

沈辉,杨清华,孙启振,等. 2016 年夏季北冰洋浮冰站近地层辐射和湍流通量观测[J]. 海洋学报, 2019, 41(3): 12—22, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.03.002

Shen Hui, Yang Qinghua, Sun Qizhen, et al. Observation of surface radiation and turbulent flux on drift ice over the Arctic Ocean in summer 2016 [J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(3): 12—22, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.03.002

2016 年夏季北冰洋浮冰站近地层 辐射和湍流通量观测

沈辉¹, 杨清华^{2,3*}, 孙启振¹, 孙晓宇¹, 赵杰臣¹, 张林¹

(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)

摘要: 2016 年 8 月 7—14 日中国第七次北极科学考察期间,在 83°N 附近设立的长期浮冰站开展了辐射和湍流通量观测研究。结果表明,观测期间反照率变化范围为 0.64~0.92,平均反照率为 0.78;基于现场观测数据评估了 PW79、HIRHAM、ARCSYM 和 CCSM3 4 种不同复杂度的反照率参数化方案在天气尺度的表现,最为复杂的 CCSM3 结果优于其他参数化方案,但不能体现降雪条件下的反照率快速增长。浮冰区冰雪面平均净辐射为 18.10 W/m²,平均感热通量为 1.73 W/m²,平均潜热通量为 5.55 W/m²,海冰表面消融率为 (0.30±0.22) cm/d,表明此时北冰洋浮冰正处于快速消融期。冰面的平均动量通量为 0.098 (kg·m/s)/(m²·s),动量通量与风速有很好的对应关系,相关系数达 0.80。

关键词: 北冰洋;湍流通量;辐射;反照率;参数化

中图分类号:P433

文献标志码:A

文章编号:0253-4193(2019)03-0012-11

1 引言

全球气候变暖背景下,北极海冰的范围、厚度、体积呈显著减小趋势^[1~3],近几年,在北极中央区多次出现海冰低密集度现象^[4]。北极海冰快速变化对全球气候变化的影响成为国内外研究的热点问题。由于北冰洋大气边界层观测资料匮乏,大气—海冰—海洋之间的相互作用以及参数化方案的合理性,亟需开展进一步研究。美国于 1997/1998 年开展了为期 1 年的北冰洋表面热量收支观测计划 (Surface Heat Budget of the Arctic Ocean, SHEBA),这也是截至目前北极地区最全面的大气、海洋和海冰相互作用的综

合观测^[5]。利用 SHEBA 资料,人们对北冰洋海冰表面的能量平衡、湍流特征以及反照率变化特征研究有了重要进展^[6~7]。2007 年在欧盟北极建模和长期环境监测能力计划 (Developing Arctic Modeling and Observation Capabilities for Long-Term Environmental Studies) 的支持下,利用穿极漂流有人站在多年冰上进行了连续高时间分辨率的光谱反照率、透射率、冰雪性质观测以及常规气象观测,并利用获得的资料与 SHEBA 资料进行了对比^[8~9]。Wang 等^[10]通过改进的光谱辐射浮标 (spectral radiation buoy) 在北冰洋 1 年冰上开展了冰上、冰下的太阳辐射无人自动观测。这些数据的获取有助于我们更好地理解北冰洋海冰

收稿日期:2018-11-05;修订日期:2018-12-04。

基金项目:国家重点研发计划课题(2016YFC1402705, 2018YFA0605903);国家自然科学基金(41376005, 41376188, 41706223)。

作者简介:沈辉(1987—),男,江苏省如皋市人,工程师,主要从事极地气象观测和预报研究。E-mail:shenh@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

的物理和生物过程。

虽然我国极地考察起步较晚,但大气—海冰—海洋相互作用和近地层湍流参数观测一直是我国极地科学考察的重点内容。在南极,我国分别于1987/1988年在长城站和1990/1991年在中山站开展了辐射和近地面的微气象梯度观测试验,分析了长城站和中山站区域的地表能量通量变化特征,暖季(11月至翌年2月)地表以感热和潜热的方式加热大气,寒季(3—10月)地表辐射冷却以感热方式从大气获取热量^[11—12]。2007—2008年在国际极地年(IPY)全球协同观测计划中,我国第24次南极考察队在中山站及附近冰盖上观测试验获得了湍流脉动及相关资料^[13—15]。在北极,截至2018年12月,我国已经开展了9次北极考察,除第五次和第八次北极科学考察进行北极航道考察外,其他航次均集中在北极太平洋扇区进行考察,在浮冰区近地层湍流通量、地面热平衡参数、反照率等方面取得了较多成果。多位科研工作者利用1999年我国首次北极考察期间获得的资料,分析了大气—海冰—海洋间的湍流交换特征,冰面热平衡参数以及大气边界层特征^[16—19]。李剑东等^[20]和卞林根等^[21]利用2003年第二次北极科学考察获得的近地层资料和大气廓线资料,利用廓线法和总体输送法估算了78°N浮冰近地层特征参数,并对北冰洋的大气边界层垂直结构进行了研究^[22]。利用2008年我国第三次北极科学考察资料,杨清华等^[23]结合一维高分辨率雪/冰模式(HIGHTSI)对积雪/海冰反照率参数化方案进行了评估,卞林根等^[24]和王先桥等^[25]分别对海冰近地层湍流通量和特征参数进行了研究,马永锋等^[26]对冰洋浮冰区对流层大气的垂直结构进行了研究。Xia等^[27]利用2010年我国第四次北极考察期间的观测资料对冰面和融池的反照率进行了研究,发现融池表面由冰雪化为冰水后,反照率快速降低。卞林根等^[28]利用我国北极首个漂流自动气象站的资料分析了北冰洋中心区秋冬季节冰表面的辐射平衡。Lei等^[29]基于CLARA反照率数据开展了研究,认为70°~82°N,130°W~180°区域反照率自1982年至2009年有显著的下降趋势。

本文利用2016年8月中国第七次北极科考队在北冰洋浮冰站获取的湍流通量和辐射观测相关资料,采用涡动相关法对北冰洋83°N浮冰下垫面的湍流通量进行了估算,计算了冰面热量收支差额项,测试评估了4种不同复杂度的海冰反照率参数化方案,并估

算了夏季海冰消融率。这有助于进一步理解认识北冰洋夏季海冰一大气间的能量、动量传输过程,为数值模式在北极浮冰区选用合适的边界层热力、动力特征参数和反照率参数化方案提供数据支撑。

2 观测资料和计算方法

2.1 观测资料

中国第七次北极科学考察队于2016年8月7日在82°N以北找到一块相对平整的大块浮冰开展长期冰站观测工作,长期冰站作业历时7 d。该浮冰大小约2~3 km²,冰上有一条冰脊,融池占比不到1成,冰脊冰厚最厚达到2.73 m,冰薄处只有1.02 m,平均冰厚约1.3 m^[30]。在长期冰站观测期间,浮冰在洋流和风场的共同驱动作用下,从2016年8月7日的(82.64°N,166.98°W)位置漂移到2016年8月14日的(82.86°N,158.86°W)位置(图1),整个长期冰站观测期间浮冰站都位于西十一区。本文描述所用时间,无特别说明均为当地时。

本文所用数据来自海冰一大气界面通量和辐射观测系统,该系统由二氧化碳、水汽分析仪和超声风速仪(IRGASON,安装高度1.7 m)、辐射传感器(CNR4,安装高度1.3 m)、雪厚传感器(SR50A,安装高度1.75 m)、红外温度传感器(SI-111,安装高度1.2 m)、温湿度传感器(HMP155A,安装高度1.4 m)、风向风速传感器(05106,安装高度2.1 m)和CR3000数据采集器组成(图2)。其中,这是IRGASON一体式传感器在我国北极科考中的首次应用。所有传感器都经过校准,精度均符合WMO的观测要求。同时对采集数据在线进行了野点去除、快慢传感器的同步测量、延时法找最大协方差、坐标旋转、频率修正、超声感热修正、数据质量分级等一系列质量控制流程。人工观测每天在UTC时间00、06、12时观测3次,观测内容除包含常规气象要素外,主要对云量、能见度和天气现象进行记录。

2.2 计算方法

冰面的能量平衡方程可以写为:

$$R_n - H - LE = G + M, \quad (1)$$

式中, R_n 为冰面净辐射; H 为感热通量; LE 为潜热通量; G 为冰内热通量; M 为冰融化(凝结)吸收(释放)的热通量。其中 R_n 冰面净辐射可以由四分量辐射计(CNR4)观测的向下短波辐射(S_t),向上短波辐射(S_g),向下长波辐射(L_a),向上长波辐射(L_g)计算获得:

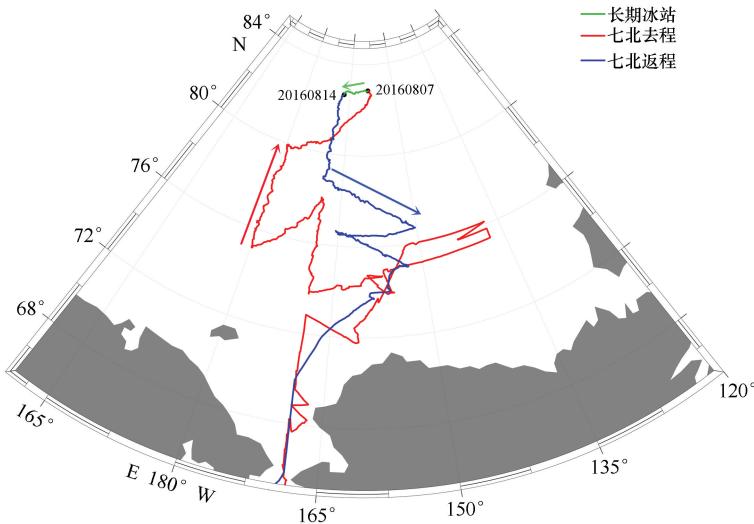


图 1 中国第七次北极科学考察“雪龙”船航行轨迹

Fig.1 The shipping track of the Chinese National Arctic Research Expedition in 2016 (CHINARE 2016)

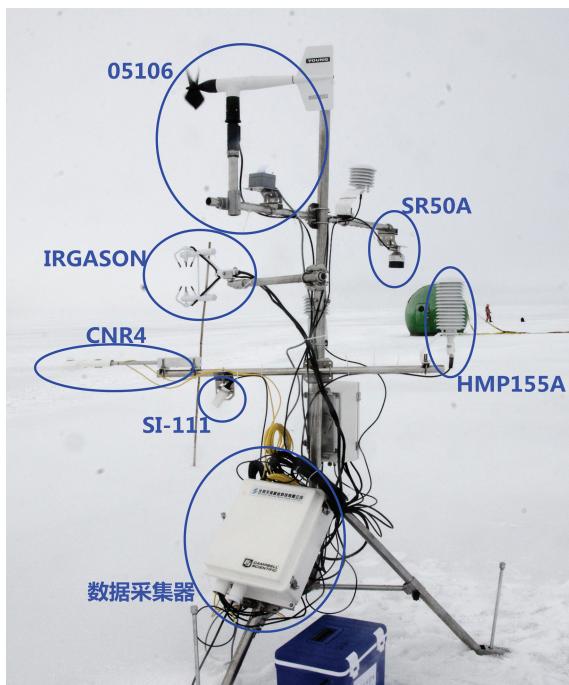


图 2 2016 年夏季北极海冰表面湍流通量和辐射观测

Fig.2 The radiation and turbulent fluxes observation over the sea ice surface in summer 2016

$$R_n = S_i - S_g + L_a - L_g. \quad (2)$$

感热通量 H 和潜热通量 LE 根据涡动相关法^[31]，由仪器 IRGASON 观测提供的高频(10 Hz)资料，从湍流通量的定义出发直接计算获得。公式如下：

$$H = \rho c_p \overline{w' T'}, \quad (3)$$

$$LE = \rho L \overline{w' q'}. \quad (4)$$

同时还可以计算获得动量通量 τ ，二氧化碳通量 F_c 。

$$\tau = \rho \overline{w' u'}, \quad (5)$$

$$F_c = \overline{w' c'}. \quad (6)$$

式(3)至式(6)中， ρ 为空气密度； c_p 为空气定压热容； L 为水的蒸发潜热； w' 、 u' 、 T' 、 q' 、 c' 分别为垂向速度、水平速度、气温、比湿、二氧化碳的脉动值；上划线表示时间平均，平均时间为 30 min。

在海冰表面，不考虑降水，同时假设冰面没有积雪，冰表面融化方程可以表示为：

$$\rho_i L_f dH/dt = M - k_i (T_f - T_o)/H, \quad (7)$$

式中， ρ_i 为表面海冰密度； L_f 为海冰融化潜热系数； T_f 为海冰冰底温度； T_o 为海冰表面温度； k_i 为海冰热传导系数； dH/dt 为海冰融化率； H 为冰厚； M 为大气热通量和太阳净辐射之和。在夏季海冰融化季节 T_f 和 T_o 只差很小， $k_i (T_f - T_o)/H$ 冰内热传导项与 M 相比是小量，冰表面融化方程可以进一步简化为：

$$\rho_i L_f dH/dt = M. \quad (8)$$

根据式(8)，我们可以粗略计算北冰洋夏季海冰的融化率。在计算过程中，海冰密度设为 910 kg/m^3 ，海冰融化潜热系数设为 333.4 kJ/kg 。

3 观测结果分析

3.1 基本气象要素特征

图 3 是 2016 年 8 月 7—14 日长期冰站观测的气温、气压、相对湿度、风速、雪厚和雪面温度每半小时

的时间序列。由于在8月12日遭遇到了冻雨天气的影响,风向风速传感器和二氧化碳、水汽分析和超声风速仪表层结冰,8月12日以后风速失真、明显偏小,二氧化碳、水汽分析仪和超声风速仪则停止工作,没有获得数据。长期冰站期间相对湿度较高,基本上在85%以上。8月11日开始逐渐受极地低压影响,气压从1 021 hPa下降到1 002 hPa;低压影响期间,风速最

大达11.2 m/s(6级),并伴有降雪,观测期间的冰面雪厚从6 cm增长到16 cm(图3e)。气温最低达-4.5℃,雪面温度与气温变化较为一致,略低于气温,表明在观测期间雪面一直能够从空气获取感热,处于吸热状态。根据人工观测记录,长期冰站作业期间以阴雪天气为主,常伴有轻雾,云量几乎都在8成以上。

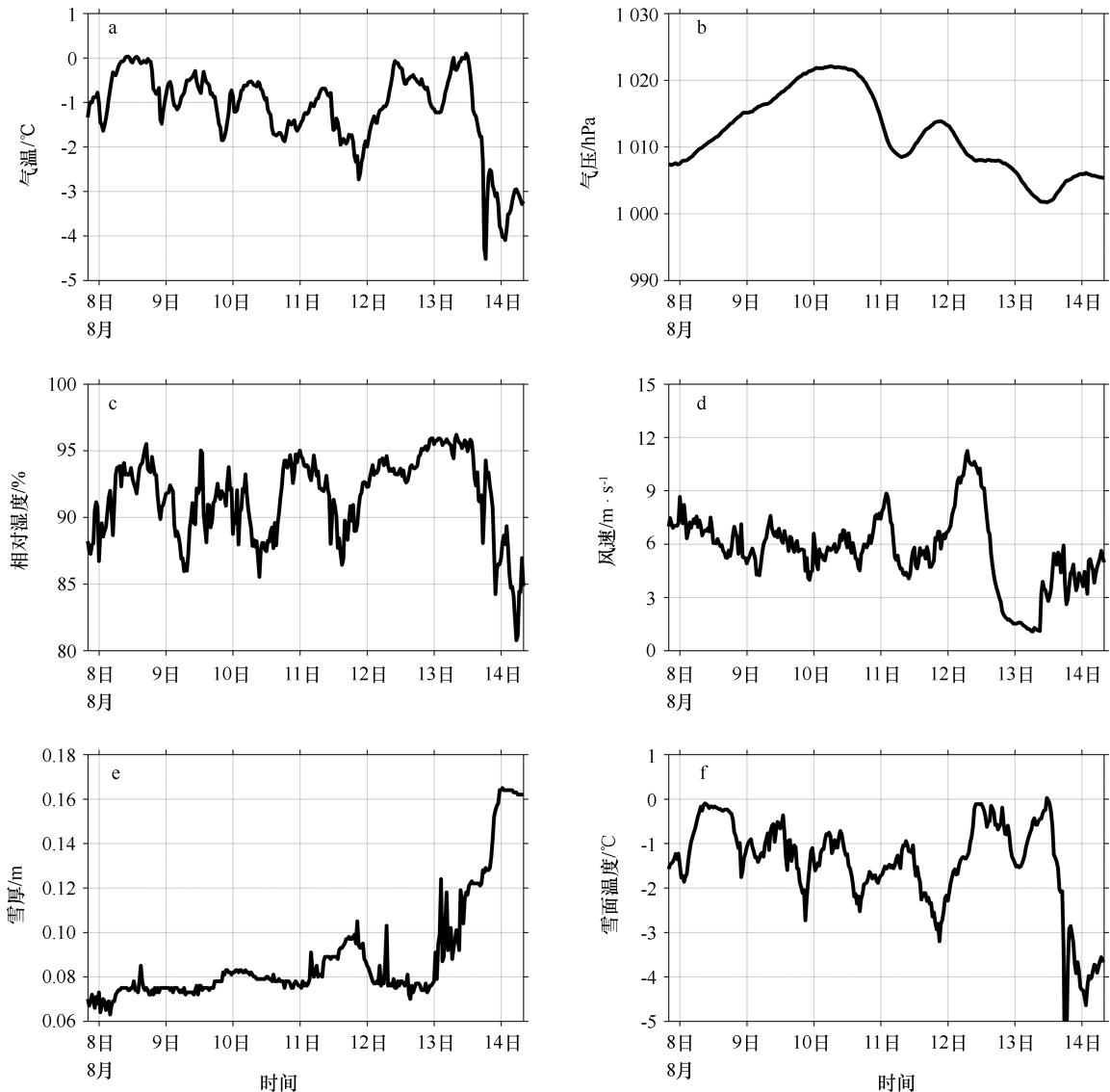


图3 2016年夏季长期冰站期间常规气象要素的变化(a.温度; b.气压; c.相对湿度; d.风速; e.雪厚; f.雪面温度)

Fig.3 Surface air temperature (a), air pressure (b), relative humidity (c), wind speed (d), snow thickness (e) and snow surface temperature (f) at the long-term ice station in summer 2016

3.2 湍流通量参数特征

图4给出了长期冰站期间海冰一大气界面通量的时间序列,由于天气原因8月12日以后的数据均不可

用。图4a和图4b是长期冰站观测期间潜热通量和感热通量的时间序列,潜热通量的变化范围为0.19~13.83 W/m²,平均值为5.55 W/m²;感热通量的变化范

围为 $-7.58\sim13.35 \text{ W/m}^2$, 平均值为 1.73 W/m^2 。正值表示冰面向大气输送热量, 研究表明冰面释放的潜热在 83°N 浮冰融化的过程中起了重要作用。感热通量具有一定的日变化, 最大值出现在中午前后, 最小值出现在夜间。2008年观测的冰面平均潜热通量和感热通量分别为 1.2 W/m^2 和 0.2 W/m^2 ^[25], 本次观测结果更大, 其中, 潜热通量增加主要归因于海冰表面融池、水道比例增加导致水汽蒸发量更大。

图4c是动量通量时间序列, 动量通量的变化范围为 $0.023\sim0.246 (\text{kg}\cdot\text{m/s})/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 平均动量通量为 $0.098 (\text{kg}\cdot\text{m/s})/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。动量通量与风速有

很好的对应关系, 相关系数达0.80, 表明观测期间海冰表面特性变化不大, 动量通量的变化由风速来决定。这与前人研究结果类似^[21]。图4d是二氧化碳通量的时间序列, 二氧化碳通量主要反映的是由海—气二氧化碳分压差产生的海—气二氧化碳通量交换^[32]。二氧化碳通量变化范围为 $-0.100\sim0.087 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 平均二氧化碳通量为 $-0.001 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 比2008年的观测结果 $-0.015 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ^[25]偏低。二氧化碳通量平均值为负值, 这表明长期冰站区域在夏季对大气CO₂有微弱的吸收能力。

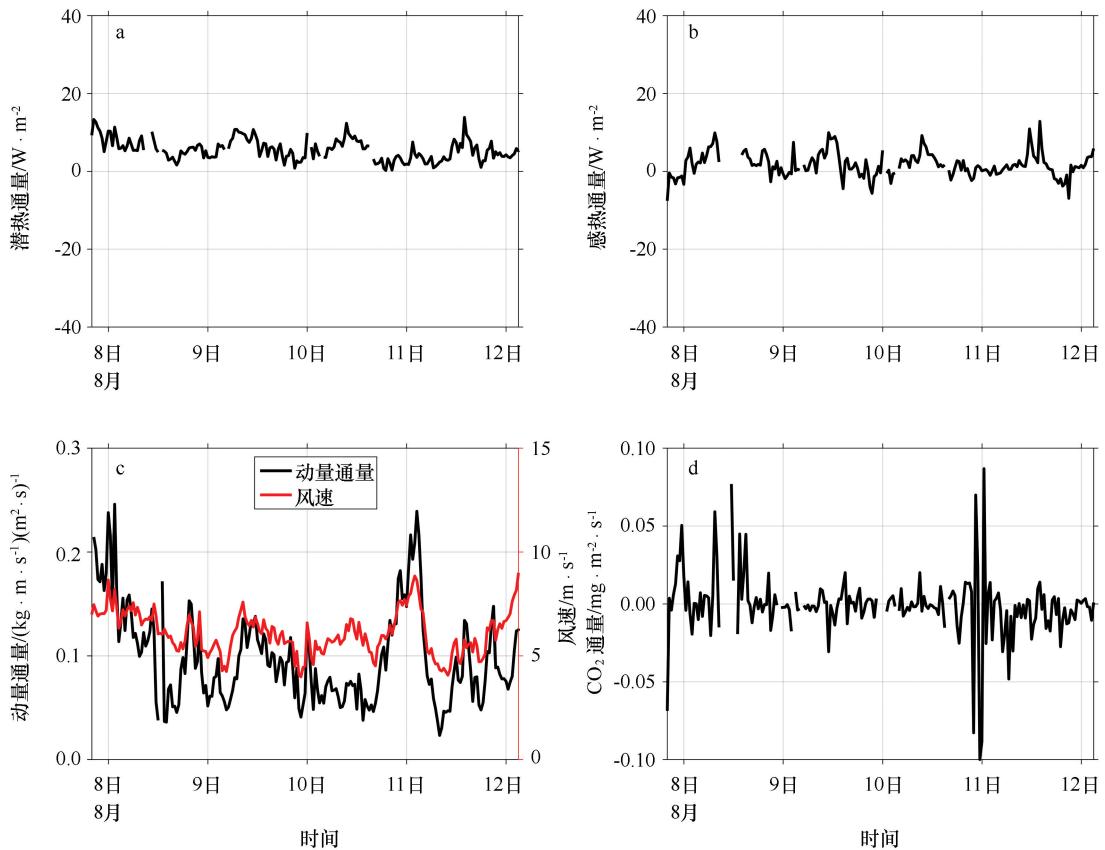


图4 2016年夏季长期冰站期间冰面通量的变化

Fig.4 The variation of turbulent fluxes at long-term ice station in summer 2016

a.潜热通量; b.感热通量; c.动量通量(黑色); d.二氧化碳通量

a.Latent heat flux; b.sensible heat flux; c.momentum flux; d.CO₂ flux

3.3 辐射分量特征及反照率参数化方案比较

图5a给出了长期冰站期间向下(上)长(短)波辐射和净辐射的时间序列。向下短波辐射的范围为 $15.63\sim388.45 \text{ W/m}^2$, 平均值为 124.97 W/m^2 , 比2008年我国第三次北极考察的观测结果偏大^[25], 偏

大的原因主要是2016年观测的地点在 $82^\circ\sim83^\circ\text{N}$ 之间, 比2008年观测地点 85°N 偏南, 同时2008年观测期间的云量基本在9成以上, 比2016年观测期间要多。向上短波辐射的范围为 $12.33\sim319.54 \text{ W/m}^2$, 平均值为 97.32 W/m^2 。短波辐射日变化明显, 中午时

段最大。8月9日、10日和11日中午向下短波辐射超过 300 W/m^2 ,剩余其他天数中午辐射值均在 250 W/m^2 以下。对比天气现象记录发现,这3天中午时段没有降雪,而其他几天中午都出现降水,天气条件变化导致了向下短波辐射差别。由图5b可见,向下长波辐射范围为 $224.82\sim312.70\text{ W/m}^2$,平均值为 299.67 W/m^2 。向上长波辐射范围为 $287.77\sim315.93\text{ W/m}^2$,平均值为 309.59 W/m^2 。向上(下)长波辐射日变化不明显,大气向下长波辐射与大气中的水汽含量有关;观测期间以阴雪天为主,相对湿度基本在85%以上,水汽充足,所以大气向下长波辐射约 300 W/m^2 。大气向上长波辐射与冰雪表面温度有关,向

上长波辐射与雪面温度保持着一致的变化趋势,但雪面温度变化幅度不大(图3f),所以大气向上长波辐射保持在 310 W/m^2 左右。长波辐射平均值与2008年夏季在 85°N 的观测结果几乎一致^[25]。如图5c所示,净辐射范围为 $-17.75\sim80.01\text{ W/m}^2$,平均值为 18.10 W/m^2 。观测期间由于北极正处极昼期间,净辐射基本上都为正值,表明海冰处于净辐射吸热状态。净辐射日变化明显,呈单峰型变化,与向下短波辐射和气温的变化趋势基本保持一致,中午时段最大,午夜前后太阳高度角最小,净辐射出现负值,冰面以长波辐射的形式放出能量。净辐射的变化主要是由向下短波辐射决定的。

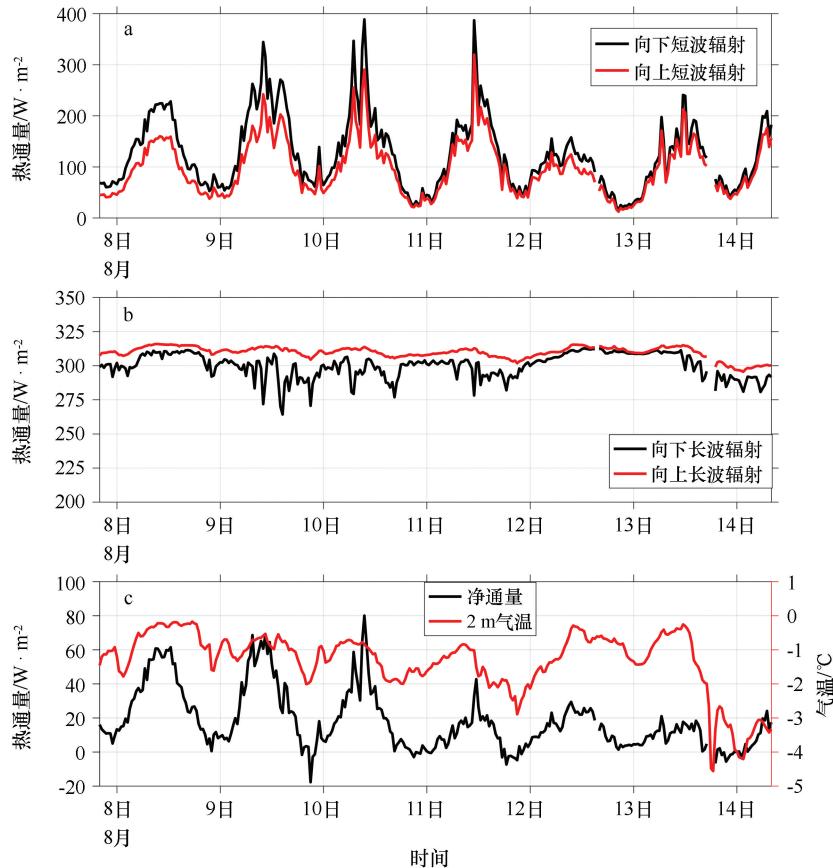


图5 2016年夏季长期冰站期间辐射通量的变化

Fig.5 The variation of radiation fluxes at the long-term ice station in summer 2016

为减少太阳高度角的影响,计算反照率时仅考虑了入射短波辐射大于 60 W/m^2 的情况^[23]。伴随冰表面积雪增加,反照率逐渐增大。观测期间反照率变化范围为 $0.64\sim0.92$,反照率平均值为0.78。与中国前3次北极考察分别在 75°N 观测的平均值0.76^[19],在

78°N 观测的平均值0.8^[18],在 85°N 观测的平均值0.76相当^[25]。

冰雪反照率反馈机制是导致极区增暖放大的一个重要原因,改进气候模式中冰雪反照率参数化方案对于全球气候变化研究具有重要意义。Yang等^[33]

和 Liu 等^[34] 分别基于 1997—1998 年北极 SHEBA 海冰观测数据和 2010—2011 年南极中山站近岸固定冰面观测数据评估了 PW79、HIRHAM、ARCSYM、CCSM3 等气候模式中常用的 4 种不同复杂度的反照率参数化方案(表 1)。考虑到北极区域海冰反照率具有显著的减小趋势^[29], 而南极海冰反照率与北极反照率亦有明显差别^[34], 在这些研究基础上, 本文进一步对比了这 4 种不同复杂度的反照率参数化方案与 2016 年北极中心区海冰现场观测结果。图 6 给出了 4 种参数化方案与观测结果的对比。PW79 方案^[35] 只考虑表面类型的影响, 由于观测期间冰面一直盖有积雪, 所以计算得到的反照率均是 0.75, 不能反映反照率的变化。HIRHAM 方案^[36] 反照率只是

表面温度的函数, 能体现反照率的日变化, 但 HIRHAM 平均值仅有 0.48, 与观测值相比明显偏小。ARCSYM 方案^[37] 考虑了表面温度、积雪厚度和冰厚的影响, 平均值为 0.66, 且能体现出反照率的日变化, 但是在降雪天气条件下, 显著偏小。CCSM3 方案^[38] 除表面温度、积雪厚度和冰厚外还考虑了光学波段, CCSM3 方案平均值为 0.77, 与观测值相当; CCSM3 也能反映出一定的变化趋势, 但是变化幅度显著偏小, 无法反映出降雪所致的反照率快速增长。综合对比这 4 种反照率参数化方案, 考虑因素最多的 CCSM3 方案结果优于其他参数化方案, 但不能体现降雪条件下的反照率快速增长。这与前人基于 SHEBA 观测实验以及南极固定冰观测结果^[33—34] 较为一致。

表 1 海冰/雪表面反照率参数化公式

Tab.1 Formulations of the snow/sea-ice albedo parameterizations

参数化方案	影响因子	公式
PW79	表面类型 (裸冰或雪)	裸冰: $\alpha_i = 0.5(H_s \leq 0 \text{ m})$; 雪: $\alpha_s = 0.75(H_s > 0 \text{ m})$
HIRHAM	表面温度	$\alpha = \alpha_{\max} - \exp[-0.5 \times (T_m - T_s)] \times (\alpha_{\max} - \alpha_{\min})$; $\alpha_{\max} = 0.7$, $\alpha_{\min} = 0.3$
ARCSYM	表面温度、雪厚、 冰厚	开阔水域: $\alpha_o = 0.1$ $\alpha_{it} = \alpha_o + \alpha_i \times \{1 + \tanh[(H_i - 0.2)/0.8]\}/2 - 0.1 \times \{1 + \tanh[\{\min(T_s - T_m, T_m) + 1.2\}/0.03]\}/2$ $\alpha_{st} = \alpha_s - 0.1 \times \{1 + \tanh[(T_s + 1.2)/0.03]\}/2$ $\alpha = \alpha_{it}$, 当 $H_s < 0.01 \text{ m}$ $\alpha = \alpha_{it} + H_s/(H_s + 0.1) \times (\alpha_{st} - \alpha_{it})$, 当 $H_s \geq 0.01 \text{ m}$ $\alpha = \max(\alpha, \alpha_o + 0.05)$
CCSM3	光谱波段、表面 温度、雪厚、冰厚	开阔水域: $\alpha_o = 0.06$ 裸冰: $\begin{cases} \alpha_{i-vis} = 0.73 \\ \alpha_{i-nir} = 0.33 \end{cases}$, 雪: $\begin{cases} \alpha_{s-vis} = 0.96 \\ \alpha_{s-nir} = 0.68 \end{cases}$ $\alpha_{it-vis} = \alpha_o + (\alpha_{i-vis} - \alpha_o) \times \min[\alpha \tan(4 \times H_i) / \alpha \tan(2), 1] / 2 + 0.075 \times \min(T_m - T_s - 1, 0)$ $\alpha_{it-nir} = \alpha_o + (\alpha_{i-nir} - \alpha_o) \times \min[\alpha \tan(4 \times H_i) / \alpha \tan(2), 1] / 2 + 0.075 \times \min(T_m - T_s - 1, 0)$ $\alpha_{vis} = \alpha_{it-vis} \times [1 - H_s / (H_s + 0.02)] + \alpha_{s-vis} \times [H_s / (H_s + 0.02)]$ $\alpha_{nir} = \alpha_{it-nir} \times [1 - H_s / (H_s + 0.02)] + \alpha_{s-nir} \times [H_s / (H_s + 0.02)]$ $\alpha = 0.53 \times \alpha_{vis} + 0.47 \times \alpha_{nir}$

注: α 为反照率; T_s 为冰雪表面温度; T_m 为融点温度(273.15 K); H_s 为雪厚; H_i 为冰厚; 下脚 vis($<0.7 \mu\text{m}$) 和 nir($>0.7 \mu\text{m}$) 分别表示可见光和近红外波段。

3.4 冰厚消融率估算

图 7 是冰面热量收支差额项的变化, 由净辐射、感热和潜热通量计算获得。冰面热量收支项的变化

趋势与太阳短波辐射的变化趋势一致, 表明冰面量收支主要由太阳短波辐射支配。观测期间冰面热量收支多为正, 表明观测期间下垫面获得热量, 此时北冰

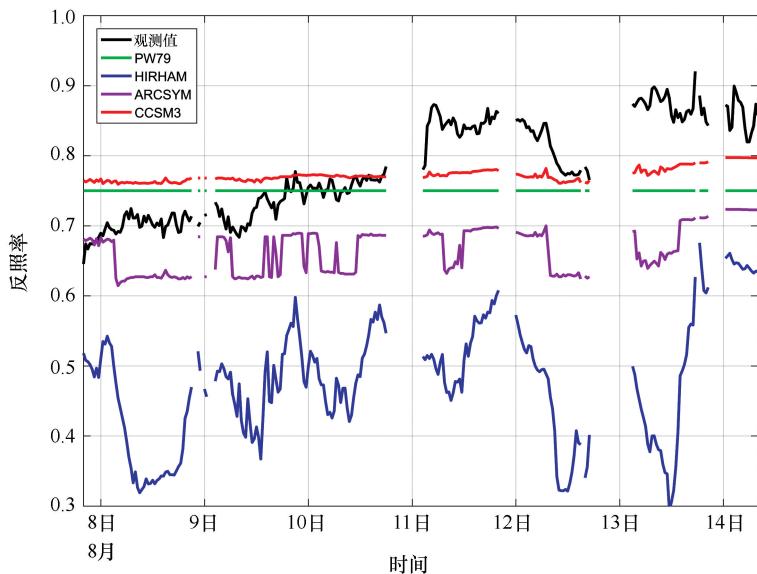


图 6 2016 年夏季长期冰站期间观测和参数化反照率的比较

Fig.6 Observed and parameterized albedos at the long-term ice station in summer 2016

洋浮冰正处于快速消融期。利用式(8)我们可以初步估算北冰洋夏季海冰的融化率。观测数据只有 4 个自然天的数据可用,通过计算,观测期间的海冰表面消融率为 $(0.30 \pm 0.22) \text{ cm/d}$ 。

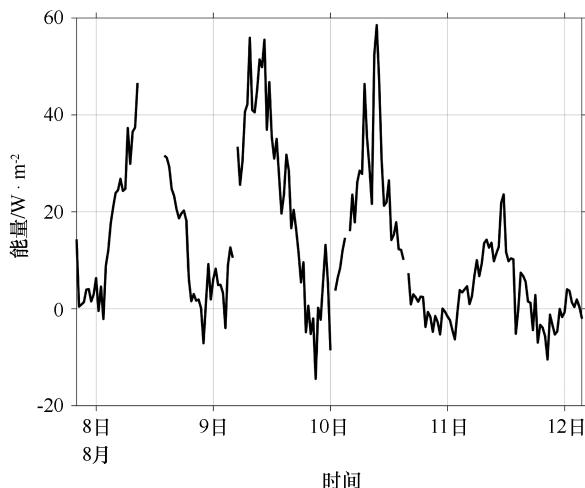


图 7 2016 年夏季长期冰站期间表面能量收支项的变化

Fig.7 The variation of surface energy budget at the long-term ice station in summer 2016

(1) 观测期间浮冰区冰雪面平均净辐射为 18.10 W/m^2 , 平均感热通量为 1.73 W/m^2 , 平均潜热通量为 5.55 W/m^2 。这表明海冰表面在观测期间获得热量, 此时北冰洋浮冰正处于快速消融期。

(2) 观测期间平均动量通量为 $0.098 (\text{kg} \cdot \text{m/s}) / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 动量通量与风速有很好的对应关系, 相关系数达 0.80, 动量通量的变化由风速来决定。平均二氧化碳通量为 $-0.001 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 表明北冰洋浮冰区域在夏季对大气 CO_2 有微弱的吸收能力。

(3) 观测期间冰雪面反照率变化范围为 $0.64 \sim 0.92$, 反照率平均值为 0.78。将 PW79、HIRHAM、ARCSYM、和 CCSM3 共 4 种反照率参数化结果与观测进行了相比, 最为复杂的 CCSM3 结果显著优于其他参数化结果, 但不能体现降雪所致的反照率快速增加。

(4) 观测期间海冰表面的消融率为 $(0.30 \pm 0.22) \text{ cm/d}$ 。由于本次可用的观测时间序列较短, 还需要今后使用更多的极地海冰现场观测结果进行补充评估。

致谢:本文工作得到中国第七次北极科学考察队的后勤保障支持, 现场观测过程得到中国气象科学研究院彭浩和张通的帮助, 以及两位审稿人的宝贵建议, 在此一并表示衷心感谢!

4 结论

对 2016 年 8 月中国第七次北极科学考察期间, 在 $82^\circ \sim 83^\circ \text{N}$ 区域长期冰站获得的辐射、湍流通量和常规气象数据进行了分析研究。得到以下结果:

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 付敏, 毕海波, 杨清华, 等. 基于卫星观测的 2003—2013 年北极海冰体积变化估算[J]. 海洋学报, 2018, 40(11): 14—22.
Fu Min, Bi Haibo, Yang Qinghua, et al. Estimation of the Arctic sea ice volume based on satellite observations during 2003—2013[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(11): 14—22.
- [3] 柯长青, 王蔓蔓. 基于 CryoSat-2 数据的 2010—2017 年北极海冰厚度和体积的季节与年际变化特征[J]. 海洋学报, 2018, 40(11): 1—13.
Ke Changqing, Wang Manman. Seasonal and interannual variation of thickness and volume of the Arctic sea ice based on CryoSat-2 during 2010—2017[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(11): 1—13.
- [4] 李理, 苏洁, 魏立新, 等. 北极中央区海冰低密度现象研究[J]. 海洋学报, 2018, 40(11): 33—45.
Li Cheng, Su Jie, Wei Lixin, et al. Exploration of anomalous low sea ice concentration phenomenon in the Central Arctic[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(11): 33—45.
- [5] Uttal T, Curry J A, McPhee M G, et al. Surface heat budget of the Arctic Ocean[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(2): 255—276.
- [6] Duynkerke P G, De Roode S R. Surface energy balance and turbulence characteristics observed at the SHEBA Ice Camp during FIRE III[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, 106(D14): 15313—15322.
- [7] Perovich D K, Grenfell T C, Light B, et al. Seasonal evolution of the albedo of multiyear Arctic sea ice[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2002, 107(C10): 8044.
- [8] Nicolaus M, Gerland S, Hudson S R, et al. Seasonality of spectral albedo and transmittance as observed in the Arctic Transpolar Drift in 2007[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C11): C11011.
- [9] Vihma T, Jaagus J, Jakobson E, et al. Meteorological conditions in the Arctic Ocean in spring and summer 2007 as recorded on the drifting ice station Tara[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(18): L18706.
- [10] Wang Caixin, Granskog M A, Gerland S, et al. Autonomous observations of solar energy partitioning in first-year sea ice in the Arctic Basin[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(3): 2066—2080.
- [11] 周秀骥, 卞林根, 贾朋群, 等. 南极长城站夏季热状况的初步分析[J]. 科学通报, 1989(17): 1323—1325.
Zhou Xiiji, Bian Lin'gen, Jia Pengqun, et al. A preliminary study on the surface thermal regime over the Great Wall station in Antarctica[J]. Chinese Science Bulletin, 1990, 35(19): 1638—1642.
- [12] 卞林根, 贾朋群, 陆龙骅, 等. 南极中山站 1990 年地表能量通量变化的观测研究[J]. 中国科学:B 辑, 1992(11): 1224—1232.
Bian Lin'gen, Jia Pengqun, Lu Longhua, et al. Observational study of annual variations of the surface energy balance components at Zhongshan station of Antarctica in 1990[J]. Science China Chemistry, 1993, 36(8): 976—987.
- [13] 李诗民, 王先桥, 周明煜, 等. 极区通量观测系统及其在国际极地年(IPY)全球协同观测中的应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(1): 62—71.
Li Shimin, Wang Xianqiao, Zhou Mingyu, et al. A polar regions flux observation system and its application in the IPY global coordinated observation[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(1): 62—71.
- [14] Liu Changwei, Li Yubin, Yang Qinghua, et al. On the surface fluxes characteristics and roughness lengths at Zhongshan station, Antarctica[J]. International Journal of Digital Earth, 2017, doi: 10.1080/17538947.2017.1335804.
- [15] 林忠, 卞林根, 马永峰, 等. 南极中山站附近冰盖近地面层湍流参数的观测研究[J]. 极地研究, 2009, 21(3): 221—233.
Lin Zhong, Bian Lin'gen, Ma Yongfeng, et al. Turbulent parameters of the near surface layer over the ice sheet nearby Zhongshan Station, east Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2009, 21(3): 221—233.
- [16] 曲绍厚, 胡非. 北冰洋海域极昼期间海—冰—气间湍流通量交换特征[J]. 自然科学进展, 2000, 10(9): 836—841.
Qu Shaohou, Hu Fei. Characteristics of ocean-ice-air turbulent flux exchange in Arctic Ocean during polar day[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(9): 836—841.
- [17] 张雅斌, 卞林根, 程彦杰, 等. 北冰洋浮冰和开阔海面上的能量平衡特征[J]. 极地研究, 2000, 12(3): 191—202.
Zhang Yabin, Bian Lin'gen, Cheng Yanjie, et al. Characteristics of energy balance over Arctic drifting ice and open sea[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2000, 12(3): 191—202.
- [18] 曲绍厚, 胡非, 李亚秋, 等. 北冰洋及其邻近海域极昼期间大气边界层结构特征试验研究[J]. 地球物理学报, 2002, 45(1): 8—16.
Qu Shaohou, Hu Fei, Li Yaqiu, et al. Experiment research on the characteristics of ABL structure over the Arctic ocean and adjacent sea area during the polar day period[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(1): 8—16.
- [19] 卞林根, 高志球, 陆龙骅, 等. 北冰洋夏季开阔洋面和浮冰近地层热量平衡参数的观测估算[J]. 中国科学:D 辑, 2003, 33(2): 139—147.
Bian Lin'gen, Gao Zhiqiu, Lu Longhua, et al. Observational estimation of heat budgets on drifting ice and open water over the Arctic ocean[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2003, 46(6): 580—591.
- [20] 李剑东, 卞林根, 高志球, 等. 北冰洋浮冰区近冰层湍流通量计算方法比较[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 368—375.
Li Jiandong, Bian Lin'gen, Gao Zhiqiu, et al. Comparison of the estimating methods of the turbulence flux over a drifting ice surface in the Arctic area[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 368—375.

- [21] 卞林根, 张占海, 陆龙骅, 等. 北冰洋 78°N 冰站近地层参数的观测研究[J]. 极地研究, 2007, 19(3): 163—170.
Bian Lin'gen, Zhang Zhanhai, Lu Longhua, et al. Experiment of near surface layer parameters on drift ice over the Arctic ocean[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2007, 19(3): 163—170.
- [22] 卞林根, 陆龙骅, 张占海, 等. 北冰洋浮冰站大气边界层结构的观测研究[J]. 极地研究, 2006, 18(2): 87—97.
Bian Lin'gen, Lu Longhua, Zhang Zhanhai, et al. Analysis of structure of atmospheric layer in ice camp over Arctic ocean[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2006, 18(2): 87—97.
- [23] 杨清华, 程斌, 雷瑞波, 等. 北极夏季海冰反照率的观测和数值模拟试验[J]. 海洋学报, 2011, 33(2): 42—47.
Yang Qinghua, Cheng Bin, Lei Ruibo, et al. Arctic sea ice albedo in summer: observation and modelling experiments[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(2): 42—47.
- [24] 卞林根, 马永锋, 邱昌贵. 北冰洋浮冰区湍流通量观测试验及参数化研究[J]. 海洋学报, 2011, 33(2): 27—35.
Bian Lin'gen, Ma Yongfeng, Lu Changgui, et al. Experiment of turbulent flux near surface layer and its parameterizations on an drift ice over the Arctic Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(2): 27—35.
- [25] 王先桥, 杨清华, 李诗民, 等. 北冰洋浮冰站近地层参数的观测估算[J]. 海洋学报, 2011, 33(2): 36—41.
Wang Xianqiao, Yang Qinghua, Li Shimin, et al. Estimate of surface layer parameters on drifting ice in the Arctic Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(2): 36—41.
- [26] 马永锋, 卞林根, 周秀骥, 等. 北冰洋 80°~85°N 浮冰区对流层大气的垂直结构[J]. 海洋学报, 2011, 33(2): 48—59.
Ma Yongfeng, Bian Lin'gen, Zhou Xiuji, et al. Vertical structure of troposphere in the floating ice zone over the Arctic Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(2): 48—59.
- [27] Xia Wentao, Xie Hongjie, Ke Changqing, et al. Summer surface albedo of sea ice in Pacific Arctic Sector as measured during the CHINARE 2010 cruise[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2015, 47(4): 645—656.
- [28] 卞林根, 王继志, 孙玉龙, 等. 北冰洋中心区海冰漂流与大气过程[J]. 海洋学报, 2014, 36(10): 48—55.
Bian Lin'gen, Wang Jizhi, Sun Yulong, et al. Sea ice drifting and atmospheric processes over the central Arctic Ocean[J]. Haiyang Xuebao, 2014, 36(10): 48—55.
- [29] Lei Ruibo, Tian-Kunze X, Leppäranta M, et al. Changes in summer sea ice, albedo, and portioning of surface solar radiation in the Pacific sector of Arctic Ocean during 1982—2009[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2016, 121(8): 5470—5486.
- [30] 孙晓宇, 沈辉, 李春花, 等. 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[J]. 海洋预报, 2017, 34(4): 11—19.
Sun Xiaoyu, Shen Hui, Li Chunhua, et al. Arctic sea ice observation and characteristic analysis based on the seventh National Arctic Research Expedition in summer 2016[J]. Marine Forecasts, 2017, 34(4): 11—19.
- [31] Swinbank W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere[J]. Journal of Meteorology, 1951, 8(3): 135—145.
- [32] 高众勇, 陈立奇, Cai Weijun, 等. 全球变化中的北极碳汇: 现状与未来[J]. 地球科学进展, 2007, 22(8): 857—865.
Gao Zhongyong, Chen Liqi, Cai Weijun, et al. Arctic carbon sink in global change: present and future[J]. Advances in Earth Science, 2007, 22(8): 857—865.
- [33] Yang Qinghua, Liu Jiping, Leppäranta M, et al. Albedo of coastal landfast sea ice in Prydz Bay, Antarctica: observations and parameterization [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(5): 535—543.
- [34] Liu Jiping, Zhang Zhanhai, Inoue J, et al. Evaluation of snow/ice albedo parameterizations and their impacts on sea ice simulations[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27(1): 81—91.
- [35] Parkinson C L, Washington W M. A large-scale numerical model of sea ice[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1979, 84(C1): 311—337.
- [36] Dethloff K, Rinke A, Lehmann R, et al. Regional climate model of the Arctic atmosphere[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1996, 101(D18): 23401—23422.
- [37] Lynch A H, Chapman W L, Walsh J E, et al. Development of a regional climate model of the western Arctic[J]. Journal of Climate, 1995, 8(6): 1555—1570.
- [38] Bitz C M, Alley R B, Braconnot P, et al. The Arctic in a warmer world: projections from 16 coupled models[J]. Journal of Climate, 2001, 14(18): 4013—4033.
- [39] Briegleb B P, Bitz C M, Hunke E C, et al. Scientific Description of the Sea Ice Component in the Community Climate System Model[M]. 3rd ed. Colorado: National Center for Atmospheric Research, Bowder, 2004.

Observation of surface radiation and turbulent flux on drift ice over the Arctic Ocean in summer 2016

Shen Hui¹, Yang Qinghua^{2,3}, Sun Qizhen¹, Sun Xiaoyu¹, Zhao Jiechen¹, Zhang Lin¹

(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 (Zhuhai), Zhuhai 519082, China)

Abstract: The surface radiation and turbulent fluxes over 82°N drifting ice in the Arctic Ocean in summer were measured from August 7 to August 14 during the Chinese National Arctic Research Expedition in 2016 (CHIN-ARE2016). The results show that the surface albedo of drifting ice range from 0.64 to 0.92 with an average of 0.78. Four different snow/ice albedo parameterizations (PW79, HIRHAM, ARCSYM and CCSM3) which are used in a variety of climate models are evaluated by comparing with the *in-situ* observations, the most complex CCSM3 scheme agreed best with the observations, but cannot well capture the rapid increasing of albedo which is induced by snowfall. The average sensible heat flux, latent heat flux and net radiation over the snow/ice surface are 1.73 W/m², 5.55 W/m² and 18.10 W/m², respectively. The melting rate of ice surface is (0.30 ± 0.22) cm/d, which shows that the drifting ice is gaining heat and under rapidly melting. The average momentum flux over the ice surface is 0.098 (kg · m/s)/(m² · s). The momentum flux has a good correlation with the wind speed and the correlation coefficient reached 0.80.

Key words: Arctic Ocean; turbulent flux; radiation; albedo; parameterization