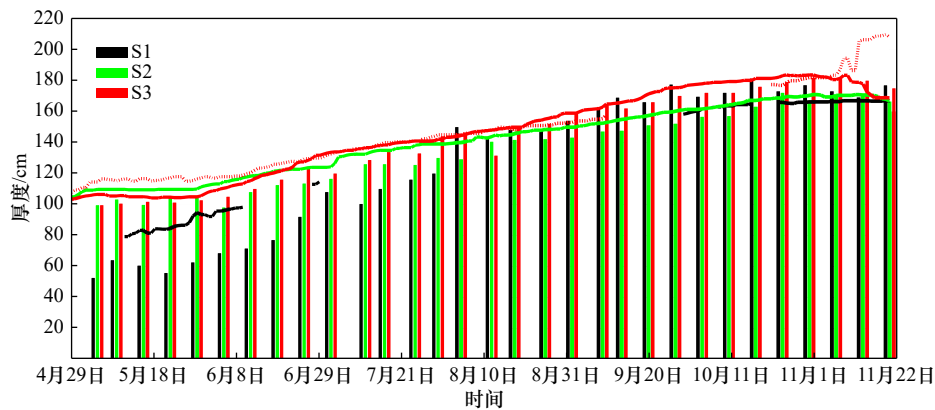


图 12 固定冰 3 个站点人工冰厚(柱状)和逐日温度链浮标冰厚观测结果(线)

Fig. 12 Observation results of ice thickness by borehole in situ (bar) and TY (SIMBA) buoys (line) on S1, S2 and S3 stations

黑色为 S1 站点, 绿色为 S2 站点, 红色为 S3 站点; 黑线为 S1 站点 TY 温度链浮标冰厚, 绿线为 S2 站点 TY 温度链浮标冰厚, 红实线为 S3 站 TY 温度链浮标冰厚, 红点线为 SIMBA 温度链浮标冰厚

The black, green, red bars represent S1, S2 and S3 stations, respectively. The green and black lines are ice thickness detected by TY buoys on S2 and S1 stations. The red solid (dotted) line represent the sea ice thickness detected by TY (SIMBA) buoys on S3 Station

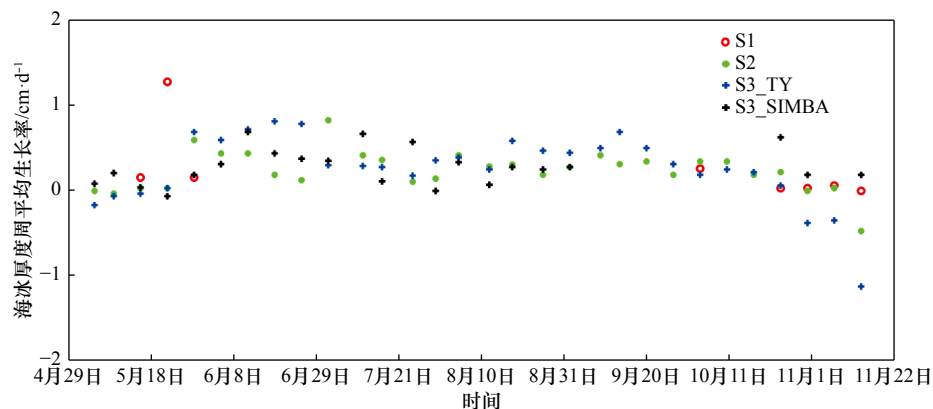


图 13 温度链浮标计算的站点(S1, S2, S3)海冰厚度周平均增长率

Fig. 13 The weekly sea ice thickness growth rate for S1, S2 and S3 stations using the buoy data

显示出明显的日变化(图 14), 而且两个站点的变化趋势基本一致。冰内温度受气温变化的影响, 但是滞后于气温的变化, 9 月 4–19 日期间经历了明显的大风降温过程(图 2), 但是冰内低温(图 14)持续到 27 日, 而且变化的幅度有明显的差异, 这可能是 2 个站点上层积雪厚度的差异造成的。在整个观测阶段, S3 站点的冰内平均温度都小于 S2 站点的冰内平均温度, 但是在 11 月融化明显开始之后, S3 站点冰内的平均温度超过了 S2 站点。

## 5 Stefan 定律海冰生长模型

目前, 数值模型仍是理解海冰热力学过程和应对现场观测数据缺乏的有效手段, 尤其是对于海冰厚度而言。利用简单的海冰热力学生长模型, 结合实测数据, 对模型进行验证, 并且结合模型分析认知目前观

测的不足, 两者相互结合, 以期在未来能够获取更好的观测数据, 改进海冰热力学生长模型。经典的 Stefan 定律假设海冰温度剖面是线性的, 海冰生长模型包含最简单的能量平衡过程<sup>[30]</sup>。本文使用简单的不考虑积雪厚度的 Stefan 定律海冰生长模型<sup>[30]</sup>以及 Leppäranta<sup>[31]</sup>修改后的考虑积雪的海冰生长模型(见附录), 假设海冰生长只受到冰表面温度的影响, 进行海冰生长试验, 并和本文观测数据进行比较。

图 15 显示了以 4 月 16 日(第一次人工钻孔观测)作为  $t=0$  时刻, 人工观测冰厚作为  $H_0$  (100.0 cm 和 94.0 cm), 分别使用不考虑雪厚和使用平均雪厚计算的海冰厚度, 考虑到观测数据的连续性, 选取了 TY 温度链浮标计算的海冰厚度进行比较, 雪厚  $H_s$  分别使用 S2 和 S3 站点人工观测雪厚的平均值(17.3 cm 和 6.8 cm)作为输入值。模拟的结果表明, 不考虑积雪效应的 Stefan

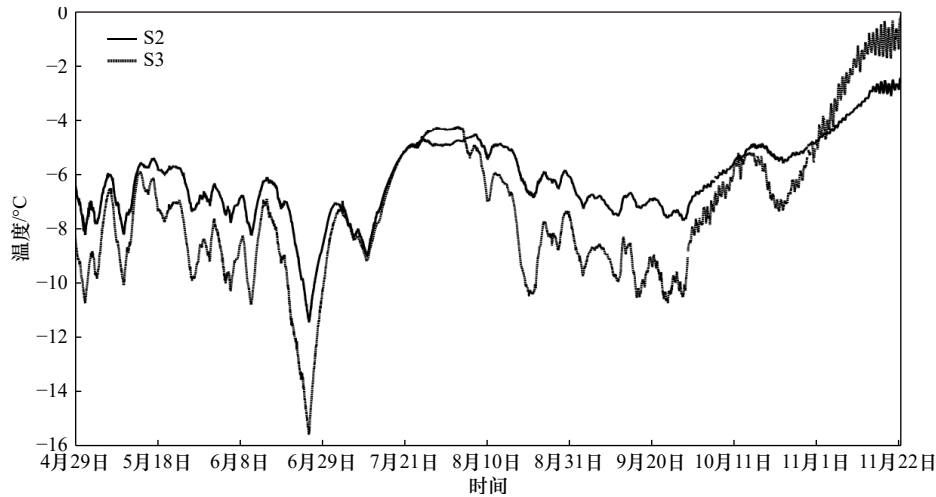


图 14 TY 温度链浮标观测的 S2 和 S3 站点每小时冰内平均温度

Fig. 14 The hourly averaged temperature observations detected by TY buoy on S2 and S3 stations

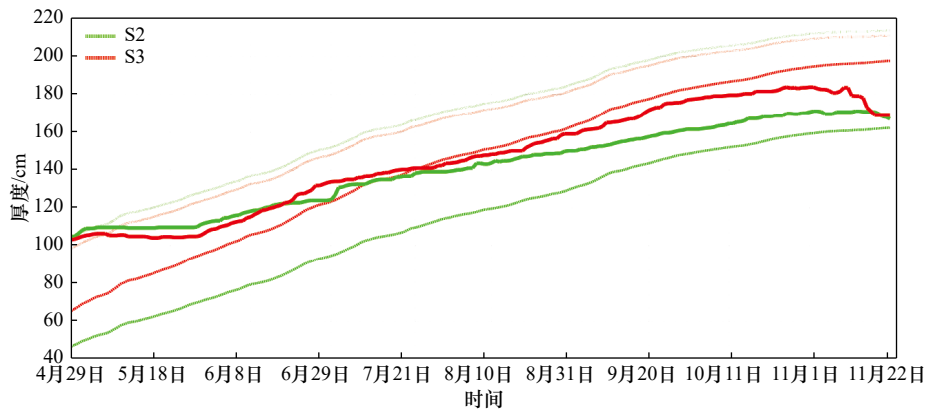


图 15 固定冰 2 个站点 (S2 和 S3) 根据 Stefan 定律模拟冰厚 (点线和虚线) 以及 TY 温度链浮标计算的冰厚 (实线)

Fig. 15 Comparison of ice thickness detected by TY buoys (solid line) and Stefan's law (dotted line and dashed line) simulated on S2 station (green) and S3 station (red)

点线为不考虑积雪厚度, 虚线为假定积雪厚度为常数, 实线是 TY 温度链浮标计算的海冰厚度

The dotted line points to the case excluding the effects of snow cover over the ice surface and the dashed line refers to the one including snow effects. The solid line is the ice thickness detected by TY buoys

模型计算的海冰厚度生长过快, 而不同的积雪厚度对海冰的增长影响显著, 因为海冰增长受积雪堆积速率影响<sup>[32]</sup>。在 6 月份之前, TY 温度链浮标海冰厚度增长缓慢, 但是 Stefan 模型计算的海冰厚度均大于 TY 温度链浮标的海冰厚度。不考虑积雪效应时, Stefan 模型计算的海冰厚度比 TY 温度链浮标结果平均厚 29.0 cm 和 20.0 cm; 而考虑积雪厚度的 Stefan 模型计算的海冰厚度小于 TY 温度链的结果, 平均小于 34.0 cm 和 10.0 cm。11 月 12 日之后, S3 站点 TY 温度链浮标计算的冰厚开始减少, 但是 Stefan 模型计算冰厚保持增长趋势。TY 温度链浮标计算的平均海冰生长率在 S2 和 S3 站点均为 0.3 cm/d, 而根据 Stefan 模型计算得到的平均海冰生长率均为 0.5 cm/d, 当考虑

积雪时, 分别为 0.5 cm/d 和 0.6 cm/d。

根据第 4 节 S2 和 S3 站点海冰内部温差的变化划分为 6 个阶段, 6 月之前 (4 月 22 日至 5 月 31 日), 6 月至 7 月下旬 (6 月 1 日至 7 月 25 日), 7 月下旬至 8 月中旬 (7 月 26 日至 8 月 15 日), 8 月中旬至 10 月中旬 (8 月 16 日至 10 月 20 日), 10 月中旬至 11 月中旬 (10 月 21 日至 11 月 15 日), 11 月中旬至观测结束 (11 月 16–22 日), 并分别计算了 6 个阶段的海冰生长率 (表 1)。Stefan 模型海冰生长率在不同阶段均大于 TY 温度链浮标结果; 当考虑积雪厚度时, S3 站点的海冰生长曲线更接近于 TY 温度链浮标的结果, 因为积雪厚度会影响 Stefan 模型计算海冰厚度生长率和最大值<sup>[27]</sup>。在前两个阶段, Stefan 模型计算的海冰

表 1 海冰厚度生长率比较  
Tab. 1 The sea ice thickness growth rate

时间	海冰厚度生长率/cm·d <sup>-1</sup>					
	S2			S3		
	TY	Stefan	Stefan(有雪)	TY	Stefan	Stefan(有雪)
4月22日至5月31日	0.2	0.7	0.7	0.2	0.7	0.8
6月1日至7月25日	0.4	0.7	0.7	0.6	0.7	0.8
7月26日至8月15日	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
8月16日至10月20日	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
10月21日至11月15日	0.1	0.2	0.2	-0.1	0.2	0.2
11月16日至11月22日	-0.5	0.1	0.1	-0.6	0.1	0.1

生长率均在 0.7~0.8 cm/d, 而 TY 温度链浮标计算的海冰生长率均不超过 0.6 cm/d, 在第三和第四阶段, Stefan 模型计算的海冰生长率和 TY 温度链浮标计算的海冰生长率比较一致, 在最后两个阶段, TY 温度链浮标计算的海冰生长率出现了负增长, 但是 Stefan 模型计算的海冰保持生长, 两者差异较大。Stefan 模型可以模拟出第二阶段的海冰快速增长, 但是相比于 TY 温度链浮标计算的结果偏大。Stefan 海冰生长模型忽略了海洋热通量, 假设海冰温度剖面是线性, 而从温度链浮标的观测发现, 其温度剖面并非完全线性变化。而且目前缺少有效的积雪观测, 本文使用积雪厚度为常数, 都给海冰厚度的模拟计算带来了误差。当前模式使用的冰内温度参数化方案依然存在很多问题, 因而需要加强观测, 获取更多的实测数据, 进一步改进模拟结果。

## 6 结论与讨论

本文介绍了 2016 年中国第 32 次南极考察中山站越冬期间 SIMBA 和 TY 两种温度链浮标在中山站附近固定冰的观测, 两种浮标都具有在环境恶劣的野外, 尤其是极区海冰长期观测的优点。SIMBA 温度链浮标于 2014 年开始应用于中国北极考察, Tian 等<sup>[29]</sup>通过浮标温度数据计算海冰厚度, 并与热力模式输出冰厚结果做了比较。

本文依据海冰/海水之间不同介质的热力学特性, 通过温度链浮标观测的温度数据计算得到了海冰厚度数据, 在极区获得了长时间的大气-积雪-海冰-海水温度剖面数据。TY 温度链浮标和 SIMBA 温度链浮标浮标在空气、海冰和海水中的平均和均方根差异分别为 0.4℃, -0.8℃, 0.3℃; 2.0℃, 1.5℃, 0.3℃,

2 种温度链在海水中差异最小。通过与人工钻孔观测的海冰厚度数据相比较, 两种温度链浮标在 3 个站点计算得到的冰厚均大于人工观测冰厚, S1 站点布放的 TY 温度链浮标计算的海冰厚度数据误差最大, 平均误差和均方根误差分别为 3.3 cm 和 14.7 cm, S2 站点和 S3 站点的 TY 温度链浮标和人工观测冰厚数据的误差接近, 平均误差和均方根误差分别为 6.6 cm、6.9 cm 以及 4.0 cm、4.8 cm。S3 站点布放的 SIMBA 温度链浮标和人工观测冰厚的平均误差和均方根误差为 8.2 cm 和 9.7 cm, S3 站点 TY 温度链浮标计算的海冰厚度更接近人工观测的结果。与以往在南极的观测比较<sup>[23, 28, 33]</sup>, 温度链浮标的冰厚结果与人工观测的误差非常接近, 尤其是 TY 温度链浮标, 表明了温度链浮标及本文自动识别算法的可靠性和对于海冰厚度长期监测的可行性。

综合来看, 8 月中旬开始, S1 站点和 S3 站点海冰厚度接近, S2 站点海冰厚度增长比较缓慢, 略小于另两个站点的厚度。S2 站点海冰平均生长率为 0.3 cm/d, S3 站点 TY 温度链浮标和 SIMBA 温度链浮标得到的海冰生长率分别为 0.3 cm/d 和 0.5 cm/d。Lei 等<sup>[23]</sup>通过热力模式, 得到的海冰生长率为 0~1.7 cm/d, 本文通过 Stefan 定律海冰生长模型计算得到的海冰生长率为 0.1~0.8 cm/d。但是 Stefan 定律海冰生长模型计算的生长率过快, 当考虑积雪效应时, Stefan 模型计算的海冰厚度更接近 TY 温度链浮标的结果。Stefan 定律海冰生长模型计算的海冰厚度可以反映海冰的基本变化以及海冰的快速生长阶段, 但是其没有考虑冰内温度的非线性变化以及受积雪厚度影响明显, 目前和观测结果差别比较大, 有待进一步改进。

温度链浮标计算冰厚通过和人工观测冰厚的比

较,能够反映出固定冰的变化过程以及整体的分布状况,考虑到现场观测本身误差以及人工观测不能和温度链浮标布放位置完全重合的影响,因此认为两种浮标均可以准确反映海冰厚度的变化,对于中山站海冰的长期监测均有应用价值。虽然温度链浮标计算海冰厚度和人工观测结果存在误差, SIMBA 温度链浮标计算的海冰厚度均方根误差较大,为 9.7 cm;但是将温度链浮标用于中山站海冰厚度监测,服务于中国南极考察及冰上货物运输对海冰厚度监测的要求,此

误差是可以接受的。但是目前温度链浮标主要布放在中山站站区周围,其数据观测范围及其代表性有限,未来应该进一步扩大布放的区域以及数量。相比于 SIMBA 温度链浮标, TY 温度链浮标传感器密度高,但是传感器精度还有待提高,而且 TY 温度链浮标目前还不能将数据实时回传,未来有待进一步改进。

**致谢:** 感谢中国第 32 次南极考察队中山站越冬队对海冰观测工作的支持。

#### 参考文献:

- [1] Serreze M C, Maslanik J A, Scambos T A, et al. A record minimum Arctic sea ice extent and area in 2002[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(3): 1110.
- [2] Liu Jiping, Curry J A, Hu Yongyun. Recent Arctic sea ice variability: connections to the Arctic oscillation and the ENSO[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(9): L09211.
- [3] Massom R A, Stammerjohn S E. Antarctic sea ice change and variability – Physical and ecological implications[J]. *Polar Science*, 2010, 4(2): 149–186.
- [4] Perovich D K, Grenfell T C, Richter-Menge J A, et al. Thin and thinner: sea ice mass balance measurements during SHEBA[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C3): SHE 26.
- [5] Maslanik J, Stroeve J, Fowler C, et al. Distribution and trends in Arctic sea ice age through spring 2011[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(13): L13502.
- [6] Holland M M, Stroeve J. Changing seasonal sea ice predictor relationships in a changing Arctic climate[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(18): L18501.
- [7] Comiso J C. Large decadal decline of the Arctic multiyear ice cover[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(4): 1176–1193.
- [8] Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(1): L01703.
- [9] Comiso J C, Hall D K. Climate trends in the Arctic as observed from space[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2014, 5(3): 389–409.
- [10] Cavalieri D J, Parkinson C L, Vinnikov K Y. 30-Year satellite record reveals contrasting Arctic and Antarctic decadal sea ice variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(18): 1970.
- [11] Liu Jiping, Curry J A, Martinson D G. Interpretation of recent Antarctic sea ice variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(2): L02205.
- [12] Stammerjohn S E, Martinson D G, Smith R C, et al. Trends in Antarctic annual sea ice retreat and advance and their relation to El Niño–Southern Oscillation and southern annular mode variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C3): C03S90.
- [13] Parkinson C L, Cavalieri D J. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2010[J]. *The Cryosphere Discussions*, 2012, 6(2): 931–956.
- [14] Holland P R. The seasonality of Antarctic sea ice trends[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(12): 4230–4237.
- [15] Massom R A, Eicken H, Hass C, et al. Snow on Antarctic sea ice[J]. *Reviews of Geophysics*, 2001, 39(3): 413–445.
- [16] Cavalieri D J, Parkinson C L. Antarctic sea ice variability and trends, 1979–2006[J]. *Journal of Geophysical Research: Ocean*, 2008, 113(C7): C07004.
- [17] Holland P R, Bruneau N, Enright C, et al. Modeled trends in Antarctic sea ice thickness[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(10): 3784–3801.
- [18] Kurtz N T, Markus T. Satellite observations of Antarctic sea ice thickness and volume[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C8): C08025.
- [19] Allison I, Brandt 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.
- [20] Worby A P, Geiger C A, Paget M J, et al. Thickness distribution of Antarctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C5): C05S92.
- [21] Reid J E, Worby A P, Vrbancich J, et al. Shipborne electromagnetic measurements of Antarctic sea-ice thickness[J]. *Geophysics*, 2003, 68(5): 1537–1546.
- [22] Fedotov V I, Cherepanov N V, Tyshko K P. Some features of the growth, structure and metamorphism of east Antarctic Landfast sea ice[M]//Jeffries M O. *Antarctic Sea: Ice Physical Processes, Interactions and Variability*. Washington, DC: American Geophysical Union, 1998: 343–354.
- [23] Lei Ruibo, Li Zhijun, Cheng Bin, et al. Annual cycle of landfast sea ice in Prydz Bay, east Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Re-*

- search: Oceans, 2010, 115(C2): C02006.
- [24] Heil P, Gerland S, Granskog M A. An Antarctic monitoring initiative for fast ice and comparison with the Arctic[J]. *The Cryosphere Discuss*, 2011, 5(5): 2437–2463.
- [25] 雷瑞波, 李志军, 秦建敏, 等. 定点冰厚观测新技术研究[J]. *水科学进展*, 2009, 20(2): 287–292.  
Lei Ruibo, Li Zhijun, Qin Jianmin, et al. Investigation of new technologies for in-situ ice thickness observation[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(2): 287–292.
- [26] 郭井学, 孙波, 田钢, 等. 南极普里兹湾海冰厚度的电磁感应探测方法研究[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 596–602.  
Guo Jingxue, Sun Bo, Tian Gang, et al. Research on electromagnetic inductive measurement of sea-ice thickness in Antarctic Prydz Bay[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(2): 596–602.
- [27] 雷瑞波, 李志军, 窦银科, 等. 南极中山站附近固定冰生消过程观测[J]. *水科学进展*, 2010, 21(5): 708–712.  
Lei Ruibo, Li Zhijun, Dou Yinke, et al. Observations of the growth and decay processes of fast ice around Zhongshan Station in Antarctica[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(5): 708–712.
- [28] 赵杰臣, 杨清华, 程斌, 等. 基于温度链浮标获取南极普里兹湾积雪和固定冰厚度的研究[J]. *海洋学报*, 2017, 39(11): 115–127.  
Zhao Jiechen, Yang Qinghua, Cheng Bin, et al. Snow and land-fast sea ice thickness derived from thermistor chain buoy in the Prydz Bay, Antarctica[J]. *Haiyang Xuebao*, 2017, 39(11): 115–127.
- [29] Tian Zhongxiang, Cheng Bin, Zhao Jiechen, et al. Observed and modelled snow and ice thickness in the Arctic Ocean with CHINARE buoy data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 36(8): 66–75.
- [30] Stefan J. Ueber die theorie der eisbildung, insbesondere über die eisbildung im polarmeere[J]. *Annalen Der Physik*, 1891, 278(2): 269–286.
- [31] Leppäranta M. Freezing of Lakes and the Evolution of Their Ice Cover[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [32] Maksym T, Markus T. Antarctic sea ice thickness and snow-to-ice conversion from atmospheric reanalysis and passive microwave snow depth[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C2): C02S12.
- [33] Tang Shulin, Kang Jiancheng, Zhou Shangzhe, et al. Sea ice characteristics between the middle Weddell Sea and the Prydz Bay, Antarctica during the austral summer of 2003[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(2): 9–15.

## 附录: Stefan 定律海冰生长模型

经典的 Stefan 定律<sup>[30]</sup>假设海冰温度剖面变化线性变化, 忽略海洋热通量, 海冰表面没有积雪覆盖或者薄雪覆盖。不考虑海冰表面积雪时, 海冰的生长方程可以表达为

$$\frac{dH}{dt} = \frac{k_{si}}{H\rho_{si}L_f}(T_f - T_s), \quad (A1)$$

式中,  $k_{si}$  为海冰的热传导系数, 取  $2.1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ ;  $\rho_{si}$  为海冰体积密度, 取  $920 \text{ kg}/\text{m}^3$ ;  $L_f$  为海冰冻结潜热, 取  $335.9 \text{ kJ}/\text{kg}$ ;  $T_s$  为海冰表面温度;  $T_f$  为海冰冰点; 可以得到海冰厚度的解析解

$$H = \sqrt{H_0^2 + \alpha^2 D}, \quad (A2)$$

式中,  $\alpha = \sqrt{2k_{si}/\rho_{si}L_f}$ ,  $D = \int_0^t (T_f - T_s)dt$ ,  $D$  表示结冰温度

日数, 时间间隔为 1 d, 单位为:  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{d}$ 。

如果考虑边界层对空气温度和海冰表面温度以及表面积雪的影响, Leppäranta<sup>[31]</sup>将方程修改为

$$\rho_{si}L_f \frac{dH}{dt} = k_{si} \frac{T_f - T_s}{H} = k_s \frac{T_f - T_s}{H_s} = -[k_0 + k_1(T_a - T_s)], \quad (A3)$$

式中,  $H_s$  为积雪厚度;  $k_s$  为积雪热传导系数, 取  $0.4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ ;  $k_0$  为热通量系数, 取  $-40 \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $k_1$  为热交换系数, 取  $15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{C})$ ;  $T_a$  为气温;  $T_s$  为雪-冰界面的温度。假定积雪厚度  $H_s$  为常数, 可以得到海冰厚度的表达式

$$H = \sqrt{H_0^2 + \alpha^2 [D - b_0 t] + (b_1 + \beta H_s)^2 - (b_1 + \beta H_s)}, \quad (A4)$$

式中,  $b_0 = \frac{k_0}{k_1}$ ,  $b_1 = \frac{k_{si}}{k_1}$ ,  $\beta = \frac{k_{si}}{k_s}$ 。

## Observation and analysis of landfast ice arounding Zhongshan Station, Antarctic in 2016

Hao Guanghua<sup>1</sup>, Yang Qinghua<sup>2,3</sup>, Zhao Jiechen<sup>1</sup>, Deng Xiao<sup>4</sup>, Yang Yong<sup>5</sup>, Duan Peifa<sup>6</sup>,  
Zhang Lin<sup>1</sup>, Li Chunhua<sup>1</sup>, Cui Liqin<sup>7</sup>

(1. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting, State Oceanic Administration, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 2. Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China; 3. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Guangdong, Zhuhai), Zhuhai 519082, China; 4. Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 5. Xiuning Meteorological Service, Huangshan 245400, China; 6. Xuzhou Meteorological Service, Xuzhou 221002, China; 7. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Sea ice is an important part of the global climate system. Landfast ice is commonly found in the Antarctic coastal area, which reached the thickest in the middle and late November around Zhongshan Station. Sea ice thickness is one of the important parameters of the sea ice. We presented measurements by taken 1 SIMBA (Snow and Ice Mass Balance Array) buoy and 3 TY buoys to monitor ice thickness based on the bias of different linear temperature gradient in air, snow, ice and sea water in three different landfast ice stations (S1, S2 and S3) in the Prydz Bay outside Zhongshan Station in 2016. The SIMBA measures vertical temperature profiles 4 times a day and TY measures vertical temperature per hour. Both SIMBA and TY buoys were set up in S3 station. Compared with borehole in situ measurements, the ice thickness derived by TY buoys had a mean bias and RMSE of 3.3 cm and 14.7 cm in S1 Station, 6.6 cm and 6.9 cm in S2 Station and 4.0 cm and 4.8 cm in S3 Station. And the mean bias and RMSE for the SIMBA buoys in S3 Station compared with borehole in situ measurements were 8.2 cm and 9.7 cm. The sea ice thickness derived by TY buoys were more agreement with the borehole in situ measurements compared with the sea ice thickness derives from SIMBA buoys in S3 Station. The result of Stefan's law of ice growth model shows the sea ice growth process and the ice growth rate varied between 0.1 cm/d to 0.8 cm/d, which is faster than the result of TY buoys and is affected by the snow thickness. While compare with limited borehole in situ sea ice thickness measurements and the great uncertain in the sea ice thickness derived by remote sense data, the error for both the TY and SIMBA buoys are reasonable, which will benefit to the future sea ice thickness monitor near Zhongshan Station.

**Key words:** sea ice thermistor chain buoys; landfast ice; thickness; temperature; Antarctic; Prydz Bay