基于 CryoSat-2 数据的 2014—2018 年北极海冰厚度分析

张 婷,张 杰,张 晰
(自然资源部 第一海洋研究所,山东 青岛 266061)

摘 要:利用 CryoSat-2 L2I 产品数据中的海冰干舷高度和相关参数,基于静力平衡方程计算获得北极海冰厚度数据,并分析了 2014-10—2018-05 的北极海冰厚度与面积的年际与月际变化,进而结合同时期的 AARI 海冰类型数据分析了北极一年冰与多年冰的厚度及面积的变化。结果显示,2014-10—2018-05,冰厚最大值基本出现在每年的 4—5 月,最小值出现在 10 月;北极海冰覆盖面积的最大值出现在每年的 4 月而最小值出现在 10 月。海冰消融期北极海冰面积的减幅逐年增加,海冰厚度的减幅也大体呈增加的趋势,而且海冰消融期海冰面积的减幅大于同年海冰生长期海冰面积的增幅。因此,在这期间北极海冰存在减少的趋势,且随着全球气温升高,减少的趋势可能仍会持续,这使得北极航道通航成为可能。

关键词:CryoSat-2;北极;海冰厚度
中图分类号:TP79 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-6647(2020)03-0425-10
doi:10.3969/j.issn.1671-6647.2020.03.005
引用格式:ZHANG T, ZHANG J, ZHANG X. Analysis of Arctic sea ice thickness from 2014 to 2018 based on CryoSat-2 data[J]. Advances in Marine Science, 2020, 38(3): 425-434. 张婷, 张杰, 张晰. 基于 CryoSat-2 数据的 2014—2018 年北极海冰厚度分析[J]. 海洋科学进展, 2020, 38(3): 425-434.

海冰是气候系统中极为敏感的环境因子之一,它对全球的大气环流、海洋水循环以及温、盐、热平衡等都起到了至关重要的作用[1-2]。海冰的表面反照率比海水更高,能反射大部分太阳短波辐射,从而减少了海水对太阳能量的吸收[3-5]。因此海冰的减少会降低海洋表面的反照率,使更多的太阳辐射进入到海水中,导致海水的温度升高,进而更加快了海冰的融化过程。海冰还会影响海洋和大气间的能量交换过程[6],形成地球上的热汇和冷源[7]。海冰变化造成的地球上冷热源的分布变化会对大气环流产生重要的影响[8]。海冰的变化影响着区域乃至全球的气候变化,而气候变化又会进一步改变海冰的特征。北极海冰是全球海冰的重要组成部分,近 50 a 来,北极海冰呈现出不断减少的趋势,已对北极乃至全球气候造成了深远的影响[9-10]。例如:北极海冰的减少会对北半球大气环流过程产生影响,导致欧亚大陆冷冬季节出现的频率升高,甚至发生极端气候灾害。因此,研究北极海冰的变化对了解气候变化过程及其影响机制具有重要的意义。

目前,对北极海冰变化的分析主要集中于海冰面积和海冰密集度,分析过去 30 a 的卫星观测数据可知,北极海冰外缘线和海冰面积呈下降趋势,且夏季下降速度比冬季快[11]。Comiso 等[12]研究表明,北极海冰面积在夏季最小,主要由多年冰组成,且以每年 10%的速度消失。1979—2008 年 CISDA 数据显示加拿大北极群岛在 9 月的海冰总面积和多年冰面积分别以每十年 8.7%和 6.4%的速度减少[13]。柯长青等[14]利用 AMSR-E 海冰密集度数据分析得出北极的多年冰于 2002—2010 年减少了近 30%。苏洁等[15]利用 AMSR-E 海冰密集度数据分析了 2002—2008 年的北极海冰变化特征。

收稿日期:2019-01-11
资金项目:国家重点研发计划项目——北极环境卫星遥感与数值预报合作平台建设(2018YFC1407200);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——SAR 海冰表面粗糙度与海冰厚度相关性分析(2014G31)
作者简介:张 婷(1982-),女,工程师,硕士,主要从事海洋微波遥感方面研究. E-mail: zhangting@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

北极海冰的变化一方面表现为外缘线的变化，即面积的变化；另一方面表现为海冰厚度的变化。目前利用高度计探测的海冰厚度分析北极海冰变化方面的研究较少。Giles 等[16]利用 ENVISAT 高度计数据计算了北极海冰厚度，发现在 2002—2007 年冬季海冰厚度呈持续减少的势态，且减少的区域主要在波弗特海海域。Laxon 等[17]利用 ICESat 和 CryoSat-2 高度计计算了北极海冰厚度，发现北极海冰体积在 2003—2008 年和 2010—2012 年秋、冬季呈降低趋势。季青等[18]将 4 种主流的海冰厚度反演算法应用于 CryoSat-2 高度计中，分别估算了北极海冰的厚度，并分析了 2003—2008 年及 2011—2013 年北极海冰厚度的时空变化。

发射于 2010-04 的 CryoSat-2 卫星高度计，携带目前最为先进的 Ku 波段合成孔径干涉雷达高度计 SIRAL(Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter)，相较于 ERS-1/2 和 Jason-1/2 等传统卫星高度计，它的空间分辨率更高(沿轨约 360 m，跨轨约 1 500 m)，因此，CryoSat-2 卫星高度计可以提供更加精细的海冰数据，并能实现对北极海冰的逐月观测。CryoSat-2 从 2013 年开始发布 L2I 海冰产品，2014 年产品质量日益成熟，因此本文将使用 2014-10—2018-05 的 CryoSat-2 L2I 海冰产品，分析北极海冰厚度及面积的年际与月际变化，进而填补 2014—2018 年北极海冰厚度变化分析的空白。

1 数 据

1.1 高度计数据

利用的高度计数据为 2014-10—2018-05 的 CryoSat-2 L2I 海冰产品数据。CryoSat-2 高度计的运行全周期为 369 d，子周期为 30 d，一个月就能实现北极区域的全覆盖，并且 CryoSat-2 高度计首次实现了北纬至 88°N 的大空间范围的覆盖(图 1)。由于海冰融化会使 CryoSat-2 高度计脉冲信号受到影响，导致提取的测高数据出现缺失，因此在北极海冰融化发生的主要月份(每年 6—9 月)，我们不能很好地对海冰数据进行提取并进行评估，在本文的分析中剔除掉了每年 6—9 月的数据。

1.2 AARI 数据

在进行海冰类型的识别时，采用了北极和南极研究所(Arctic and Antarctic Research Institute，AARI)发布的北极冰况图数据(http://www.aari.ru/)。AARI 冰况图为周产品，除 6—9 月只提供海冰密集度产品外，其余月份均提供海冰的类型产品。它的类型产品是由海岸带气象站数据、船舶走航数据和卫星数据(可见光、红外和雷达)等多源数据综合分析而成[19]。AARI 发布的北极海冰类型 SHAPEFILE 格式数据提供 6 种类型数据：尼罗冰、初生冰、一年冰、多年冰、固定冰和开阔水域。尼罗冰、初生冰和一年冰在海冰消融期后通常会消融，而多年冰和固定冰则可以经历一个或多个海冰消融期。因此，本文只考虑 2 种海冰类型：一年冰(First-Year Ice，FYI)和多年冰(Multi-Year Ice，MYI)(图 2)。

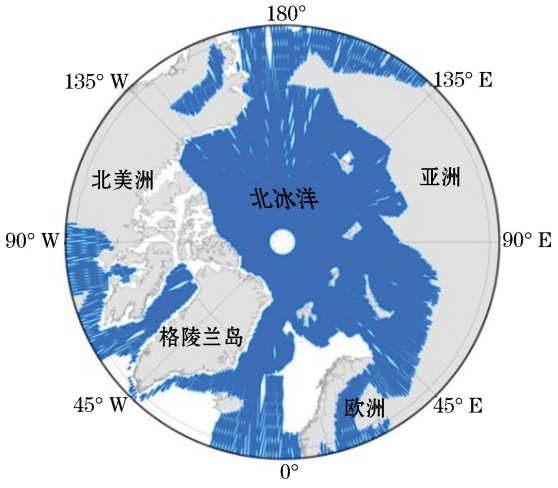

图 1 CryoSat-2 高度计北极区域空间覆盖范围

Fig.1 Spatial coverage of CryoSat-2 in the Arctic

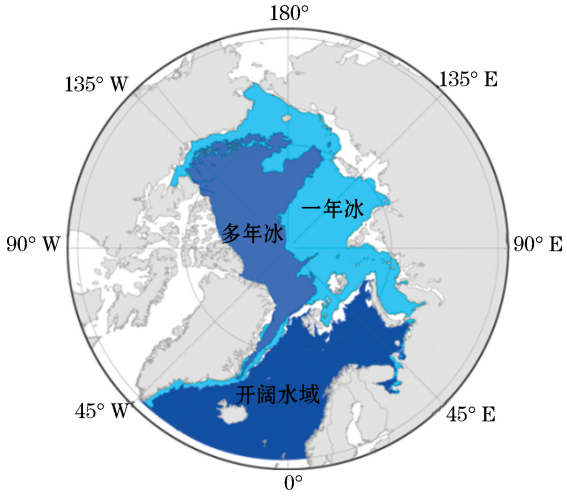

图 2 2015-03 AARI 北极海冰冰况

Fig.2 Example of AARI Arctic ice chart in March 2015

1.3　数据处理

CryoSat-2 L2I 产品是由 ESA 提供的可直接使用的数据产品，产品的数据参数包括表面高程和海冰干舷高度。它的垂直分辨率高达 1～3 cm，冰厚分辨率为 0.5 m，已经进行了地理校正、地物分类和重跟踪校正，可以直接读取数据进行使用[20]。

根据 CryoSat-2 L2I 产品数据中的海冰干舷高度和相关参数（海水、积雪和海冰的密度），假定海冰和积雪在海水中处于平衡状态，结合静力平衡方程（浮体法）[21-22]得到海冰厚度的计算公式：

$$h_i = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} \cdot h_f + \frac{\rho_s}{\rho_w - \rho_i} \cdot h_s, \tag{1}$$

式中，h_i 为海冰厚度；ρ_w，ρ_s 和 ρ_i 分别为海水密度、积雪密度和海冰密度；h_f 为海冰干舷高度；h_s 为积雪厚度；海水密度取值为 1 024 kg/m^3[23]；海冰密度按一年冰和多年冰分别取不同值，一年冰和多年冰的密度取值分别为 917.6 kg/m^3 和 882.0 kg/m^3；积雪密度、积雪厚度和海冰干舷高度均可由 CryoSat-2 L2I 产品中直接读取。为了评价 CryoSat-2 反演冰厚的精度，柯长青等[24]将基于 CryoSat-2 数据反演的 2010—2017 年海冰厚度与 OIB 机载激光雷达测量结果进行对比，结果显示其平均差异为 0.03～0.51 m，标准偏差为 0.68 m，这说明 CryoSat-2 反演的海冰厚度对北极海冰变化仍有重要指示作用。

利用 AARI 北极海冰冰况图 SHAPEFILE 格式数据对海冰进行一年冰与多年冰的分类，先将 AARI 数据与 Cryosat-2 数据进行时空匹配。由于 AARI 冰况图的生成周期为一周，而 Cryosat-2 数据是日产品，进行时间匹配时，选择与 Cryosat-2 测量点时间上最接近的一周的 AARI 冰况图，保证 2 个数据集的最大时间间隔为 3 d，因为该时间间隔内的海冰类型变化不大，可以认为海冰类型没有改变。进行空间匹配时，将每个 Cryosat-2 测量点处的海冰类型从空间上最接近的 AARI 北极冰况图中提取。

2　结果分析

2.1　北极海冰厚度年际变化分析

利用 2014-10—2018-05 的 CryoSat-2 L2I 日产品数据，根据式（1）获得 2014-10—2018-05 逐日的北极海冰厚度数据，将逐日的海冰厚度数据按月平均，得到了逐月的平均海冰厚度数据，并生成了每个月的北极海冰厚度图（选取了每年海冰面积最大时间即 4 月和海冰面积最小时间即 10 月的数据，如图 3 所示）。

计算出的北极平均海冰厚度（2014-10—2018-05）的时间序列、北极一年冰平均海冰厚度和多年冰平均海冰厚度的时间序列分别如图 4a、图 4b 和图 4c 所示。由于热力学原因，北极海冰在每年的 9 月达到最小值，自 10 月海冰又开始生长，到次年 3 月达到最大值，之后，开始新一轮的周期变化。因此，我们通常认为每年的 10 月到次年的 3 月为海冰的增长期，每年的 4—9 月为海冰的消融期。由图 4a 可见，2015 年月平均冰厚度最大值出现在 3 月，为 2.82 m，2016 和 2017 年的月平均冰厚度最大值均出现在 5 月，分别为 3.20 m 和 2.87 m，而 2018 年的月平均冰厚度最大值出现在 4 月，为 2.88 m，这说明 2015—2017 年的北极海冰均于 5 月开始消融，而 2018 年的北极海冰于 4 月开始消融。由图 4a 亦可见，从每年的 10 月开始月平均厚度开始增加，说明 2014—2017 年的北极海冰消融期均结束于 10 月。图 4b 中 FYI 的消融期开始时间与整体一致，但是 2017 年的北极海冰消融期结束时间为 11 月，比 2014-10—2018-05 的其他年份晚了一个月。2018 年的北极海冰增长期持续时间比 2014-10—2018-05 的其他年份短了一个月，而 FYI 的增长期则短了 2 个月。由图 4c 可见，MYI 的变化趋势与平均冰厚的变化趋势一致。

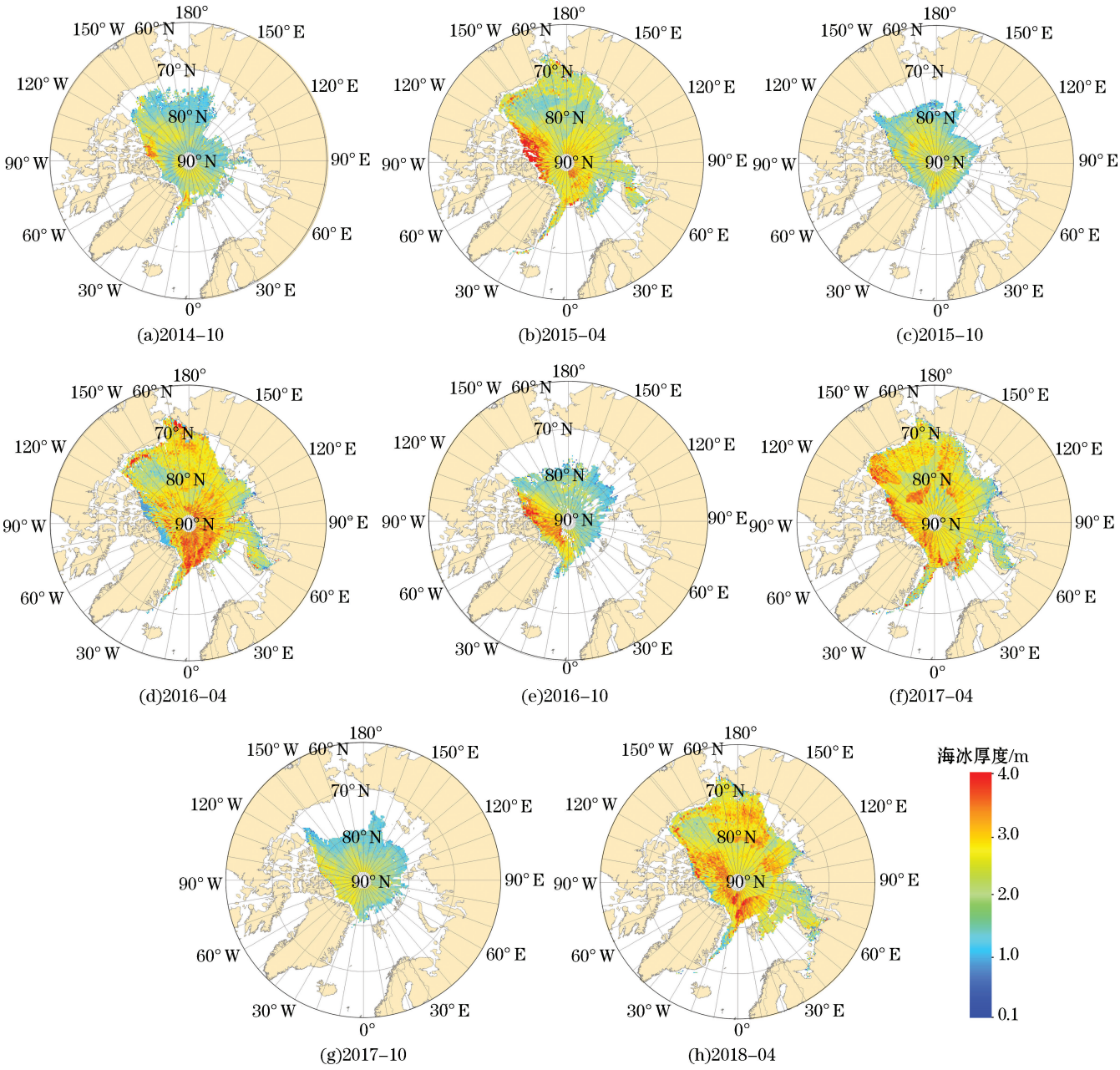

图 3 北极海冰月平均冰厚分布

Fig.3 Monthly mean ice thickness in the Arctic

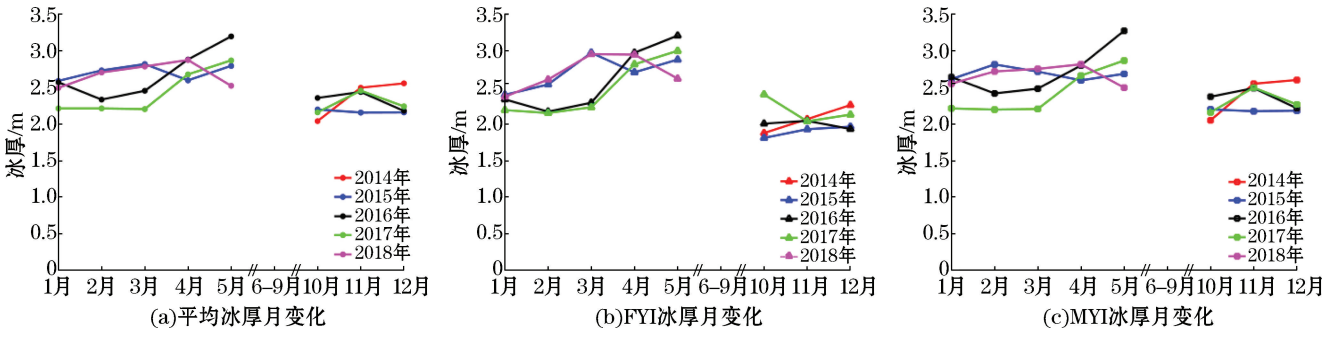

图 4 2014—2018 年冰厚月变化

Fig.4 Monthly mean ice thickness from 2014 to 2018

从海冰厚度在增长期（每年的 10 月到次年 3 月）及消融期（每年的 4—9 月）的年际变化（表 1）可以看出，自 2014-10 每个海冰增长期厚度的增幅呈递减的趋势，而每个海冰消融期厚度的减幅却呈递增的趋势，这说明北极海冰厚度整体呈现出减少的趋势，增长期内平均海冰厚度的变化也显示出这一趋势（由 2014 年的 2.64 m 降为 2018 年的 2.60 m）。由一年冰和多年冰在海冰增长期及消融期的年际变化（表 2 和表 3）可见，FYI 和 MYI 的变化趋势与平均厚度的变化趋势一致，但 MYI 的变化值相对较小，这说明 MYI 的冰厚比 FYI 的冰厚相对稳定。

表 1　2014—2018 年北极平均海冰厚度在增长期与消融期的年际变化

Table 1　Sea ice thickness during growth and melting periods in the Arctic from 2014 to 2018

海冰增长期	平均冰厚/m	厚度增幅/m	海冰消融期	平均冰厚/m	厚度减幅/m
2014-10—2015-03	2.64	0.78	2015-04—2015-09	2.50	0.40
2015-10—2016-03	2.43	0.69	2016-04—2016-09	2.78	0.53
2016-10—2017-03	2.32	0.32	2017-04—2017-09	2.52	0.52
2017-10—2018-03	2.60	0.63	2018-04—2018-09	—	—

注：“—”表示无数据

表 2　2014—2018 年北极一年冰平均海冰厚度在增长期与消融期的年际变化

Table 2　FYI thickness during growth and melting periods in the Arctic from 2014 to 2018

海冰增长期	FYI 平均冰厚/m	FYI 厚度增幅/m	海冰消融期	FYI 平均冰厚/m	FYI 厚度减幅/m
2014-10—2015-03	2.36	1.10	2015-04—2015-09	2.47	0.90
2015-10—2016-03	2.28	1.17	2016-04—2016-09	2.73	0.97
2016-10—2017-03	2.20	0.81	2017-04—2017-09	2.74	0.41
2017-10—2018-03	2.42	0.55	2018-04—2018-09	—	—

注：“—”表示无数据

表 3　2014—2018 年北极多年冰平均海冰厚度在增长期与消融期的年际变化

Table 3　MYI thickness during growth and melting periods in the Arctic from 2014 to 2018

海冰增长期	MYI 平均冰厚/m	MYI 厚度增幅/m	海冰消融期	MYI 平均冰厚/m	MYI 厚度减幅/m
2014-10—2015-03	2.56	0.67	2015-04—2015-09	2.50	0.52
2015-10—2016-03	2.42	0.60	2016-04—2016-09	2.82	0.43
2016-10—2017-03	2.34	0.29	2017-04—2017-09	2.57	0.50
2017-10—2018-03	2.49	0.66	2018-04—2018-09	—	—

注：“—”表示无数据

2.2　北极海冰厚度月际变化分析

由北极海冰厚度月际变化线性拟合图（图 5）可以看出，除 4 月、10 月和 11 月外，其他月的冰厚变化均呈递减的趋势。4 月和 10 月均为海冰生长期和消融期的交界期，海冰厚度变化受当年气温影响较大，2015—2018 年海冰厚度呈增长的趋势；11 月的冰厚除在 2015 年有较大减少外，在其他年份基本稳定。进一步分析 2014—2018 年各月的海冰厚度的减少率（表 4）可知，12 月的海冰厚度减少率最高（12.5%），该月的 MYI 厚度减少率也最高（13.03%）；5 月的 FYI 厚度减少率最高（9.03%）。

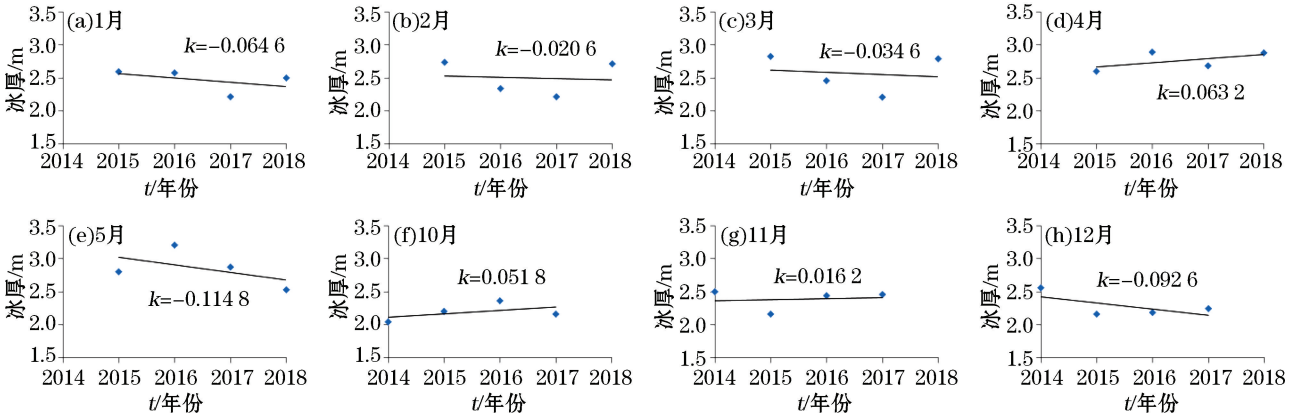

图 5 北极海冰厚度月际变化线性拟合

Fig.5 Linear fitting of monthly Arctic ice thickness

表 4 2014—2018 年各月(除 6—9 月)海冰厚度减少率

Table 4 Decreasing rate of monthly sea ice thickness from 2014 to 2018 (except from June to September)

评价指标	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	10 月	11 月	12 月
海冰厚度减少率/%	3.47	1.09	1.06	−10.77	9.64	−5.88	1.60	12.50
FYI 厚度减少率/%	0.83	−2.76	0.67	−8.86	9.03	−28.19	1.45	5.75
MYI 厚度减少率/%	2.67	3.55	−1.47	−8.46	7.06	−5.37	1.96	13.03

2.3 北极海冰面积年际变化分析

北极的地理覆盖范围存在着不同的定义,通常认为的北极为北极圈(66°33′N)以北区域,由北冰洋及周边陆地组成,总面积 2.1×10^7 km^2,其中陆地面积约 8.0×10^6 km^2[25]。我们计算的是 65°N 以北区域的北冰洋海冰覆盖面积,通常认为这个区域内的北冰洋覆盖约 7.23×10^6 km^{2}的固定区域[26]。

每年 4 月,海冰覆盖面积最大,尤其在 2017-04,其海冰覆盖面积为 2014-10—2018-05 期间最大(7.582×10^6 km^2),10 月海冰覆盖面积最小(图 6a)。FYI 的变化趋势与整体一致(图 6b),10 月,FYI 的面积下降到相对非常小的一个值(2017-10 的 FYI 面积仅为 0.028×10^6 km^2);而 MYI 的面积变化却相对稳定(图 6c)。这说明一年冰更容易因受到高温的影响而融化,北极海冰覆盖面积的变化也主要是由一年冰面积的变化所致。

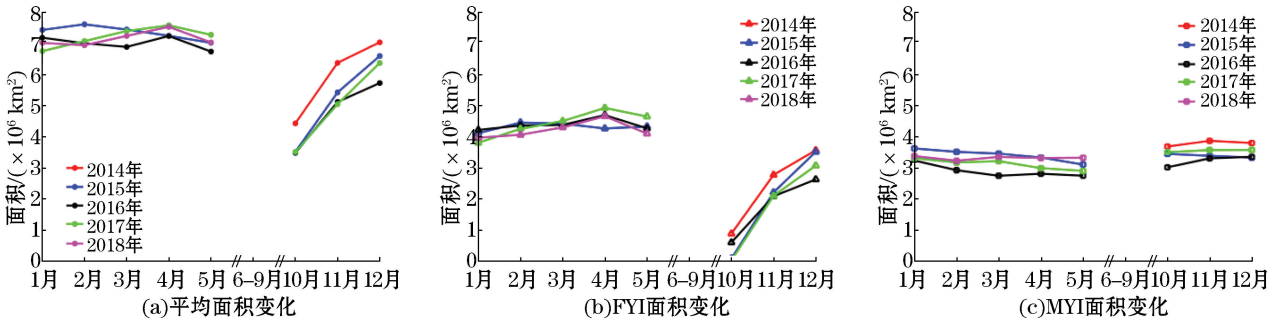

图 6 2014—2018 年海冰面积变化

Fig.6 Monthly mean ice coverage from 2014 to 2018

自 2014-10,每个海冰增长期面积的增幅与每个海冰消融期面积的减幅均呈递增的趋势(表 5)。其中,2014—2018 年海冰增长期面积的增幅由 3.02×10^6 km^2 增加到 4.03×10^6 km^2,增长了约 33%;2015—2018 年海冰消融期面积的减幅由 3.73×10^6 km^2 增加到 4.49×10^6 km^2,增长了约 20%。FYI 的面积变化趋势与平均面积的变化趋势一致(表 6),而 MYI 的面积在海冰增长期与消融期则均呈现出减少的趋势(表 7),这是由于这里的冰厚代表了大尺度厚度分布的平均值,因此观察到的变化包括热力学(冰生长)和动力学(机械再分布,即漂流/起垄)的贡献。每个海冰增长期内 MYI 的面积减少,面积平均损失接近 0.2×10^6 km^2 而厚度增加(表 7),这可以从格陵兰海岸北部冰盖和加拿大北极群岛 MYI 的压缩来解释。据报道[27],格陵兰海岸北部的冰盖和加拿大北极群岛的 MYI 在 2007 年夏季之后的短短几个月内出现大规模会聚。当然,面积损失的一部分是由于压缩而造成的,另一部分则为每年从弗拉姆海峡流出的 MYI[28]。弗拉姆海峡在 10 月至次年 4 月的平均冰流出面积约为 0.7×10^6 km^2[28]。本文的结论进一步表明了冰变形对维持北极冰厚的重要性。

表 5　2014—2018 年北极平均海冰面积在增长期与消融期的年际变化

Table 5　Variation of the Arctic ice coverage during growth and melting periods from 2014 to 2018

海冰增长期	平均面积/($\times10^6$ km^2)	面积增幅/($\times10^6$ km^2)	海冰消融期	平均面积/($\times10^6$ km^2)	面积减幅/($\times10^6$ km^2)
2014-10—2015-03	6.72	3.02	2015-04—2015-09	5.93	3.73
2015-10—2016-03	6.26	3.72	2016-04—2016-09	5.11	3.76
2016-10—2017-03	6.16	4.10	2017-04—2017-09	5.39	4.49
2017-10—2018-03	6.24	4.03	2018-04—2018-09	—	—

注:“—”表示无数据

表 6　2014—2018 年北极一年冰平均面积在增长期与消融期的年际变化

Table 6　Variation of the Arctic FYI coverage during growth and melting periods from 2014 to 2018

海冰增长期	FYI 平均面积/($\times10^6$ km^2)	FYI 面积增幅/($\times10^6$ km^2)	海冰消融期	FYI 平均面积/($\times10^6$ km^2)	FYI 面积减幅/($\times10^6$ km^2)
2014-10—2015-03	3.87	3.54	2015-04—2015-09	2.89	4.34
2015-10—2016-03	3.90	4.61	2016-04—2016-09	2.44	4.09
2016-10—2017-03	3.70	4.33	2017-04—2017-09	2.34	4.90
2017-10—2018-03	3.69	4.63	2018-04—2018-09	—	—

注:“—”表示无数据

表 7　2014—2018 年北极多年冰平均面积在增长期与消融期的年际变化

Table 7　Variation of the Arctic MYI coverage during growth and melting periods from 2014 to 2018

海冰增长期	MYI 平均面积/($\times10^6$ km^2)	MYI 面积增幅/($\times10^6$ km^2)	海冰消融期	MYI 平均面积/($\times10^6$ km^2)	MYI 面积减幅/($\times10^6$ km^2)
2014-10—2015-03	3.66	−0.23	2015-04—2015-09	3.30	0.01
2015-10—2016-03	3.13	−0.64	2016-04—2016-09	2.88	−0.21
2016-10—2017-03	3.23	0.20	2017-04—2017-09	3.13	−0.51
2017-10—2018-03	3.44	−0.15	2018-04—2018-09	—	—

注:“—”表示无数据

2.4 北极海冰面积月际变化分析

由北极海冰面积月际变化线性拟合图(图 7)可以看出,除 4 月和 5 月外,其他月份的海冰面积变化均为递减的趋势。4 月呈现递增的趋势,5 月面积变化较稳定,基本持平,原因与冰厚变化一样,是 4 月和 5 月均为海冰生长期和消融期的交界期,其海冰面积变化受当年气温影响较大。进一步分析 2014—2018 年各月的海冰面积的减少率(表 8),只有 4 月和 5 月出现了减少率为负值的情况,这说明 2014—2018 年北极海冰面积整体在减少,其中 10 月和 11 月的海冰面积减少幅度较大,减少率最高值出现在 10 月的 FYI(96.63%),原因是 FYI 易受当年气温的影响;MYI 因受气温影响而变化是一个长期、缓慢的过程,所以其各月的面积减少率比较稳定(除 4 月和 5 月外)。

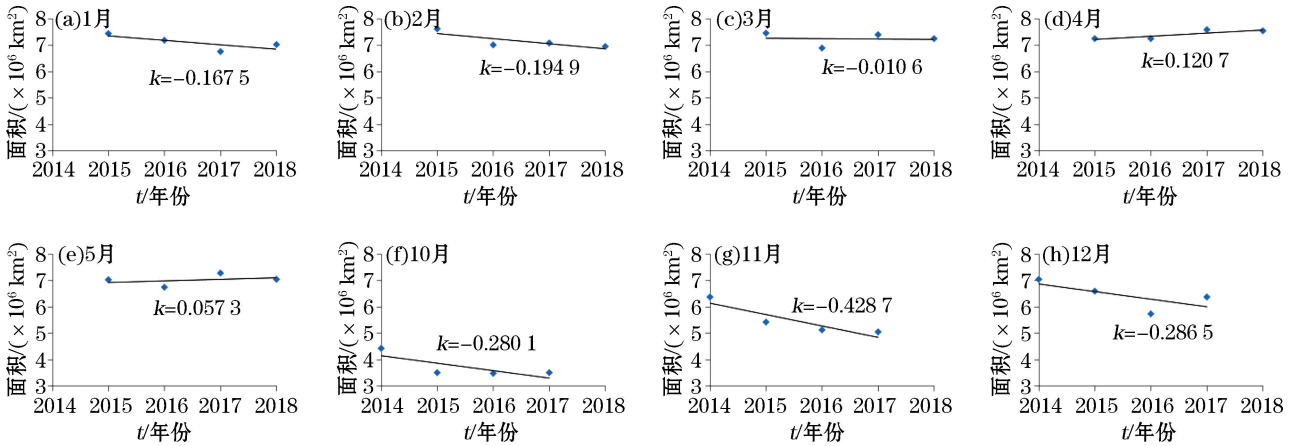

图 7 北极海冰面积月际变化线性拟合

Fig.7 Linear fitting of monthly Arctic ice coverage

表 8 2014—2018 年各月(除 6—9 月)海冰面积减少率

Table 8 Decreasing rate of monthly sea ice coverage from 2014 to 2018 (except from June to September)

评价指标	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	10 月	11 月	12 月
海冰面积减少率/%	5.52	8.92	2.82	−3.86	−0.14	20.77	20.85	9.52
FYI 面积减少率/%	3.41	8.74	2.71	−9.13	5.31	96.63	24.46	14.00
MYI 面积减少率/%	6.89	8.24	3.18	0.30	−7.07	4.89	7.49	5.79

3 结 语

利用 2014-10—2018-05 的 CryoSat-2 L2I 产品数据,分析了北极海冰厚度年际与月际变化及海冰面积的年际和月际变化,并结合同时期的 AARI 冰类型数据分析了北极一年冰与多年冰的厚度及面积的变化,得到结论:

1)2014-10—2018-05 冰厚最大值基本出现在每年的 4—5 月,最小值基本出现在 10 月;北极海冰覆盖面积的最大值出现在每年 4 月而最小值出现在 10 月;一年冰和多年冰的变化趋势与平均海冰总体变化一致。

2)2014-10—2018-05 北极海冰厚度和面积大致都呈减少的趋势。除 4 月和 10 月外海冰厚度均呈现减少的趋势,减少率最高的是 12 月,该月海冰厚度减少了 12.5%;除 4 月和 5 月外海冰面积也均呈减少的趋势,10 月和 11 月的海冰面积均有大幅度的减少,尤其是 10 月的 FYI 面积减少近 97%,原因是 FYI 易受当年气温的影响;MYI 各月的面积减少率比较稳定,除 4 月和 5 月外,减少率均约为 5%,这是由于 4 月、5 月

和 10 月为海冰生长期和消融期的交界期，其海冰厚度和面积变化受当年气温影响较大。

总体来看，海冰消融期海冰面积的减幅在逐年增加，海冰厚度的减幅也呈大体增加的趋势，而且海冰消融期海冰面积的减幅大于同年海冰生长期海冰面积的增幅。因此，在 2014-10—2018-05 期间北极海冰总体呈现减少的趋势，这种减少的趋势可能会随着全球气温的升高而持续下去，从而使北极航道通航成为可能。

参考文献(References)：

[1] WALSH J. The role of sea ice in climatic variability: theories and evidence1[J]. Atmosphere, 1983, 21(3): 14.

[2] TOGGWEILER J R, RUSSELL J. Ocean circulation in a warming climate[J]. Nature, 2008, 451(7176): 286-288.

[3] HALL A. The role of surface albedo feedback in climate[J]. Journal of Climate, 2004, 17(7): 1550-1568.

[4] LAINE V. Arctic sea ice regional albedo variability and trends, 1982－1998[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109(C6): C06027, DOI:10.1029/2003jc001818.

[5] XIONG X, STAMNES K, LUBIN D. Surface albedo over the Arctic Ocean derived from AVHRR and its validation with SHEBA data [J]. Journal of Applied Meteorology, 2010, 41(4): 413-425.

[6] MASSOM R A, HARRIS P T, MICHAEL K J, et al. The distribution and formative processes of latent-heat polynyas in East Antarctica [J]. Annals of Glaciology, 1998, 27: 420-426.

[7] KANG J C, TANG S L, LIU L B. Satellite remote sensing validation experiment at sea ice zone, East Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2003, 15(4): 310-317. 康建成，唐述林，刘雷保. 南极海冰遥感现场对比实验[J]. 极地研究，2003，15(4)：310-317.

[8] WEI L X. Study on the variation of Arctic sea ice and its effect on global climate[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. 魏立新. 北极海冰变化及其气候效应研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2008.

[9] LI P J. The Artic sea ice and climate change[J]. Journal of Glaciolgy and Geocryology, 1996, 18(1): 72-80. 李培基. 北极海冰与全球气候变化[J]. 冰川冻土，1996，18(1)：72-80.

[10] ZHAO Y C, SUN Z B, WANG Y H. Linear trend and abrupt change of sea ice in Arctic and Antarctic with its relation to atmospheric circulation[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2001, 24(1): 119-126. 赵玉春，孙照渤，王叶红. 南、北极海冰的长期变化趋势及其与大气环流的联系[J]. 南京气象学院学报，2001，24(1)：119-126.

[11] DEVASTHALE A, SEDLAR J, KOENIGK T, et al. The thermodynamic state of the Arctic atmosphere observed by AIRS: comparisons during the record minimum sea ice extent of 2007 and 2012[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(15): 7441-7450.

[12] COMISO J C. Arctic multiyear ice classification and summer ice cover using passive microwave satellite data[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 1990, 95(C8): 13411-13422.

[13] HOWELL S E L, DUGUAY C R, MARKUS T. Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979-2008[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(10): 92-103.

[14] KE C Q, PENG H T, SUN B, et al. Spatio-temporal variability of Arctic sea ice from 2002 to 2011[J]. Journal of Remote Sensing, 2013, 17(2): 459-466. 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.

[15] SU J, XU D, ZHAO J P, et al. Features of Northwest Passage sea ice′s distribution and variation under Arctic rapidly warming condition[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2010, 22(2): 104-124. 苏洁，徐栋，赵进平，等. 北极加速变暖条件下西北航道的海冰分布变化特征[J]. 极地研究，2010，22(2)：104-124.

[16] GILES K A, LAXON S W, RIDOUT A L. Circumpolar thinning of Arctic sea ice following the 2007 record ice extent minimum[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(22): 113-130.

[17] LAXON S W, GILES K A, RIDOUT A L, et al. CryoSat-2 estimates of Arctic sea ice thickness and volume[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(4): 732-737.

[18] JI Q, PANG X P, ZHAO X, et al. Comparison of sea ice thickness retrieval algorithms from CryoSat-2 Satellite Altimeter data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(11): 1467-1472. 季青，庞小平，赵羲，等. 基于 CryoSat-2 数据的海冰厚度估算算法比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版)，2015，40(11)：1467-1472.

[19] MAHONEY A R, BARRY R G, SMOLYANITSKY V, et al. Observed sea ice extent in the Russian Arctic, 1933—2006[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2008, 113(C11): 303-306.

[20] SHEN X Y. Research on CryoSat-2 sea ice thickness retrieval method[D]. Nanjing: Nanjing University, 2018. 沈校熠. 基于 CrvoSat-2 的海冰厚度反演方法研究[D]. 南京：南京大学，2018.

[21] LEE S, IM J, KIM J, et al. Arctic sea ice thickness estimation from CryoSat-2 Satellite data using machine learning-based lead detection [J]. Remote Sensing, 2016, 8(9): 698.

[22] KWOK R. Satellite remote sensing of sea-ice thickness and kinematics: a review[J]. Journal of Glaciology, 2011, 56(200): 1129-1140.

[23] FICHEFET T, MAQUEDA M A M. Modelling the influence of snow accumulation and snow-ice formation on the seasonal cycle of the Antarctic sea-ice cover[J]. Climate Dynamics, 1999, 15(4): 251-268.

[24] KE C Q, WANG M M. Seasonal and interannual variation of thinkness and volume of the Arctic sea ice based on CryoSat-2 during 2010—2017[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(11): 1-13. 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.

[25] JI Q. Study on spatial-temporal change of Arctic sea ice thickness based on satellite altimetry[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. 季青. 基于卫星测高技术的北极海冰厚度时空变化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.

[26] KWOK R, CUNNINGHAM G F. Variability of Arctic sea ice thickness and volume from CryoSat-2[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2015, 373(2045): 20140157, DOI: 10.1098/rsta.2014.0157.

[27] KWOK R, CUNNINGHAM G F. Deformation of the Arctic Ocean ice cover after the 2007 record minimum in summer ice extent[J]. Cold Regions Science & Technology, 2012, 76-77: 0-23.

[28] KWOK R. Outflow of Arctic Ocean sea ice into the Greenland and Barents Seas: 1979－2007[J]. Journal of Climate, 2008, 22(9): 2438-2457.

Analysis of Arctic Sea Ice Thickness From 2014 to 2018 Based on CryoSat-2 Data

ZHANG Ting, ZHANG Jie, ZHANG Xi

(*First Institute of Oceanography, MNR*, Qingdao 266061, China)

Abstract: The Arctic sea ice thickness are calculated based on the static equilibrium equations and freeboard height data of sea ice as well as relevant parameters from the CryoSat-2 L2I products. Interannual and monthly variations of the Arctic sea ice thickness and coverage from October 2014 to May 2018 are analyzed. The AARI ice-type data of the same period are also used to analyze variations of the first- and multi-year ice thickness and coverage. During the period from October 2014 to May 2018, the maximum thickness of the Arctic sea ice appeared in April or May, and the minimum appeared in October; the maximum coverage of the Arctic sea ice appeared in April and the minimum appeared in October. The decreasing magnitude of the Arctic sea ice coverage during sea ice melting period is increasing year by year from October 2014 to May 2018, and the decreasing magnitude of sea ice thickness also shows an increasing trend. Moreover, the decreasing magnitude of sea ice coverage during the melting period is higher than the increasing magnitude during the growth period of sea ice in the same year. Therefore, there is a general decreasing trend of the Arctic sea ice during this period, which may still continue with the increasing of the global warming and can make it possible for the Arctic Channel navigation.

Key words: CryoSat-2; the Arctic; sea ice thickness

Received: January 11, 2019