

研究论文

北极加速变暖条件下西北航道的 海冰分布变化特征

苏洁 徐栋 赵进平 李翔

(中国海洋大学 教育部物理海洋重点实验室 极地海洋过程与全球海洋变化实验室, 青岛 266100)

提要 近年来北极的加速变暖使西北航道的通航成为可能。利用 AMSR-E 的 6.25 km 分辨率日平均海冰密集度卫星数据, 研究了 2002—2008 年北极西北航道的海冰密集度变化特征。通过统计分析沿西北航道各条线路冰障流段代表站点的融化期、轻冰期、无冰期、无冰天数和轻冰天数, 以及海冰分布和变化的细节, 加深了对西北航道海冰季节变化和年际变化以及空间分布的主要特征, 特别是与通航相关的冰情信息的了解。研究指出西北航道南路比北路容易开通, 航道上的海冰通常是从冰间湖及固定冰与流冰间的水道处开始融化, 各线路冰障流段存在的时间呈减小趋势, 整条线路无冰天数/轻冰天数呈增加趋势。讨论了研究区域海冰空间分布的特征和成因, 提出了以整条线路无冰天数/轻冰天数作为衡量通航程度的指标之一, 并初步分析了西北航道通航的影响因子。

关键词 西北航道 海冰分布变化 冰障 无冰天数 冰间湖

doi: 10.3724/SP.J.1084.2010.00104

0 引言

自《马可·波罗游记》问世以来, 西方探险家就开始不畏艰险地探索一条从大西洋北部出发, 穿越北极海域到达太平洋, 然后直抵亚洲的“东北航线”或“西北航线”, 并期望以此代替分别经苏伊士运河、巴拿马运河和非洲好望角的连接欧亚大陆的 3 条主要航线, 大大节省航程。近年随着气候不断变暖, 人们看到了这两条航线通航的可能性。如果商业性通航得以实现, 将对全球的自然资源开发、交通运输和国际贸易等方面产生显著的经济效益。最近, 郭培清等^[1]对北极航道的国际问题进行了较系统的总结和论述。

本文研究的“西北航线”是指以加拿大东北部巴芬岛以北海区为起点, 由东向西, 经

[收稿日期] 2010 年 2 月收到来稿, 2010 年 5 月收到修改稿。

[基金项目] 国家自然科学基金面上基金(40876003)、自然科学基金重点基金(40631006)及 863 项目(2008AA121701)资助。

[作者简介] 苏洁, 女, 1966 年生。研究方向为海冰多年变化、海冰遥感及冰-海洋耦合数值模拟。

加拿大北极群岛(CAA ,Canadian Arctic Archipelago) 间一系列深海峡 ,至阿拉斯加北面的波弗特海 经白令海峡进入太平洋的航道 ,又称“西北航道”。位于太平洋一侧的国家通常习惯于自西向东描述这条航道(本文以下将按此方向描述) 。CAA 水道众多 ,西北航道位于 CAA 的部分可以有几条线路 ,图 1 给出了在以往文献叙述中最常见的几条线路。

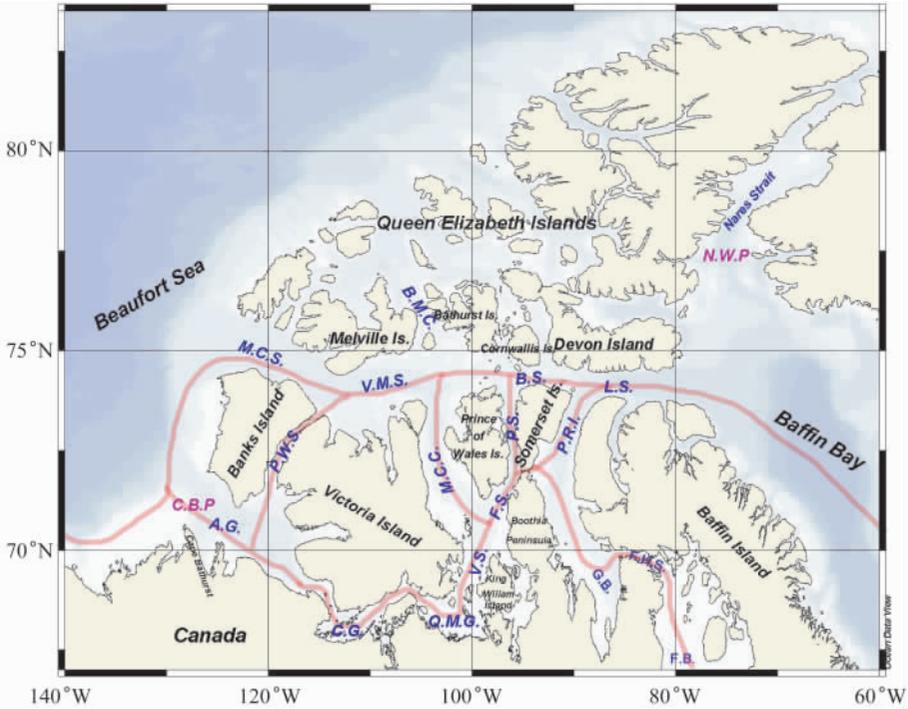


图 1 穿过加拿大北极群岛的西北航道
Fig. 1. Northwest Passage though Canada Arctic Archipelago

靠北的一支航线是从波弗特海东南沿班克斯岛(Banks Island) 西侧 ,进入麦克卢尔海峡(MCS ,M’ Clure Strait) 经梅尔维尔子爵海峡(VMS ,Viscount-Melville Sound) 、巴罗海峡(BS ,Barrow Strait) 和兰开斯特海峡(LS ,Lancaster) ,进入巴芬湾 ,我们称这条线路为西北航道北路 ,其中从 MCS 至 LS 的水道统称帕里(Parry) 水道。

西北航道的南路有多条线路 ,在 Wilson 等^[2]的描述中 ,提到其中两条可行的线路 ,都是由波弗特海开始从阿蒙森湾(AG ,Amundsen Gulf) 进入。一条经威尔士王子海峡(PWS ,Prince of Wales Strait) 在 VMS 与北路汇合 ,简称 PWS 线路; 另一条是经科罗内申湾(CG ,Coronation Gulf) 、毛德皇后湾(QMG ,Queen Maud Gulf) 、维多利亚海峡(VS ,Victoria Strait) 、富兰克林海峡(FS ,Franklin Strait) 和皮尔海峡(PS ,Peel Sound) ,在 BS 西端与北路汇合 ,简称 PS 线路。在 Stewart 等^[3]的线路图中 ,还包括另两条线路 ,都是对 PS 线路稍作调整 ,一条是避走 PS ,从萨默塞特岛(Somersat Island) 东边的利金特王子湾(PRI ,Prince Regent Inlet) 进入帕里水道 ,在 LS 与北路汇合 ,简称 PRI 线路; 另一条是避走 VS ,从威廉国王岛(King Willam Island) 东边绕行 ,但这条线路水深很浅 ,船只通过受到限制 ,本文不做研究。Pharand^[4]提出的七条线路中除了以上线路 ,还包括两条基于 PRI 线路的

调整线路,一条是南部从威廉国王岛东侧绕行,北部沿 PRI 线路;另一条是开始沿 PRI 线路,从萨默塞特岛北部分开转向南,经布希亚湾(GB, Gulf of Boothia)、弗瑞赫克拉海峡(FHS, Fury and Hecla Straits)进入福克斯湾(FB, Foxe Basin),再经福克斯海峡,进入巴芬湾。由于 FHS 海峡非常狭窄,而且 GB 湾比 PRI 湾的海冰密集得多,因此只有少数加拿大船只使用这条线路。本文对这两条线路也不做研究。另外, Sou 和 Flato^[5]给出的西北航道线路图中还包括了一条线路,即经 AG, CG, VS 和麦克林托科海峡(MCC, M'Clintock Channel),在帕里水道的 VMS 东部与北路汇合,简称 MCC 线路。

尽管 20 世纪 70 年代末以来,卫星遥感数据使我们获取了前所未有的时空连续的海冰观测资料,专门针对西北航道海冰冰情的分析却并不太多。这主要是因为 2005 年之前,人们一直没有看到真正通航的实况。Howell 等^[6]针对西北航道通航问题,利用加拿大冰服务中心(CIS, Canadian Ice Service)北极结冰期船运系统(AIRSS, The Arctic Ice Regime Shipping System)的历史数字化数据集,基于地理信息系统(GIS, Geographic Information System)平台统计了 1969—2002 年的 IN(Ice Numeral)指数,该指数可用来体现海冰对船运的影响。他们指出,尽管人们不断猜测并希望在气候变暖的条件下西北航道会开通,代替巴拿马运河航线,但 2003 年之前并没有数据证明有通航迹象^[6]。

美国国家冰雪数据中心(NSIDC, National Snow and Ice Data Center)的卫星数据表明,20 世纪有卫星遥感数据以来,波弗特海东北部班克斯岛(Banks Island)西侧即使在夏季融冰季节也会受到来自北冰洋的流冰的侵袭,帕里水道西部和 MCC 海峡更是长期被高密集度的多年冰覆盖, MCC 的海冰向南漂流很容易堵住 PS 和 PRI 线路。但是 2006 年西北航道南路开通;2007 年北极海冰达到有卫星观测以来的极轻状况^[7],北冰洋太平洋扇区海冰外缘线大范围内缩。对西北航道来说,2007 年也是具有历史意义的一年,夏季不仅南路各水道出现无冰状态,北路的帕里水道西部长期被高密集度的多年冰覆盖的 MCS 海峡以及 VMS 海峡处也有短暂的开通,这使人们对西北航道的冰情产生了新的关注。加拿大海洋科学研究所(IOS, Institute of Ocean Sciences)在国际极地年(IPY)期间组织了 C30(Canada's Three Oceans)计划,对围绕加拿大的三大洋进行较全面的调查,研究了水文、生态和地质等因子的变化及对气候的影响。调查在 CAA 区域的线路就是上述提到的 PRI 线路。Howell 等利用 SMMR/SSM/I(Scanning Multichannel Microwave Radiometer/Special Sensor Microwave/Imager)和 CISDA(Canadian Ice Service Digital Ice Chart Archive)数据,分析了 1979—2008 年 CAA 的海冰分布特征和变化,结果表明,CAA 的海冰总面积和多年冰面积在 9 月份平均每 10 年分别减少 8.7% 和 6.4%;在 CAA 内的融冰时段每 10 年平均增长 7 d^[7]。

SMMR/SSM/I 数据虽然时间序列较长,但是分辨率只有 25 km,难以细致地研究 CAA 错综分布、宽度有限的水道中海冰的分布变化特征。因此,采用高分辨率遥感数据进行 CAA 冰情研究是十分必要的。Kwok 等和 Agnew 等分别采用高分辨率 RADARSAT 数据和增强图像的 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System)数据分析研究了北冰洋和 CAA 之间的海冰流量^[8,9]。Howell 等则采用分辨率为 8—10 km 的 SeaWinds/QuikSCAT 的数据,对 2000—2007 年间 CAA 的当年冰融冰日、结冰日以及融冰期进行了估计。他们的研究表明,西北航道北路的帕里水道东部及南路的 AG 和

CG 区域融冰最早, 结冰最晚; 而伊丽莎白女王群岛 (QEI, Queen Elizabeth Island)、西北航道北路的 MCS 和 VMS 处情况相反。整个 CAA 海区平均结冰日为第 266 天, 平均融冰日为第 150 天, 平均融冰期为 116 天^[10]。

本文利用分辨率为 6.25 km 的 AMSR-E 海冰密集度遥感反演数据从几个不同的侧面更细致地研究了 2002—2008 年北极西北航道的海冰变化特征。以上研究为我们提供了认识西北航道海冰变化的基础, 但是近年北极海冰加速融化条件下的海冰时空变化细节特征, 特别是影响通航的因素还有待揭示。文章介绍了数据来源及统计方法, 通过对西北航道主要线路海冰密集度、冰障分布、无冰天数以及代表站点的融化期、轻冰期、无冰期的分析, 提取航道上海冰分布和变化的细节特征, 并统计各线路在研究时段的无冰天数和轻冰天数, 作为估计通航可能性的基础参数, 对西北航道开通的背景进行初步的讨论。

1 数据来源及资料处理

本文所使用的数据是德国不莱梅 (Bremen) 大学 PHAROS (PHysical Analysis of Remote Sensing images) 小组利用 AMSR-E 卫星数据反演的日平均海冰密集度产品^[11], 分辨率为 6.25 km, 时间跨度为 2002 年 7 月—2008 年 12 月。

根据研究需要, 分别计算了一年中各格点的无冰天数和轻冰天数, 将两者分别定义为海冰密集度小于 15% 和小于 50% 的总天数。同时利用逐日海冰密集度数据计算了各代表站位的融化期、轻冰期、无冰期。需要注意的是, 这里定义的“融化期”与通常意义下的从开始融冰到密集度达到最小的融冰过程 (一般称“融冰期”) 是两个概念。本文将融化期、轻冰期、无冰期分别定义为: 每年从 1 月 1 日开始统计到 12 月 31 日, 海冰密集度连续 3 天分别小于 90%、50% 和 15% 的第 1 天至最后 1 天之间的时段。

对融冰、轻冰和无冰条件海冰密集度阈值的选取主要基于以下原因: (1) 密集度为 90% 以上的海冰基本上可认为是冰封状况; (2) 轻冰条件只是一个相对的概念, 对不同性能的船只, 影响其通航的海冰密集度量值是不同的。不仅如此, 海冰的冰厚、类型、密度、漂移速度以及海底地形等都会影响船只的通航条件。因此, 这里取 50% 作为轻冰条件, 只是为了对冰情给出一个定量的刻画; (3) 在使用卫星遥感数据判断海冰外缘和冰-水判别时, 通常采用 15% 作为基本判据。

需要说明的是, 根据无冰期和无冰天数的定义, 无冰期内很可能会出现海冰密集度大于 15% 的情况, 同时, 无冰天数也不一定都出现在无冰期之内, 因此, 无冰天数并不等于无冰期内的总天数。

在整个研究时段, 共有 43 d 缺测数据。在进行无冰天数和轻冰天数统计时, 如果出现缺测数据, 则会对统计结果有影响, 此时需要将缺测数据的天数计入无冰天数或轻冰天数之内。在进行时间平均计算时, 缺测数据按无效处理, 只对有效数据进行平均和计算。由于缺测数据不多, 这样处理对计算结果影响不大。

2 结果分析

2.1 西北航道加拿大北极群岛间水道冰情变化基本特征

北冰洋的海冰具有明显的季节性变化,最大海冰覆盖面积出现在 3 月,这时太平洋一侧的海冰外缘线到达白令海,大西洋一侧海冰外缘线到达戴维斯(Davis)海峡以南;5 月份冰外缘区附近开始出现明显的融冰现象,西北航道相关区域中,首先融冰的海区为白令海、楚科奇海、阿蒙森湾、哈德逊海峡北部、巴芬湾东南部和帕里水道东部。融冰过程持续到 9 月份,海冰覆盖面积减至最少;10 月份随着气温降低,海冰又开始增加,冰外缘线逐渐扩展,进入下一个结冰过程。

在多年平均状态下,9 月份在太平洋一侧,白令海峡和楚科奇海大部分区域已无冰;波弗特海南部也基本上无冰或具有很低的海冰密集度;大西洋一侧的巴芬湾已没有海冰覆盖。因此,就 2002—2008 年多年平均情况,对西北航道通航起决定因素的海区是波弗特海东北部(Banks 岛西侧)和 CAA 间水道。下面我们以此区域作为研究海区,针对西北航道开通状况进行冰情变化的分析。

2.1.1 9 月份海冰密集度空间分布和年际变化

首先分析该研究海区冰情变化的基本特征。AMSR-E 卫星遥感资料显示,每年北极海冰覆盖面积最小、融化程度最高的时间基本上出现在 9 月,图 2 给出了研究海区 2002—2008 年 9 月份月平均海冰密集度的空间分布。

在多年平均状态下(图 2 的最上方左图),9 月份班克斯岛西侧海区平行 CAA 西岸方向有自北向南伸展的海冰冰舌;帕里水道西端的 MCS 和 VMS 的海冰密集度达到 60%—80%,东部密集度基本为 0;帕里水道以北伊丽莎白女王群岛(QEI)的大部分水道海冰密集度维持在 85%以上;维多利亚岛东侧 MCC 水道的海冰密集度为 40%—60%;威尔士岛南侧的 FS 和 VS 附近海冰密集度为 30%左右;CAA 南部其他大部分区域无冰或密集度很低。

从图 2 可以清楚地看出,研究海区 9 月份海冰的年际变化整体上体现为:在 2002—2004 年海冰密集度呈增加趋势;2005 年比 2004 年冰情减轻,主要体现为帕里水道的东部无冰区域明显向西扩展,但 MCC 的海冰密集度还比较高;2006 年研究海区冰情明显减轻,CAA 南部和东部水道完全开通;2007 年冰情达到研究时段的最轻,整个 CAA 的 9 月平均密集度除北路的 VMS 区域外基本为 0;2008 年的冰情比 2007 略重,但比 2006 年轻,CAA 南部和东部仍为无冰状况,只是从 Byam-Martin Channel (BMC) 流出的海冰横跨帕里水道,使得西北航道北路不像 2007 年那样畅通,但月平均意义下的海冰密集度不为 0 并不代表该年份帕里水道没有短暂的通航。

从研究区域海冰空间分布看,北路帕里水道的冰情体现出明显东轻西重的特征。在康沃利斯(Cornwallis)岛以东区域,2005—2008 年完全为开阔水域,2002—2004 年的海冰密集度也明显较 Cornwallis 岛以西区域小得多。这种分布一方面受到由哈得逊湾流入该海峡东部的大西洋暖水的影响;另一方面,从海峡西端的 MCS 和北方 QEI 间水道有漂移到帕里水道的来自北冰洋的流冰和离岸的固定冰^[9]。与气温南暖北冷的分布不同,除

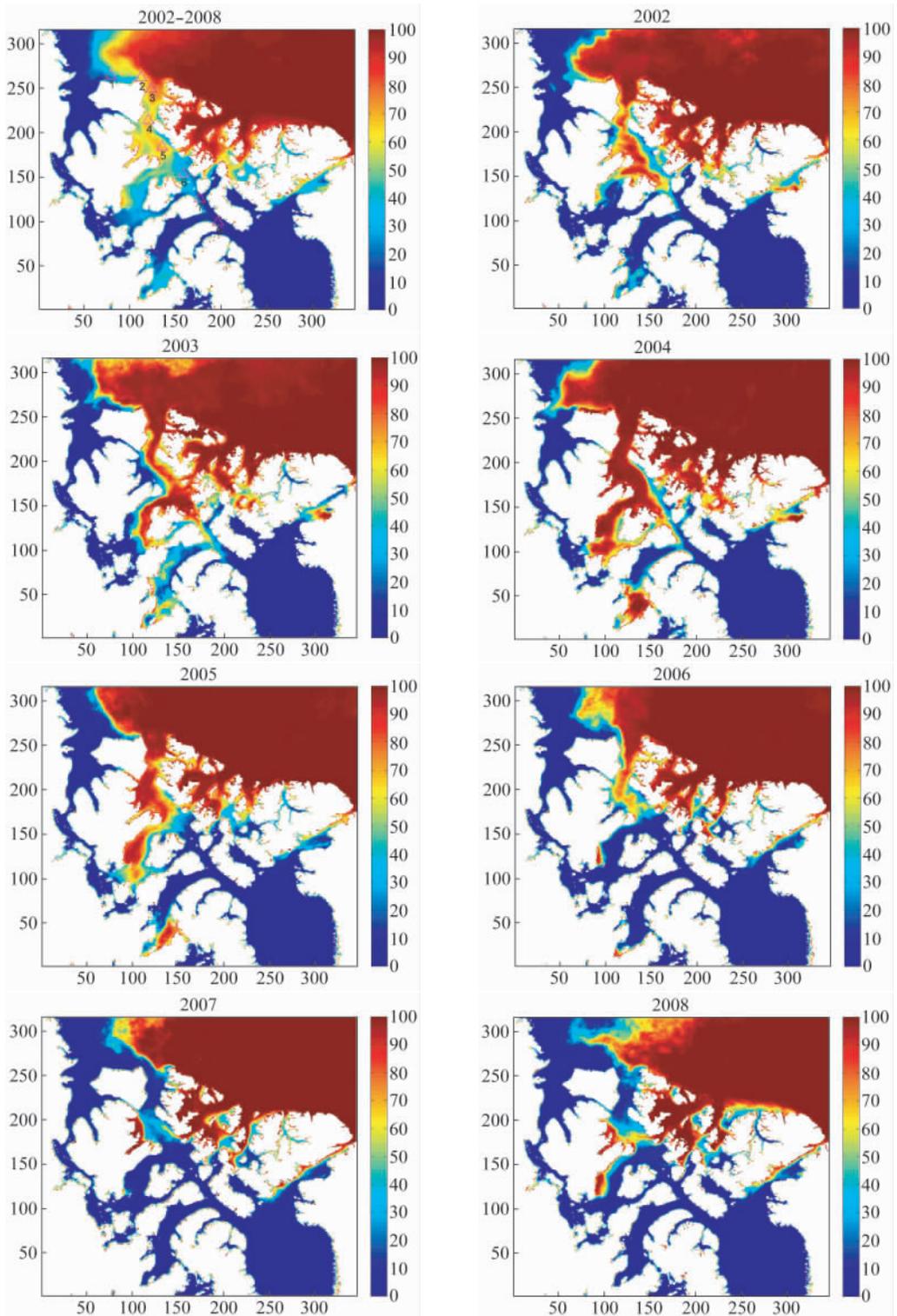


图 2 2002—2008 年研究海区 9 月份月平均海冰密集度

Fig. 2. Mean sea ice concentration in study area in September during 2002—2008

2003 年,其他年份的 9 月帕里水道均为北部较南部冰轻。加拿大 Bedford 海洋研究所自 1998 年开始,就在巴罗(Barrow)海峡进行观测^[2]。表层流速的分析显示,夏季海峡北部的表层流由东向西流动,南部则基本全年由西向东流动,这可以很大程度地解释帕里水道南北向的海冰分布。西北航道南路位于 CAA 最南端的流段基本上不成为通航的障碍,联接该流段和北路线路的各条水道基本呈东西轻、中间重的冰情分布,其中冰情最重的是 MCC 水道;其次是 PS;再次是 PWS;冰情最轻的是东边的 PRI。加拿大 C30 计划取 PRI 线路作为研究对象的主要原因就是基于它良好的通航性。

2.1.2 海冰无冰天数及全年冰障的分布

9 月份月平均海冰分布体现了每年海冰最轻时段的冰情状况,有助于了解可能通航的程度和线路。本节将通过统计和分析研究区域无冰天数来了解通航的可能时段,同时突显航道上冰障(指由于海冰的存在使航道受阻的现象,如果发生在较狭窄的水道中,也称冰堵)的分布。

由于数据从 2002 年 7 月开始,这里只统计了 2003—2008 年的无冰天数。由图 3 可见,受北方水域冰间湖(NWP, North Water Polynya)和 Cape Bathurst Polynya(CBP)(位置见图 1)的影响,巴芬湾北部和阿蒙森湾的无冰天数较多,前者一般在 160d 以上,其中 2005 年最少,2006 年最多;后者具有较强的年际变化,2003—2005 年无冰天数最大值出现在阿蒙森湾口,为 120 d 以上,湾内部只有 80—100 d,而 2006—2008 年无冰天数最大值则出现在湾内部,超过 160 d,这种变化与 CBP 的年际变化有很大关系。该冰间湖实际上是环北冰洋在流冰和沿岸固定冰之间的水道(CFL, Circumpolar Flaw Lead)扩大而成的。一般于 4 月在波弗特海东南部开始形成,受暖水涌升和局地东向流动的影响,不断扩大,并伸展到阿蒙森湾^[3],该冰间湖几乎每年都出现,且具有较大的年际变化^[4]。

受大西洋暖流的影响,帕里水道东端无冰天数也较多。2006 年无冰天数最多,达 160 d 以上,2004 年和 2008 年无冰天数最少,为 120 d 左右;帕里水道西部在 2003—2006 年基本是冰封状态,2007 年无冰天数为 30—60 d,2008 年减少,VMS 存在无冰天数不足 20 d 的区域。西北航道南路阿蒙森湾以东的东西向流段也达到 60 d 以上的无冰天数。与海冰密集度分布相对应,自西向东联接南路和北路线路的大致南北向的各水道中,PWS 南部无冰天数为 80—120 d,北部无冰天数较少,受数据分辨率限制不便分析;MCC 在 2003—2005 年基本是冰封状态,2006—2008 年无冰天数为 30—70 d;PS 在 2003—2005 年无冰天数为 20 d 左右,2006—2008 年无冰天数为 80 d 左右;PRI 北部受从帕里水道东端进入的大西洋暖流影响,无冰天数较多,达到 80—120 d,南部无冰天数较少,但比 PS 多,2003—2005 年无冰天数为 20—60 d,2006—2008 年无冰天数为 60—100 d。

图 3 中白色表示无冰天数为 0 的区域,如果白色区域出现在航道上,就表示该区域全年都有冰障存在。Falkingham 等^[5]曾给出了 2002 年之前西北航道的几个冰障的位置,第 1 个位于 MCS 入口处,第 2 个位于 VMS,第 3 个位于威尔士王子岛和威廉国王岛之间;还有 1 个位于波弗特海中南部,美加交界线附近;我们的研究将揭示 2002 年之后这些冰障的变化情况。

如图 3 所示,2003 年冰障出现在 Banks 岛西侧、帕里水道西部的 MCS 和 VMS 及威尔

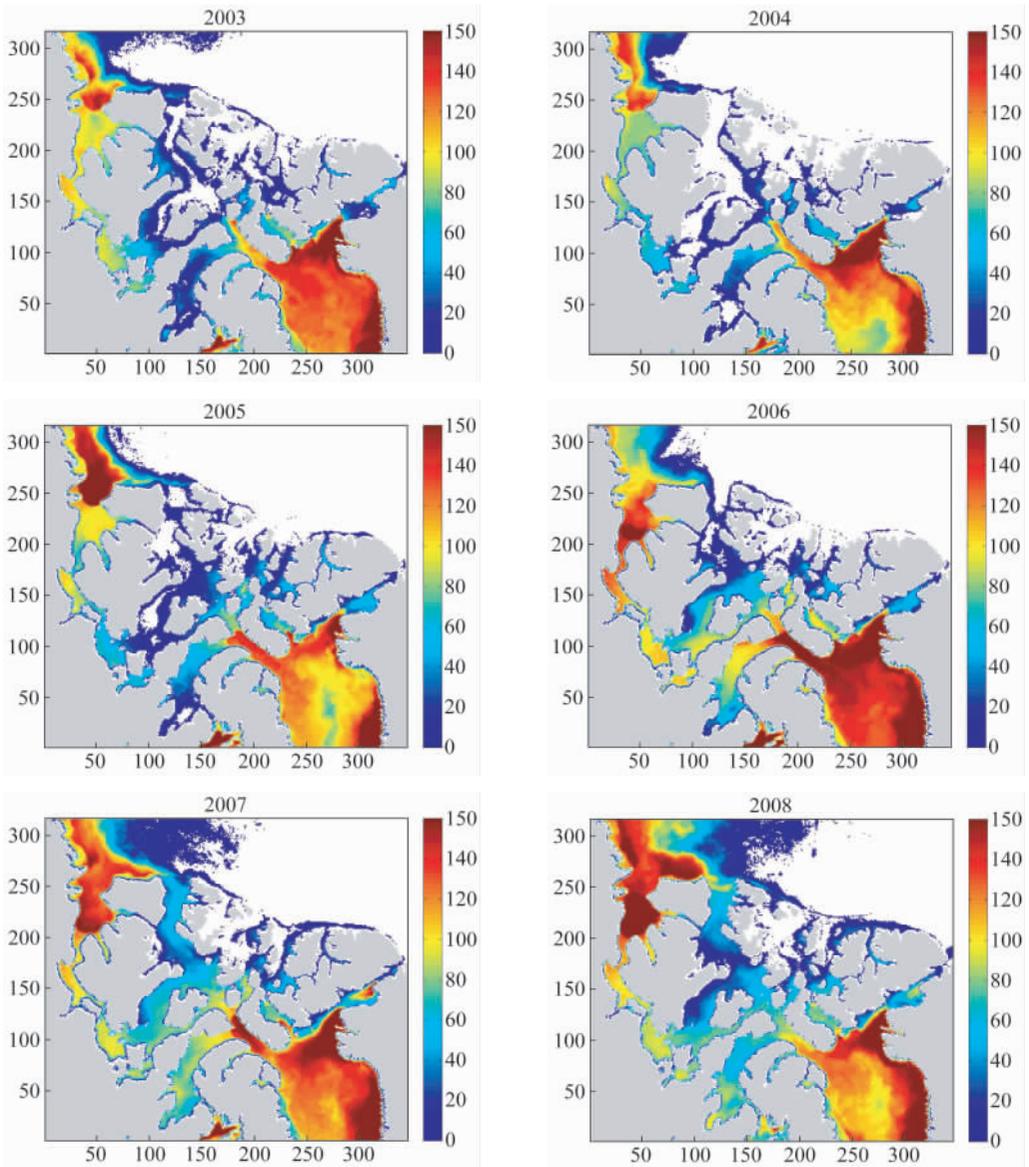


图 3 2003—2008 年研究海区无冰天数

Fig. 3. Ice-free days in study area during 2003—2008

士王子岛西侧的 MCC 经 PS 和 PRI 的线路不存在全年冰障; 2004 年在以上区域冰障面积扩大, 同时威尔士王子岛和威廉国王岛之间也出现冰障, 这使得所有的线路都不能通航; 2005 年冰障范围缩小, 但还有小范围的全年冰障, 对通航仍然不利; 2006 年全年冰障只存在于帕里水道西部的 MCS 和 VMS 南路各线路无冰天数都较多, 通航无阻; 2007 和 2008 年北路和南路都不存在全年冰障。因此 Falkingham 等^[5]提出前 3 个冰障在 2003—2008 年仍然是决定西北航道能否通航的关键地段, 其中帕里水道西部的冰障决定北路的通航, 位于威尔士王子岛和威廉国王岛之间的冰障对南路 PS 和 PRI 线路的通航至关重要。另

外, Banks 岛西部的流冰有时也会成为通航的障碍。而位于波弗特海中南部的冰障在我们研究时段已不存在。

需要注意的是, 即使某个年份、某条线路不存在全年冰障, 也并不说明这条线路一定能够通航, 特别是在无冰天数很小的情况下。只有当整条线路都在相同的时段处于无冰或海冰密集度和厚度很小的状况, 才能达到通航的要求。为此, 在下一节中将分别对西北航道北路和南路的海冰变化进行分析, 进一步确定影响通航的冰障流段, 并提供航道中海冰融化的细节。

2.2 西北航道北路和南路的冰障及海冰融化细节

2.2.1 西北航道北路

沿着西北航道北路从波弗特海东南沿 Banks 西侧, 进入帕里水道西部的 MCS, 经 VMS、BS 和 LS 自西向东密集地选取 60 个站点, 见图 4 中蓝点, 这里将这组站点命名为 n1—n60。由图 2 可知, 夏季大部分情况下 VMS 南部较北部冰情严重。因此, 为了最大限度地揭示通航的可能性, 在这一段没有将站点选在水道中轴线上, 而是略向北偏。

图 5 给出了沿水道各站点的逐年日平均海冰密集度, 横轴为站点位置, 纵轴为时间(天)。由图 5 可以清楚地得到各年冰障发生位置和持续时间的信息。2003 和 2004 年冰障较严重, 2005—2007 年不断减轻。2003 年 Cornwallis 岛(n38 站附近) 以西的帕里水道几乎都为全年冰障; 2004 年 Banks 岛西侧流段除了 6 月份和 9 月底的短暂时段, 几乎为全年冰障, 帕里水道西部的冰障也比 2003 年更严重, 但 9 月份从 Cornwallis 岛冰障明显向西融化, 这种趋势一直持续到 2007 年帕里水道冰障的完全融化; 2005 年流段东西两侧冰障维持时间比前两年缩短, Banks 岛西侧海冰融化较早, 9 月份冰障发生位置缩小为 n3—n30 之间; 2006 年 9 月份冰障发生位置进一步缩小, 位于 n9 和 n26 之间; 2007 年该线路航道开通; 2008 年虽然没有全年冰障存在(图 3), 但正如图 2 分析所述, 夏季在该流段海冰完全融化后, 从 BMC 流入的海冰自北向南横跨帕里水道, 成为新的冰障。

我们通常认为, 受由巴芬湾进入帕里水道的大西洋暖水影响, 海冰的融化是从水道东部开始逐渐向西进行的, 但图 5 显示帕里水道海冰的融化并不完全是由东向西进行的, 尽管各年的融化过程不同, 在研究时段海冰融化具有一个共同的特点, 即融化是从巴罗海峡(BS) 东部和 Lancaster Sound(LS) 西部开始的。开始融化的时间(一般在第 50—第 150 天) 和具体位置(n41—n47 站) 都具有较大的年际差异, 其中 2003 和 2007 年融化较早, 2008 年融化最晚; 2003 和 2004 年起始融化的位置在 Cornwallis 岛(n41 站附近); 2007 年起始融化的位置略偏东, 在 n44 站附近; 2005 和 2006 年则是从 n46 站开始的。

从图 5 我们还发现, 海冰开始大面积融化之前, 在这些最先融化的位置附近, 冬季和

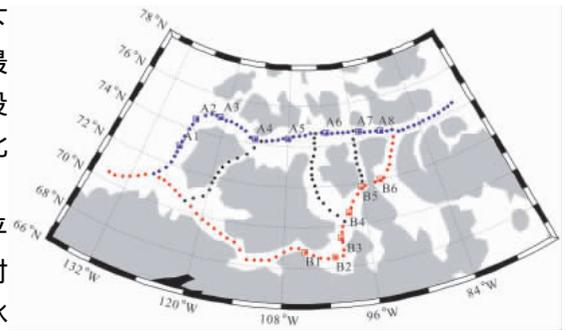


图 4 西北航道南路和北路及代表站点

Fig. 4. Positions of representative stations in north and south route of Northwest Passage

春季都存在海冰密集度的低值区。根据 Barber 和 Massom 的综述^[13], 上述 n41—n47 站附近存在一个名为 Lancaster Sound 的冰间湖。另外, 在海冰大面积融化之前, 对应 Barber 和 Massom^[13]分析中的 VMS 冰间湖位置(n20—n34 附近) 和 MCS 入口处的 CFL(n12—n18 附近) 也存在海冰密集度的低值区。

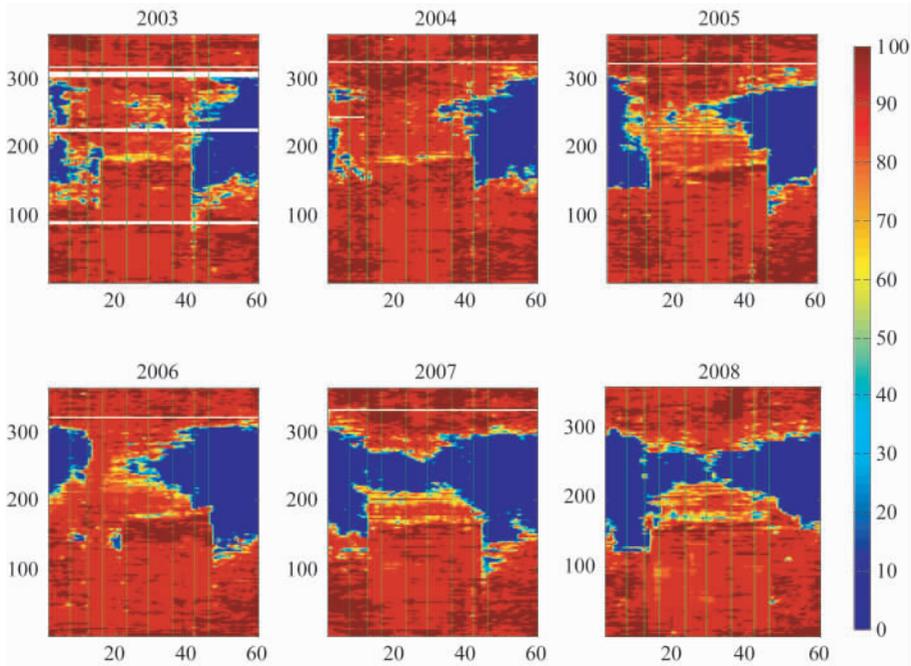


图 5 2003—2008 年西北航道北路逐日海冰密集度时空分布

Fig. 5. Daily sea ice concentration temporal and spatial distribution of north route of Northwest Passage during 2003—2008

2.2.2 西北航道南路

在西北航道南路的主要线路中, 从 AG 经 CG、QMG、VS、FS 和 PRI, 最后在 LS 与北路汇合的这条线路海冰冰情最轻, 通航可能性最大。沿线路自西向东选取了 57 个站点, 称为 s1—s57 站, 位置见图 4 中红点。图 6 给出了沿该线路各站点的逐年日平均海冰密集度。由图 6 可知, 南路冰障整体来说比北路轻很多。2003—2005 年存在冰障, 其中以 2004 年最重, 冰障位置主要出现在 s38—s47 站, 以及 VS 和 FS 附近, 2006—2008 年冰障消失。

整条线路最先融化的区域有两处, 一处是 s57 站, 即 PRI 和 LS 的交界处, 另一处在阿蒙森湾(AG) 内 s12—s19 站之间, 位置具有明显的年际变化, 其中 2003—2005 年靠近湾口(偏西), 2006—2008 年靠近湾内(偏东)。2003 和 2008 年在 AG 处最早开始融化, 2006 年则在 s57 站附近最早开始融化, 其他年份两处融化时间相近。最先融化的时间基本在第 110—第 140 天之间。从图 6 还可以清楚地看到, AG 处在海冰开始大面积融化之前也存在海冰密集度的低值区, 对应着 CBP 冰间湖的位置。

南路的其他三条线路(图 6 中的黑点) 中, 冰障最严重的是 MCC 线路, 2004 年几乎整

个 MCC 水道都为冰障,只有 2006 和 2007 年水道开通,整个水道融化的时间几乎同步;其次是 PWS 线路,但由于水道较窄,受数据空间分辨率限制,不便详细分析冰障和海冰融化情况;PS 线路冰障较轻,但比 PRI 线路冰障重。PS 线路也是 2004 年冰障最严重,VS 以南的 FS 至 PS 几乎都被海冰堵住,2005 年冰障范围主要集中在 VS 路段,PS 路段有短暂开通,2006—2008 冰障消失,整个 PS 水道融化的时间也几乎同步。

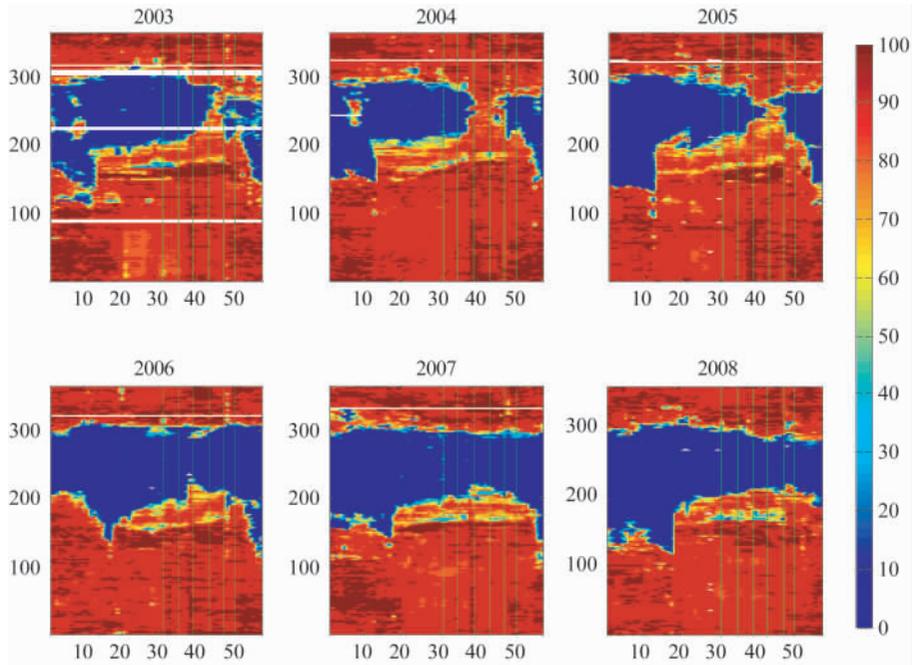


图 6 2003—2008 年西北航道南路逐日海冰密集度时空分布

Fig. 6. Daily sea ice concentration temporal and spatial distribution of south route of Northwest Passage during 2003—2008

由以上分析可以直观地得到西北航道各条线路的冰障位置及海冰融化的信息,由此可分析出各线路冰情的轻重。同时,无论是北路还是南路,海冰都是从有冰间湖和 CFL 的地方开始融化的。可以看出,冰间湖和 CFL 的分布和变化与西北航道海冰融化的年际变化有着一定的联系,这必然对通航的可能性起重要作用。有关冰间湖对海冰融化影响的细节问题我们将另文描述。

2.3 多年平均意义下冰障流段代表站点的海冰季节性变化

2.3.1 西北航道北路

根据以上确定的西北航道冰障位置,自西向东选取 8 个代表站位,分别位于 n7, n12, n16, n23, n29, n36, n42 和 n46,位置见图 4 蓝色方框,重新编号为 A1—A8 站。选择的站位力求能够代表冰障流段附近海区海冰季节性变化的一般特点,并能够表示海冰冰情的不同空间分布。

首先,对 2003—2008 年代表站位的海冰密集度进行多年平均,得到各站的日平均海冰密集度。由图 7 可见,西北航道北路冰障流段上各代表站点的海冰密集度均体现了明

显的季节性变化,同时也显示出冰情轻重程度在不同空间位置上具有很大的差别。为了定量地揭示海冰密集度季节变化的演变过程和空间差异,将各站的融化期、轻冰期和无冰期的统计结果列于表 1 中。为了叙述的统一,均采用一年中的第几天进行分析。

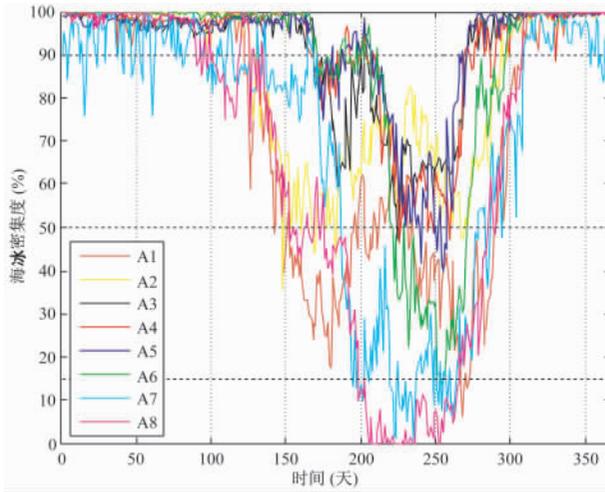


图 7 西北航道北路冰障流段代表站点多年平均逐日海冰密集度

Fig. 7. Multi-year-mean daily sea ice concentration along representative stations of ice choke points in north route of Northwest Passage

由图 7 和表 1 可知,多年平均意义下,位于帕里水道西部 MCS 和 VMS 的 A3—A5 站冰情最重,其中 A5 融化期最短,只有 98 d,且只有 4 d 的轻冰期,没有无冰期;A3 和 A4 两站既没有无冰期,也没有轻冰期。位于帕里水道东部的 A8 站冰情最轻,具有较长的轻冰期(130 d)和最长的无冰期(67 d),融冰较早(第 102 d),结冰较晚(第 306 d);但是融化期最长的站却是 A7 站,可以看出,该站的结冰日期与 A8 站相近,但是由于该站附近冬、春季经常出现 Lancaster 冰间湖,使得海冰密集度在第 15 d 就出现低于 90% 的情况;A1 和 A2 两站受到 CFL 的影响,融冰也比较早,开始融冰的时间分别为第 123 天和第 126 天。各站融冰期的差异主要体现在融冰开始时间(最大相差 157 d),而海冰开始冻结的时间各站相差不大(最大相差 43 d)。

表 1 西北航道北路各代表站点的多年平均海冰季节演变

Table 1. Multi-year-mean sea ice seasonal evolution in representative stations in north route of Northwest Passage

站点	融化期	轻冰期	无冰期
A1(n7)	123—307 (185)	148—289 (142)	267—269 (3)
A2(n12)	126—293 (168)	168—269 (102)	/
A3(n16)	169—270 (102)	/	/
A4(n23)	169—289 (121)	/	/
A5(n29)	168—265 (98)	254—257 (4)	/
A6(n36)	172—296 (125)	222—270 (49)	/
A7(n42)	15—308 (294)	188—278 (91)	199—263 (65)
A8(n46)	102—306 (205)	156—285 (130)	199—265 (67)

表中数字 i1—i2 均表示一年当中的第几天, (j) 表示天数

从图 7 还可看出,各站的海冰变化有一个共同的特点,即海冰在春季开始融化后,并不是一直融化下去,而是在达到一个低值后有所回升,随后才达到全年的最低值。其中 A1 和 A2 站的海冰密集度两个低值间隔时间较长; A3—A6 站情况比较接近,基本在第 160 天—第 190 天达到冰密集度的一个低值,之后回升,随后在第 220 天—第 260 天达到全年的最低值; A7 站由于受冰间湖的影响,情况比较特殊,大面积融化出现在第 180 d 左右,而且融化非常迅速,在第 200 d 左右就达到了一个新的低值,但在达到全年的最低值(第 220 天—第 240 天)之前,又经历了一次回升; A8 站达到第一个的低值的时间较其他站早,而且回升特点不明显。这是由于从 6 月份开始,随着气温的转暖,抑制了一年冰的产生,当年海冰逐渐融化,使得局地海冰分布不再密集,而在大气环流和局地风影响下,来自北面 QEI 松动离岸的海冰和班克斯岛西侧的流冰会更容易进入北路航道,造成了局地的海冰密集度增加,之后的海冰迅速融化直至达到全年最小值则主要是由于暖水入侵以及局地气温升高这双重原因造成的。在不同地点,漂流而来的海冰来自不同的区域。A1 和 A2 站主要受班克斯岛西部的流冰的影响,而 A3—A7 站则受通过 QEI 水道的流冰的影响, A8 站几乎不受北方流冰的影响。因此,流冰来源不同是造成各站位海冰季节变化的细节特征有所差别的根本原因。

各站位多年平均海冰密集度季节变化过程实际上也体现了各站冰情轻重的差别,从一年中海冰最轻时段的冰情看,由重至轻排序分别为 A3, A4, A5, A2, A1, A6, A7 和 A8 站; 而根据海冰融化期的长短,冰情由重至轻分别为 A5, A3, A4, A6, A2, A1, A8 和 A7 站。

2.3.2 西北航道南路

在西北航道南路 PRI 线路冰障位置附近,自南向北选取 6 个代表站位,分别位于 s31, s35, s39, s43, s47 和 s50,位置见图 4 红色方框,重新编号为 B1—B6 站。图 8 给出了 2003—2008 年各代表站点的日平均海冰密集度。表 2 统计了各站的融化期、轻冰期和无冰期,统计方法与表 1 相同。

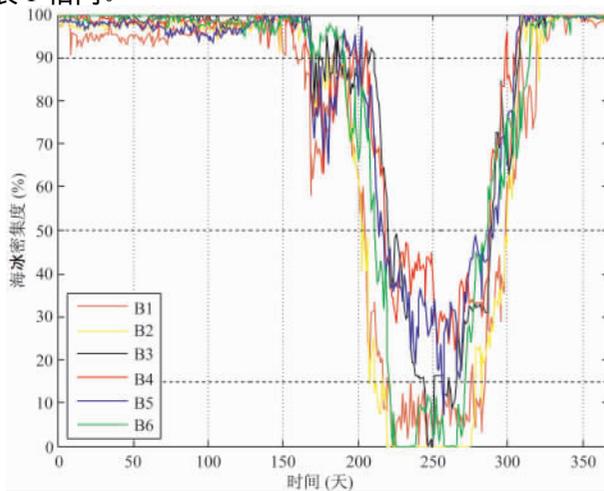


图 8 西北航道南路冰障流段代表站点多年平均逐日海冰密集度

Fig. 8. Multi-year-mean daily sea ice concentration along representative stations of ice choke points in south route of Northwest Passage

与北路不同的是,西北航道南路冰障流段上各代表站点的海冰密集度季节性变化具有较强的一致性。由图 8 和表 2 可知,多年平均意义下,6 个代表站的融化期、轻冰期相近,其中位于 VS 和 FS 的 B3—B5 站冰情最重,其中位于 FS 的 B4 站和 B5 站都没有无冰期,轻冰期都为 71 d,融化期分别为 136 和 137 d;位于 VS 的 B3 站无冰期为 21 d,但轻冰期和融化期分别只有 68 d 和 132 d,是各站中最短的。从图 8 可以看出,各站海冰密集度的季节变化也体现出第 160 天—第 180 天的第一次低值,第 180 天—第 210 天的回升,以及之后的迅速融化,成因与北路相同,只是南路的冰障流段主要受来自 MCC 和 PS 水道的流冰影响。

表 2 西北航道南路各代表站点的多年平均海冰季节演变

Table 2. Multi-year-mean sea ice seasonal evolution in representative stations in south route of Northwest Passage

站位	融化期	轻冰期	无冰期
B1(s31)	159—318 (160)	205—297 (93)	217—285 (69)
B2(s35)	168—305 (138)	205—299 (95)	213—277 (65)
B3(s39)	175—306 (132)	221—288 (68)	244—264 (21)
B4(s43)	168—303 (136)	218—288 (71)	/
B5(s47)	169—305 (137)	217—287 (71)	/
B6(s50)	192—314 (123)	212—285 (74)	221—271 (51)

注:表中数字说明与表 1 相同

从一年中海冰最轻时段的冰情看,由重至轻排序分别为 B4、B5、B3、B1、B6 和 B2 站;由于各站海冰融化期和轻冰期的长短比较相近,所以这里从无冰期角度看各站差异,冰情由重至轻分别为 B4、B5、B3、B6、B2 和 B1 站。

2.4 冰障流段代表站点的海冰无冰天数和轻冰天数

从上述海冰密集度季节性变化的分析中,我们可以得到多年平均状况下各个代表站点的冰期要素特征,然而对通航问题我们更关心的是各站点每一年的无冰期和轻冰期。由于西北航道沿线冰情复杂,常出现 CFL 和冰间湖,因此,对于逐年的资料,有的站点在一年当中可能有不只一个无冰期(轻冰期);而对一些冰情较重的站点,无冰(轻冰)天数较少且很不连续,这些都给判断无冰期和轻冰期带来困难。因此,这里我们采用比较简单的办法(详见第 1 节),统计每年出现的无冰天数和轻冰天数,它们可以作为估计通航可能性的重要参量之一。

2.4.1 西北航道北路

图 9 给出了 2003—2008 年西北航道北路各代表站点的无冰天数、轻冰天数以及两者之和的统计结果。从图 9 中除了能够了解各站之间的差异,还可以得到这些冰期要素的年际变化信息。

根据无冰天数的多少,8 个代表站可分为 4 组,第 1 组是 A4、A5、A6 三站,无冰天数不足 3 个月,且都存在无冰天数为 0 的年份,无冰天数最多的年份都出现在 2007 年;第 2 组是 A1、A2、A3 站,虽然这三个站的无冰天数差别较大(A1 站最多,A3 站最少),但有一个共同的特点,即无冰天数最多的年份发生在 2008 年;第 3 组为 A7 站,情况比较特殊,无冰天数在 40—110 d 之间,最多的年份发生在 2006 年;除 2008 年外,A8 站(第 4 组)的无冰天数在各站中最多,基本在 75—160 d 之间,无冰天数最多的年份也是 2007 年。各站

的轻冰天数多数情况小于 20 d,但冰障流段的两端,如 A1、A2、A7 和 A8 都存在轻冰天数多于 20 d 的年份,其中 A7 站 2003 年轻冰天数最多,为 69 d。

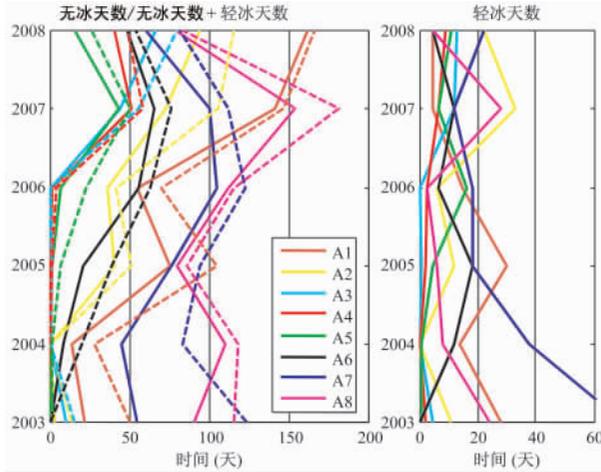


图 9 西北航道北路冰障流段代表站点无冰天数或轻冰天数. 左图中实线为无冰天数,虚线为无冰天数 + 轻冰天数

Fig. 9. Ice-free days and slight-ice days in representative stations of ice choke points in north route of Northwest Passage. In the left figure, solid is ice-free days and dash is ice-free days plus slight-ice days

表 3 中“平均 1”与图 9 对应,是对每一年进行无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数统计,然后求多年平均;而“平均 2”对应图 7,是先求各站的多年平均逐日日平均冰密集度,再进行各站无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数的计算。从数值上看,两种统计方法得到的无冰天数差别较大,“平均 1”较“平均 2”明显大,在考虑了轻冰天数之后,各站两种统计方法得到的无冰天数与轻冰天数之和在冰障流段外端位置明显接近了。实际上,两种算法从不同侧面体现了各站的冰情。

表 3 西北航道北路冰障流段各代表站无冰天数或无冰天数 + 轻冰天数的统计表. 平均: 天; 变幅: 天; 趋势: 天/年

Table 3. Statistics of ice-free days and ice-free + slight-ice days in representative stations of ice-blocking area in north route of Northwest Passage. average and variation amplitude: day; trend: day/year

要素	年份	A1 站	A2 站	A3 站	A4 站	A5 站	A6 站	A7 站	A8 站
无冰天数	平均 1	83.7	42.5	20.7	15.3	11.2	33.2	74.5	105.3
	平均 2	5	0	0	0	0	1	32	66
	变幅	46.6	27.3	23.2	20.1	11.9	23.5	19.2	20.0
	趋势	27.6*	18.0*	11.7*	10.1*	6.0	12.9*	5.4	2.1
无冰天数 + 轻冰天数	平均 1	99.8	56.5	25.8	19.2	18.0	42.2	104.0	117.7
	平均 2	116	13	1	4	8	48	94	126
	变幅	42.2	36.3	28.1	22.9	15.0	22.5	17.7	22.7
	趋势	23.1*	22.3*	13.8*	11.7*	8.2*	13.3*	-3.5	1.0

注: 趋势分析中* 表示通过 90% 置信显著性检验

如前所述,代表站点的无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数年际变化的趋势并不一致(图 9),不是所有的站点均在 2007 年达到最大值,各站也不是都具有相同的线性趋势。为了更直观地体现年际变化,在表 3 中我们还计算了各要素的年际平均变幅和线性拟合变化

趋势。其中年际平均变幅为每年的无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数相对于多年平均值的距平的绝对值之平均值。

无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数年际平均变幅最大的两个站是位于班克斯岛西侧的 A1 和 A2 站, 这里的海冰受整个北极环流系统年际变化的直接影响, 在一定程度上反映了从更高纬区域漂移过来的海冰量的多少; 年际平均变幅最小的是 A5 站, 即使在冰情较轻的年份, 来自北方的 QEI 群岛水道间海冰从 Byam-Martin 水道注入, 能够不断补充该站的海冰冰量, 使得无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数的增加不会太多。存在 CFL 和冰间湖的 A3、A4 和 A6 站附近无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数年际平均变幅也比较显著。

除 A7 站外, 其他各站的无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数的变化趋势都是增加的, 而且大部分通过了 90% 置信的显著性检验。总的规律是西部增加较快, 东部增加较慢。A1 站的无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数的年变率分别达到 27.6 d/a 和 23.1 d/a。

2.4.2 西北航道南路

图 10 给出了 2003—2008 年西北航道南路各代表站点的无冰天数、轻冰天数以及两者之和的统计结果。与北路相比, 南路冰障流段的各代表站年际变化比较一致, 除了 B1 和 B3 站, 其他各站都在 2006 年达到无冰天数最大值, 基本在 60—110 d 之间; 除了 B6 站, 其他各站无冰天数均在 2004 和 2005 年最小。除 B6 站, 各站的轻冰天数均小于 20 d, 年际变化不明显。B1 站无冰天数 + 轻冰天数也在 2006 年达到最大值。总体上, 各站无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数在 2003—2004 年基本是减少趋势(除 B6 站), 2004—2006 年都呈现增加的趋势, 2007 年减少, 2008 年除 B1 站外继续减少。

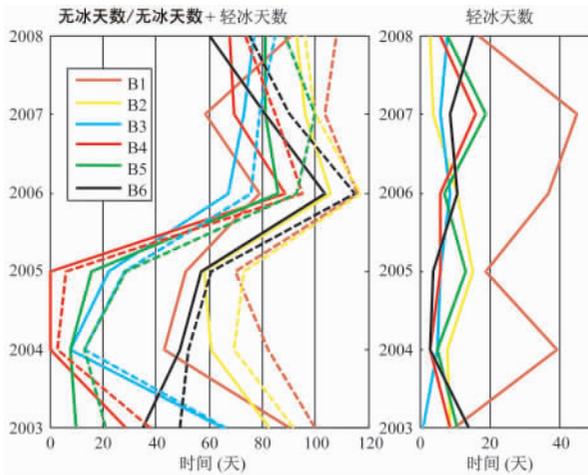


图 10 西北航道南路冰障流段代表站点无冰天数或轻冰天数. 左图中实线为无冰天数, 虚线为无冰天数 + 轻冰天数

Fig. 10. Ice-free days and slight-ice days in representative stations of ice choke points in south route of Northwest Passage. In the left figure, solid is ice-free days and dash is ice-free days plus slight-ice days

表 4 与表 3 相似, 给出了两种统计的无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数的平均值及年际平均变幅和变率。虽然南路各站的平均无冰天数/无冰天数 + 轻冰天数也具有在冰障流

段两端值较大、中间值较小的规律,但各站之间的差异比北路各站小得多。其中无冰天数/无冰天数+轻冰天数在 B4 站最小,这说明该站附近是南路冰障最严重的位置。年际平均变幅最大的站是 B5 和 B4 站,都超过了 30 d。研究时段各站无冰天数/无冰天数+轻冰天数均为增加的趋势,但只有 B5 站超过了置信,年变率分别达到 18.4 d/a 和 19.0 d/a; B4 站的年变率接近置信水平。

表 4 西北航道南路冰障流段各代表站无冰天数和无冰天数+轻冰天数的统计表. 平均: 天; 变幅: 天; 趋势: 天/年

Table 4. Statistics of ice-free days and ice-free + slight-ice days in representative stations of ice-blocking area in south route of Northwest Passage. average and variation amplitude: day; trend: day/year

要素	年份	B1 站	B2 站	B3 站	B4 站	B5 站	B6 站
无冰	平均 1	68.8	82.8	52.0	42.5	47.0	64.3
冰天	平均 2	67	67	13	0	2	51
数	变幅	17.8	15.6	24.7	32.8	35.7	18.8
	趋势	2.3	5.8	8.6	14.0	18.4	7.7
无冰	平均 1	96.7	91.2	57.8	50.2	57.5	73.7
+	平均 2	93	97	68	71	74	74
轻冰	变幅	13.8	13.4	24.9	34.5	36.5	19.7
天数	趋势	4.3	4.5	9.7	14.7	19.0	8.5

可见,西北航道的南路和北路在冰障流段海冰分布和变化方面有一定的统一性,但在很多细节方面也存在明显的差别。基于这些分析,人们更希望从中提取北路或南路整条线路在每年夏季能否开通及开通时间的信息,下面将从无冰天数和轻冰天数出发给出这些统计信息,并初步讨论造成海冰年际变化的气候背景。

3 关于西北航道开通状况的讨论

根据图 5、图 6,可以直观地判断西北航道北路和南路 PRI 线路的各年的开通情况。这里我们忽略横跨航道方向的差异,以图 4 中各站点位置的冰情代表整个航道的冰情,统计每年每条线路上各站点同时满足无冰和轻冰条件的天数,见表 5。统计线路包括: Parry, PRI, PS 和 MCC 线路。后两条线路也是从波弗特海开始至帕里水道的 LS 结束。由于网格数据分辨率不够,这里暂没有分析南路中位于西部的 PWS 线路。

由表 5 可见,2003—2005 年各线路均无同时满足无冰和轻冰条件的情况,即全年都存在冰障的路段;2006 年北路仍存在全年冰障,但南路航道开通, PRI、PS 和 MCC 的无冰天数分别为 34 d、23 d 和 2 d,轻冰天数分别为 63 d、58 d 和 16 d;2007 年是研究时段北路唯一的整个线路同时存在无冰天数的年份,无冰天数和轻冰天数分别为 7 d 和 25 d,南路的 MCC 线路比 2006 年开通状况好, PRI 和 PS 的无冰天数比 2006 年分别少了 7 d 和 5 d,轻冰天数则比 2006 年分别多了 3 d 和 8 d;2008 年北路帕里水道只有 4 d 轻冰天数,无冰天数为 0,南路的 MCC 线路存在全年冰障, PRI 和 PS 的无冰天数为研究时段最多的年份,分别达到 38 d 和 40 d,轻冰天数比 2006 年和 2007 年少。可以看出,各条线路的年际变化具有总体一致性,但仍有各自的变化特点,尤其是 2007 年和 2008 年南路的 PRI 和 PS 的变化与北路的变化是相反的。

相对而言,2007 年西北航道北路帕里水道的开通引起了更为广泛的关注,主要是因

为该线路是通过北冰洋联接太平洋和大西洋的最短航路。根据上述分析, 帕里水道 9 月份的冰量在 2002—2004 年是增加的, 之后快速减少, 在 2007 年达到极小值, 2008 年略有增加。有关研究指出, 2000—2004 年 CAA 内多年冰的增加是由于该区域多年冰的动力输入以及更多的当年冰发展为多年冰两方面原因造成的。而这种多年冰的补充实际上在 2005—2007 年已经停止, 到 2008 年又有增加的趋势^[10]。从图 5 可以清楚地看到 2007 年夏季帕里水道的冰情, 并可估计航道开通的程度。Howell 指出 2007 年是有卫星遥感资料以来观测到的西北航道北路第一次开通^[7], 但 Atkinson 等^[16]的研究表明, 虽然 2007 年整个北极的海冰面积达到最小, 但在 CAA, 保持海冰面积最低记录的却是 1998 年的夏季, 局地气温最高的年份也是 1998 年。

表 5 各线路同时满足无冰或轻冰条件的天数

Table 5. The number of days when every points along the whole routine are ice free or with slight ice

线路	冰况	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
北路	Parry	无冰	0	0	0	7	0	
		轻冰	0	0	0	25	4	
	PRI	无冰	0	0	0	34	27	38
		轻冰	0	0	0	63	66	58
南路	PS	无冰	0	0	0	23	18	40
		轻冰	0	0	0	58	66	56
	MCC	无冰	0	0	0	2	7	0
		轻冰	0	0	0	16	34	0

关于 1998 年 CAA 海域冰情异常轻的成因, Jeffers 等^[17]认为主要是由于该年 9 月 CAA 海域的异常高温, 海面气温距平达 2.5 °C; Kwok 等^[8]则认为大气环流的作用更重要。1998 年 8—9 月的海表面气压 (SLP) 场体现出较强的格陵兰高压, 受此控制, CAA 海区的海冰向北输运, 从而抑制了北冰洋的海冰流入帕里水道。Kwok 等^[8]的分析还显示 1998 年是 1997—2002 期间夏季海冰由 CAA 向北极输送量最大的一年, 而一般年份夏季基本都是北冰洋的海冰输入 CAA; Melling 等^[18]的研究表明, 在帕里水道北边的 Sverdrup 海盆在海冰极少年份 (1998 年) 后的 2—3 a, 从北冰洋输入西北航道的多年冰量会增多。卫星数据也证实, 1998 年之后该海区 9 月份平均海冰面积不断增加, 于 2004 年达到峰值。

关于 2007 年帕里水道北路的开通, Howell 等^[7]认为可以归因于多年冰在过去几年已变薄、异常高的气温 (帕里水道平均气温距平为 2 °C) 加速海冰的融化以及北极大气环流的影响。从图 2 可以看到, 2007 年 9 月帕里水道西部局地海冰基本消融; 从 M'Clure 海峡西侧输入的北冰洋海冰没有像往年夏季一样一直伸入水道, 而是停留在海峡入口处; 但仍然有来自 QEI 的多年冰从 BMC 输入, 并沿帕里水道北岸向西漂流。2007 年 8—9 月 SLP 场的主要特征是波弗特高压异常强 (图略), 这使得从 BMC 流出的多年冰沿等压线向西流动, 而没有横跨帕里水道。

总之, 2007 年西北航道北路的开通主要受局地气温、大气环流以及北冰洋中部和 QEI 群岛间水道冰冻情况的影响, 仅有较高的局地气温 (如 1998 年) 不足以造成西北航道北路的开通。实际上, 我们更关心的还是 2007 年的冰情极轻状况会不会和 1998 年一样, 造成之后几年的冰情偏重的情形, 或是在北极迅速变暖的背景下, 帕里水道的海冰在

2007 年之后的夏季是否会完全融化 造成西北航道北路每年夏季的开通。要回答这些问题还需要进行更深入的机制研究 特别是搞清局地海冰与大气环流背景之间的关系。

4 结论

针对北极近年加速变暖引起的西北航道的开通状况,本文利用 AMSR-E 的 6.25km 分辨率日平均海冰密集度卫星数据较全面地研究了 2002—2008 年北极西北航道的海冰密集度变化特征,揭示了西北航道北路和南路的冰障分布及年际变化,并通过统计冰障流段附近各代表站点的融化期、轻冰期、无冰期、无冰天数、轻冰天数等因子研究了海冰分布和变化的细节特征,加深了对西北航道海冰季节变化和年际变化的了解,提取了各线路的整体无冰天数和轻冰天数,作为衡量西北航道开通程度的指标之一,并对航道开通的成因进行了初步的讨论。主要结论如下:

(1) 西北航道海冰空间分布及成因。帕里水道是西北航道北路的主要流段,以 Cornwallis 岛为界,海冰分布体现出明显的东轻西重特征。大西洋暖水从东部流入水道,导致水道的东部冰情较轻;水道西部即使在局地海冰融化后,也会受到北部伊丽莎白女王群岛(QEI)漂移过来的流冰的影响,冰情较重。同时,在横跨水道方向,海冰呈现出北轻南重的特点。该分布与气温南暖北冷的分布相反,主要是受夏季表层流的影响,暖水自东向西沿水道的北侧流入。因此,影响西北航道北路开通的主要因子是北部 QEI 群岛的流冰输送、局地气温和大西洋暖流的流入。在气候变暖的条件下,与大气环流背景有关的来自北部的流冰量成为北路冰情预报最重要的因素。西北航道南路的海冰冰情总体比北路轻,这也是有人将西北航道开通的希望寄托在南路的原因之一。夏季从阿蒙森湾(AG)到毛德皇后湾(QMG)的加拿大北极群岛(CAA)最南端流段上的海冰几乎全部融化,然而,联接 AG-QMG 流段和北路线路的几条水道在夏季仍具有不同程度的冰冻现象,成为阻碍西北航道南路通航的主要流段。这些流段的海冰总体上呈现东西轻、中间重的分布,其中冰情最轻的是经利金特王子湾(PRI)的流段。

(2) 西北航道海冰密集度的变化。西北航道海冰具有明显的季节变化和年际变化。一年中海冰最轻的月份是 9 月,研究时段 9 月份的海冰密集度变化并不是简单的线性减少,而是叠加了很显著的年际变化,海冰密集度在 2002—2004 年总体呈增加趋势;2005—2007 年冰情减轻,2008 年的冰情比 2007 年略重。这些年际变化可能在夏季成为阻塞航道的关键因素。

(3) 冰障流段的分布和年际变化。冰障流段是西北航道能否通航的关键路段。北路比南路冰障严重,主要冰障流段出现在帕里水道西部,班克斯(Banks)岛西侧也会有由北冰洋中央区域漂流过来的流冰形成冰障。冰障流段代表站点的无冰天数/无冰天数+轻冰天数基本呈增加趋势,帕里水道的西部比东部增加显著;北路班克斯岛西侧的 A1 站年际变幅最大,另外存在 CFL 和冰间湖之处也是年际变化较明显的区域。南路的 PRI 和皮尔海峡(PS)线路的主要冰障流段出现在维多利亚海峡(VS)和富兰克林海峡(FS)之间。虽然南路冰障流段代表站点的无冰天数/无冰天数+轻冰天数增加趋势不如北路明显,但 2006—2008 年 PRI 和 PS 两条线路都有不同程度的开通时段,其中 PRI 整条线路同时达

到无冰的天数为 27—38 d, PS 线路为 18—40 d; MCC 线路在 2006 年和 2007 年也有短暂的整条线路同时出现无冰的状况。总之, 各线路冰障流段存在的时间呈减小趋势, 整条线路无冰天数/轻冰天数呈增加趋势。北路增加趋势更为明显。本文提出的整条线路无冰天数/轻冰天数是能够较好地体现西北航道通航程度的指标之一。

(4) 未来西北航道通航可能性。如果气候持续变暖, 那么西北航道在未来开通的可能性会不断增加, 南路开通的可能性更大。北路开通的机制还没有完全清楚, 但至少需要有高的局地气温, 同时配合能够阻碍北部群岛间海冰流入帕里水道的大气环流背景。

另外, 我们的研究发现, 帕里水道中的海冰融化并不是从东部开始, 而是从水道西端 CFL 处和 LS 冰间湖处开始的; 南路的海冰融化也具有类似的特点。这说明冬季和春季存在的冰间湖和 CFL 的产生和发展会在一定程度上影响到整个航路的融冰开始时间, 因此针对航道通航问题, 进一步深入研究 CFL 和冰间湖与海冰融化之间的关系是十分必要的。

致谢 本文使用的 AMSR-E 遥感数据来自德国不莱梅大学。图 1 由王维波协助绘制, 特此感谢。

参考文献

- 1 郭培清等. 北极航道的国际问题研究, 北京: 海洋出版社, 2009.
- 2 Wilson K J, Kalkingham J, Melling H and de Abreu R A. Shipping in the Canadian Arctic: Other possible climate change scenarios, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2004). Anchorage, Alaska, 2004, Sept 20—24.
- 3 Stewart E J, Howell S E L, Draper D, Yackel J and Tivy A. Sea ice in Canada's Arctic: Implications for cruise tourism. *Arctic*, 2007, 60(4): 370—380.
- 4 Pharand D. The Arctic waters and the Northwest Passage: A final revisit. *Ocean Development and International Law*, 2007, 38(1—2): 3—18.
- 5 Sou T and Flato G. Sea Ice in the Canadian Arctic Archipelago: Modeling the Past (1950—2004) and the Future (2041—2060). *J Clim*, 2009, 22: 2181—2198.
- 6 Howell S E L and Yackel J J. A vessel transit assessment of sea-ice variability in the Western Arctic, 1969—2002: implications for ship navigation. *Can J Rem Sens*, 2004, 3(2): 205—215.
- 7 Howell S E L, Duguay C R and Markus T. Sea ice conditions and melt season duration variability within the Canadian Arctic Archipelago: 1979—2008. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L10502, doi: 10.1029/2009GL037681.
- 8 Kwok R. Exchange of sea ice between the Arctic Ocean and the Canadian Arctic Archipelago. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L16501, doi: 10.1029/2006GL027094.
- 9 Agnew T A, Vandewedge J and Lambe A. Estimating the sea ice area flux across the Canadian Arctic Archipelago using the Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E), unpublished report, 2008.
- 10 Howell S E L, Tivy A, Yackel J J, Else B G T and Duguay C R. Changing sea ice melt parameters in the Canadian Arctic Archipelago: Implications for the future presence of multiyear ice. *J Geophys Res*, 2008, 113: C09030, doi: 10.1029/2008JC004730.
- 11 Spreen G, Kaleschke L and Heygster G. Sea ice remote sensing using AMSR-E 89-GHz channels. *J Geophys Res*, 2008, 113: C02S03, doi: 10.1029/2005JC003384.
- 12 Prinsenberg S J, Hamilton J. Monitoring the volume, freshwater and heat fluxes passing through Lancaster Sound in the Canadian Arctic Archipelago. *Atmosphere-Ocean*, 2005, 43(1): 1—23.

- 13 Barber D G and Massom R A. The role of sea ice in Arctic and Antarctic polynya , Elsevier Oceanography Series 74 , In: Smith W O , Barber D G (eds) Polynyas: Windows to the world. Elsevier , Amsterdam , 2007: 1—54.
- 14 Arrigo K R and Van Dijken G L. Annual cycles of sea ice and phytoplankton in Cape Bathurst polynya , southeastern Beaufort Sea , Canadian Arctic , Geophys Res Lett , 2004 , 31: L08304 , doi: 10. 1029/2003GL018978.
- 15 Falkingham J , Chagnon R and McCourt S. Trends in sea ice in the Canadian Arctic. The 16th International Symposium on Ice , December 2002 , Dunedin , New Zealand. 2002 , 1: 352—359.
- 16 Atkinson D E , et al. Canadian cryospheric response to an anomalous warm summer: A synthesis of the climate change action fund project—The State of the Arctic Cryosphere During the Extreme Warm Summer of 1998. Atmosphere-Ocean , 2006 , 444: 347—375 , doi: 10. 3137/ao. 440403.
- 17 Jeffers S , Agnew T , Alt B , De Abreu R and McCourt S. Investigating the anomalous sea ice conditions in the Canadian High Arctic (Queen Elizabeth Islands) during the summer of 1998. Annals of Glaciology , 2001 , 33: 507—612.
- 18 Melling H. The pack ice of the northern Canadian Archipelago. J Geophys Res , 2002 , 107(C11) : 3181.

FEATURES OF NORTHWEST PASSAGE SEA ICE'S DISTRIBUTION AND VARIATION UNDER ARCTIC RAPIDLY WARMING CONDITION

Su Jie , Xu Dong , Zhao Jinping and Li Xiang

(Key Laboratory of Physical Oceanography of State Education Ministry , Laboratory of Polar Oceanography
and Global Ocean Change (POGOC) , Ocean University of China , Qingdao 266100 , China)

Abstract

In recent years , rapid warming of Arctic has made the Northwest Passage navigation possible . In this paper , we studied the characters of variation of sea ice concentration around the Northwest Passage using AMSR-E sea ice concentration product with the resolution of 6. 25 kilometers from the year 2002 to 2008. By analyzing melting period , ice-free period , slight-ice period , ice-free days , slight-ice days , as well as some details of the variation and distribution of sea ice in main ice choke points along the passages , We got deeper understanding of the main features of sea ice seasonal and interannual variation and distribution , especially the information related to the navigation possibility of Northwest Passage. Our research shows that the south route is easier to navigate than the north route. Sea ice often begins to melt near the place where polynya and Circumpolar Flaw Lead occurs. For each route , the period of ice choke points existing represents a decreasing trend , while ice-free and slight-ice days show a increasing trend. The spatial distribution of sea ice in the research region and its mechanism was discussed and an index which named ice-free or slight-ice days along the whole route was set to estimate navigation extent.

Key words Northwest Passage , sea ice distribution and variation , ice choke points , ice-free days , polynya