

DOI: 10.5846/stxb201307151898

王肖颖,张芳,李娟英,林凌,高源,何剑锋. 2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征. 生态学报, 2014, 34(8): 2076–2084.

Wang X Y, Zhang F, Li J Y, Lin L, Gao Y, He J F. Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 2076–2084.

2012 年夏季挪威海和格陵兰海浮游植物群落结构的色素表征

王肖颖^{1,2}, 张芳^{2,*}, 李娟英¹, 林凌², 高源^{2,3}, 何剑锋²

(1. 上海海洋大学农业部淡水水产种质资源重点实验室, 上海 201306;

2. 国家海洋局极地科学重点实验室, 中国极地研究中心, 上海 200136;

3. 近海海洋环境科学国家重点实验室, 厦门大学海洋与地球学院, 厦门 361000)

摘要: 对 2012 年中国第 5 次北极科学考察期间的挪威海和格陵兰海两个断面的光合色素进行了高效液相色谱 (HPLC) 分级分析, 通过藻类色素化学分类分析软件 (CHEMTAX) 获得了不同浮游植物类群对叶绿素 a 的贡献, 进而得到该海域表层和次表层 (30 m) 的浮游植物群落结构。结果表明: 表层总叶绿素 a 的浓度为 23.59 ng/L, 低于次表层的 30.38 ng/L, 其中浮游植物根据粒径划分对总叶绿素 a 的贡献由高到低依次是微型浮游植物、小型浮游植物和微微型浮游植物。该海域同时存在葱绿叶绿素 (Prasino)、墨角藻黄素 (Fuco)、别藻黄素 (Allo)、多甲藻素 (Perid)、玉米黄素 (Zea)、19-丁墨甲藻黄素 (19'BF) 和 19-六己墨甲藻黄素 (19'HF) 等色素, 其浓度和分布与温盐和营养盐等环境因子存在一定的相关性。不同粒径浮游植物色素组成显示, 微微型浮游植物群落中以 S 型定鞭藻 (28%)、N 型定鞭藻 (21%)、硅藻 (18%) 和青绿藻 (12%) 占优; 微型浮游植物群落的优势类群为 S 型定鞭藻 (53%)、N 型定鞭藻 (20%) 和硅藻 (12%); 而小型浮游植物群落主要为硅藻 (63%) 和甲藻 (17%)。

关键词: 光合色素; 挪威海; 格陵兰海; 浮游植物; 群落结构

Phytoplankton community structures revealed by pigment signatures in Norwegian and Greenland Seas in summer 2012

WANG Xiaoying^{1,2}, ZHANG Fang^{2,*}, LI Juanying¹, LIN Ling², GAO Yuan^{2,3}, HE Jianfeng²

1 Key Laboratory of Freshwater Fishery Germplasm Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

2 China SOA Key Laboratory for Polar Science, Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

3 State Key Laboratory of Marine Environmental Science, College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361000, China

Abstract: Composition of phytoplankton controlled not only the formation of the Food Chain, but also the efficiency of energy transfer. At the same time, phytoplankton influenced the distribution of nutrient and the sedimentation of organic particulate matter. So study of phytoplankton community structures plays an important role in understanding the ecological function of phytoplankton. Photosynthetic pigments needed by photosynthesis, are very good biomarkers. They can be used to research and characterize phytoplankton community structure. Norwegian and Greenland Seas which are influenced by the Arctic water with low temperature and salinity and Atlantic water with high temperature and salinity. Understanding of correlation between environmental factors and phytoplankton community structure, is important for understanding the community structure of the marine organisms and their ecological function.

During the 5th Chinese Arctic Research Expedition in summer 2012, we analyze the photosynthetic pigments from

基金项目: 国家自然科学基金 (41076130, 41206189); 南北极环境综合考察与评价专项 (CHINARE2011–2015)

收稿日期: 2013–07–15; 修订日期: 2014–03–03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangfang@pric.gov.cn

<http://www.ecologica.cn>

Norwegian and Greenland Seas by HPLC. Contributions of different phytoplankton assemblages to Chlorophyll *a* were obtained by Chemical Taxonomy (CHEMTAX), and thus resulted in composition of the phytoplankton community structure at the surface and subsurface water (about 30 m depth).

The result showed that average concentration of Chlorophyll *a* at surface water was 23.59 ng/L, lower than that at upper water (30.38 ng/L). The contributions of phytoplankton to Chlorophyll *a* were nano→micro→pico-one. Prasinolanthin, Fucoxanthin, Alloxanthoxyletin, Peridinin, Zeaxanthin, 19'-but-fucoxanthin, 19-hexanoyloxyfucoxanthin were observed in the waters. Their distributions were relative to environmental factors, including Nutrients, temperature and salinity. These photosynthetic pigments showed negative correlations with temperature and salinity. Whereas they showed positive relations with nutrients, including NO_2^- , NO_3^- , SiO_3^{2-} and PO_4^{3-} . The correlations of different phytoplankton and environmental factors were different. Diatoms had a very significant positive correlation with SiO_3^{2-} , but had no correlation with PO_4^{3-} , NO_2^- and NO_3^- ; Haptophytes-N had significant positive correlations with PO_4^{3-} , NO_2^- and NO_3^- ; Haptophytes-S also had a positive correlation with PO_4^{3-} , but had no correlation with NO_2^- and NO_3^- . The maximum values of these photosynthetic pigments, except for Zea and Fuco, existed in the subsurface of the section BB.

The distribution and concentration of photosynthetic pigments could explain the distribution and abundance of the phytoplankton to some extent. Not only because the pigments are complex and multiple, but also because there are inevitable errors in the testing and sampling, we can't determine the existence and abundance of the phytoplankton. So we use the CHEMTAX to obtain the contributions of different phytoplankton assemblages to Chlorophyll *a*, and thus resulted in composition of phytoplankton community structure. The composition of phytoplankton showed that Haptophytes-S (28%), Haptophytes-N (21%), Diatoms (18%), and Prasinophytes (12%) were main assemblages in the picoplankton; the main composition of nanophytoplankton were Haptophytes-S (53%), Haptophytes-N (20%), and Diatoms (12%); meanwhile, Diatoms (63%) dominated the microphytoplankton, followed by Dinoflagellates (17%). Haptophytes-S, Haptophytes-N and Diatoms were dominant species in the surface and subsurface of section BB and AT belonging to the Norwegian and Greenland Sea. If Fucoxanthins and Diatomss existence in picophytoplankton could explain the tendency of phytoplankton to micro and miniaturization, these still need to be more sufficient evidence.

Key Words: photosynthetic pigments; Norwegian Sea; Greenland Sea; phytoplankton; community structure

海洋浮游植物通过光合作用,可以将溶解无机碳转化为颗粒有机碳,进而通过浮游动物的摄食和食物链传递到高营养级^[1]。浮游植物组成不仅控制着食物链的构成和能量传递效率,同时影响着海水营养盐的分布和有机颗粒物的沉降^[2],因此研究其群落结构对了解浮游植物的生态作用具有重要的作用。浮游植物进行光合作用所必须的光合色素具有生物标志性^[3],可用来研究和表征其群落结构。挪威海和格陵兰海受低温、低盐的北冰洋水和高温、高盐的大西洋水的^[4-5]双重影响,研究该海域浮游植物群落的分布、结构以及与环境因子的相关性,对于了解该海域海洋生物群落结构及生态作用具有重要意义。目前对该海域浮游植物的研究主要集中在丰度、生物量、群落结构组成^[6]以及季节性变化^[7-8]等研究,研究的主要类群包括自养鞭毛藻、硅藻和蓝

藻^[9-11],但对该海域光合色素的研究仅集中在应用荧光仪检测 Chl *a* 来表征浮游植物生物量^[5-6,12],尚未应用多种标志光合色素来全面表征浮游植物群落结构。本文利用中国第五次北极科学考察的机会,于2012年夏季对该海域两条断面的分层(表层和次表层30 m)、分级(微微型、微型、小型)浮游植物进行了HPLC色素分析,以了解挪威海和格陵兰海浮游植物的群落结构特征及其与环境的相关性。此前我国从未在该海域开展相关研究。

1 材料和方法

1.1 站位布设和样品采集

2012年我国第5次北极科学考察期间,在挪威海和格陵兰海共布设了2个采样断面共10个站位(图1),各站位的具体经纬度和采样层次信息见表

1. 各站点用 SBE 911 CTD (Conductance-Temperature-Depth) 采集表层(0 m) 和次表层(30 m) 水样 4—8 L, 经 20 μm 孔径筛绢和 3 μm 聚碳酸酯滤膜过滤, 再过滤到 GF/F 滤膜(47 mm 直径, 0.7 μm 孔径, 预先在 450℃ 下灼烧预处理) 上, 过滤压力均低于 30KPa。滤膜用铝箔包好后 -80℃ 超低温冰箱冷冻保存, 直至实验室分析。本文将浮游植物分三级研究, 包括微型浮游植物(<3 μm 粒径)、微型浮游植物(3—20 μm) 和小型浮游植物(>20 μm)。

1.2.1 光合色素 HPLC 分析

将冷冻的滤膜剪成碎片, 加入 3 mL 100% 甲醇 (HPLC 级), 置于 -20℃ 冰柜 1 h, 后超声 30 s (冰

用 0.2 μm 孔径的滤膜过滤后, 与四丁基醋酸铵 (TBAA 28 mmol/L) 体积比 1:1 混合进样^[13]。色谱系统为 Waters e2695 色谱工作站, 色谱柱为 Ecilipse XDB C8 柱(150 mm×4.6 mm, 3.5 μm), 检测器为 Waters 2998 多极管阵列检测器(DAD)。色素分析在 Van Heukelem 和 Thomas^[14]的方法的基础上进行了改进, 使用梯度淋洗的程序为(min, A%, B%): (0, 90, 10), (21, 70, 30), (36, 5, 95), (41, 5, 95), (42, 90, 10), (56, 90, 10)。流动相 A 液体积比是 TBAA(28 mmol/L): 甲醇 = 7:3, B 液是 100% 甲醇。通过对照色素标准品保留时间和光谱特性, 分别对叶绿素 a (Chlorophyll a, Chl a)、叶绿素 b (Chlorophyll b, Chl b)、叶黄素(Lutein, Lut)、青绿黄素 (Prasinolanthoxanthin, Prasino)、别黄素 (Alloxanthoxyletin, Allo)、β-胡萝卜素(Beta-Carotene, β-caro)、叶绿素 c₂(Chlorophyll c₂, Chl c₂)、叶绿素 c₃(Chlorophyll c₃, Chl c₃)、硅甲藻黄素 (Diadinoxanthin, Diadino)、二乙烯叶绿素 a (Divinyl Chlorophyll a, DV Chl a)、新黄素(Neoxanthin, Neo)、多甲藻素(Peridinin, Perid)、紫黄素(Violaxanthin, Vio)、玉米黄素 (Zeaxanthin, Zea)、硅藻黄素 (Diatoxanthin, Diato)、岩藻黄素(Fucoxanthin, Fuco)、19-己酰氧岩藻黄素(19'-Hexanoyloxyfucoxanthin, 19' HF) 和 19-丁酰氧岩藻黄素 (19'-Butanoyloxyfucoxanthin, 19' BF) 进行定性和定量检测, 检测波长为 450 nm, 采用的色素标准品, 购自丹麦国际 C14 检测中心(International Agency for 14C Determination, Danmark)。

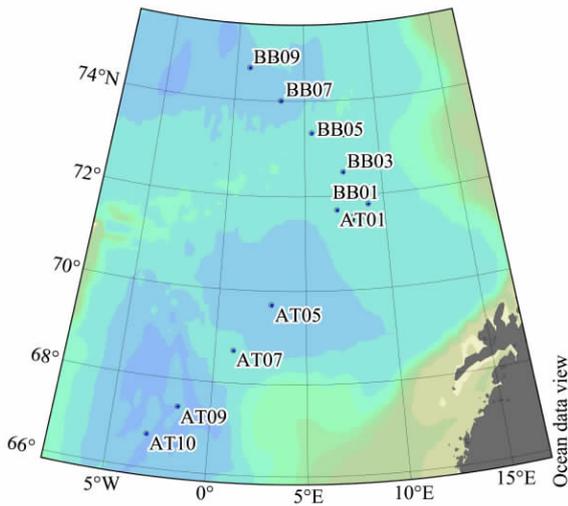


图 1 挪威海和格陵兰海采样站点

Fig. 1 Sampling stations in Norwegian and Greenland Seas

浴) 萃取, 然后重新放置于 -20℃ 冰柜 1 h。萃取液

表 1 站点经纬度和采样水层信息表

Table 1 Longitude, latitude and sampling depths of each sampling station

站点 Station	采样时间 Sampling date	经度/(°) Longitude	纬度/(°) Latitude	水深/m Depth	采样水层/m Sampling depth
AT10	Aug. 11	356.89	66.74	3764.4	0-30
AT09	Aug. 11	358.31	67.40	3186.7	0-30
AT07	Aug. 10	1.00	68.70	2966.4	0-30
AT05	Aug. 10	3.03	69.70	3268.3	0-30
AT01	Aug. 09	7.00	71.71	2904.8	0-30
BB01	Aug. 04	1.00	71.80	2615.5	0-25
BB03	Aug. 05	7.51	72.50	2584.6	0-20
BB05	Aug. 05	5.50	73.33	2553.3	0-20
BB07	Aug. 06	3.34	74.01	3444.7	0-35
BB09	Aug. 06	0.97	74.67	3660.2	0-36

1.2.2 光合色素的 CHEMTAX 分析

浮游植物不同类群对叶绿素 a 的贡献率用 CHEMTAX 程序因子分析方法在 MATLAB 环境下计算得出^[15], CHEMTAX 软件根据各个藻纲初始色素与 Chl a 的比值, 利用程序因子分析和最陡下降算法找到样品最符合的植物的群落组成。初始色素比值采用在南大洋和北极加拿大海盆使用的初始色素比值^[16-17], 最终比值见表 2。本文 CHEMTAX 结果主要用于评估不同浮游植物类群在浮游植物群落中的优势地位。分析的 8 种浮游植物类群包括青绿藻 (Prasinophytes)、甲藻 (Dinoflagellates)、隐藻

(Cryptophytes)、N 型定鞭藻 (Haptophytes-N)、S 型定鞭藻 (Haptophytes-S)、蓝藻 (Cyanobacteria)、绿藻 (Chlorophytes) 和硅藻 (Diatoms)。其中, Fuco 多出现在硅藻细胞中^[17]; S 型定鞭藻标志色素是 19'BF, 除此之外包含 Chl c₃、Chl c₂ 等色素^[8], 而 19'HF 是 N 型定鞭藻的标志色素^[17]; 青绿藻的标志色素是 Prasino, 它还含有 Chl b、Neo 等色素^[17]; Allo 和 Zea 分别是隐藻和蓝藻的标志色素^[17], 绿藻 (Chlorophytes) 和原绿藻 (Prochlorophytes)^[19] 等其他浮游植物中也含有少量的 Zea。

表 2 本研究使用的最终色素比率

Table 2 The final pigment ratios in this study

类群 Class	色素 Pigments												
	Peri	19'BF	Fuco	19'HF	Neo	Prasino	Vio	Allo	Lut	Zea	Chl b	Chl a	总和 Total
青绿藻 Prasinophytes	0	0	0	0	0.032	0.101	0.013	0	0.002	0	0.117	0.211	0.524
甲藻 Dinoflagellates	0.257	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2425	0.5
隐藻 Cryptophytes	0	0	0	0	0	0	0	0.093	0	0	0	0.407	0.5
N 型定鞭金藻 Haptophytes-N	0	0	0	0.315	0	0	0	0	0	0	0	0.185	0.5
S 型定鞭金藻 Haptophytes-S	0	0.082	0.119	0.110	0	0	0	0	0	0	0	0.204	0.484
绿藻 Chlorophytes	0	0	0	0	0.02	0	0.018	0	0.064	0.003	0.083	0.314	0.5
蓝藻 Cyanobacteria	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.129	0	0.371	0.5
硅藻 Diatoms	0	0	0.303	0	0	0	0	0	0	0	0	0.241	0.456

1.3 环境因子数据获取和分析

海水温、盐数据由 SBE 911 plus CTD 温盐深剖面仪现场获得。各站位采集表层和次表层水样各 100 mL, 经 GF/F 滤膜过滤, 滤液在船上实验室用 Skalar San ++ 营养盐自动分析仪测定磷酸盐、硅酸盐、硝酸盐和亚硝酸盐的浓度^[18]。

对光合色素浓度和环境因子的相关性进行了皮尔森分析 (Person Analysis), 并用 *t* 检验检验其差异显著性。

2 结果

2.1 色素分析

2.1.1 叶绿素 a

叶绿素 a 常用于表征浮游植物的生物量。挪威海和格陵兰海断面的表层和次表层叶绿素 a 浓度如图 2 所示。由图可知, 表层叶绿素 a 平均浓度为

23.59 ng/L, 低于次表层的 30.38 ng/L。就分级叶绿素而言, 表层微微型、微型和小型浮游植物叶绿素 a 平均浓度分别为 6.36、9.78 ng/L 和 7.44 ng/L, 次表层分别为 5.02、15.04 ng/L 和 10.32 ng/L, 显示微型浮游植物在群落中占有优势, 其次是小型浮游植物, 而微微型最低; 而且从表层到次表层, 除微微型浮游植物平均生物量略有下降外, 微型和小型浮游植物平均生物量均有明显增加。低纬海域浮游植物生物量要高于高纬海域。

2.1.2 标志色素与环境因子

各站位标志色素浓度及环境因子数据见图 3。由图可知, 随着纬度的增加, 水温由 12°C 下降至 2°C, 而盐度则维持在 35 左右, 波动较小; 硝酸盐和亚硝酸盐总体呈上升趋势, 磷酸盐在 0.26—0.79 μmol/L 之间, 总体随纬度增加也呈明显上升趋势。次表层较表层呈现低温、高营养盐的特点。

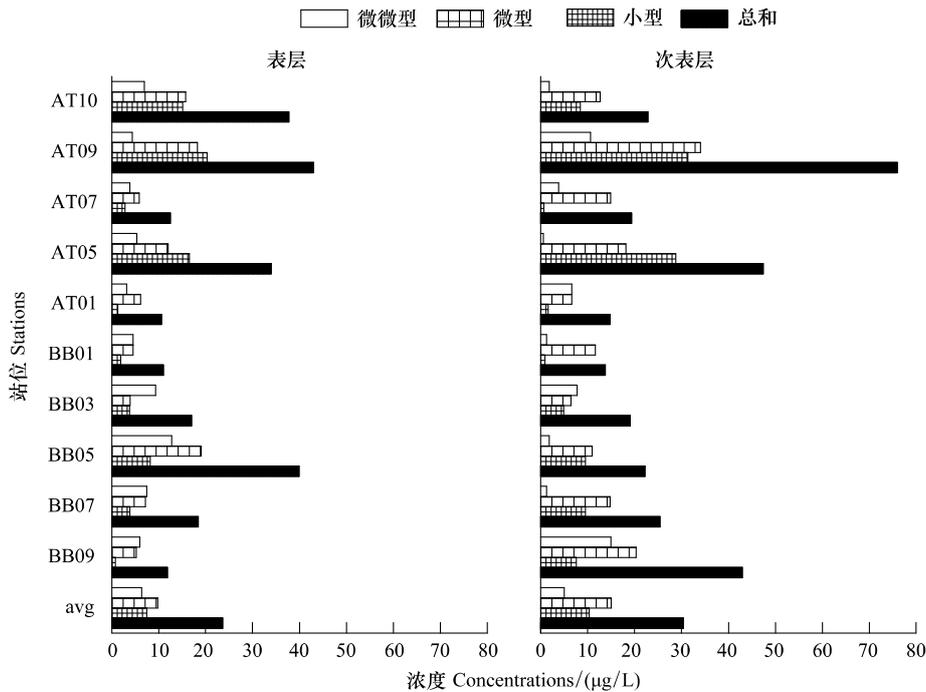


图2 各站位表层和次表层不同粒径叶绿素 a 浓度

Fig. 2 The size-classified Chl a concentrations of surface and subsurface waters of each sampling station

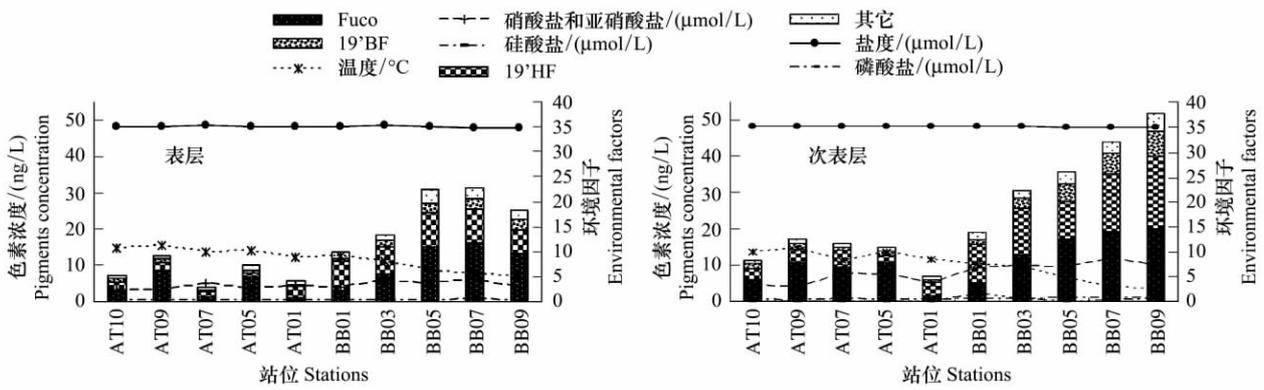


图3 不同站位的标志色素浓度及其环境因子

Fig. 3 The concentration of the pigments and the environmental factors of different stations

由图3可知,各个站位表层和次表层 Fuco 均有大量分布,且浓度很高,其中 BB05 站位的表层和次表层,以及 AT09 和 BB09 站位的次表层该色素浓度均超过 20 ng/L,次表层硅藻生物量要明显高于表层。如图3所示,19'BF 和 19'HF 在两个断面的表层和次表层均有大量检出,说明定鞭藻在挪威海和格陵兰海域浮游植物群落结构中占有明显的优势地位,尤其是 BB 断面,次表层尤为丰富,最高值出现在 BB09 断面次表层,为 7.008 ng/L。Perid 浓度平均大于 1 ng/L,较 Prasino、Zea 和 Allo 略高,最高值出现在 BB09 站位次表层。Prasino、Zea 和 Allo 在各个

站位均有检出,但含量较低,证实了该海域广泛的存在着一定量的青绿藻、蓝藻和隐藻。Prasino 最高值出现在 BB09 站位的表层,浓度为 1.119 ng/L; Allo 最高值出现在 BB09 站位的次表层,为 0.726 ng/L;而 Zea 的极大值在 BB07 站位表层,为 0.984 ng/L。Perid 浓度最高值出现在 BB09 站位的次表层;除 BB09、BB01 和 AT05 三个站位外,其余表层浓度高于次表层。

皮尔森相关性分析(表3)结果表明:除 Prasino ($P < 0.05$) 外,检测的几种标志色素全部和温度呈现极显著的正相关($P < 0.01$);除 Prasino 和 Zea 外,其

他色素的浓度和盐度也呈现明显的负相关 ($P < 0.05$); 除 19'-HF 和 Allo 外, 和硅酸盐呈负相关 ($P < 0.05$); Perid、Allo 和 19'-HF 与硝酸盐和亚硝酸盐呈

显著的正相关 ($P < 0.05$); 除 Prasino、Zea 和 Fuco 外的色素浓度和磷酸盐呈明显正相关 ($P < 0.05$)。

表 3 光合色素与环境因子的 Pearson 相关性分析

Table 3 The Pearson Correlations between pigments and environmental factors

环境因子 Environmental factors	多甲藻素 Perid	19'-丁酰氧 岩藻黄素 19'-BF	岩藻黄素 Fuco	葱绿叶绿素 Prasino	19'-己酰氧 岩藻黄素 19'-HF	别藻黄素 Allo	玉米黄素 Zea
硝酸盐+亚硝酸盐/($\mu\text{mol/L}$)	0.492*	0.435	0.335	0.262	0.474*	0.443*	0.436
磷酸盐/($\mu\text{mol/L}$)	0.561**	0.527*	0.372	0.280	0.584**	0.530*	0.430
硅酸盐/($\mu\text{mol/L}$)	-0.697**	-0.588**	-0.875**	-0.645**	-0.310	-0.394	-0.509*
盐度 Salt	-0.616**	-0.745**	-0.554*	-0.252	-0.754**	-0.546*	-0.290
温度 Temperature/ $^{\circ}\text{C}$	-0.748**	-0.802**	-0.598**	-0.466*	-0.840**	-0.686**	-0.594**

2.2 浮游植物主要类群的分布

图 4 显示了浮游植物不同优势类群对总叶绿素 a 的贡献。由图 4 可知, 微微型浮游植物最主要类群是 S 型和 N 型定鞭金藻, 对 Chl a 的贡献率分别是 28% 和 21%, 其次是硅藻 (18%) 和青绿藻

(12%)。其他类群有蓝细菌 (8%) 和甲藻 (7%) 等。其中, 表层占有明显优势地位的类群是 N 型和 S 型定鞭金藻; 次表层是 S 型定鞭金藻, 硅藻和 N 型定鞭金藻。相对表层, 次表层硅藻和青绿藻对 Chl a 的贡献增加, 而 N 和 S 型定鞭金藻则降低。

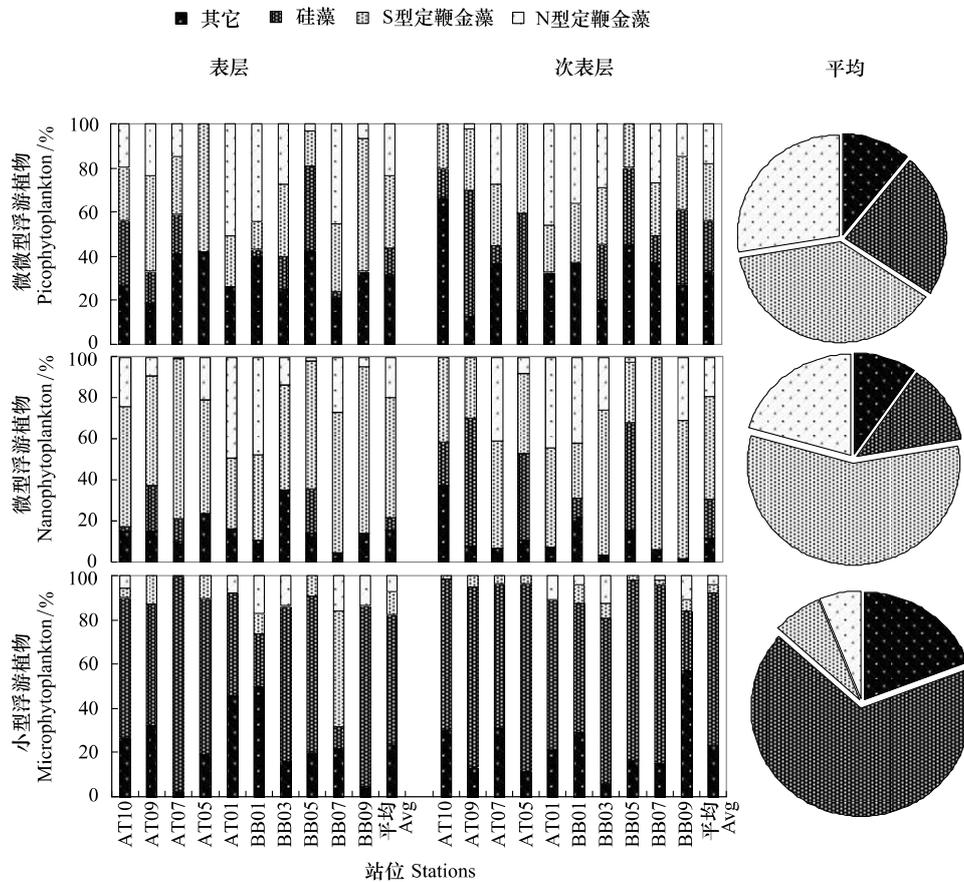


图 4 分粒径浮游植物各个类群对叶绿素 a 的贡献率

Fig.4 Contribution of each group of phytoplankton of every particle size to total Chl a

微型浮游植物的优势类群(图4)是S型定鞭金藻(53%),其次是N型定鞭金藻(20%)和硅藻(12%)。表层优势类群为S型和N型定鞭金藻,对Chl a的贡献率分别为58.4%和19.8%;次表层中优势类群包括S型定鞭金藻(49.8%),其次是N型定鞭金藻(19.4%)和硅藻(18.7%)。相对表层,次表层中定鞭金藻降低,而硅藻增加。硅藻在AT09等站位的次表层,甚至占据优势。

由图4所示,小型浮游植物中最主要的类群是硅藻,它对Chl a的贡献率高达63%,其次是甲藻17%,还有少量的S和N型定鞭金藻(6%+7%)。其中,表层硅藻占优势地位,对Chl a的贡献率为58.7%,其次是甲藻(18.5%),还有少量的S型和N型定鞭金藻(9.9%+7.4%)等。次表层硅藻对Chl a的贡献率平均为68.8%,比表层有所增加;而甲藻的贡献率平均为16.0%,略低于表层。

3 讨论

3.1 研究海域浮游植物群落结构

郭超颖等^[23]对北冰洋微型浮游生物分布及其多样性的研究表明,微型浮游植物是北冰洋水体中生物量和生产力的重要贡献者。本研究显示,表层和次表层各类群按粒径划分由多到少依次是:微型浮游植物、小型浮游植物、微微型浮游植物,和Gunnar Bratbat对挪威海Chl a分布研究规律相同^[24]。

挪威海和格陵兰海的优势类群包括硅藻和鞭毛藻等^[6],本文也发现了大量硅藻的标志色素Fuco,表层浓度平均达7.6 ng/L,次表层浓度平均高达11.3 ng/L。Fuco在硅藻中含量较高,并少量存在于一些甲藻和定鞭藻中^[17]。此外,发现了S型和N型定鞭藻的标志色素在表层和次表层大量存在,平均浓度分别高达2.1 ng/L和6.9 ng/L。2000年5—8月对格陵兰海浮游植物研究发现鞭毛藻占有明显的优势地位,尤其是属于定鞭藻的棕囊藻(27%),并且部分站位硅藻占优势地位^[8]。此外,Annette^[9]早在1984年研究就发现挪威海格陵兰海域的自养鞭毛藻占优势地位,对浮游整个浮游植物的贡献高达49%。除以上两种主要类群外,本文还发现了Zea、Allo、Perid和Prasino等其他类群的标志色素。Zea相对于其他胡萝卜素或者叶绿素来讲,具有稳定性的特点,非常适

合作为生物标志物;Allo的存在证明了挪威海和格陵兰海域隐藻的存在,而Perid和Prasino的检出表明甲藻和青绿藻在该海域有一定的分布。Li^[25]在北冰洋加拿大海盆的研究表明,随着全球变暖和北极海冰的消除,浮游植物存在微型化的趋势。本研究显示,微型浮游植物占优势。是否同样存在微型化趋势,有待进一步研究。

浮游植物的标志色素的浓度和分布,从一定程度上可以说明藻本身的丰度和分布,但是由于植物的复杂性和光合色素的多样性,以及检测和采样中的不可避免的误差,比如绿藻没有自己特有的色素,大部分色素(Chl b、Neo和Vio)是和青绿藻相同^[18],因此不能确定其存在和多少,本文进一步借用CHEMTAX软件对色素进行程序因子分析,得到各种优势浮游植物类群对总Chl a的贡献率。分粒径使用CHEMTAX软件分析各个类群对Chl a的贡献率发现,微微型、微型和小型浮游植物中贡献最大的是硅藻和定鞭金藻,其中次表层硅藻的贡献率更大,定鞭金藻反之。1993年Booth等人在格陵兰海研究中也发现硅藻在小型植物中占有主导地位^[11],Coupel^[17]等人在研究太平洋北极地区浮游植物群落组成时,发现硅藻和甲藻对大于20 μm的小型浮游植物贡献突出。Booth在格陵兰海区也发现,部分硅藻是大小在10 μm以下^[11],小于20 μm。

庄燕培等^[25]2012年对北冰洋中心区表层海水浮游植物群落结构研究发现,青绿藻在微微型浮游植物中占有主导地位,本文检测到它对Chl a的贡献并不是最高,可能是受大西洋暖流的影响。蓝藻和青绿藻一般为微微型浮游植物,在个别站位微型浮游植物和小型浮游植物中的出现是说明,采样过程中由于植物浓度过高而发生了截留,因此以此种单一色素判断蓝藻的存在和丰度情况,略显不妥,这也是HPLC色素分析研究浮游植物群落结构的弊端所在。值得注意的是,微微型浮游植物中的Allo和Perid的检出,刘莹^[26]利用分子生物学手段对夏季北极海域微微型浮游植物的研究发现了硅藻和甲藻的存在,很可能的原因是小于2 μm的细胞碎片^[16]可以通过2 μm孔径的滤膜而导致的。

3.2 环境对浮游植物群落的潜在调控

海洋中温度和盐度的变化和分层,形成特殊的水团进而影响着海洋生物分布;氮是生物蛋白质

的重要组成部分,磷在构成细胞膜时不可或缺,硅在浮游植物繁殖时也会有大量消耗,因此营养盐的多少在一定程度上决定和制约着生物的丰度和分布^[27]。Harrison^[7]等人也发现包括挪威海格陵兰海在内的亚北极海域,其浮游植物的分布和丰度受物理水文条件(温度和盐度)和营养元素(硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐)等环境因子的影响明显。

崔世开^[28]研究发现北极海冰浮游植物的生物量和温度呈现明显的负相关,而和硅酸盐和磷酸盐呈正相关,本文也发现浮游植物受环境因子的影响明显,全部和温度和盐度(除青绿藻和蓝藻)呈显著的负相关,但针对不同植物类群来说,受环境因素的调控各不相同。硅藻和硅酸盐有极显著的正相关,而其他两种营养盐相关性不显著,Rey^[21]等也发现硅藻在挪威海发生赤潮时受到硅酸盐的限制明显大于磷酸盐和硝酸盐。N型和S型定鞭金藻和磷酸盐呈显著和极显著正相关,S型定鞭金藻和硝酸盐和亚硝酸盐无相关性,Smith^[29]发现该海域定鞭藻中的棕囊藻和磷酸盐有明显的正相关,而和硝酸盐相关性不大,而本文发现N型定鞭金藻和硝酸盐和亚硝酸盐呈显著正相关。本文还发现甲藻和隐藻与磷酸盐和硝酸盐及亚硝酸盐呈显著正相关,而蓝藻和青绿藻和营养盐的相关性不显著,这在该海域其他相关研究中没有报道。

4 结论

本研究根据2012年中国北极第五次科学考察的现场采集样品,首次利用HPLC色素分析和CHEMTAX数据分析方法,分级分析研究了北极海域挪威海和格陵兰海浮游植物的色素分布、群落结构组成,研究结果表明:

(1) 挪威海格陵兰海表层叶绿素a浓度为23.59 ng/L左右,次表层Chl a浓度为30.38 ng/L左右,高于表层;其中,微型浮游植物是该海区初级生物量最主要的贡献者。

(2) 挪威海格陵兰海存在有Prasino、Fuco、Zea、Perid、Allo、19'BF、19'HF等色素。这些色素和环境因子存在着一定的相关性,总体上与温度和盐度呈现负相关,而和营养盐(硝酸盐、亚硝酸盐、磷酸盐和可溶性硅)呈现正相关。几种色素的极大值都存在于BB断面,除Zea和Fuco外且全部在次表层,与

BB断面相对较低的温度温和较高的营养盐以及次表层的高浓度营养盐相对应。

(3) 微型浮游植物中具有优势地位的是S型定鞭金藻、N型定鞭金藻、硅藻和青绿藻,它们对叶绿素a的贡献率分别是28%、21%、18%和12%;微型浮游植物中S型和N型定鞭金藻占绝对优势,它们对叶绿素a的贡献率分别是53%和20%,其次是硅藻12%;小型浮游植物中对叶绿素a贡献率最大的是硅藻63%,其次是甲藻17%。

References:

- [1] Tang Q S. Study on ecosystem dynamics in coastal ocean. Beijing: Science Press, 2000: 10.
- [2] Guidil L, Stemmann L, Jackson G A, Ibanez F, Claustre H, Legendre L, Picheral M, Gorsky G. Effects of phytoplankton community on production, size export of large aggregates: A world-ocean analysis. *Limnology and Oceanography*, 2009, 54 (6): 1951-1963.
- [3] Jeffery S W, Mantoura R F C, Wright S W. Phytoplankton pigments in oceanography. Paris: UNESCO Publishing, 1997: 34.
- [4] Aken V, Mattheus H. The Oceanic Thermohaline Circulation: An Introduction. 2007, Springer. ISBN 0-387-36637-7.
- [5] Erga S R, Ssebiyonga N, Hamre B, Frette Ø, Hovland E, Hancke K, Drinkwater K, Rey F. Environmental control of phytoplankton distribution and photosynthetic performance at the Jan Mayen Front in the Norwegian Sea. *Journal of Marine Systems*, 2012, doi: 10.1016/j.jmarsys.2012.01.006.
- [6] Gradinger R, Friedrich C, Spindler M. Abundance biomass and composition of the sea ice biota of the Greenland Sea pack ice. *Deep-Sea Research II*, 1999, 46: 1457-1472.
- [7] Harrison W G, Børshem K Y, Li W K Y, Maillet G L, Pepin P, Sakshaug E, Skogen M D, Yeats P A. Phytoplankton production and growth regulation in the Subarctic North Atlantic: A comparative study of the Labrador Sea-Labrador/Newfoundland shelves and Barents/Norwegian/Greenland seas and shelves. *Progress in Oceanography*, 2013, 114: 26-45.
- [8] Richardson K, Markager S, Buch E, Lassen M F, Kristensen A S. Seasonal distribution of primary production, phytoplankton biomass and sizedistribution in the Greenland Sea. *Deep-Sea Research I*, 2005, 52: 979-999.
- [9] Annette S. Phytoplankton in the Marginal Ice Zone of the Greenland Sea During Summer 1984. *Polar Biology*, 1987, 7: 195-205.
- [10] Uetake J, Naganuma T, Hebsgaard M B, Kanda H, Kohshima S. Communities of algae and cyanobacteria on glaciers in west Greenland. *Polar Science*, 2010, 4: 71-80.

- [11] Booth B C, Smith J W O. Autotrophic flagellates and diatoms in the Northeast Water Polynya, Greenland: summer 1993. *Journal of Marine Systems*, 1997, 10: 241–261.
- [12] Erga S R, Ssebiyonga Nicolausi, Hamre B, Frette Ø. Nutrients and phytoplankton biomass distribution and activity at the Barents Sea Polar Front during summer near Hopen and Storbanken. *Journal of Marine Systems*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2012.12.008>.
- [13] Zhuang Y P, Jin H Y, Chen J F, Wang K, Xu Y Q, Wang B. Distribution of photosynthetic pigments and its indication to phytoplankton community in warm pool of the western equatorial Pacific. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 143–152.
- [14] Heukelem L V, Thomas C S. Computer-assisted high-performance liquid chromatography method development with application to the isolation and analysis of phytoplankton pigments. *Journal of Chromatography A*, 2001, 910: 31–49.
- [15] Mackey M D, Mackey D J, Higgins H W, Wright S W. CHEMTAX—a program for estimating class abundances from chemical markers: application to HPLC measurements of phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 144: 265–283.
- [16] Wright S W, Thomas D P, Marchant H J, Higgins H W, Mackey M D, Mackey D J. Analysis of phytoplankton of the Australian sector of the Southern Ocean: comparison of microscopy and size frequency data with interpretations of pigment HPLC data using the “CHEMTAX” matrix factorization program. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 144: 285–298.
- [17] Coupel P, Jin H Y, Joo M, Horner R, Bouvet H A, Sicre M A, Gascard J C, Chen J F, Garçon V, Ruiz P D. Phytoplankton distribution in unusually low sea ice cover over the Pacific Arctic. *Biogeosciences*, 2012, 9: 4835–4850.
- [18] Zhuang Y P, Jin H Y, Chen J F, Wang B, Li H L, Lu Y, Xu J. Response of nutrients and the surface phytoplankton community to ice melting in the central arctic ocean. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(2): 151–158.
- [19] Simon W W, Akira I, Harvey J M, Andrew T D, Rick L E, Geraldine V N. Composition and significance of picophytoplankton in Antarctic waters. *Polar Biology*, 2009, 32: 797–808.
- [20] Chen J X, Huang B Q, Liu Y, Cao Z R, Hong H S. Phytoplankton community structure in the transects across East China Sea and Northern South China Sea Determined by analysis of HPLC photosynthetic pigment signature. *Advance in Earth Science*, 2006, 21(7): 738–746.
- [21] Yao P, Yu Z G, Mi T Z. The chemotaxonomy of marine phytoplankton. *Marine Environmental Science*, 2003, 20(1): 75–80.
- [22] Rey F. Phytoplankton: the grass of the sea. The Norwegian Sea Ecosystem, 2004, 6(1): 97–136.
- [23] Guo C Y, Wang G Z, Zhang F, Cai M H, He J F. The abundance and diversity of nanoplankton in Arctic Ocean. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(10): 2897–2905.
- [24] Bratbak G, Jacquet S, Larsen A, Pettersson L H, Sazhin A F, Thyrrhaug R. The plankton community in Norwegian waters—abundance composition, spatial distribution and diel variation. *Continental Shelf Research*, 2011, 31: 1500–1514.
- [25] Li W K W, McLaughlin F A, Lovejoy C, Carmac E C. Smallest algal thrive as the Arctic Ocean freshens. *Science*, 2009, 326(5952): 539.
- [26] Liu Y. Research on diversity and community structure of picoplankton and nanoplankton in the Arctic Ocean during summer seasons. Shanghai: Master of academic dissertation of Shanghai Ocean University: 2013.
- [27] Feng S Z, Li F Q, Li S J. Introduction to Ocean Science. Beijing: Higher Education Press, 1999: 83–100.
- [28] Cui S K. Physical, chemical and biological characteristics of pack ice in the Arctic Ocean during summer seasons. Shanghai: Master of academic dissertation of Shanghai Ocean University: 2012.
- [29] Smith Jr W O, Johannessen O M, Muench R D, Overland J E. Primary productivity of a *Phaeocystis* bloom in the Greenland Sea during spring 1989. *The Polar Oceans and Their Role in Shaping the Global Environment*, 2013, 85: 263–272.

参考文献:

- [1] 唐启升. 中国海洋生态系统动力学研究. 北京: 科学出版社, 2000: 10.
- [13] 庄燕培, 金海燕, 陈建芳, 王奎, 徐燕青, 王斌. 西赤道太平洋暖池区光合色素分布及其对浮游植物群落的指示作用. *海洋学报*, 2012, 34(2): 143–152.
- [18] 庄燕培, 金海燕, 陈建芳, 王斌, 李宏亮, 陈法锦, 卢勇, 徐杰. 北冰洋中心区表层海水营养盐及浮游植物群落结构对快速融冰的响应. *极地研究*, 2012, 24(2): 151–158.
- [20] 陈纪新, 黄邦钦, 刘媛, 曹振锐, 洪华生. 应用特征光合色素研究东海和南海北部浮游植物的群落结构. *地球科学进展*, 2006, 21(7): 738–746.
- [21] 姚鹏, 于志刚, 米铁柱. 海洋浮游植物的化学分类法. *海洋环境科学*, 2003, 20(1): 75–80.
- [23] 郭超颖, 王贵忠, 张芳, 蔡明红, 何剑锋. 北冰洋微型浮游生物分布及其多样性. *生态学报*, 2011, 31(10): 2897–2905.
- [26] 刘莹. 夏季北冰洋海域微型和微型浮游生物的多样性及其群落结构的研究. 上海: 上海海洋大学, 2013.
- [27] 冯士筭, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论. 北京: 高等教育出版社, 1999: 83–100.
- [28] 崔世开. 夏季北极浮冰理化及其生物学特性研究. 上海: 上海海洋大学, 2012.