

王维波,赵进平. 累积海冰密集度及其在认识北极海冰快速变化的作用[J]. 地球科学进展, 2014, 29(6): 712-722, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.06.0712. [Wang Weibo, Zhao Jinping. Accumulation sea ice concentration and its action on understanding arctic sea ice dramatic change [J]. Advances in Earth Science 2014, 29(6): 712-722, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.06.0712. ]

## 累积海冰密集度及其在认识北极 海冰快速变化的作用\*

王维波, 赵进平

(物理海洋教育部重点实验室, 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

**摘要:**为定量分析北冰洋海冰密集度年际差异,提出并采用累积海冰密集度(ASIC)概念。利用SSMR/SSMI的分辨率为25 km的海冰密集度数据,分别研究了1979—2011年北极海冰在融冰期(4~9月)和结冰期(10月至翌年3月)的变化过程以及2个冰期内ASIC的区域差异。研究发现,在1979—1989年、1989—1999年和1999—2009年期间,融冰期海冰发生明显变化的范围都远远大于结冰期海冰发生明显变化的范围。1998—2010年,融冰期内发生加速融化的海区并没有都出现结冰期冰量减小的现象。在此期间融冰期ASIC减小,结冰期ASIC也减小的海域仅集中在楚克奇海、新地岛北部海域以及格陵兰岛东西海岸。融冰期ASIC减小,而结冰期ASIC无明显变化的海域包括波弗特海、东西伯利亚海、拉普捷夫海和喀拉海。这些区域与局地陆地径流侵入的海域重合。研究发现,在这些区域,融冰期ASIC减少是陆地径流增大加速海冰融化引起的。在结冰期,陆地径流加速海水结冰的作用消除融冰期海水吸收大量太阳辐射能后发生推迟结冰的现象,使得ASIC无明显变化。融冰期ASIC减小,而结冰期ASIC增大的区域只有白令海。研究结果证明累积海冰密集度能够去除海冰高频变化而只表现低频变化,能够描述海冰的年际变化特征。同时由于海冰变化与海洋中其他物理参数存在显著关系,变 $T$ 的ASIC可以更加方便地描述次表层叶绿素最大值层深度的变化。

**关键词:**海冰变化;陆地径流;北冰洋

中图分类号:P343.6

文献标志码:A

文章编号:1001-8166(2014)06-0712-11

### 1 引言

北冰洋地处高纬度地区,常年被海冰覆盖,是地气系统中的冷源之一。北极海冰范围存在明显的季节变化,冬末3月达到最大值,夏末9月达到最小值。近30年来,由于北极气温以几乎2倍于全球平均温度的速率升高<sup>[1,2]</sup>,加上冰—水反照率反馈<sup>[3,4]</sup>等机制的作用,北极海冰发生了急剧的减退。

北极海冰总量的减少最直观地表现为海冰覆盖面积的缩减。卫星遥感数据显示,20世纪70年代初到80年代中期,北极夏季海冰最小面积为 $1.250 \times 10^4 \text{ km}^2$ 左右;自80年代后期开始迅速减小,至90年代中期,北极海冰面积减小至 $1.160 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[5]</sup>;进入21世纪后,北极海冰面积呈加速减小趋势<sup>[6,7]</sup>;在2007年9月达到历史同期极小值,为 $413 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[5,6]</sup>。2012年夏季这一数据又被刷新,达到

收稿日期:2014-04-14;修回日期:2014-05-16.

\* 基金项目:全球变化研究国家重大科学研究计划项目“北半球冰冻圈变化及其对气候环境影响与适应对策”(编号:2010CB951403);  
南北极环境综合考察与评估专项“北极环境综合评估”(编号:CHINARE2012-04-03-02)资助。

作者简介:王维波(1986-)男,安徽舒城人,博士研究生,主要从事极区海洋动力学研究。E-mail:wbwang@live.com

$341 \times 10^4 \text{ km}^2$ <sup>[8]</sup>。1979—1996年整个北极地区的海冰面积变化速率为每10年减少3.0%。进入21世纪后,海冰面积变化速率增加到每10年减少10.7%<sup>[7]</sup>。

北冰洋各个边缘海所处的气候环境存在很大的差别,使得各个海域海冰覆盖面积体现出不同的变化特征。朱大勇等<sup>[9]</sup>利用高分辨率卫星遥感资料分析了1997—2005年夏季楚科奇海海冰面积变化,发现海冰冰情在轻—重—轻的波动下总体减轻。Petoukhov等<sup>[10]</sup>发现1960—2006年冬季巴伦支海和喀拉海海冰密集度持续减小。Divine等<sup>[11]</sup>研究发现,1968—2008年哈德森湾夏季海冰覆盖面积每10年减少 $11.3\% \pm 2.6\%$ ,加拿大北极群岛每10年减少 $2.9\% \pm 1.2\%$ ,波弗特海每10年减少 $5.2\% \pm 2.4\%$ 。

冬季(3月)海冰覆盖范围与夏季海冰覆盖范围一样,呈持续减小的趋势(图1)。在有海冰遥感数据以来,3月海冰覆盖范围的减少速率为 $4 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ ,远小于夏季海冰覆盖范围减少速率。3月海冰覆盖范围在2006年达到历史极小值,为 $1443 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,当时认为冬季北极海冰进入加速融化的状态<sup>[12]</sup>。但依据近些年冬季海冰变化趋势,冬季海冰覆盖范围并没有呈现加速减小。冬季北极海冰变

化或许还处于预调整的状态<sup>[13]</sup>。

不同月份海冰覆盖面积的减小速率存在不同步性。对比不同月份海冰覆盖面积的减小速率(图1)可以看到,11月至翌年6月海冰覆盖面积减小速率比较接近,平均值为 $0.043 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ ,远小于7~10月的减小速率(平均值为 $0.075 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ )。海冰覆盖面积减小速率在7月发生突变,从6月的 $0.043 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ 激增到7月的 $0.072 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ 。海冰覆盖面积也在10月发生突变,从9月的 $0.089 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ 骤降到10月的 $0.063 \times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ 。同时10月发生突变的变化幅度要小于7月发生突变的变化幅度。

海冰覆盖面积减小速率的季节性差异主要是海冰变化的区域性差异引起的<sup>[14]</sup>。以往科学家更多关注某个季节内海冰的多年代尺度上的变化,很少涉及在海冰变化过程中海冰覆盖范围在季节间差异的特征。由于高频的海冰变化很难捕捉区域差异,为了加强对海冰变化区域差异的认识,必须采用一个新的方式描述海冰的变化过程。海冰变化在整年内只存在2种状态,即融冰状态(4~9月)和结冰状态(10月至翌年3月)。建议将海冰变化过程分为融冰期变化(4~9月)和结冰期变化(10月至翌年3月)对2个时段内海冰变化进行单独分析。这种分析方法需要解决2方面的问题,一方面在整个融冰期和结冰期内海冰变化是一个复杂的高频变化过程,海冰区域的年代际变化特征往往被掩盖,如何去除海冰的高频变化过程,只保留海冰的年代际变化特征?另一方面得到的融冰期和结冰期内海冰变化过程之间必须具有可比性。如何量化融冰期和结冰期内海冰变化?为了更好地描述海冰在融冰期和结冰期变化的区域性差异,将借鉴传统的方法,采用新的方式描述整个北极海冰的变化。

基于对融冰期内和结冰期内海冰变化的区域差异还不够了解的事实,出于增强对北极快速变化的认识的目的,提出并采用累积海冰密集度(Accumulative Sea Ice Concentration, ASIC)概念,依据卫星遥感海冰密集度数据,论述了以下2方面的内容:一方面将全年海冰变化分为融冰期海冰变化(4~9月)和结冰期海冰变化(10月至翌年3月),分别论述融冰期和结冰期ASIC年际变化规律;另一方面论述融冰期和结冰期北极海冰变化的区域差异性。

## 2 累积海冰密集度

海冰密集度 $c(t)$ 的动态变化可以用来描述海

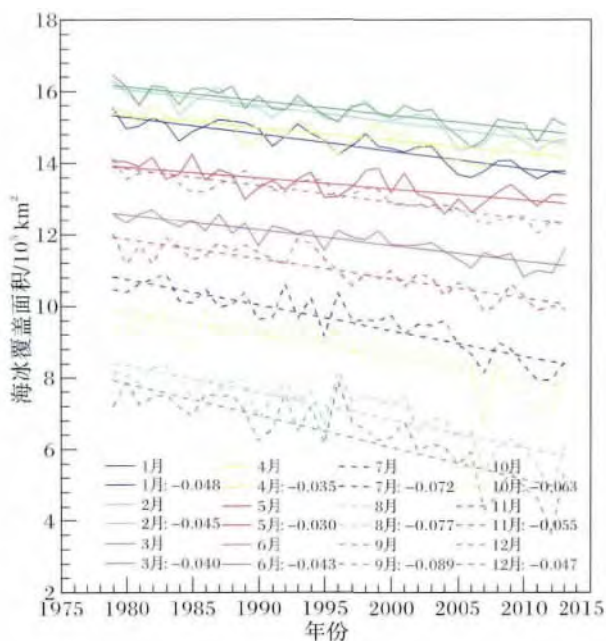


图1 1979—2013年1~12月海冰覆盖面积(折线)及其线性回归线(直线)

Fig. 1 Monthly variation of Arctic sea ice extent from 1979 to 2013 (polyline) and their respective linear regression line (straight line)

图标中数字代表海冰覆盖面积的减少速率( $\times 10^6 \text{ km}^2/\text{a}$ )

The underneath in figure presents monthly declining rate of sea ice extent

冰的时间变化,但是如果要描述融冰期和结冰期内海冰密集度的多年变化,直接用海冰密集度就不够了,主要有2个原因:一是密集度的多年变化叠加在季节变化之上,季节变化淹没了多年变化的信号;另外,密集度的变化存在季节内变化,变化早晚不定,不便于各年密集度变化的比较。因此,需要一个能消除季节变化和其他高频变化因素的参数。这里,定义了一个参数,称之为累积海冰密集度(ASIC):

$$\zeta(T) = \frac{1}{T} \int_0^T c(t) dt \quad (1)$$

累积海冰密集度类似于积温概念,有以下2个重要的物理意义:

首先,如果积分时间  $T$  取为常数,累积海冰密集度  $\zeta$  等于海冰密集度的时间平均值。如果计算出不同年份同样时间段的累积海冰密集度,就可以得到这段时间冰情的年际差异。图2给出了2011年4~9月北冰洋 ASIC 分布,等价于融冰期平均海冰密集度。图2中越靠近北极点,ASIC 越大,表明那段时间那里的海冰覆盖较多;而在北极边缘海地区,ASIC 值都偏小。然而,时间平均的海冰密集度较低有2个可能的过程:一个可能是该海域长期被较低

密集度的海冰覆盖,另一个可能是在积分期间一段时间被高密度海冰覆盖,一段时间是开阔水。只用平均海冰密集度的概念无法区分这2种过程。

第二,如果积分时间  $T$  是变量,ASIC 则代表了海冰积累量随时间的变化,是时间的函数。假如初始时海冰密集度为100,ASIC 保持为100;当海冰密集度减小后,ASIC 将小于100。由于 ASIC 包含了整个积分期间的海冰密集度信息,海冰密集度的高频变化在 ASIC 中会弱化,而更多地体现持续的增加或减少过程。因此,变  $T$  的 ASIC 可以表达不同位置或不同年份海冰融化的早晚和先后,可以实现对融化和冻结期间海冰变化过程的描述。ASIC 和海冰密集度  $c$  都是时间( $t$ )的函数,但二者有重要的差别: $c$  主要体现了海冰密集度的季节变化和低频变化,而 ASIC 体现的是低频变化,后者正是多年变化研究所需要的。图3表现了两者的差别。

本文使用的海冰密集度数据选自美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)提供的 Nimbus-7 SMMR (Scanning Multi-channel Microwave Radiometer) 和 DMSP SSM/I (Special Sensor Microwave/Imagers) -SSMIS (Special Sen-

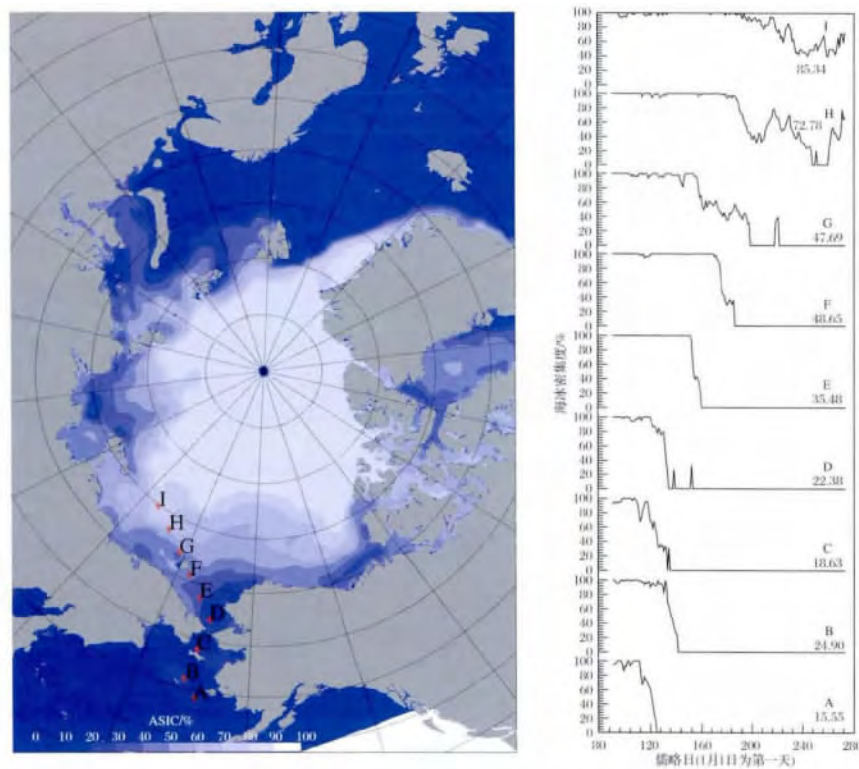


图2 2011年4~9月北极地区 ASIC 分布图(左图)和 A~I 站点海冰密集度日变化(右图)

Fig.2 ASIC distribution in Arctic calculated from April to September in 2011 (left) and daily variation of sea ice concentration (right) at A~I in left map

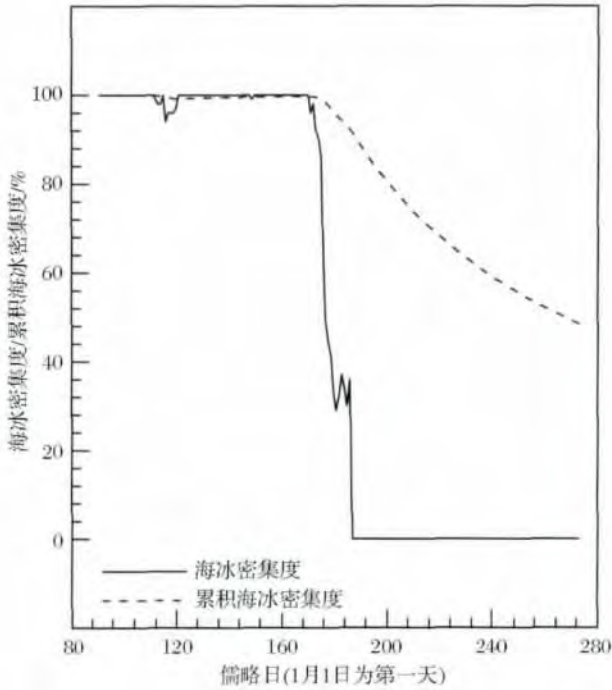


图 3 累积海冰密集度与海冰密集度日变化之间的比较

Fig. 3 Comparison between accumulative sea ice concentration and daily sea ice concentration

观测站点为图 2 中 F 站

F station is chosen in Figure 2 left map

...sor Microwave Imager/Sounder) 微波波段卫星遥感得到的日均分辨率为 25 km 的海冰密集度数据, 时间长度为 1979 年 1 月 1 日至 2011 年 12 月 31 日。

### 3 融冰期和结冰期 ASIC 的趋势变化

在这里, 选取的  $T$  为固定时长, 时间范围是 4 ~ 9 月和 10 月至翌年 3 月, 分别代表海冰融冰期和结冰期。根据定义, ASIC 增大(减小)表示海冰密集度整体偏高(低)。本文首先计算了 1979—2011 年北极地区融冰期和结冰期内的 ASIC。其次将 1979—2011 年分成 3 个时期, 分别为 1979—1989 年, 1989—1999 年和 1999—2009 年。最后利用一次线性拟合分别得到 3 个时期内每个像素点在融冰期和结冰期 ASIC 的趋势变化(图 4 5)。

在融冰期, 1979—1989 年内 ASIC 变化最大的区域位于东西伯利亚海域和巴伦支—喀拉海靠近新地岛区域, 2 个区域内 ASIC 都呈减小趋势(图 4a)。1989—1999 年, 东西伯利亚海和新地岛周围海域 ASIC 变化趋势与 1979—1989 年完全相反, 都趋于增大。此时, 喀拉海东部、波弗特海沿岸、格陵兰海西海岸和巴伦支海北部都趋于减小(图 4b)。1999—2009 年, 巴伦支海东部、喀拉海全海域、楚克奇海北部、波弗特海和东西伯利亚海 ASIC 都趋于减少, 此时仅有 Fram 海峡的 ASIC 略有增大(图 4c) 与大量海冰输向北大西洋有关<sup>[15, 16]</sup>。

结冰期 ASIC 变化与融冰期相差很大。1979—1989 年, 整个北极地区只有新地岛周围的海域以及白令海部分海域趋于减少, 在格陵兰海西海岸趋于增大(图 5a)。此时东西伯利亚海并没有像融冰季

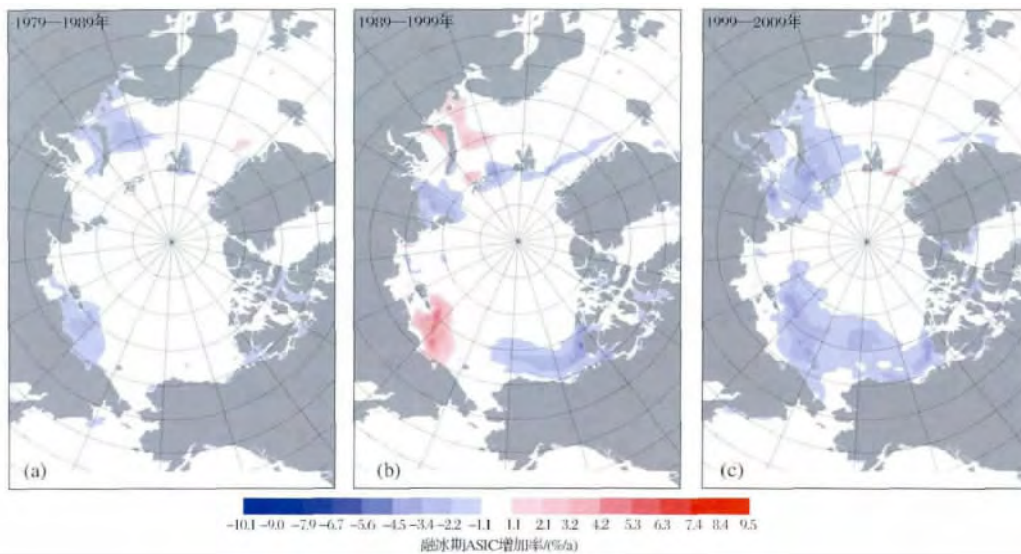


图 4 融冰期 ASIC 在 1979—1989 年(a), 1989—1999 年(b)和 1999—2009 年(c)内的趋势变化

Fig. 4 The linear trends of ASIC computed from 1979-1989 (a), 1989-1999 (b) and 1999-2009 (c) respectively in melt period (April-September)

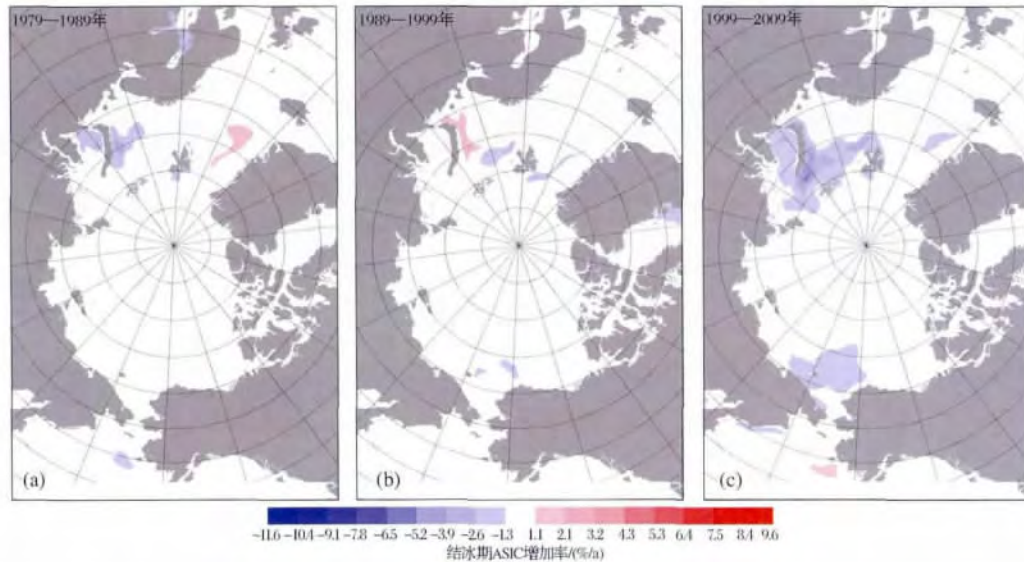


图 5 10 月至翌年 3 月 ASIC 在 1979—1989 年 (a) , 1989—1999 年 (b) 和 1999—2009 年 (c) 内的趋势变化

Fig. 5 The linear trends of ASIC computed from 1979-1989 (a) , 1989-1999 (b) and 1999-2009 (c) respectively in ice-formation period (October-March)

表现出明显的减小趋势 (图 5a)。1989—1999 年, 只有新地岛西海岸 ASIC 趋于增大, 巴伦支海北部和 Fram 海峡东侧部分海域趋于减少。此时东西伯利亚海也没有像融冰季表现出明显的增大趋势 (图 5b)。1999—2009 年, 新地岛东西海岸、巴伦支海北部以及楚克奇海 ASIC 都大面积趋于减小。此时, 只有白令海部分海域趋于增大 (图 5c)。

比较融冰期和结冰期在 3 个时期内趋势变化, 融冰期 ASIC 变化范围要远大于结冰期 ASIC 变化的区域。ASIC 趋势变化相同的区域为新地岛海域、楚克奇海部分海域和北欧海西部部分海域, 同时趋

势值基本一致。ASIC 趋势变化不一致的海域主要集中在东西伯利亚海、波弗特海、喀拉海东部以及白令海。

#### 4 1998—2011 年 ASIC 异常

1998 年被认为是夏季北极海冰开始加速融化的年份<sup>[17]</sup>。为了描述近十几年 ASIC 的变化过程, 在这里, 我们取 1979—1995 年 ASIC 平均值作为历史平均态 ASIC, 分析 1998—2011 年 ASIC 相对历史平均态的异常变化。

融冰期 ASIC 异常如图 6 所示。在 1998 年只有

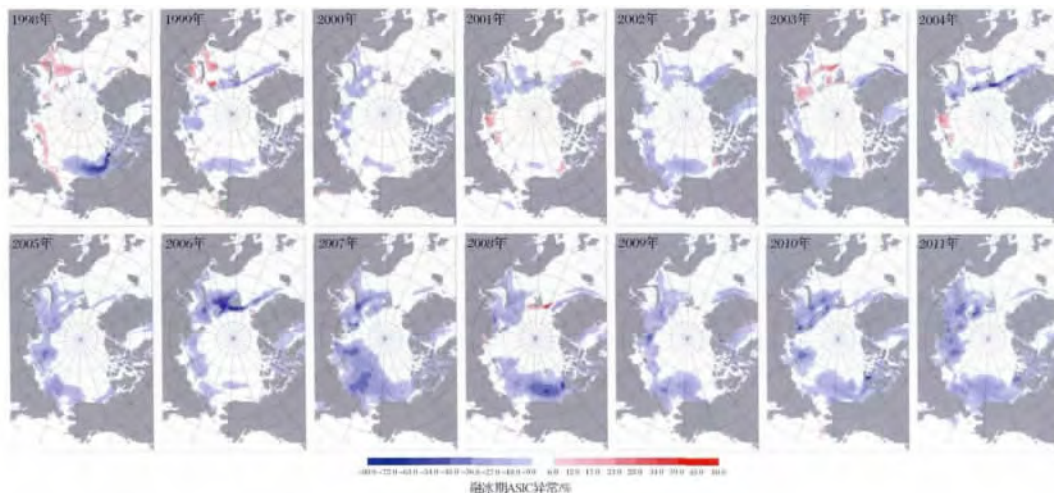


图 6 1998—2011 年融冰期 ASIC 相对于 1979—1995 年平均 ASIC 的异常变化

Fig. 6 ASIC anomaly in 1998-2011 computed against the averaged ASIC from 1979-1995 in melt period

波弗特海沿岸的值为负值,与当年 Mackenzie 河向波弗特海输送的大量的陆地径流存在密切关系<sup>[18]</sup>。此时,北冰洋中其他边缘海 ASIC 较历史值增大。1999—2004 年,在整个北冰洋海域内,ASIC 异常既存在明显的正值又包含负值。ASIC 发生异常的区域集中在各个边缘海内。2004—2011 年,除白令海外,北冰洋各个边缘海的 ASIC 都小于历史平均值,尤其是喀拉海、拉普捷夫海、东西伯利亚海、楚科奇海以及波弗特海,同时 ASIC 减少的区域开始向北扩展,甚至到达 85°N。如 2007 年,常年被海冰覆盖的东西伯利亚海西部海冰已经全部融化,同时海冰已经向北融化到 85°N。

结冰期 ASIC 异常区域的变化范围要小得多(图 7),表明结冰期整个北冰洋的海水季节性同步冻结,因而海冰密集度变化不大。总体上看,1998—2010 年,结冰期 ASIC 明显减小的区域位于喀拉海—巴伦支海一带,表明那里的海冰冻结有明显的推迟。自 2004 年以来,楚科奇海结冰期 ASIC 开始发生明显减小的现象,表明那里也发生海冰冻结期的大范围推迟。1998—2010 年,格陵兰岛东西海岸 ASIC 异常偏小。其他边缘海 ASIC 变化不是很明显。

## 5 ASIC 异常在融冰期和结冰期内的异同

比较图 6 和图 7 可以发现,部分海域发生 ASIC 异常在结冰期和融冰期同步变化,即融冰期 ASIC 减小(增大)的区域结冰期 ASIC 也发生减小(增大)。如在 2007 年,由于融冰期海冰在东西伯利亚海大范围的向北融化,使得在结冰期此处的海水发生推迟结冰的现象。反映在 ASIC 异常上,融冰期 ASIC 相对历史值偏小,而结冰期 ASIC 相对历史值也偏小。为了衡量 ASIC 异常在融冰期和结冰期的异同性,本文给出了如下的判断标准:

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon + 1 & \Delta ASIC_W \cdot \Delta ASIC_S > 250 \\ \varepsilon - 1 & \Delta ASIC_W \cdot \Delta ASIC_S < -50 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\varepsilon$  为判别因子, $\Delta ASIC_W$  和  $\Delta ASIC_S$  分别为结冰期和融冰期 ASIC 异常。算法如下:首先,设北极地区每个像素点判别因子  $\varepsilon$  初始值为 0;其次,计算每个像素点在融冰期和结冰期 ASIC 的异常值。最后利用公式(2)判断每个像素点,如果符合  $\Delta ASIC_W \cdot \Delta ASIC_S > 250$ ,则判别因子  $\varepsilon$  值加 1,如果符合  $\Delta ASIC_W \cdot \Delta ASIC_S < -50$ ,判别因子  $\varepsilon$  值减 1。

从公式(2)可以看出,判别因子越大,说明融冰期和结冰期 ASIC 异常发生同步变化越明显。反之,判别因子越小,表明融冰期和结冰期 ASIC 异常发生明显的相反变化的特征。判别因子值为 0,代表融冰期和结冰期 ASIC 异常关系不明显。本文给出了 1998—2010 年北极地区  $\varepsilon$  的分布图(图 8)。

从图 8 中可以看出,ASIC 发生明显同步变化的区域主要集中在楚科奇海北部、东西伯利亚海东部、巴伦支海—喀拉海北部以及格陵兰岛东西海岸。在北冰洋中,有的海域融冰期 ASIC 也发生显著减小,但结冰期 ASIC 并没有发生显著减小,即 ASIC 异常在融冰期和结冰期发生不一致的变化。从图 6~8 中可以看出,这类区域集中在波弗特海、东西伯利亚海西部、拉普捷夫海和喀拉海东部区域。只有白令海部分海域发生 ASIC 异常,在融冰期和结冰期存在完全相反的变化。

## 6 河流对 ASIC 的影响

本文提出分别计算融冰期和结冰期的 ASIC,可以体现融冰期提前和结冰期延迟的多年变化信息。如果融冰期的累积密集度小于参考值,则代表海冰减少;如果结冰期的累积密集度小于参考值,则代表海冰冻结期的延迟。从分析可以看出(图 8),结冰期的推迟仅发生在楚科奇海、巴伦支海—喀拉海北部等区域。在波弗特海、东西伯利亚海西部、拉普捷夫海和喀拉海东部都没有发现冻结期延迟的信号。

ASIC 异常在融冰期和结冰期发生一致变化的区域,主要是海冰在融冰期大量融化,同时由于海冰冻结期推迟引起的,可以被解释为,由于融冰期海冰大范围的融化,引起海水吸收大量太阳辐射,推迟了局地海水结冰。这样的解释却无法说明 ASIC 异常不一致区域内表现出的结冰期海冰不存在推迟的现象。图 9 为河流示踪参数  $S_{275-295}$  在北极地区的分布图<sup>[19]</sup>,从中可以看出,东西伯利亚海西部、拉普捷夫海、喀拉海东部以及波弗特海都存在大范围的陆地径流水。结果显示,融冰期和结冰期 ASIC 异常关系不明显的区域通常与河流影响的区域相对应。

融冰期和结冰期 ASIC 变化不一致的区域与环北极河流水侵入北冰洋的区域存在重合(图 9)。在近几十年来,这些河流的入海径流在融冰期和结冰期都大幅增加<sup>[20]</sup>。依据以往的研究,在融冰期,陆地径流可以通过 2 种方式加速海冰融化:一种方式是在春季陆地径流从低纬度陆地地区携带大量热量直接融化边缘海局地海冰<sup>[21]</sup>;另一种方式是陆地径

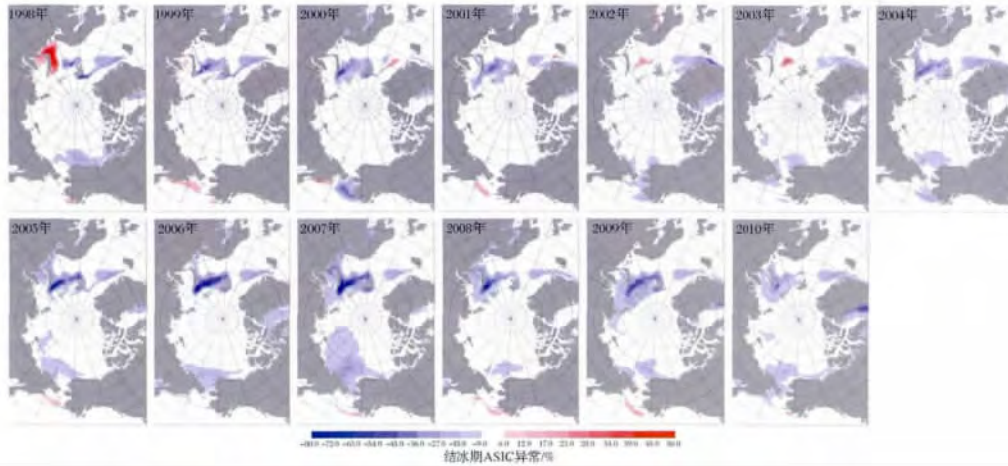


图 7 1998—2010 年结冰期 ASIC 相对于 1979—1995 年平均 ASIC 的异常变化

Fig. 7 ASIC anomaly in 1998-2010 computed against the averaged ASIC from 1979-1995 in ice-formation period

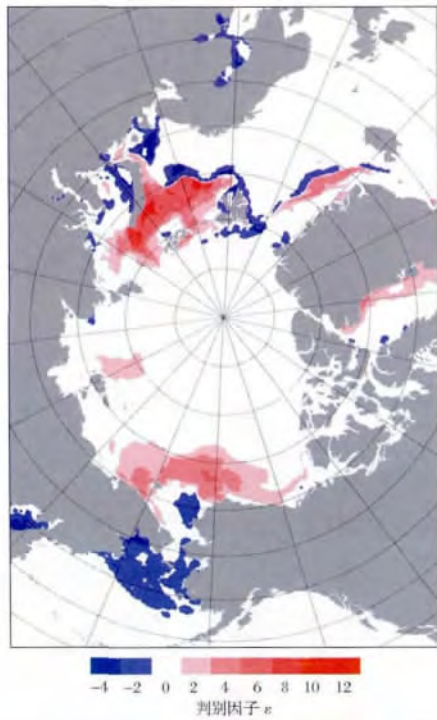


图 8 1998—2010 年融冰期和结冰期 ASIC 异常的一致性特征

Fig. 8 The synchronal property between ASIC anomalies in melt period and ice-formation period

红色代表 ASIC 异常在融冰期和结冰发生一致变化，而蓝色代表 ASIC 异常不一致变化

Red region presents the synchronization and blue region presents the asynchronization between ASIC anomalies in melt period and in ice-formation period

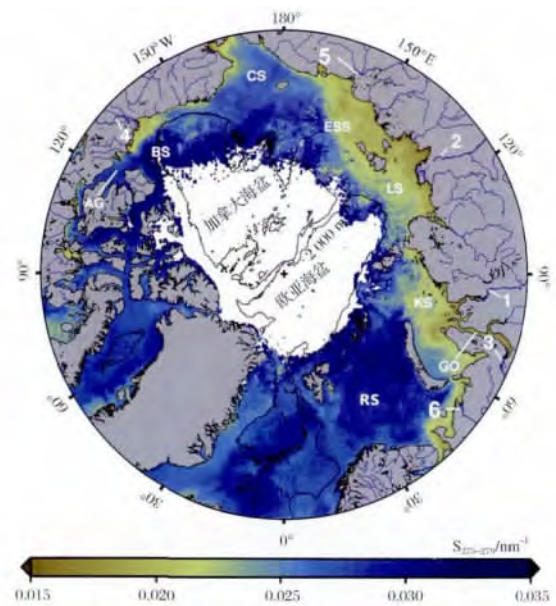


图 9 8 月北冰洋  $S_{275-295}$  区域分布<sup>[17]</sup>

Fig. 9 A pan-Arctic view of an August climatology (2002-2009) of  $S_{275-295}$ <sup>[19]</sup>

$S_{275-295}$  值越大,说明海水受陆源径流水的影响越小。图中标注的六大河流依次是:Yenisei 河(1),Lena 河(2),Ob 河(3),Mackenzie 河(4),Kolyma 河(5)以及 Pechora 河(6)。对应的影响区域是:Ob 河湾(GO),喀拉海(KS),拉普捷夫海(LS),东西伯利亚海(ESS),楚克奇海(CS),波弗特海(BS),阿蒙森湾(AG)和巴伦支海(RS)。”

In increase in  $S_{275-295}$  corresponds to a diminishing influence of continental runoff. The five largest Arctic Rivers are labels and ranked in order of decreasing discharge: Yenisei (1), Lena (2), Ob (3), Mackenzie (4), Kolyma (5), and Pechora (6). River-influenced margins of the Arctic are labels: Gulf of Ob (GO), Kara Sea (KS), Laptev Sea (LS), East Siberian Sea (ESS), Chukchi Sea (CS), Beaufort Sea (BS), Amundsen Gulf (AG) and Barents Sea (RS)

流携带大量营养盐入海,使得边缘海表层浮游植物大量繁殖,造成太阳辐射在表层海水聚集间接融化海冰。随着入海径流的增加,在融冰期,海冰覆盖面积必然发生大幅减小。对于结冰期的海冰,依据以往的研究,陆地径流可以通过 2 种方式加速海水结冰:一种方式是 10~11 月的冷而淡的河水直接侵入海水中,由于河水密度小于海水,往往浮于海水表层,使得海水更容易结冰;另一种方式是河流水覆盖在海水之上,在海水表层形成强的密度跃层,阻碍了下层海水向上层海水输送能量<sup>[22]</sup>。在结冰期 ASIC 异常没有发生显著的变化可能是上述原因加速海水结冰的过程刚好抵消了夏季大范围的开阔水导致海水吸收大量的太阳辐射减缓海水结冰的过程,最终的结果是结冰期海水并没有发生海冰结冰日推迟的现象。

## 7 白令海 ASIC 的变化

此外,白令海 ASIC 的变化与其他边缘海变化完全不同。从图 6~8 中可以看出,虽然融冰期 ASIC 没有表现出明显减少的特征,但在白令海局部区域,尤其在白令海东部区域,结冰期 ASIC 表现出明显大于历史平均值的特征。从 1999—2009 年 ASIC 趋势项变化(图 5)中也能够看到白令海东部区域 ASIC 呈现出逐渐增大的趋势。白令海地处副极地低压带,其海冰变化往往受极区和中纬度气候的共同作用。周波涛等<sup>[23]</sup>研究表明冬季白令海海冰面积与哈德利环流(Hadley Cell, HC)之间具有显著的反相关关系。HC 偏弱(强)对应着白令海海冰增加(减小)。也有一种说法是负位相的北极涛动(Arctic Oscillation, AO)导致北冰洋向白令海输入更多海冰,导致白令海海冰增加。依据 NSIDC 分析结果,2012 年白令海 1 月白令海海冰增加与 AO 位相从正位相转为负位相密切相关<sup>[24]</sup>。

## 8 变 $T$ 的 ASIC 的一个应用

变  $T$  的 ASIC 代表了海冰积累量随时间的变化,其值的大小可以表达不同位置或不同年份海冰融化的早晚和先后。利用变  $T$  的 ASIC 可以表征次表层叶绿素最大值层(Subsurface Chlorophyll Maximum Layer, SCML)的深度变化<sup>[25]</sup>。SCML 的深度、厚度与强度是表征海洋次表层叶绿素最大值(Subsurface Chlorophyll Maximum, SCM)现象的主要特征因子,受海洋水文环境、营养盐分布以及浮游植物种类等因素共同影响,在不同季节不同海区其分布有

较大差异<sup>[26]</sup>。变  $T$  的 ASIC 与 SCML 的深度存在明显的反相关关系(图 10)。ASIC 值越大,SCML 的深度越小。ASIC 值越小,SCML 的深度越大。该关系式定量地给出了 SCML 特征因子与海冰变化的关系。

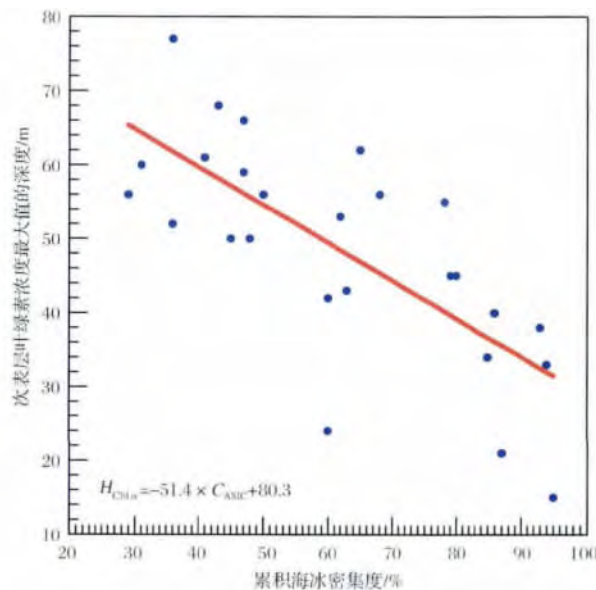


图 10 变  $T$  的 ASIC(积分范围是从 6 月 1 日到观测日)与次表层叶绿素最大值层的深度之间的反相关关系

Fig. 10 The negative correlation between ASIC calculated from June 1 to observation day and the depth of Subsurface Chlorophyll Maximum

## 9 结 语

依据最新海冰遥感数据发现,夏季北极海冰正在发生加速融化的过程,但冬季海冰覆盖范围,只发生了缓慢减小的过程,减小的速率低于夏季的一半。冬季海冰变化与夏季海冰变化存在的差异是区域性海冰变化的结果。本文提出分别计算融冰期和结冰期的 ASIC,获得融冰期提前和结冰期延迟的多年变化信息。通过比较融冰期和结冰期的累积海冰密集度,体现融冰期和结冰期海冰变化的区域差异。

分别计算 1979—1989 年、1989—1999 年和 1999—2009 年融冰期和结冰期 ASIC 的趋势变化。从中可以看出,1979—1989 年,在融冰期,东西伯利亚海、新地岛周围海域海冰 ASIC 表现出显著的减小过程。在结冰期,只有新地岛周围海域 ASIC 表现出明显的减小过程,且范围比融冰期要小。1989—1999 年,在融冰期,东西伯利亚海、新地岛周围海域 ASIC 表现出显著的增大过程。在喀拉海东部、波弗特海沿岸、格陵兰海西海岸和巴伦支海北部都趋于减小。在结冰期,海冰变化范围要比融冰期



小的多,仅在新地岛东海岸和巴伦支海北部存在微弱的变化。1999—2009年,在融冰期,除拉普捷夫海、北冰洋各个边缘海都表现出显著的减小过程。在结冰期,同样海冰变化范围比在融冰期要小很多。仅在喀拉海—巴伦支海、楚克奇海北部存在明显的减小过程。

其次,分别取1979—1995年融冰期和结冰期北冰洋地区的平均ASIC作为历史平均态,分别研究1998—2010年在融冰期和结冰期ASIC的异常变化。从中发现,在近十几年内,融冰期和结冰期ASIC异常区域特征并不完全相同。依据这一特征,本文将北冰洋分成3类区域:第一类区域位于楚科奇海北部、东西伯利亚海东部、巴伦支海—喀拉海北部以及格陵兰岛东西海岸,表现为融冰期ASIC异常和结冰期ASIC异常发生同步变化,即融冰期ASIC减小,同年结冰期ASIC也发生减小过程;第二类区域位于波弗特海、东西伯利亚海西部、拉普捷夫海和喀拉海东部区域,表现为融冰期ASIC发生减小过程,但结冰期ASIC异常不发生明显变化;第三类区域位于白令海,表现为融冰期ASIC减小,但结冰期ASIC异常发生显著的增加过程。

分析发现,第二类区域与环北极河流侵入北冰洋中的区域基本一致。而第一类区域基本不受河流的影响。总结发现,在融冰期,河流通过2种方式加速海冰融化,一种方式是自身携带大量热量侵入北冰洋;第二种方式是自身携带大量营养盐,造成表层海水大量繁殖浮游植物,形成太阳辐射能在表层海水聚积,间接融化海冰。在结冰期,河流通过2种方式加速海水结冰,一种方式秋季自身冷而淡的河水更容易结冰;第二种方式河水覆盖在海水之上,增强海水的层结,使得海水下层热量很难向上传输。在结冰期由于存在河流加速海水结冰的作用抵消了在融冰期海水大量吸收热量后发生推迟结冰的现象,导致融冰期ASIC变化不明显。至于白令海海冰ASIC异常,可以断定是低纬度地区和高纬度地区气候因素共同作用的结果。

变 $T$ 的ASIC描述了海冰融化或结冰的时间变化顺序,其值的大小可以表达不同位置或不同年份海冰融化的早晚和先后,同样也具有应用价值。本文给出了变 $T$ 的ASIC的一个应用,即变 $T$ 的ASIC与次表层叶绿素浓度最大值所在深度呈反相关关系。

ASIC描述的是一段时期内海冰变化的平均状态,可以有固定时长或可变时长2种表述形式。

ASIC本质上描述了区域内海冰的持续性。不管是海区前海冰海冰密集度从100快速变为0的状态或者是海区长期处于小密集度状态,只要ASIC偏小,那么就可以说明该海区内海冰覆盖的持续时间较小。其次,海冰是隔绝太阳辐射直接进入海水的最主要的因子。利用ASIC描述一段时间内海冰变化,可以从侧面反映太阳辐射进入海水中的大小。最后,海冰通过改变进入海水中太阳辐射间接影响海水中浮游植物,利用ASIC描述浮游植物的变化过程是一个非常有效的手段。ASIC是一段时期内海冰的平均状态,忽略了海冰高频变化的过程。研究它的年代际变化,能够描述北极不同环境因素的变化,有利于增强对北极快速变化的认识。

#### 参考文献(References):

- [1] Hassol S. Impacts of a warming Arctic—Arctic climate impact assessment [M] // Hassol S J, ed. Impacts of A Warming Arctic—Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [2] Solomos S. Climate Change 2007: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Zhao Jinping, Li Tao, Zhang Shugang, et al. The shortwave solar radiation energy absorbed by packed sea ice in the central arctic [J]. *Advances in Earth Science*, 2009, 24(1): 33-41. [赵进平, 李涛, 张树刚, 等. 北冰洋中央密集冰区海冰对太阳短波辐射能吸收的观测研究[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 33-41.]
- [4] Yang Qinghua, Zhang Zhanhai, Liu Jiping, et al. Review of sea ice albedo parameterizations [J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(1): 13-21. [杨清华, 张占海, 刘骥平, 等. 海冰反照率参数化方案的研究回顾[J]. 地球科学进展, 2010, 25(1): 13-21.]
- [5] Vinnikov K Y, Robock A, Stouffer R J, et al. Global warming and northern hemisphere sea ice extent [J]. *Science*, 1999, 286(5446): 1934-1937.
- [6] Perovich D K, Richter-Menge J A, Jones K F, et al. Sunlight, water, and ice: Extreme Arctic sea ice melt during the summer of 2007 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L11501, doi: 10.1029/2008GL034007.
- [7] Comiso J C, Parkinson C L, Gersten R, et al. Accelerated decline in the Arctic sea ice cover [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35: L01703, doi:10.1029/2007GL031972.
- [8] Perovich D K, Meier W, Tschudi M, et al. Sea ice cover, the Arctic, in state of the climate in 2012 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94: S126-S128.
- [9] Zhu Dayong, Zhao Jinping, Shi Jiuxin. Study on the multi-year variation of sea ice cover of Chukchi Sea in Arctic Ocean [J]. *Ac-*

- ta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(2):25-33. [朱大勇, 赵进平, 史久新. 北极楚科奇海冰面积多年变化的研究[J]. 海洋学报, 2007, 29(2):25-33.]
- [10] Petoukhov V, Semenov V A. A link between reduced Barents-Kara sea ice and cold winter extremes over northern continents [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2010, 115: D21111, doi: 10.1029/2009JD013568.
- [11] Divine D V, Dick C. Historical variability of sea ice edge position in the Nordic Seas [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: C01001, doi:10.1029/2004JC002851.
- [12] Shindell D T, Miller R L, Schmidt G A, et al. Simulation of recent winter climate trends by greenhouse gas forcing [J]. *Nature*, 1999, 399:452-455.
- [13] Cosmiso J C. Abrupt decline in the arctic winter sea ice cover [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33: L18504, doi:10.1029/2006GL027341.
- [14] Claire L P, Donald J C, Per Golersen, et al. Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1999 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104(C9):20 837-20 856.
- [15] Wu B, Wang J, Walsh J E. Dipole anomaly in the winter Arctic atmosphere and its association with sea ice motion [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19(2):210-225.
- [16] Mu Longjiang, Zhao Jinping. Variability of the Greenland Sea ice edge [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(6):709-717. [牟龙江 赵进平. 格陵兰海冰外缘线变化特征分析[J]. 地球科学进展 2013, 28(6):709-717.]
- [17] Stroeve J C, Serreze M C, Holland M M, et al. The Arctic's shrinking sea ice cover: A research synthesis [J]. *Climatic Change*, 2012, 110:1 005-1 027, doi: 10.1007/s10584-011-0101-1.
- [18] Macdonald R W, Carmack E C, McLaughlin F A, et al. Connections among ice, runoff and atmospheric forcing in the Beaufort Gyre [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 25(15): 2 223-2 226.
- [19] Fichot C, Kaiser Karl, Stanford Hooker, et al. Pan-Arctic distributions of continental runoff in the Arctic Ocean [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3, doi:10.1038/srep01053.
- [20] Nghiem S V, Hall D K, Rigor I G, et al. Effects of Mackenzie River discharge and bathymetry on sea ice in the Beaufort Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41, doi:10.1002/2013GL058956.
- [21] Sui Cuijuan, Zhang Zhanhai, Liu Jiping, et al. Variation of Arctic runoff and its association with climate factors [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 4:39-47. [隋翠娟, 张占海, 刘骥平, 等. 北极河流径流量变化及影响因子分析[J]. 海洋学报, 2008, 4:39-47.]
- [22] Masayo Ogi, Yoshihiro Tachibana. Influence of the annual Arctic Oscillation on the negative correlation between Okhotsk Sea ice and Amur River discharge [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(8) doi:10.1029/2006GL025838.
- [23] Zhou Botao, Wang Huijun. The correlation of anomalous Bering Sea ice with the change of Hadley Cell [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(18):2 194-2 198. [周波涛, 王会军. Hadley 环流变化与白令海海冰异常的关系 [J]. 科学通报, 2007, 52(18):2 194-2 198.]
- [24] Perovich D K, Meier W, Tschudi M, et al. Sea ice cover, the Arctic, in state of the climate in 2012 [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(8):S126.
- [25] Wang Weibo, Zhao Jinping. Variation of diffuse attenuation coefficient of downwelling irradiance in Arctic Ocean [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(6):53-62.
- [26] Gong Xiang, Shi Jie, Gao Huiwang. Subsurface chlorophyll maximum in ocean: Its characteristics and influencing factors [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(5):539-548. [宫响, 史洁, 高会旺. 海洋次表层叶绿素最大值的特征因子及其影响因素 [J]. 地球科学进展 2012 27(5): 539-548.]

## Accumulation Sea Ice Concentration and Its Action on Understanding Arctic Sea Ice Dramatic Change

Wang Weibo, Zhao Jinping

(Key Laboratory of Physical Oceanography, MOE, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** Accumulation Sea Ice Concentration (ASIC) is developed to quantitatively measure the regional difference of Arctic sea ice concentration. During the periods of 1979-1989, 1989-1999 and 1999-2009, the linear trends of ASIC in melt period (April-September) and in ice-formation period (October-March) were obtained from SSMR/SSMI sea ice concentration, respectively. Retrospective analysis reveals that there exists greater areas, where dramatic change happens for ASIC in melt period than in ice-formation period. It is revealed that during 1998-2010, in most areas where sea ice was rapidly melted, sea ice amount did not yet decrease in ice-formation period. These areas of ASIC in melt period decreased and in ice-formation also decreased in Chukchi Sea, northern Nova

Zembla , and the east and west coast of Greenland. These areas of ASIC in melt period decreased and in ice-formation did not obviously change in Beaufort Sea , East Siberian Sea , Laptev Sea and eastern Kara Sea , where sea ice was influenced by continental runoff. Continental runoff can accelerate the melt of sea ice in melt period and can accelerate the freeze of sea water in ice-formation period. It is concluded that its action is enough to compensate for the delay due to regional sea water absorbing more radiation in summer , as a result of freezing sea ice on time in these areas. The area of ASIC in melt period decreased and in ice-formation increased only in Bering Sea. Conclusively , ASIC is regarded as a useful parameter presenting low frequency of sea ice change and eliminating the high frequency , and is used to illustrate annual variation characteristics of sea ice. Meanwhile , due to sea ice change consistent with other parameters in sea water , using ASIC can better understand the change of sea water's properties. There is a negative correlation between ASIC calculated by changeable time-scale and the depth of subsurface chlorophyll maximum layer.

**Key words:** Sea ice change; Continental runoff; Arctic Ocean.

---

## PNAS 发文提出新的海洋生物多样性理论

2014 年 5 月 21 日 ,PNAS 杂志在线发布题为《海洋生物圈的普遍与稀有》(Commonness and Rarity in the Marine Biosphere)的文章 ,研究者发布了他们突破性的发现 ,这些发现推翻了生物多样性中性理论。

在过去的 10 年中 ,中性理论主导了生物多样性研究。中性理论的目的是解释生态系统内物种的多样以及相对丰度 ,但是这个理论有一个重大的缺陷:它不能解释海洋生态中高度丰富物种的重要性。该理论认为 ,如果一个高度丰富的物种消失了 ,另一个物种会很容易增长并代替它的位置。该研究在全球 1 185 个地点采集了 14 个不同海洋生态系统样本。数据集范围从极地到热带地区 ,从深海到浅水珊瑚礁环境和潮间带。包括脊椎动物和无脊椎动物 ,从浮游生物到蛤蜊再到珊瑚礁鱼类。可见该研究覆盖了大范围的海洋生态系统 ,对海洋保护区如何管理具有重要意义。

为了推翻中性理论 ,该研究使用了一个创新的数学模型 ,找出不同模型预测结果的共同点。生态多样性理论的一个关键考验是生态理论能够多好地重现物种丰度的经验分布。但是 ,具有不同假设条件的生态模型可能预测出相似的物种丰度分布 ,而具有相似假设的生态模型可能会得出相差很大的预测结果。该新方法研究的结果 ,在全球海洋大量不同的生态系统研究中 ,具有史无前例的显著的一致性。

(韦博洋 编译)

原文题目:Commonness and Rarity in the Marine Biosphere

来源:<http://www.pnas.org/content/early/2014/05/21/1406664111>