

文章编号: 1001-8166(2010)02-0154-09

# 楚科奇海融冰过程中的海水结构研究\*

赵进平<sup>1</sup>, 史久新<sup>1</sup>, 金明明<sup>2</sup>, 李超伦<sup>3</sup>, 矫玉田<sup>1</sup>, 卢勇<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学, 物理海洋学重点实验室, 山东 青岛 266061; 2 国家海洋局海洋生态系统和生物地球化学实验室, 浙江 杭州 310012; 3. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:**楚科奇海是北冰洋的陆架海, 中部凸起的 Herald 浅滩对海水流动和海冰融化过程有显著影响。利用我国 1999 年夏季北冰洋考察数据, 讨论了楚科奇海海冰融化过程中的海水结构。结果表明, 海区内存在 2 个相继进入的水团, 一个是海冰覆盖期进入的阿纳德尔水 (AW), 具有低温、高盐、高硅酸盐的特点; 另一个是海冰融化后进入的白令海陆架水 (BSW), 具有高温、低盐、低硅酸盐的特点。在开阔水域, 表层水温度达到 7 以上, 高于当地气温, 是当地太阳辐射的加热作用形成的。开阔海域的水体向冰下扩展, 表层水温在 1 以上, 形成冰下暖水区, 加速了海冰的融化; Herald 浅滩阻挡了海水的流动形成绕流, 其北部处于绕流的死角, 表层水温在 -1 以下, 形成冰下冷水区。在开阔海域, 上层海水的混合深度达到 15~20 m, 而渗入冰下的暖水深度小于 5 m, 体现了海冰对暖水渗入的阻滞作用。所有海冰覆盖站位 10 m 层的叶绿素 -a 含量都很高, 表明冰下海水处于浮游植物大量繁殖的状态, 有可能对海水吸收热量和海冰融化产生显著的影响。

**关键词:**楚科奇海; 海冰融化; 水团; 硅酸盐; 叶绿素 -a

**中图分类号:** P731.16 **文献标志码:** A

## 1 引言

北极海冰正在经历快速变化的过程, 夏季海冰的范围呈现迅速减小趋势, 尤其在 2007 年达到其多年的最小值, 对全球气候产生显著的影响<sup>[1]</sup>。海冰融化有 2 种主要机制: 一种是海冰吸收太阳短波辐射而融化 (以下简称“加热融冰”)<sup>[2]</sup>, 另一种是温暖海水进入海冰区导致海冰融化 (以下简称“暖水融冰”)。二者的区别是: 加热融冰时太阳辐射能量被海冰吸收, 冰下海水温度接近冰点, 而暖水融冰是由开阔水域的暖水渗入冰下所致, 冰下水温明显高于冰点。夏季在北冰洋海冰覆盖海域普遍存在加热融冰现象, 而暖水融冰是不普遍的, 需要有暖水来源和暖水嵌入冰下的机制。海冰的融化过程很复杂, 涉及到海冰的精细结构, 包括盐泡吸热、海冰内部升温、海冰下部腐烂、海冰侧面融化等。海冰融化后,

开阔海水对太阳辐射有更强的吸收能力, 导致海水温度不断升高, 不仅增加了对大气热贡献, 而且由于暖水向冰下渗透, 加剧了海冰的融化。因此, 海冰融解过程对北冰洋的海冰快速变化和海气相互作用具有重要的意义。然而, 由于对海冰融化过程缺乏观测, 人们只能通过海冰边缘线的移动来了解海冰融化过程<sup>[3]</sup>, 对海冰融化过程中海冰和海洋结构的了解非常稀少。

在楚科奇海, 上述 2 种融冰过程几乎同时存在, 来自白令海的温暖水体渗入冰下, 形成暖水融冰现象。楚科奇海是北冰洋的边缘海之一 (图 1a), 南边是白令海峡 (Bering Strait), 北部一直延伸到大陆坡, 西部与东西伯利亚海 (East Siberia Sea) 相连, 东部是美国的阿拉斯加。楚科奇海的中央偏北是 Herald 浅滩, 水深只有 30 m。浅滩西部是 Herald 峡谷 (Canyon), 东部是无名峡谷 (Unnamed Canyon)。

\* 收稿日期: 2009-07-06; 修回日期: 2009-08-26

\* 基金项目: 国家自然科学基金重点项目“北极环极边界流的结构及其对气候变化贡献的研究”(编号: 40631006)资助。

作者简介: 赵进平 (1954-), 男, 吉林省吉林人, 博士, 研究员, 主要从事北极海洋学研究。E-mail: j.zhao@ouc.edu.cn

Herald浅滩南部是一个盆地,称为 Hope海谷 (Valley),最大水深在 60 m 以上。

由于太平洋与北冰洋之间存在的海面高度差,驱动海水通过白令海峡流向北冰洋<sup>[4]</sup>。夏季的入流要比冬季大,海峡流量达到 1.1~1.3 Sv (1 Sv = 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/s)<sup>[5]</sup>。具有高温高盐特征的白令海暖水进入楚科奇海,首先融化白令海峡北端的海冰,然后使海冰边缘区逐渐向北退缩,对楚科奇海的海冰融化过程产生重要影响<sup>[6]</sup>。海水流动的路径主要受海底地形约束,在海水流动的方向上海冰的融化加快<sup>[7]</sup>。白令海水沿楚科奇海东侧达到 Hope角 (Cape Hope),然后分为 3 支流动,分别通过西部的 Herald峡谷、中间的无名峡谷和东部的 Barrow峡谷向北流动进入北冰洋<sup>[8-10]</sup>。其中,大部分水体从南部绕过 Herald浅滩沿 Herald峡谷北上<sup>[11]</sup>。在海冰融化的早期,楚科奇海的海水呈现明显的 3 湾结构,即开阔水体在 3 个方向伸向北冰洋<sup>[3]</sup>。因此,在融冰过程中,Herald浅滩形成流动的死角,海冰融化很慢。

大尺度海冰融化过程与区域性的海洋物理状况相联系,由于同步观测困难,人们对特定海域海冰融化的全过程及其相应的海水结构知之甚少。在暖水嵌入冰下的情形,海冰的融化不仅取决于局地太阳辐射因素,还取决于外来水团的作用,了解海冰融化过程中的海水结构对于研究海冰融化过程是非常重要的。1999年 7 月 14 日中国北极考察船“雪龙”号进入楚科奇海,计划沿 170°W 经线到达 75°N。当时,楚科奇海南部海冰已经全部融化,但北部仍然被海冰覆盖,海冰边缘出现在 70°N (C6 站),冰区的海冰密集度达 60% 以上,严重迟滞了船只的航行。在

冰区的 4 天时间里考察船环绕 Herald浅滩辗转寻找北向通道,最后由于冰情严重,不能到达预定站位,不得不撤出楚科奇海。在寻找航路的过程中,对海冰覆盖下的海域进行了观测,获得了海冰融化早期的海洋观测数据,对于研究春季海冰的快速退缩有重要价值。进入楚科奇海共进行了 14 个站位的考察,这些站位的位置和海冰状况如表 1 所示。本文分析研究在海冰融化过程中海水的温度、盐度、硅酸盐和叶绿素-a 的分布特征,以增加对海冰融化过程中海洋结构的认识。

## 2 考察海域的环境和海冰状况

图 1b 是 1999 年 7 月 16 日海冰密集度分布图,在时间上与考察期间最为接近,考察站位所在处的海冰密集度与冰图对应很好。海冰数据来自于美国国家冰雪数据中心,是海冰多元信息综合分析结果。冰图显示,浅滩西南有大范围的低密集度冰区,东南海冰边缘区比较紧凑,体现暖水在冰下从 Herald浅滩两侧向冰区扩展。

本文采用的数据是现场观测的结果,温度和盐度数据采用 FSI 温盐深剖面探测仪,在观测前和观测后均做了标定。用 Niskin 采水器分层采集水样。营养盐测量用 0.45 μm 孔径混合纤维素脂微滤膜水样,在 24 小时内用手动法分光光度计测量营养盐浓度。叶绿素-a 浓度通过荧光法测定,用 0.2 μm 孔径的筛绢滤除浮游动物,然后用 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤 500 mL 水样,抽滤压力小于 0.3 大气压。所获膜样避光、冷冻保存,于 1 个月内利用 Turner Designs 荧光光度计测定叶绿素-a 含量。

表 1 站位信息和海冰条件

Table 1 Station information and ice condition

站名	日期	水深 /m	北纬 /N	西经 /W	气温 /	海冰状况
C01	07-14	45	67 29.9	170 00.6	2.5	无冰,晴,波高 0.3 m
C02	07-14	46	68 00.1	170 00.7	2.3	无冰,晴,波高 0.3 m
C03	07-14	52	68 30.0	170 00.0	2.3	无冰,大雾,波高 0.3 m
C04	07-14	55	69 00.5	169 09.3	-0.4	无冰,大雾,波高 0.3 m
C05	07-14	50	69 20.0	170 00.0	0.0	无冰,大雾,波高 0.4 m
C06	07-14	32	69 59.9	170 00.6	1.3	浮冰 6 成,波高 0.2 m
C07	07-15	44	69 59.1	172 14.6	2.0	浮冰 4 成
C08	07-15	52	70 00.7	174 59.5	0.0	浮冰 4 成
C09	07-16	50	70 29.7	175 01.7	0.3	浮冰 4 成
C10	07-16	32	71 00.1	173 54.3	1.6	浮冰 4 成
C11	07-17	35	71 01.3	172 29.6	0.9	浮冰 6 成
C12	07-17	30	70 40.1	170 02.1	1.0	浮冰 6 成
C13	07-18	48	70 28.8	167 10.2	3.9	无冰,浪高 1.5 m
C14	07-18	45	70 00.0	167 30.6	2.9	无冰,有雾,浪高 1.5 m

### 3 Herald浅滩附近各站位的海水结构

#### 3.1 170 W 剖面温度与盐度特征

已有研究指出,从白令海进入白令海峡的水体有 3 个水团,东部的是阿拉斯加沿岸水 (ACW),受 Yukon 河入海淡水的影响,盐度  $< 32.0$ <sup>[12]</sup>;中部是白令海陆架水 (BSW),盐度  $32.0 \sim 32.8$ ;西部是阿纳德尔水 (AW),盐度为  $32.8 \sim 33.0$ <sup>[13, 14]</sup>。在整个夏季,不同时期各水团进入楚科奇海的比例是不一样的<sup>[15]</sup>。各水团在白令海峡并行流动过程中发生混合<sup>[16]</sup>。

在 170 W 经线上共有 7 个测站, C1 ~ C6 站是 7 月 14 日观测的, C12 站是 17 日观测的,这些站的数据所构成的剖面体现了温度和盐度的分布特征 (图 2)。

沿 170 W 断面在 70 N 处是 Herald 浅滩。断面 20 m 以下的水体结构简单, 70 N 以南和以北的下层水有不同的温度和盐度特征,各自都比较均匀。70 N 以南的温度和盐度代表值为  $-0.3$  和  $32.5$ ,盐度特征属于 BSW,是考察同时期来自白令海的水体。70 N 以北的海水温度低于  $-1$ 、盐度高于  $33.0$ ,是冬季或春季早期进入的白令海水,盐度特征属于 AW。

170 W 剖面上层海水的温度受冰情的显著影响。在 70 N 以南 C1 ~ C5 站是开阔水域,在  $15 \sim 20$  m 左右形成很强的温度跃层。上层的海水温度都很高,最高温度达到  $7$  以上,高于白令海峡源区的水体温度,也高于当时的平均气温 ( $1.2$  左右),显然是在楚科奇海当地太阳辐射加热的结果。水温高于气温导致大范围的海雾 (表 1)。C6 站处于 Herald 浅滩南缘,虽然被海冰覆盖,但暖水已经渗透到冰下,水温达到  $0.5$ 。而位于 Herald 浅滩北缘的 C12 站则完全是低温海水,上层水温为  $-1.2$ 。

在 C1 ~ C4 站所代表的开阔海域,上层海水的盐度都在  $32.0 \sim 32.5$  之间 (图 2),基本与白令海峡水体的盐度一致,符合 BSW 盐度特征,但由于上层水可能与融冰水混合,也可能是被融冰水冲淡的 AW 水,仅从温度和盐度数据不能确定。在海冰刚刚融化的 C5 站和海冰覆盖的 C6 站有明显的低盐层, C12 站也有  $3$  m 左右的盐度低于  $28$  的低盐层,显然是与融冰水混合的水层。断面的温度和盐度特征表明,开阔水域海冰融化生成的高温低盐水体部分渗透到冰下。

因此,在观测期间,楚科奇海有 2 个相互有明显区别的水团:海冰覆盖区的下层是早期进入的白令

海水,具有 AW 水的特征;开阔水域的下层基本是夏季进入的水体,具有 BSW 水的特征。开阔海域和海冰覆盖海域的上层水都受融冰过程影响,仅凭盐度特征不能确定其水团性质。

#### 3.2 Herald浅滩附近的温度与盐度特征

Herald 浅滩附近有 C5 ~ C14 共 10 个站,环绕 Herald 浅滩呈顺时针排列 (图 1a)。各站的温度和盐度垂直分布绘于图 3。按照表层水温度的特点,这些测站可以分成 3 类:开阔水测站、冰下暖水测站和冰下冷水测站。

开阔水测站有 C5、C13 和 C14。其中 C5 和 C14 表层温度最高,盐度也最高。在  $20$  m 以下,海水的温度高于  $-0.5$ ,盐度为  $32.67$  和  $32.58$ ,与图 2 中 Hope 海谷的温度一致,同属于 BSW 水体。C13 站比较特殊,因其海冰刚刚融化,上层海水的温度和盐度都很低。下层海水也很特殊,其温度几乎在冰点,盐度为  $32.75$  以上。看起来,该站处于夏季 BSW 水与春季 AW 水的混合处。

冰下暖水测站包括 C6、C7、C8 和 C9。这些测站的表层水温都在  $0$  以上,是开阔水域暖水渗入的结果。C8 站的温度比其他 3 个冰下暖水测站的温度高,表明该站是海水在冰下扩展的主要通道。这 4 个站的表层盐度最低,体现了开阔水域的融冰水渗透到冰下,或者与融冰水混合的结果。

冰下冷水测站包括 C10、C11 和 C12。这 3 个站的表层海水温度接近冰点,上下层的温度近乎均匀。在冰下也存在表面低盐度层,由于冰情较重,海冰融化不多,低盐水层的厚度只有  $2$  m 左右。其低温特征表明,这些站位于浅滩的北部和西北部,表明绕过浅滩的水流没有进入这些站位,暖水向冰下的渗入不明显。

从图 3 还可以看出,海冰覆盖海域下层海水的盐度都在  $33$  以上,具有 AW 的盐度特征,表明下层 AW 水体的存在范围与海冰边缘线大体一致。在海冰覆盖海域普遍存在低盐层,厚度小于  $5$  m,其下是数米厚的盐度跃层。冰下暖水的厚度也在  $8$  m 以内,远小于开阔水域  $15 \sim 20$  m 的混合层厚度。冰下海水的水团特性仅凭温度和盐度数据不能确定,需要进一步分析其化学和生物特性。

#### 3.3 硅酸盐的分布特征

在各种主要的营养盐中,硅酸盐主要是白令海起源的,白令海上层硅酸盐气候平均值为  $10 \sim 30$   $\mu\text{mol/L}$ ,而同纬度的大西洋  $< 5$   $\mu\text{mol/L}$ ,是来自白令海的水体最有价值的示踪参数;其他营养盐在北

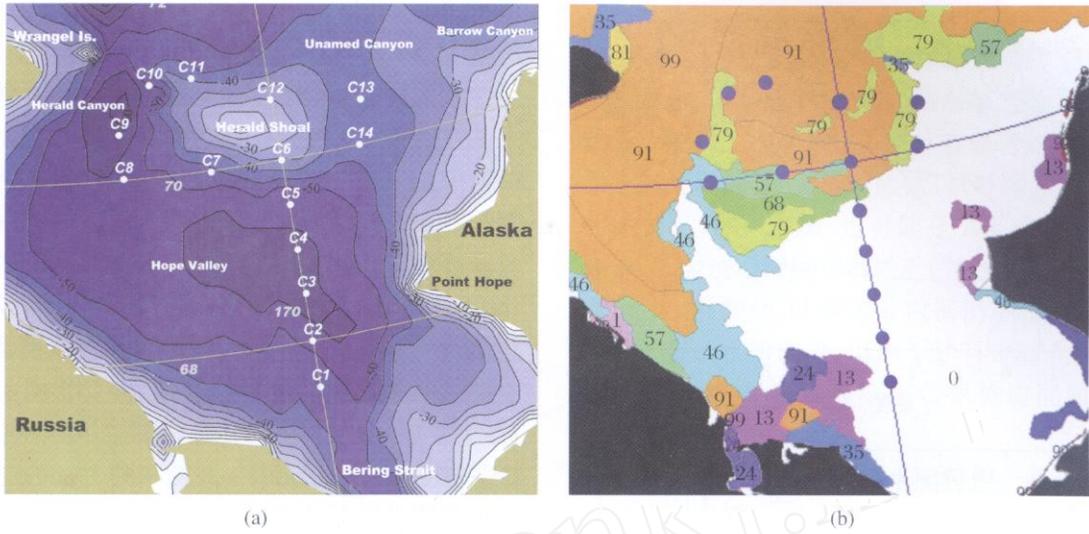


图 1 1999 年 7 月 14 ~ 18 日楚科奇海观测站位 (a) 和 7 月 16 日冰密集度图 (b)

Fig. 1 Stations in Chukchi Sea in 1999 from July 14 to 18 (a) and ice concentration chart in July 16 (b)

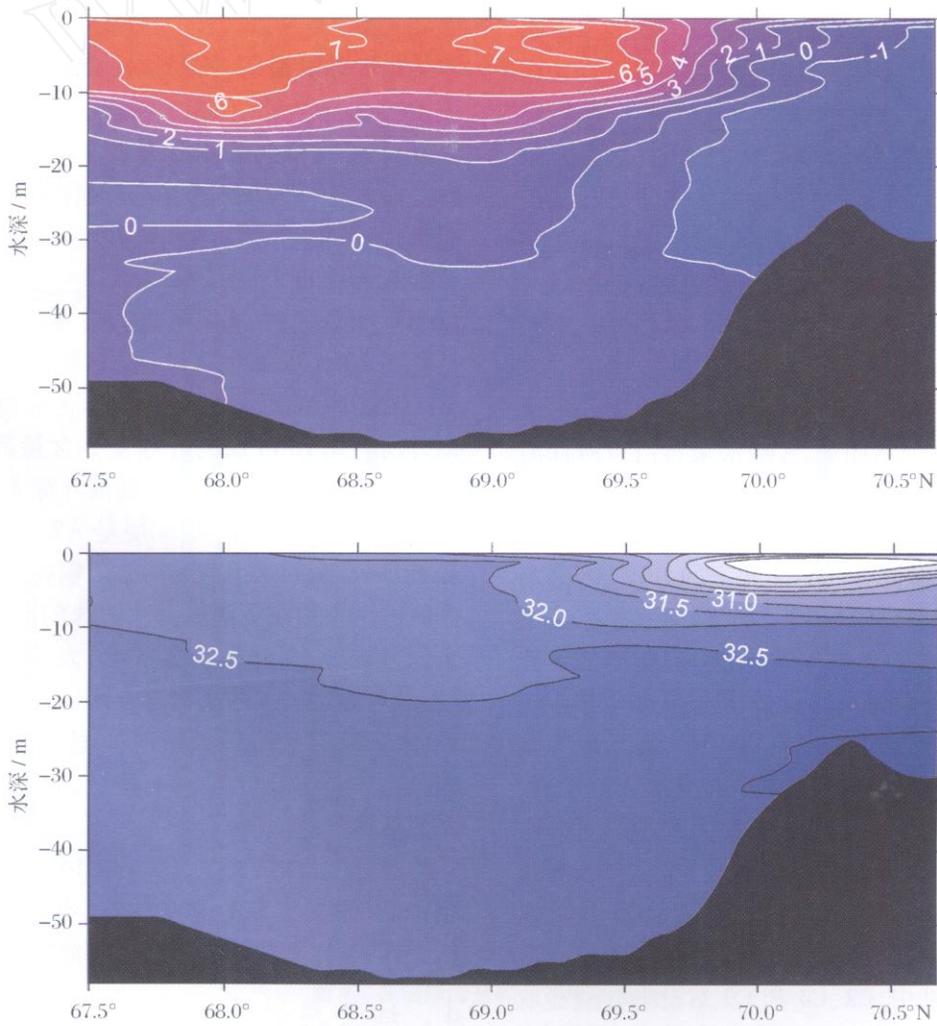


图 2 170°W 剖面温度 (上) 和盐度 (下) 的垂向分布图

Fig. 2 Vertical sections of temperature (upper) and salinity (lower) along 170°W

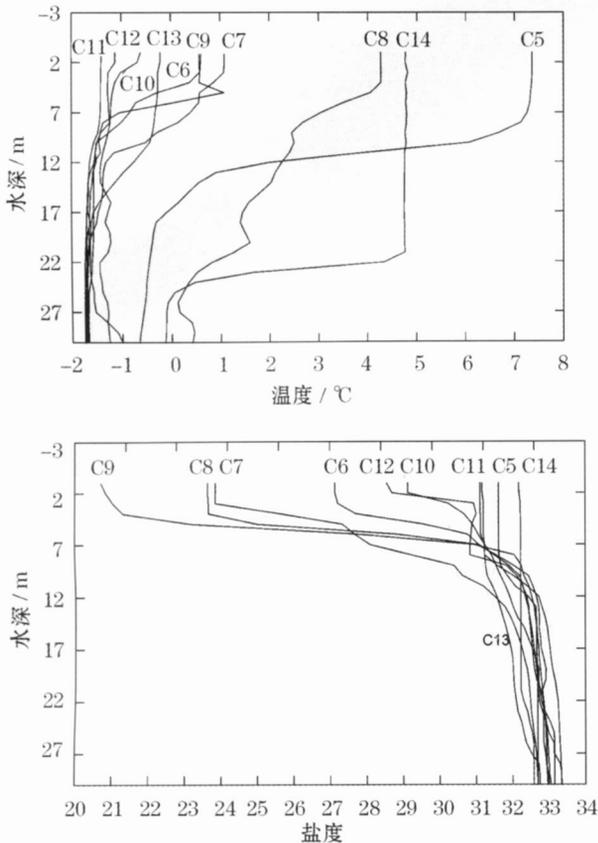


图 3 C5 ~ C14 各测站温度(上)和盐度(下)剖面分布

Fig 3 Profile of temperature (upper) and salinity (lower) in the stations C5 to C14

冰洋有另外的来源,其指示特性不是很明显<sup>[17]</sup>。来自白令海峡的 3 个水团中,AW 水来自白令海深海盆,上升水穿越等深线向北进入 Anadyr 湾,最终抵达白令海峡,硅酸盐最高值达到  $55 \mu\text{mol/L}$ <sup>[13]</sup>。来自北太平洋的水体部分成为陆架上的 BSW,部分与近岸径流混合变性成为 ACW<sup>[18]</sup>。经过冬季冰间湖引起的对流混合,春季 BSW 和 ACW 有较高的营养盐;但在夏季,BSW 和 ACW 受陆架上春季生物生产过程的影响具有低营养盐的特点<sup>[19]</sup>。因此,发生在楚科奇海的高硅酸盐水体可以用来指示 AW 水团,而低硅酸盐水体不能指示水团,因为在楚科奇海不仅 ACW 或 BSW 具有低硅酸盐特性,而且由于海冰融化后浮游生物繁殖消耗大量营养盐,AW 也可以成为低硅酸盐水体。

在 14 个测站中,C2、C4 和 C9 站没有硅酸盐取样。图 4a 给出了各站 10 m 层和底层硅酸盐的分布特征,避开了冰下融冰混合水的干扰。硅酸盐的分布基本呈现 2 种情况:一种是低硅酸盐水,浓度在  $0 \sim 10 \mu\text{mol/L}$ ;另一种是高硅酸盐水,浓度在  $20 \sim 58$

$\mu\text{mol/L}$ 。上层和下层都处于低硅酸盐状态的站位有 C3、C5、C8 和 C14,其盐度介于  $32.0 \sim 32.8$  之间,至少表明这些站的下层水体是 BSW,是太平洋水北上的主要流路。在其余的站位 C6、C7、C10、C11、C12 和 C13,下层水的硅酸盐含量都很高,结合盐度特征和白令海深海盆硅酸盐结构<sup>[20]</sup>,可以判断其是冬季或春季进入的白令海水,属于 AW。冰覆盖测站 C6、C11、C12 和 C13 站的上层海水保持较高的硅酸盐水平,体现了 AW 的特征,表明在冰覆盖的条件下其硅酸盐还没有被消耗。C7 和 C10 站上层为低硅酸盐 BSW 水,下层为高硅酸盐 AW 水,可能是 BSW 水体渗透进入冰下,并影响到 10 m 水层,也可能是生物过程消耗硅酸盐的结果,需要进一步分析叶绿素-a 的分布特征。

在所有测站中,上层水体的盐度均小于  $32.8 \text{ psu}$ ,仅凭盐度数据无法确认上层存在 AW 水。但是在图 4 中,C6、C11、C12 和 C13 4 个站上层具有 AW 水的高硅酸盐特征,其低盐度应该是融冰导致的盐度下降造成的。

### 3.4 叶绿素-a 的分布特征

海水中叶绿素-a 的分布是浮游植物生物量的重要指标,将叶绿素-a 含量与硅酸盐对比可以看出营养盐消耗的状况和原因。在 14 个站中的 C1、C2、C4、C6 和 C9 5 个站没有进行叶绿素-a 观测,图 4b 是各站 10 m 水层叶绿素-a 的含量。

从图中可以看出,在海冰覆盖海域,除了 C8 站以外所有站 10 m 层的叶绿素-a 含量都很高。其中 C11、C12 和 C13 三个站呈现高叶绿素-a、高硅酸盐特征,表明这 3 个站 10 m 层是 AW 水;尽管海冰覆盖,但通过冰间水道进入的太阳辐射,浮游植物正处于旺发期。而在更接近海冰边缘的 C7 和 C10 站呈现低硅酸盐、高叶绿素-a 状况,表明浮游植物繁殖已经进入后期,硅酸盐接近耗尽。硅酸盐和叶绿素-a 的数据表明,冰下测站的上层盐度虽然低于  $32.8$ ,但其水体具有高叶绿素-a 特征,仍然是 AW 水,与下层水体一致。

在开阔水域的 C3、C5 和 C14 站叶绿素-a 的含量很低,海冰覆盖的 C8 站也具有低叶绿素-a 的特征,说明其冰下海水是来自开阔海域的水体。

## 4 结果与讨论

楚科奇海是北冰洋的陆架海,也是北冰洋中海冰季节变化范围最大的海域。来自白令海的水体渗入冰下,加速海冰的融化;海冰融化水与海水混合,

显著改变海水的结构。因此,融冰期楚科奇海的水团结构很复杂。楚科奇海中部凸起的 Herald 浅滩对海水流动有显著影响,也是影响该海域海冰融化过程的主要因素。由于楚科奇海适合航行的观测大都在 8~10 月,对发生在 7 月的海冰快速融化阶段的海水结构缺乏观测和了解。这里利用我国 1999 年 7 月下旬在北冰洋的考察数据,讨论了楚科奇海中部海冰融化过程中的海水结构。

在极区融冰期,海水的温差小,融冰水又显著改变盐度结构,仅仅从温度和盐度数据几乎不能确定海水的水团结构,必须借助水化学和生态学参数。而海水的营养盐和叶绿素 -a 不是保守量,在融冰过程中不断变化,用以识别水团需要对消耗和繁殖过程进行全面的分析。本文利用水文学和生态学参数研究了水团结构,分析了先后进入楚科奇海的 2 个水团、水团结构与海冰边缘线位置的关系以及开阔海域暖水向冰下的渗透。

(1) 开阔水域的水团特性。海冰融化后,在 Hope 海谷形成大范围开阔水域,表层水温度达到 7 以上,远高于其上方大气的平均气温(1.2 左右),也高于白令海峡的水体温度(4.2)。开阔水

域的叶绿素 -a 含量很低,表明水体的高温与浮游生物的繁殖无关。当时楚科奇海的北向通道全部被海冰覆盖,水体输送不畅,高温海水是当地太阳辐射加热形成的。开阔水站位下层具有显著的 BSW 特性;而上层呈现低盐度、低硅酸盐、低叶绿素 -a 特征,可能代表了 BSW 水团,也可能是 AW 水被融冰水稀释、硅酸盐被浮游植物消耗后的特征<sup>[21]</sup>。虽然从温度、盐度、硅酸盐、叶绿素 -a 数据仍不能确定开阔水站位上层的水团划分,但由于楚科奇海北向流以正压成分为主,开阔水域上下层水体应同属于 BSW 水团。

(2) 海冰覆盖海域的水团特性。所有海冰覆盖海域的下层水盐度均高于 33.0,硅酸盐均为高值,温度接近冰点,可以确信下层水体均属于早期进入冰下的 AW 水团。上层水受融冰过程的影响盐度均低于 32.8,不能指示水团特性,需要生态学参数辅助确定。图 5 中红线和绿线分别代表上层和下层低硅酸盐水的北边界。冰下水体大部分呈现高硅酸盐特性,只有 C7 和 C10 站的 10 m 层为低硅酸盐站位。然而,冰下 10 m 层的叶绿素 -a 含量都很高,表明冰下暖水的上层都是 AW 水,浮游植物的繁殖时

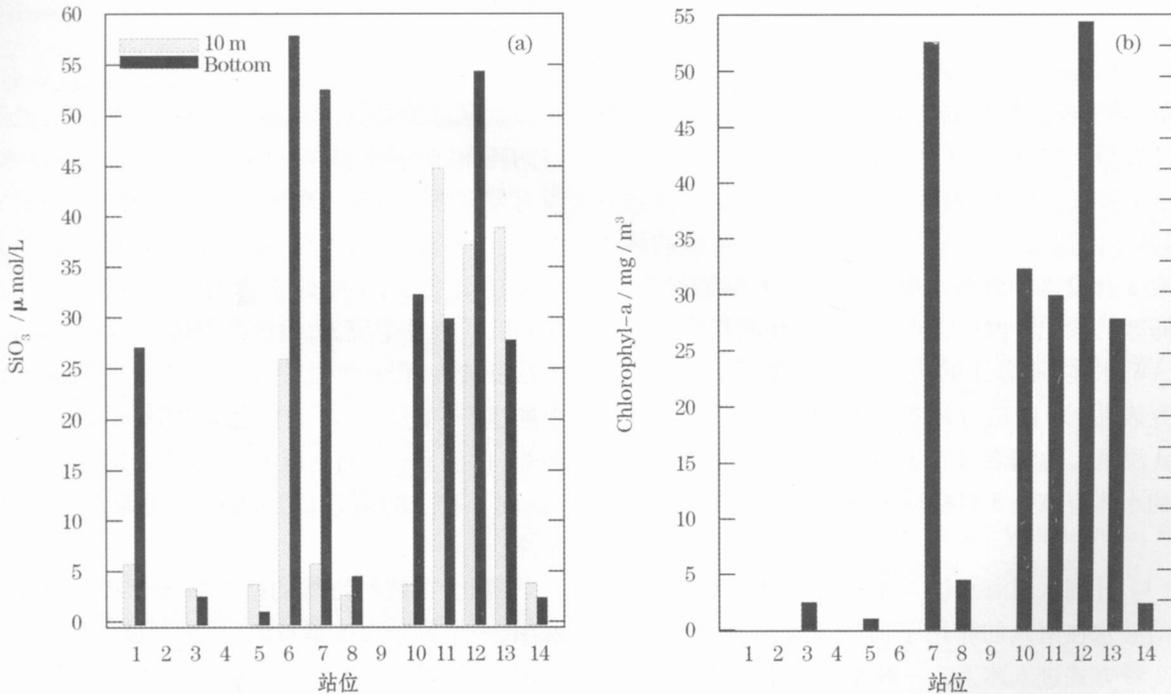


图 4 各站硅酸盐和叶绿素 -a 含量

Fig 4 Concentrations of silicate and Chlorophyll-a in stations

(a) 10 m 和底层硅酸盐含量; (b) 10 m 水层叶绿素 -a 含量

(a) silicate concentration in 10 m and bottom water; (b) concentration of Chlorophyll-a in 10 m water

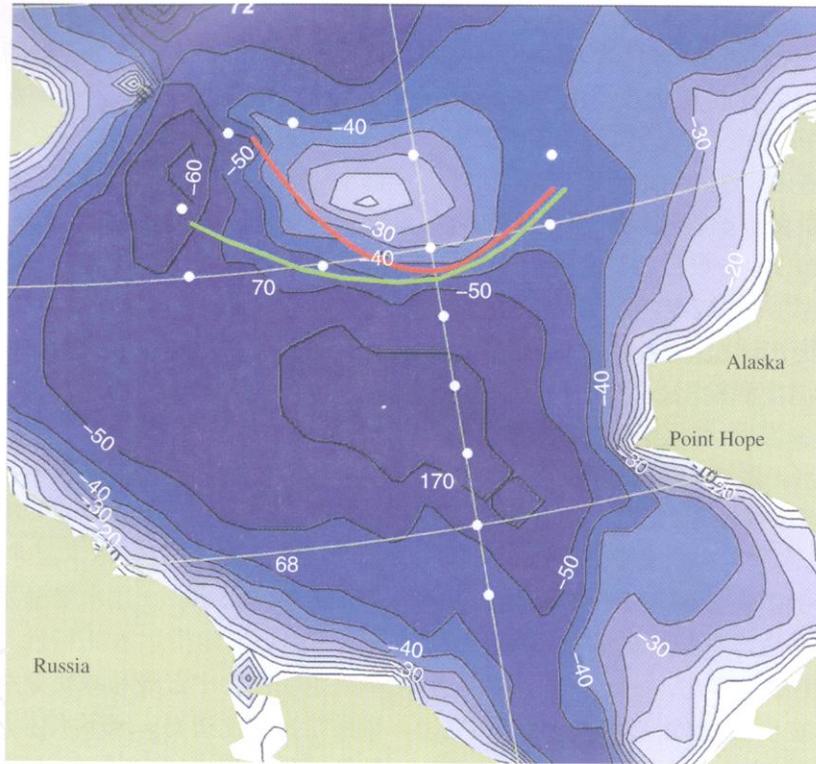


图 5 低硅酸盐水的扩展范围

Fig 5 Extention of waters with low silicate

绿线代表下层低硅酸盐水的北向边界;红色线是上层低硅酸盐水的北向边界

Low silicate waters of upper and lower layers are bounded by red and green lines, respectively

期有所不同,浮游植物新近旺发的水体保持较高的营养盐含量。C7和C10站靠近海冰边缘,浮游植物的繁殖期较长,硅酸盐被大量消耗形成低硅酸盐水体,但其水团性质仍是AW水。冰下上层水体的高叶绿素-a含量将导致海水吸收更多的太阳辐射能,加剧海冰的融化。因此,冰下10m层和底层水体均属于AW水体,随海冰的边缘一起向北退缩。以往的研究表明,来自白令海的水体从白令海峡到达Herald浅滩大约需要2个月时间<sup>[17]</sup>,因此,海冰覆盖区的水体应该是5月初以前进入白令海峡的AW水<sup>[22]</sup>。

(3) 开阔水域海水进入冰下的2种方式。开阔水域的暖水在南风的作用下向海冰覆盖区移动,并采取2种方式进入冰下。一种是从海冰边缘向冰下渗透,形成冰下暖水区,表层水温在1以上。在开阔海域,上层海水的混合深度达到15~20m<sup>[23]</sup>(图2)。而渗入冰下的暖水深度小于5m(图3),体现了海冰对暖水渗入的阻滞作用。渗入冰下的高温暖水是海冰融化的重要热量来源,冰下暖水的范围与海冰密集度低的水体位置很一致,充分体现了该海

域暖水融冰的特征。而在Herald浅滩北部,处于绕流的死角,表层水温在-1以下,形成冰下冷水区,没有发现渗入现象。暖水进入冰下的另一种方式是绕流。当海冰边缘北退到Herald浅滩附近时,楚科奇海的北方海域都处于海冰封闭状态。海水在Herald浅滩发生绕流,沿浅滩两侧在冰下向北运动。下层低盐度、低硅酸盐的水体代表了海流北上的主要通道,一个是以C8为代表的沿Herald峡谷(浅滩西侧)的流动,一个是以C14为代表的沿无名峡谷(浅滩东侧)的流动,在Herald浅滩两侧形成暖水湾。

因此,在楚科奇海的研究海域存在2个不同的水团,一个位于海冰覆盖区,是早期进入楚科奇海的水团,其特点是,盐度高于33,温度低于-1,硅酸盐含量高于20 $\mu\text{mol/L}$ ,属于来自白令海深海盆的AW水团。另一个位于开阔水,是后期进入楚科奇海的水团,其特点是,盐度低于32.8,温度高于-0.3,硅酸盐的含量低于10 $\mu\text{mol/L}$ ,属于来自白令海陆架的BSW水团。2个水团的分界线与海冰边缘线大体一致,在融冰过程中AW水团随海冰

边缘线一起向北退缩。

致谢:感谢国家极地考察办公室的资助;感谢“雪龙”号科学考察船提供考察支援;感谢中国南北极数据中心提供数据。

### 参考文献 (References):

- [1] Perovich D K, Richter-Menge J A. Loss of sea ice in the Arctic [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 417-441.
- [2] 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): 35-41. [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): 35-41.]
- [3] Zhao Jinping, Zhu Dayong, Shi Jiuxin. Seasonal variation of sea ice and its main driving factors in Chukchi Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21 (2): 123-131. [赵进平, 朱大勇, 史久新. 楚科奇海海冰周年变化特征及其主要关联因素 [J]. *海洋科学进展*, 2003, 21 (2): 123-131.]
- [4] Overland J E, Roach A T. Northward flow in the Bering and Chukchi seas [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92 (C7): 7 097-7 105.
- [5] Woodgate R A, Aagaard K, Weingartner T. Monthly temperature, salinity, and transport variability of the Bering Strait throughflow [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L04601, doi: 10.1029/2004GL021880.
- [6] Shimada K, Camack E C, Hatakeyama K, et al. Varieties of shallow temperature maximum waters in the Western Canadian Basin of the Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28 (18): 3 441-3 444.
- [7] Paquette R G, Bourke R H. Ocean circulation and fronts as related to ice melt-back in the Chukchi Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86 (NC5): 4 215-4 230.
- [8] Coachman L K, Tripp R B. Currents north of Bering Strait in Winter [J]. *Limnology and Oceanography*, 1970, 15: 625-632.
- [9] Weingartner T J, Cavalieri D J, Aagaard K, et al. Circulation, dense water formation, and outflow on the northeast Chukchi shelf [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103 (C4): 7 647-7 661.
- [10] Weingartner T J, Aagaard K, Woodgate R A, et al. Circulation on the north central Chukchi Sea shelf [J]. *Deep-Sea Research II*, 2005, 52: 3 150-3 174.
- [11] Martin S, Drucker R. The effect of possible Taylor columns on the summer ice retreat in the Chukchi Sea [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (C5): 10 473-10 482.
- [12] Brabets T P, Wang B, Meade R H. Environmental and Hydrologic Overview of the Yukon River Basin, Alaska, and Canada [R]. Water-Resources Investigations Report 99-4204, 2000: 106.
- [13] Shuert P G, Walsh J J. A coupled physical-biological model of the Bering-Chukchi Seas [J]. *Continental Shelf Research*, 1993, 13: 543-573.
- [14] Woodgate R A, Aagaard K. Revising the Bering Strait freshwater flux into the Arctic Ocean [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32, L02602, doi: 10.1029/2004GL021747.
- [15] Zhao J P, Shi J X, Gao G P, et al. Water mass of the northward throughflow in the Bering Strait in summer 2003 [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 25 (2): 1-8.
- [16] Piatt J F, Springer A M. Advection, pelagic food webs and the biogeography of seabirds in Beringia [J]. *Marine Ornithology*, 2003, 31 (2): 141-154.
- [17] Cooper L W, Whitedge T E, Grebmeier J M, et al. The nutrient, salinity, and stable oxygen isotope composition of Bering and Chukchi Seas waters in and near the Bering Strait [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (C6): 12 563-12 573.
- [18] Codispoti L A, Flagg C, Kelly V, et al. Hydrographic conditions during the 2002 SB I process experiments [J]. *Deep-Sea Research II*, 2005, 52: 3 199-3 226.
- [19] Whitedge T E, Luchin V A. Summary of chemical distributions and dynamics in the Bering Sea [C]. Loughlin T R, Ohtani K, eds. Dynamics of the Bering Sea. University of Alaska Sea Grant, 1999: 217-249.
- [20] Jin M M. Vertical properties of nutrients and oxygen under temperature-salinity structure of the Bering Basin in July 1999 [J]. *Chinese Journal of Polar Science*, 2002, 12: 145-156.
- [21] Körtzinger A, Koeve W, Köhler P, et al. C/N ratios in the mixed layer during the productive season in the northeast Atlantic Ocean [J]. *Deep-Sea Research I*, 2001, 48: 661-688.
- [22] Pickart R S, Weingartner T J, Pratt L J, et al. Flow of winter-transformed Pacific water into the Western Arctic [J]. *Deep-Sea Research II*, 2005, 52: 3 175-3 198.
- [23] Coachman L K, Aagaard K, Tripp R B. Bering Strait: The Regional Physical Oceanography [M]. Seattle: University of Washington Press, 1975: 172.

## Water Mass Structure of the Chukchi Sea during Ice Melting Period in the Summer of 1999

ZHAO Jinping<sup>1</sup>, SHI Jiuxin<sup>1</sup>, JIN Mingming<sup>2</sup>, LI Chaolun<sup>3</sup>, JIAO Yutian<sup>1</sup>, LU Yong<sup>2</sup>

(1. Ocean University of China, Qingdao 266061, China;

2. Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China;

3. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The Chukchi Sea is one of the marginal seas in the Arctic Ocean, where the sea ice cover varies seasonally. Herald Shoal located in the middle of the Chukchi Sea is a main feature of topography, and obviously impacts the flow and sea ice melting process. Data collected during the first Arctic cruise of China in the summer of 1999 are used to identify the water masses of Chukchi Sea around the Herald Shoal. Two water masses exist in this region. One is the Anadyr Water that entered in winter or spring with lower temperature, higher salinity and higher silicate. The other is the Bering Shelf Water with higher temperature, lower salinity and lower silicate. In open water, the maximum temperature in upper level reached 7 °C, higher than local air temperature, which is speculated to cause by heating of local solar radiation. The water from open area inset under the ice cover to form a warm water region under ice with the temperature greater than 1 °C, which leads to ice melting. Obstructed by the Herald Shoal, the northward flow bypassed the shoal and formed a cold water region under ice behind the shoal with the temperature lower than -1 °C. Although the thickness of mixed layer in open water is about 15 ~ 20 m, the thickness of the warm water under ice is only 5 ~ 6 m, showing retarding of ice cover to the inset water. At the depth of 10 m under ice cover, the concentration of chlorophyll was higher in all stations, indicating the blooming under ice and impacting possibly on the heat absorption of water and ice melting.

**Key words:** Chukchi Sea; Ice melting; Water mass; Silicate; Chlorophyll

### 2010年第 3期要目

长江三角洲对流域输沙变化的响应:进展与问题..... 高 抒  
 数字黑河的思考与实践 1:为流域科学服务的数字流域..... 李 新,程国栋,吴立宗  
 数字黑河的思考与实践 2:数据集成..... 李 新,吴立宗,马明国,盖迎春,冉有华,王亮绪,南卓铜  
 事件地层单位的理论及实践——以中扬子台地震旦—寒武纪界线事件集群为例..... 肖传桃,刘 丰