

研究论文

北冰洋中心区表层海水营养盐及浮游植物群落对快速融冰的响应

庄燕培¹ 金海燕¹ 陈建芳¹ 王斌¹ 李宏亮¹ 陈法锦¹ 卢勇¹ 徐杰²

(¹ 国家海洋局第二海洋研究所, 国家海洋局海洋生态系统和生物地球化学重点实验室, 浙江 杭州 310012;

² 环境学部, 香港科技大学, 香港九龙清水湾, 香港)

摘要 依托2010年夏季中国第四次北极科学考察, 通过对高纬度极地冰下水和冰芯的营养盐的连续观测及表层水颗粒物的藻类色素分析, 获取了夏季快速融冰下冰水界面营养盐和光合色素的分布信息。结果表明调查期间表层水磷酸盐和硅酸盐相对于无机氮更丰富(依据 Redfield 比值), 表现为显著的氮限制。而冰芯无机氮浓度相对更高, 融冰释放对水体无机氮有一定的补充。色素分析显示岩藻黄素(Fuco)和叶绿素 *a* (Chl *a*) 是水体颗粒物的主要光合色素。在8月15日—8月18日期间, 叶绿素 *c* (Chl *c*)、硅藻黄素(Diato)、硅甲藻黄素(Diadino)和岩藻黄素(Fuco)分别达到6、22、73和922 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 体现了硅藻在群落中的优势地位。岩藻黄素(Fuco)的浓度在融冰快速期间有巨大的提升, 主要来源于冰芯底部释放的衰老的冰生硅藻和浮游硅藻的生长。此外, 青绿黄素(Prasino)和叶黄素(Lut)与岩藻黄素(Fuco)分布模式有明显的差异, 暗示青绿藻和绿藻与硅藻对海冰融化的不同响应。

关键词 海冰融化 光合色素 营养盐限制 北极

doi:10.3724/SP.J.1084.2012.00151

0 引言

季节性的海冰退缩和变薄通过调节水体层化和光条件, 控制了北冰洋的食物网结构和生产力机制^[1-2]。在海冰消融期间, 往往形成冰生藻类和浮游植物的竞争及底栖-浮游群落优势的演替。冰边缘区和融冰区能够发生春季浮游植物勃发, 主要得益于淡水输入迅速形成的盐度层化^[3]。同时海冰丰富的初级生产力^[4]及海冰与冰下水营养盐浓度的差异^[5], 使融冰输入对浮游植物勃发的“播种”作用(seeding)和冰水界面营养盐状态也具有可观的影响^[6-7]。可以说, 冰情变化最终影响了北冰洋的海洋

生态系统的结构和功能及生源有机碳的埋藏^[8-9]。

海冰覆盖程度及持续时间是制约北极海区浮游植物类群和生产力的重要因素^[10]。在过去几十年, 由于全球变暖, 北冰洋海冰覆盖面积持续减小, 海冰厚度减薄^[11], 使得北冰洋生态环境发生明显变化^[12-13]。但由于外业工作的限制, 融冰对北极高纬度冰区表层水的营养盐循环和生态系统调控机制的研究并不充分。因而第四次北极科学考察期间, 在高纬度北冰洋中心区布设了一个多学科连续观测冰站。本文拟通过对冰芯、海冰-海水界面的营养盐状况和水体光合色素的群落结构分析, 探讨海冰快速变化下, 浮冰底部冰水界面浮游生态系统的响应。

[收稿日期] 2011年10月收到来稿, 2011年11月收到修改稿

[基金项目] 国家自然科学基金(41076135, 41003036)、国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项(JC200820)和海洋公益性行业科研专项(200805095)资助

[作者简介] 庄燕培, 男, 1986年生。硕士研究生, 主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail: pei368@163.com

[联系作者] 金海燕, E-mail: jinhaiyan@sio.org.cn

1 材料与方法

1.1 站位与采样

中国第四次北极科学考察布设了 1 个连续观测冰站(图 1a),观测时间为 8 月 9 日—8 月 18 日,期间浮冰漂移的路线如图 1b 所示,漂移的平均速度约为 $8 \text{ km} \cdot \text{d}^{-1}$ (根据每天经纬度变化换算)。使用冰铲挖开一个直径 1 m 左右的冰洞,每隔 1—2 d 采集水样用于色素和营养盐分析。利用 Mark II 型冰钻

在冰洞附近于 8 月 15 日和 8 月 17 日钻取了冰芯,将冰芯每隔 20 cm 分层,并在黑暗低温条件下解冻后冷藏用于营养盐分析。表层水的温盐数据来自于 RBR 多参数水质剖面仪(加拿大)。由于 RBR 缺失 8 月 9 日—8 月 10 日的数据,因而也采用船载表层传感器数据。冰芯和表层水经预洁净的醋酸纤维膜($47 \text{ mm}, 0.45 \mu\text{m}$)过滤后使用 Skalar 营养盐自动分析仪(荷兰,布雷达)测定,检测限分别为 $0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} (\text{NO}_3 + \text{NO}_2)$ 、 $0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} (\text{SiO}_2)$ 和 $0.03 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} (\text{PO}_4)$ 。

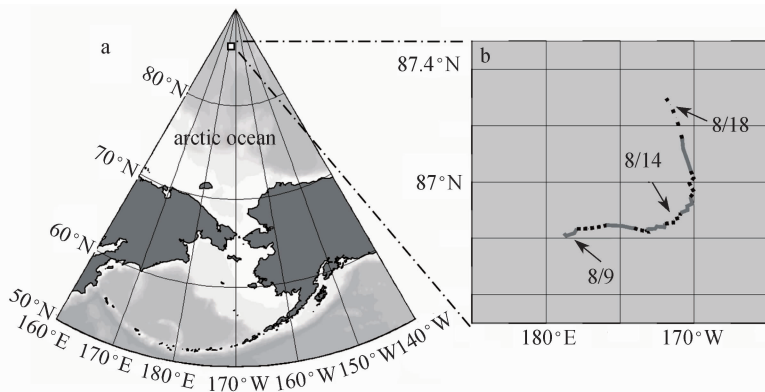


图 1 高纬度北冰洋冰站(a)及海冰漂移路线(b,日期用实线和虚线分隔)

Fig. 1. Sampling sites in the Arctic Ocean (a) and drift route of sea-ice (b, dates separated by solid and dashed lines)

1.2 色素分析

采集 4 L 的表层海水,在低照度低压条件下($< 0.5 \text{ MPa}$)滤过 Whatman GF/F 膜($47 \text{ mm}, 0.7 \mu\text{m}$),滤膜置入冻存管保存于 -80°C 冰箱直至实验室 HPLC 检测。将冷冻滤膜以 3 mL 100% 甲醇(HPLC 级)于 -20°C 冷藏萃取,1 h 后超声 30 s(冰浴)并接着萃取 1 h。萃取液滤过 $0.2 \mu\text{m}$ 滤膜保存于 CNW 棕色瓶,并与四丁基醋酸铵(TBAA, 28 mM)1:1 混合进样。色谱系统为 Waters 600 色谱工作站,色谱柱为 Eclipse XDB C8 柱($150 \times 4.6 \text{ mm}, 3.5 \mu\text{m}$),检测器为 Waters 2998 多极管阵列检测器。色素分析参考 Van Heukelem & Thomas^[14]的方法,使用梯度淋洗程序为(min, A%, B%):(0, 90, 10), (36, 5, 95), (41, 5, 95), (42, 90, 10), (56, 90, 10), 流速 1 mL/min ,柱温 45°C 。流动相 A 液为 TBAA (28 mM): 甲醇 = 30: 70, B 液为 100% 甲醇。通过对照色素标准色谱峰保留时间与光谱特性,分别对叶绿素(Chlorophylls)和类胡萝卜素(Carotenoids)进行定性

和定量,检测波长为 450 nm。采用的色素标准如表 1 所示,其中 Chl a 和 Chl b 为固体标准(美国 Sigma 公司),其余色素标准购自丹麦国际 ^{14}C 检测中心。

1.3 不同类型浮游植物对叶绿素 a 的贡献

Claustre^[16]和 Uitz 等^[17]提出了一种用 7 种检测色素来表征 3 种不同类型浮游植物对总浮游植物生物量的贡献的经验公式,浮游植物区分为小型(micro, 20—200 μm)、微型(nano, 2—20 μm)及微微型(pico, 0.2—2 μm)。公式如下:

$$F_{\text{micro}} = (1.41\text{Fuco} + 1.41\text{Peri})/\text{wDP}$$

$$F_{\text{nano}} = (0.60\text{Allo} + 0.35\text{But} - \text{fuco} + 1.271 \text{ 9Hex} - \text{fuco})/\text{wDP}$$

$$F_{\text{pico}} = (0.86\text{Zea} + 1.01\text{TChlb})/\text{wDP}$$

$$\text{wDP} = 1.41\text{Fuco} + 1.41\text{Peri} + 0.60\text{Allo} + 0.351 \text{ 9But} - \text{fuco} + 1.271 \text{ 9Hex} - \text{fuco} + 0.86\text{Zea} + 1.01\text{TChlb}$$

其中, F_{micro} 、 F_{nano} 和 F_{pico} 分别表示三种类型浮游植物百分比。该法主要用于研究浮游植物的群落结构及不同海区输出的颗粒有机碳中浮游植物的贡献。

表 1 HPLC 检测的色素标准的中英文对照^[15]
Table 1. Pigment standards indentified by HPLC^[15]

色素	Pigments	英文缩写	藻类
A. 叶绿素	A. Chlorophylls		
叶绿素 <i>a</i>	Chlorophyll <i>a</i>	Chl <i>a</i>	光合微藻(除原绿球藻)
二乙烯基叶绿素 <i>a</i>	Divinyl chlorophyll <i>a</i>	DV Chl <i>a</i>	原绿球藻
叶绿素 <i>b</i>	Chlorophyll <i>b</i>	Chl <i>b</i>	绿藻、青绿藻和裸藻
B. 类胡萝卜素	B. Carotenoids		
别黄素	Alloxanthin	Allo	隐藻
19'-丁酰氧岩藻黄	19'-Butanoyloxyfucoxanthin	But-fuco 或 BF	金藻
β,β -胡萝卜素	β,β -carotene	β,β -car	所有藻类除隐藻和红藻
硅甲藻黄素	Diadinoxanthin	Diadino	硅藻、甲藻、定鞭金藻和金藻
新黄素	Neoxanthin	Neo	绿藻和青绿藻
岩藻黄素	Fucoxanthin	Fuco	硅藻、定鞭金藻、金藻和甲藻
19'-己酰氧岩藻黄	19'-Hexanoyloxyfucoxanthin	Hex-fuco 或 HF	定鞭金藻
叶黄素	Lutein	Lut	绿藻和青绿藻
多甲藻素	Peridinin	Perid	甲藻
青绿黄素	Prasinoxanthin	Prasino	青绿藻
硅藻黄素	Diatoxanthin	Diato	硅藻
紫黄素	Violaxanthin	Viola	绿藻和青绿藻
玉米黄素	Zeaxanthin	Zea	蓝藻和原绿球藻

2 结果与讨论

2.1 浮冰的营养盐水平

前人研究表明海冰的营养盐储量与其年龄息息相关,形成时间长的海冰一般与表层水营养盐水平并不相关^[5,18]。本研究位于高纬度北冰洋,海冰为多年冰,海冰表现为显著的贫营养盐状况。冰芯 8 月 15 日和 8 月 17 日的营养盐垂直分布见图 2。冰

芯 8/15 的平均无机营养盐浓度分别为 $(0.46 \pm 0.22) \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} (\text{NO}_3 + \text{NO}_2)$, $(0.51 \pm 0.15) \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} (\text{SiO}_2)$, 磷酸盐浓度低于检测限 $(0.03 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1})$; 冰芯 8/17 的平均值分别为 $(0.77 \pm 0.39) \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} (\text{NO}_3 + \text{NO}_2)$, $(0.45 \pm 0.16) \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1} (\text{SiO}_2)$, 磷酸盐浓度低于检测限 $(0.03 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1})$ 。冰芯营养盐分布显示无机氮和硅酸盐平均浓度均低于 $1 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$, N/Si 比接近于 1。

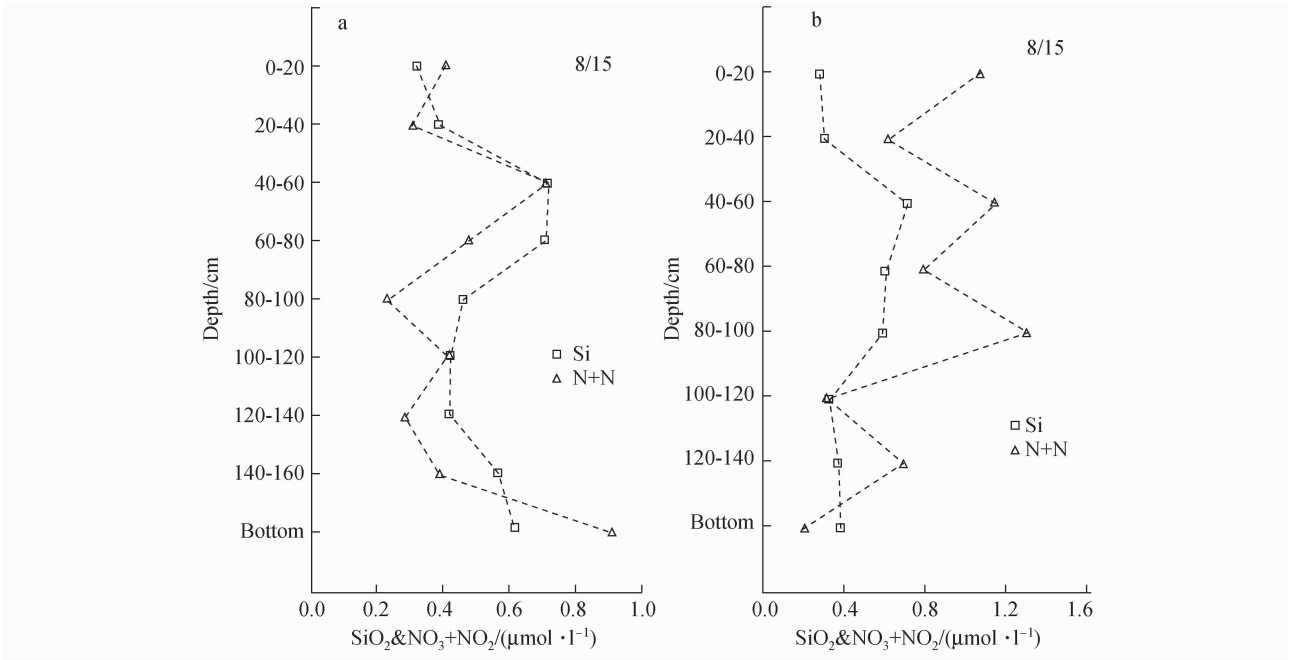


图 2 8 月 15 日(左图)和 8 月 17 日(右图)冰芯营养盐的垂直分布

Fig. 2. Vertical profiles in nutrient concentrations distribution ($\mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$) in sea-ice cores collected on 15 and 17 August, respectively

2.2 冰下海水营养盐及光合色素随融冰的变化

2.2.1 表层水的水文状况

影响冰水界面表层水的盐度主要过程包括低盐度融水的输入和外部水团的交换。表层水温度和盐度在调查期间的变化如图 3 所示。8 月 11 日—8 月 12 日之间,水温轻微地降低,盐度有一定的升高。我们缺失了 8 月 9 日—8 月 10 日的温盐数据,但船载表层传感器数据显示 8 月 9 日和 8 月 10 日的盐度均为 30.1 psu(数据未列出),表明 8 月 9 日—8 月 12 日期间外部高盐水的入侵。8 月 14 日—8 月 17 日期间表层盐度有较为显著的降低(约 0.2 psu),体现为低盐度融水的贡献。而后在 8 月 17 日—8 月 18 日期间盐度增高,温度无明显变化,而 8 月 18 日—8 月 19 日期间盐度降低且水温增高。

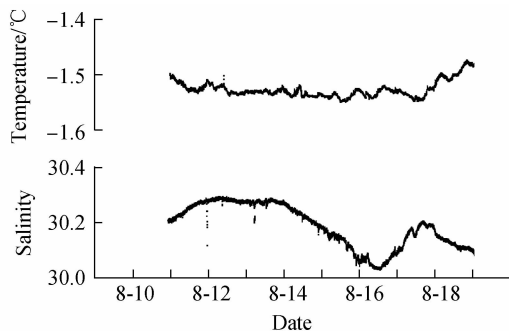


图 3 RBR 测定的水深 3 m 层温度和盐度随时间的变化
Fig. 3. Changes in temperature and salinity measured with RBR at the depth of 3 m from 11 to 19 August

2.2.2 营养盐的变化趋势

世界大洋真光层水体营养盐总体表现为 N 限制($<1 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$),北冰洋也不例外^[19]。而冰下表层水又是北冰洋氮限制最显著的水体,通常在垂直水柱中具有最低的无机营养盐浓度^[20]。在 10 d 的融冰调查期间,浮冰底部表层水营养盐的平均浓度分别为 $0.18 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$)、 $0.69 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ (PO_4) 和 $4.78 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ (SiO_2) (图 4)。磷酸盐在水体的储量丰富,未对浮游植物的生长形成抑制。可利用的无机氮平均浓度低于 $0.2 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$,平均 Si/N 比高达 27,表现为显著的 N 限制。与海冰中营养盐浓度相比较,表层海水磷酸盐和硅酸盐的浓度更高,无机氮则相对更低。因而海冰融化对表层水磷酸盐和硅酸盐有一定的稀释作用,但对无机氮有一定的补充。

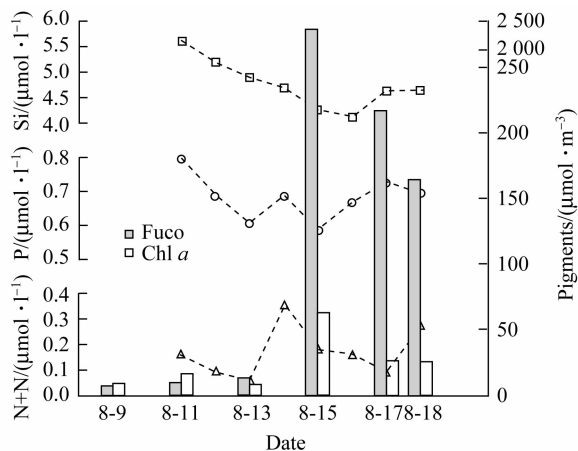


图 4 冰水界面营养盐及光合色素 Fuco 和 Chl *a* 的浓度时间序列

Fig. 4. Changes in nutrient concentrations and photosynthetic pigments fucoxanthin and chlorophyll *a* from 9 August to 18 August

如图 4 所示,8 月 11 日—8 月 13 日期间,营养盐均呈线性降低趋势,磷酸盐的降低速率明显高于无机氮(约为 2 倍),显然与 Redfield 比值不符(氮磷消耗为 16:1)。导致表层水营养盐降低的主要因素包括:①生物吸收利用,②融水稀释作用,③外部贫营养水体的交换。进一步分析可以发现低浓度的叶绿素 *a* 并不能导致那么高的营养盐消耗,同时盐度变化显示 8 月 11 日—8 月 13 日之间融冰的影响很小,因此推断营养盐的降低主要由于低营养盐的外部水团的影响。8 月 14 日—8 月 16 日期间,盐度快速降低(图 3),同时伴随硅酸盐浓度的降低,暗示快速融冰事件的发生。考虑到海冰的营养盐分布,融冰的输入造成了水体无机氮浓度在 8 月 14 日显著升高。8 月 15 日各项营养盐均显著消耗,相对于 8 月 14 日分别降低了 $0.17 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ($\text{NO}_3 + \text{NO}_2$)、 $0.10 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ (PO_4) 和 $0.42 \mu\text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ (SiO_2),对应了高的 Fuco 和 Chl *a* 浓度,体现为生物消耗利用。磷酸盐在 8 月 15 日—8 月 17 日期间有一定的提升,这可能与释放的有机质中磷酸盐的再循环有关,磷酸盐相对于硝酸盐和硅酸盐有更快的再矿化过程。此阶段中如果表层海水的营养盐均是融冰输入的贡献,则海水中的硅酸盐和磷酸盐应有显著降低,而硝酸盐略有升高。但实际情况则相反,说明营养盐有其他输入。磷酸盐升高的一个主要因素可能是有机质降解,营养元素的矿化循环,而硅酸盐的升高和硝酸盐的降低则与融冰水输入的减少,海水所占

比例增加有关。8月17日—8月18日磷酸盐和硅酸盐的浓度有所降低,无机氮浓度又有提升,对应了盐度的降低,即反映了融冰对磷、硅的稀释作用以及对氮的补充。

2.2.3 光合色素分布及其群落指示作用

岩藻黄素(Fuco)和叶绿素 a (Chl a)分别是水体颗粒物类胡萝卜素(Carotenoids)及叶绿素(Chlorophylls)的主要成分。如图4所示,8月9日—8月13日期间,光合色素Fuco及Chl a 的平均浓度均为 $12 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,浓度维持在较低水平,Fuco/Chl a 比值为1。8月15日—8月18日期间,存在于硅藻细胞中的叶绿素 c (Chl c)、硅藻黄素(Diato)、硅甲藻黄素(Diadino)和岩藻黄素(Fuco)是检测到的主要色素,平均浓度分别为 $62 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $222 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、 $732 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $922 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,这表明硅藻(Dia-

toms)在群落中占据优势。

硅藻的特征色素岩藻黄素(Fuco)在8月15日相对于8月9日—8月13日期间有显著的提升,其浓度达到了 $2382 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,但叶绿素 a 并没有相应比例的升高,其色素光谱图如图5所示。考虑到水体的N限制及硅藻繁殖强烈的Si需求,冰水界面的贫营养的水体环境并不能支撑硅藻的大量生长。而盐度及营养盐变化(图4)显示8月14日有显著的融水输入,这暗示硅藻细胞可能来源于融冰释放。冰生硅藻主要分布在海冰底部的卤水通道中,其生物量累积在春季达到最高^[21-22],并且在融冰期形成聚集体释放到水体中^[23]。在8月14日—8月18日期间,均在水体中发现淡黄的类似于面包屑的碎屑物质,虽然并没有鉴定,但可能为硅藻细胞聚集形成。

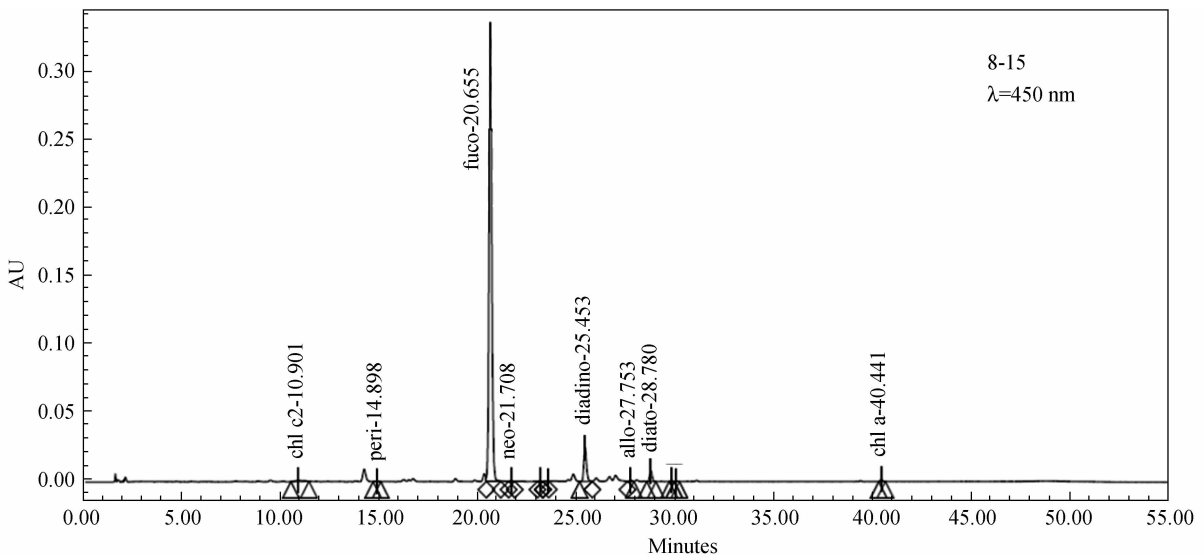


图5 8-15色素样品分析光谱图(横坐标为保留时间,纵坐标为吸光强度)

Fig. 5. Chromatogram analysis of pigments on 15 August (X-axis represents retention time, Y-axis represents absorbance intensity)

2.3 冰下表层水的生态群落

一些特征色素尽管浓度很低,但仍表现出一定的规律性。青绿藻(Prasinophyceae)的特征色素青绿黄素(Prasino)及绿藻(Chlorophyceae)的特殊色素叶黄素(Lut)的分布与岩藻黄素(Fuco)呈相反分布模式(图4和图6),在8月15日—8月18日期间色素浓度明显更低,显示青绿藻和绿藻与硅藻对海冰消融不同的响应。青绿藻和绿藻的浓度由于融冰的稀释而降低。一般认为硅藻是冰藻和浮游植物的优势种,青绿藻则主要存在于盐度更低(盐度 <10

psu)的冰下融池(under-ice pond)^[24]。多甲藻素(Peri)在8月15日—8月18日期间的检测平均浓度是8月9日—8月13日期间的5倍,表明冰融提升了甲藻(Dinophyta)的浓度。其余的特征色素检测平均浓度均很低($<1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),如 But-fuco、Hex-fuco、Allo、Zea等,分别指示了金褐鞭毛藻(含定鞭金藻 Prymnesiophyceae 和金藻 Chrysophyceae)、隐藻(Cryptophyta)及蓝细菌(Cyanobacteria)的分布。特征色素二乙烯叶绿素 a (DV Chl a)则未检测到,表明原绿球藻(Prochlorophyta)在夏季冰下表层水没

有分布。

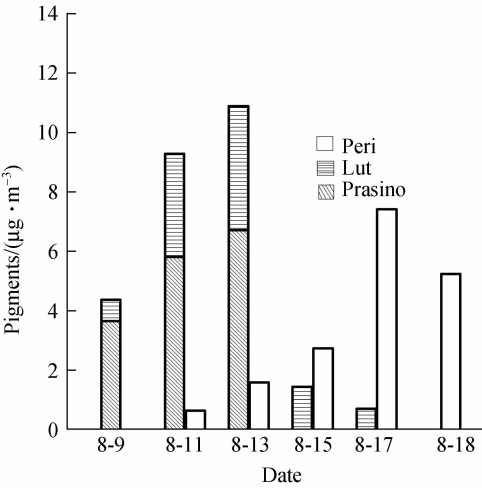


图 6 特征色素的浓度的时间序列

Fig. 6. Time series changes in the concentrations of diagnostic pigments

3 种不同类型浮游植物对总浮游植物生物量的贡献分析表明大粒径的浮游植物在冰水界面表层水占主要优势地位。如图 7 所示,8 月 9 日—8 月 18 日期间, F_{micro} 在 64% 到接近 100% 之间,前人研究认为大尺寸的藻类细胞在冰水界面贡献了 77%—91% 的总的色素生物量^[25]。8 月 9 日—8 月 13 日期间,微微型 Pico 的贡献高于微型 nano,范围在 12%—30% 之间,体现为青绿球藻和绿藻的贡献。

3 结论

(1) 中国第四次北极调查中,高纬度冰水界面表层水营养盐状况表现为显著的 N 限制 ($NO_3 + NO_2 < 0.4 \mu mol \cdot l^{-1}$),P 和 Si 并未对浮游植物的生

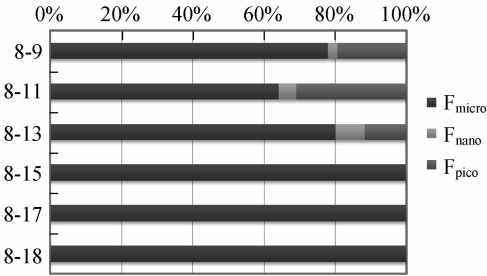


图 7 不同粒径浮游植物对总的生物量的贡献

Fig. 7. The relative contribution of three size classes of phytoplankton to total chlorophyll *a* biomass

长形成抑制。同海冰相比,表层水具有更低的无机氮浓度,因而海冰融化释放的无机氮对水体有一定的补充。

(2) 岩藻黄素 (Fuco) 和叶绿素 *a* (Chl *a*) 分别是水体颗粒物类胡萝卜素 (Carotenoids) 及叶绿素 (Chlorophylls) 的主要组成。硅藻的特征色素岩藻黄素 (Fuco) 在 8 月 15 日相对于 8 月 9 日—8 月 13 日期间有巨大的提升,主要来源于融冰释放的冰生硅藻。而青绿黄素 (Prasino) 及叶黄素 (Lut) 随时间的变化与岩藻黄素 (Fuco) 相反,显示青绿藻和绿藻与硅藻对海冰消融不同的响应。

(3) 在 8 月 9 日—8 月 13 日期间, F_{micro} 在 64%—80% 之间,其次是 F_{pico} 在 12%—30% 之间。在 8 月 15 日—8 月 18 日期间, F_{micro} 基本能够达到 100%,表现为高硅藻的贡献。

致谢 感谢中国第四次北极科学考察期间全体“雪龙”号船员和科考队员的无私帮助,感谢法国第六大学 Pierre Coupel 在样品采集中给予的帮助,感谢国家海洋局第三海洋研究所康建华提供了冰芯样品。

参考文献

1 Hill V, Cota G. Spatial patterns of primary production on the shelf, slope and basin of the Western Arctic in 2002. *Deep-Sea Research II*, 2005, 52:3344—3354.

2 刘子琳, 陈建芳, 张涛, 等. 楚科奇海及其海台区粒度分级叶绿素 *a* 与初级生产力. *生态学报*, 2007, 27(12):4953—4962.

3 Niebauer N J, Alexander V, Henrichs S M. A time-series of the spring bloom at the Bering Sea ice edge I. Physical processes, chlorophyll and nutrient chemistry. *Continental Shelf Research*, 1995, 15(15):1859—1877.

4 Sørense J E, Hop H, Carroll M L, et al. Seasonal food web structures and sympagic-pelagic coupling in the European Arctic revealed by stable isotopes and a two-source food web model. *Progress in Oceanography*, 2006, 71:59—87.

5 Dieckmann G S, Lange M A, Ackley S F, et al. The nutrient status in sea ice of the Weddell Sea during winter: effects of sea ice texture and algae. *Polar Biology*, 1991, 11:449—456.

6 Schandelmeyer L, Alexander V. An analysis of the influence of ice on spring phytoplankton population structure in the southeast Bering Sea. *Limnol-*

- ogy and Oceanography, 1981, 22(5):935—943.
- 7 Gradinger R. Sea-ice algae: Major contributors to primary production and algal biomass in the Chukchi and Beaufort Seas during May/June 2002. Deep-Sea Research II, 2009, 56:1201—1212.
- 8 陈建芳, 张海生, 金海燕, 等. 北极陆架沉积碳埋藏及其在全球碳循环中的作用. 极地研究, 2004, 16(3):193—201.
- 9 陈敏, 黄奕普, 郭劳动, 等. 北冰洋: 生物生物产力的“沙漠”? 科学通报, 2002, 47(9):707—710.
- 10 Reid N, Johns G G, Edwards M, et al. A biological consequence of reducing Arctic ice cover: arrival of the Pacific diatom *neodenticula seminae* in the North Atlantic for the first time in 800000 years. Global Change Biology, 2007, 13:1910—1921.
- 11 ACIA. Impacts of a Warming Climate: Arctic Climate Impact Assessment. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- 12 陈立奇, 赵进平, 卞林根, 等. 影响北极地区迅速变化的一些关键过程研究. 极地研究, 2004, 15(5):283—302.
- 13 Grebmeier J M, Cooper L W, Feder H M. Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic. Progress in Oceanography, 2006, 71:331—361.
- 14 van Heukelem L, Thomas C S. Computer-assisted high-performance liquid chromatography method development with applications to the isolation and analysis of phytoplankton pigments. Journal of Chromatography A, 2001, 910:31—49.
- 15 Jeffery S W, Mantoura R F C, Wright S W, et al. Phytoplankton pigments in oceanography. Paris: UNESCO publishing, 1997.
- 16 Claustre H. The trophic status of various oceanic provinces as revealed by phytoplankton pigment signatures. Limnology and Oceanography, 1994, 39(5):1206—1210.
- 17 Uitz J, Claustre H, Morel A, et al. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment based on surface chlorophyll. Journal of Geophysical Research, 2006, 111:C08005.
- 18 Maestrini S Y, Rochet M, Legendre L, et al. Nutrient limitation of the bottom-ice microalgal biomass (southeastern Hudson Bay, Canadian Arctic). Limnology and Oceanography, 1986, 31(5):969—982.
- 19 Falkowski P G. Evolution of the nitrogen cycle and its influence on the biological sequestration of CO₂ in the ocean. Nature, 1997, 387:272—275.
- 20 Cota G F, Anning J L, Harris L R, et al. Impact of ice algae on inorganic nutrients in seawater and sea ice in barrow strait, NWT, Canada, during spring. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1990, 47(7):1402—1415.
- 21 Gradinger R. Vertical fine structure of algal biomass and composition in Arctic pack ice. Marine Biology, 1999, 133:745—754.
- 22 Ambrose W G, van Quillfeldt C, Clough L M, et al. The sub-ice algal community in the Chukchi Sea: large- and small- scale patterns of abundance based on images from a remotely operated vehicle. Polar Biology, 2005, 28:784—795.
- 23 Riebesell U, Scholoss I, Smetacek V. Aggregation of algae released from melting sea ice: Implications for seeding and sedimentation. Polar Biology, 1991, 11:239—248.
- 24 Gradinger R. Occurrence of an algal bloom under Arctic pack ice. Marine Ecology Progress Series, 1996, 131:301—305.
- 25 Grosselin M, Levasseur M, Wheeler P A, et al. New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean. Deep-Sea Research II, 1997, 44:1623—1644.

RESPONSE OF NUTRIENTS AND THE SURFACE PHYTOPLANKTON COMMUNITY TO ICE MELTING IN THE CENTRAL ARCTIC OCEAN

Zhuang Yanpei¹, Jin Haiyan¹, Chen Jianfang¹, Wang Bin¹,
Li Hongliang¹, Chen Fajin¹, Lu Yong¹, Xu Jie²

(¹The second Institute of Oceanography, SOA, Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, SOA, Hangzhou 310012, China;

² Division of Environment, Hong Kong University of Science and Technology, Clear water Bay, Hong Kong, China)

Abstract

During the fourth Chinese National Arctic Research Expedition cruise in summer 2010, a time-series observation was carried out to examine the response of nutrients and phytoplankton community in the ice-water interface to the ice melting in the central Arctic Ocean. Phosphate and silicate in the ice-water interface were rich relative to

dissolved inorganic nitrogen (DIN), based on the Redfield ratio (16N: 1P: 16Si), suggesting that DIN was the potential limiting nutrient. DIN concentrations in the sea ice were about 3—4 times that in the surface seawater, indicating that melting ice delivered DIN to the surface water. Pigment analysis showed that fucoxanthin and chlorophyll *a* contribute to carotenoids and chlorophylls in particles. The mean concentrations of chlorophyll *c*, diatoxanthin, diadinoxanthin and fucoxanthin from 15 August to 18 August were $6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $22 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $73 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $922 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, suggesting that diatoms dominated in the phytoplankton community composition. Furthermore, a notable enhancement in fucoxanthin and chlorophyll *a* during a large-scale ice melting was likely attributed to senescent diatoms released from the bottom sea-ice as well as phytoplankton diatoms growth in the water column due to the input of nutrients (i. e. DIN) and reducing light limitation from melting ice. Temporal distribution patterns of prasinoxanthin and lutein differed from fucoxanthin, indicating that the response of green algae and diatoms to ice melting were different.

Key words ice melting, photosynthetic pigments, nutrient limitation, Arctic