

楚科奇海和白令海网采浮游植物群聚的多元分析

杨清良 林更铭

(国家海洋局第三海洋研究所 厦门 361005)

摘要 根据 1999 年夏季(7~8 月)我国首次北极科学考察期间“雪龙”号考察船在楚科奇海(66°0.3'~75°18.6' N, 153°36.5'~174°59.5' W)和白令海(55°59.8'~66°0.3' N, 173°21.1' E~175°53.9' W)49 个站采集的样品研究了该区网采浮游植物的分布特征。结果显示,两个调查区的浮游植物多样性指数和均匀度平均值几乎相等且都较低,分别变动在 1.88~1.90 和 0.43~0.45 之间。然而,两个区存在明显的空间异质性。就丰富度和种类组成而言,楚科奇海的细胞密度和物种总数量远高于白令海,前者为 $9\ 122.56 \times 10^4$ cells·m⁻³ 和 103 种,而后者为 161.78×10^4 cells·m⁻³ 和 71 种。上述生态学指标不同站点间的变异也大。用多元分析方法对浮游植物群聚的分布异质性加以讨论。主成分分析(PCA)结果表明,解析调查区浮游植物分布方差的 33.0% 的两个最主要成分(即主要物种变量)分别是北极-北方浅海群落(泛北极群落)和北方大洋群落的主要种群。前者包括某些圆心硅藻,如旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、柔弱角毛藻(*C. debilis*)、聚生角毛藻(*C. socialis*)、叉尖角毛藻(*C. furcellatus*)等多种寡体类角毛藻以及冷淡劳德藻(*Lauderia glacialis*)、丹麦圆柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、诺登海链藻(*Thalassiosira nordenskioldii*)和脆杆链藻(*Bacteriosira fragilis*)等;后者主要有小环毛藻(*Corethron criophilum*)、平截鼻状藻(*Proboscia truncata*)、无刺鼻状藻(*P. inermis*)、西氏细齿状藻(*Denticula seminae*)和一些多色暗角毛类角毛藻,如大西洋角毛藻(*Chaetoceros atlanticus*)等。泛北极群落主要分布于楚科奇海南部和中部,而北方大洋群落的主要分布区在白令海调查区的西南部。通过聚类分析还辨认出 7 个包含不同群落的主要网采浮游植物分布区,但是由于不同水系的不同程度影响,以及极具不确定性的浮冰的位置及其物理状态(聚集、开裂和消融等)也会在短时间内给调查区生物过程导入变异性,从而使得这些分布区的归类复杂化,尤其在楚科奇海。

关键词 楚科奇海和白令海 网采浮游植物 分布 生态学 多元分析

A MULTIVARIATE ANALYSIS OF NETPHYTOPLANKTON ASSEMBLAGES IN THE CHUKCHI SEA AND BERING SEA

YANG Qing-Liang and LIN Geng-Ming

(Third Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China)

Abstract Background and Aims The phytoplankton in the Arctic seas is rarely explored on a large geographic scale, particularly at the community level. The diversity, density and distribution variability of netphytoplankton assemblages were measured at 49 stations in the Chukchi Sea (66°0.3'–75°18.6' N, 153°36.5'–174°59.5' W) and Bering Sea (55°59.8'–66°0.3' N, 173°21.1' E–175°53.9' W) during the FCNARE (1999) cruise on the Xuelong Research Vessel of SOA, China.

Methods The diversity indices combining the data on the abundance within a species in a community into a single number were adopted to understand the state of the community. Principal component analysis (PCA) of data was applied for examining the distribution variability of netphytoplankton. Cluster analysis was used as indicative of the degree of similarity in species composition among stations to the selected species having a frequency of occurrence greater than 10% of the total samples.

Key Results Both the mean index values of phytoplankton diversity and evenness were approximately equally low at the two study areas, ranging from 1.88 to 1.90 and from 0.43 to 0.45, respectively. However, both the average cell density and total species numbers in the Chukchi Sea were far greater than these in the Bering Sea, reaching $9\ 122.56 \times 10^4$ cells·m⁻³ and 103 taxa in the Chukchi Sea but only 161.78×10^4 cells·m⁻³ and 71 taxa in the Bering Sea. The results of PCA indicated that the first two components (the most important species variables) explained 33.0% of the total variance in the netphytoplankton distribution in the study areas. The main populations belong to the arctic-boreal community (pan-arctic community) and boreal oceanic

community, including some centric diatoms in the arctic-boreal community, such as *Chaetoceros curvisetus*, *C. debilis*, *C. socialis*, *C. furcellatus* etc. belonging to the *Chaetoceros-Oligochromatophorus* group, and *Lauderia glacialis*, *Leptocylindrus danicus*, *Thalassiosira nordenskioldii* and *Bacteriosira fragilis* etc., as well as *Corethron criophilum*, *Proboscia truncata*, *P. inermis*, *Dentecula seminae* and some species belonging to *Chaetoceros-Phaeoceros-Polychromatophorus* group such as *Chaetoceros atlanticus* etc. in the boreal oceanic community. Seven major netphytoplankton regions containing different phytoplankton communities in two study areas were distinguished by the cluster analysis. However, the extremely dynamic physical nature of the drifting pack ice (e.g. packing, breaking up and melting) introduce short-term variability into the water conditions that no doubt affect the species composition; hence, the groupings of the netphytoplankton in the different regions may reflect temporal conditions, particularly in the Chukchi Sea, that require repeated sampling in order to better classify the regions.

Conclusions There were strong differences in the density and taxa of the netphytoplankton between the Chukchi Sea and Bering Sea. The density and composition were highly variable among sampling sites, particularly in Chukchi Sea.

Key words Chukchi Sea and Bering Sea, Netphytoplankton, Distribution, Ecology, Multivariate analysis

对于海洋浮游植物分布的时空差异(异质性)研究,国内至今大多采用单变量分析技术。常见的研究方法往往是对一定时空单位的一定物种分布趋势分别进行描述,就基础性调查以及原始数据资料的积累而言,该方法所获得的成果的意义毋庸置疑。而且在生态系统里环境胁迫的最初迹象通常出现在种群水平上,首先影响特别敏感的物种(Odum, 1992),因而这些工作至今仍然重要。但这种传统的种群水平上的方法毕竟是个体生态学的研究方法,当物种对象较多或者要用于考察研究海域的整个植物群聚的生态特点时其局限性不言而喻。多元分析方法恰恰可同时采集大量并存的不同物种的数据信息做综合分析,并可在群落水平上较客观地量化单变量技术难以分辨的浮游植物分布的变异性来源,因此其应用领域已从陆地生态到海洋生态,从底栖生态到浮游生态不断扩展。例如 Estrada 和 Blasco (1979), Blasco 等(1980)以及 Matta 和 Marshall (1984)等,曾用主成分分析方法(PCA)推断上升流过程与浮游植物分布的关系。之后不少学者的研究工作也都陆续证明多元分析技术是量化海洋浮游植物群聚的生态学特征及其分布变异的有效手段(Huang *et al.*, 1988; Huang, 1988, 1993)。

有关北极海浮游植物的研究在国际上已有一个多世纪的历史。相对而言在冰情等北极极端气候较为显著的东西伯利亚至楚科奇海一带偏少(Cecilie & von Quillfeldt 2003; Heimdal, 1989; Werner, 1977; 杨清良等 2002)。楚科奇海是北冰洋边缘海之一,并通过白令海峡与白令海相连,都是来自太平洋的高温高盐海水进入北冰洋(输送热量)的必经通道。近年来由于发现北极海已成为对全球气候变化有显

著贡献的海域之一,这一带的海洋科考工作日趋活跃。作为北极海生态系统初级生产者的海洋浮游植物,也成为北极变化的关键问题研究不可替代的重要研究对象(陈立奇等 2003; 王自磐, 1997)。

我国 1999 年夏季首次在北极开展科学考察。该航次有关楚科奇海和白令海的浮游植物物种组成和分布等已做过研究(杨清良等 2002)。本文拟采用多元分析方法从群落水平上进一步探讨该区浮游植物的空间群聚异质性。

1 材料和方法

1.1 样品和数据来源

所用材料取自 1999 年 7~8 月我国“雪龙号”调查船首次北极科学考察期间分别在楚科奇海(66°0.3'~75°18.6' N, 153°36.5'~174°59.5' W)和白令海(55°59.8'~66°0.3' N, 173°21.1' E~175°53.9' W)所布设 49 个测站(图 1)的样品分析数据。植物样品用小型浮游生物网(网长 280 cm, 网口 37 cm, 筛绢网孔 0.077 mm)自底至表拖曳,水深大于 200 m 时自 200 m 处始拖至水表。

1.2 数据统计分析

用 PRIMER 软件。

1) 物种多样性指数(H')、均匀度(J)和种类优势度(D)计算公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \log_2 p_i \quad (\text{Shannon-Weaver, 1963}) \quad (1)$$

$$J = H' / \log_2 S \quad (\text{Pielous, 1969}) \quad (2)$$

2) 群落的聚类分析用 Bray-Curtis 相似性距离:

$$B(j, k) = \frac{\sum_{i=1}^s |X_{ij} - X_{ik}|}{\sum_{i=1}^s |X_{ij} + X_{ik}|} \quad (\text{Bray-Curtis, 1957}) \quad (3)$$

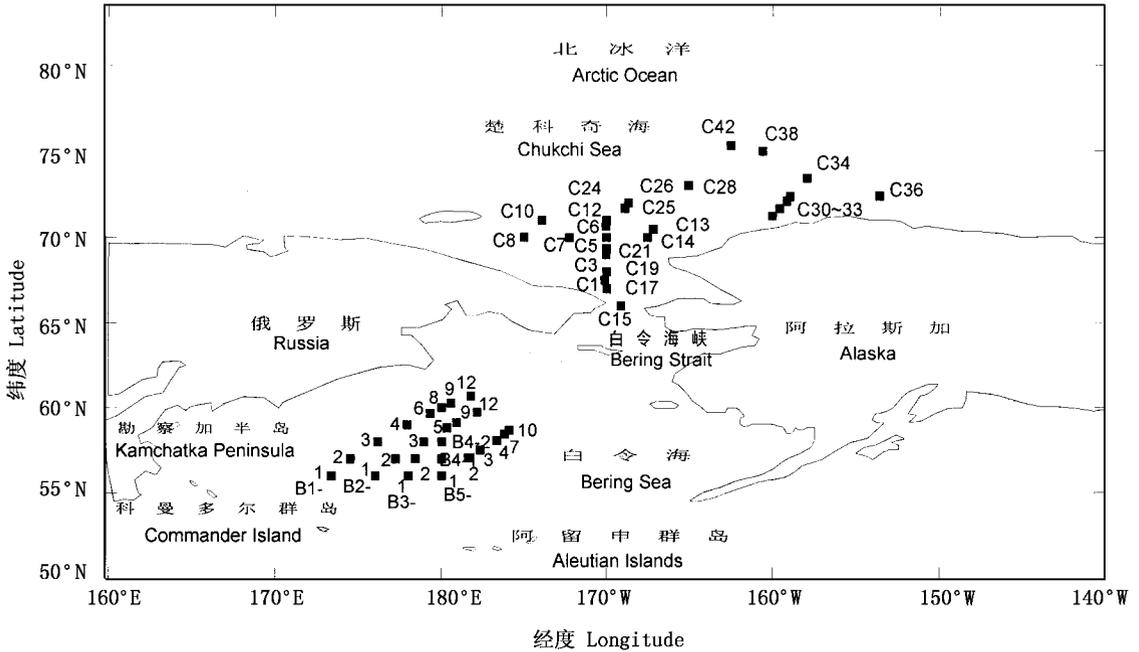


图1 调查区浮游植物采样站(1999年7~8月)

Fig.1 Sampling stations of phytoplankton in the study areas (July - August, 1999)

式中： S 为样品中的种类数； P_i 为第 i 种的细胞数量与样品总细胞数量的比值； $B(j, k)$ 为第 j 个和第 k 个样品间的距离系数， X_{ij} 、 X_{ik} 分别为第 j 个和第 k 个样品的第 i 种的数据。

3) 物种的筛选和数据处理：为简化分析数据，避免种类检出的偶然性及其所提供的信息意义不大，数据分析前特挑选出现率 $> 10\%$ 的种类作为物种变量。并在 PRIMER5.0 软件上先对物种丰富度(细胞密度)作(平方根)转换和标准化等处理，而后计算样品间的 Bray-Curtis 相似性距离并建立相似性矩阵。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物物种多样性现状

楚科奇海和白令海通过狭窄的白令海峡连接。在楚科奇海调查区，除了东北部北冰洋洋区少数有关测站(C42、C38和C34等站)水深大于2000m外，普遍是水深小于100m的浅水浮冰区。白令海调查区相反，除了北部陆架区个别站(B1-12、B1-9和B-8等站)水深在165~1000m外，其余测站都在水深达2000m以上的深水区(即中部白令海盆)。此外，两个调查区分别受到北冰洋和北太平洋不同程度的影响。调查结果表明浮游植物分布的区间和站间都存在较大变异。共记录网采浮游植物121种(含变种、

变型)，分属于3门28属，但两个调查区之间的共有种仅为13属49种(表1)；平均细胞密度的区间变化范围为 $161.78 \times 10^4 \sim 9122.56 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-3}$ ，站间变化范围更大。再者，虽然夏季是调查区浮游植物的水华期，优势种突出，物种多样性指数(H')和均匀度(J)均值偏低，但不同测站间变化也大(表2)。

2.2 浮游植物数据的PCA分析

根据58种筛选的种类(出现率 $\geq 10\%$)数据进行PCA分析获得5个重要因子，可解析浮游植物分布总方差的56.9%，特别是前两个因子最为重要，累积贡献率达33.0%(表3、表4)。

在PC1里，影响作用较大的是旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、柔弱角毛藻(*C. debilis*)、圆柱角毛藻(*C. teres*)、聚生角毛藻(*C. socialis*)、叉尖角毛藻(*C. furcellatus*)、冕胞角毛藻(*C. subsecundus*)等多种寡色体类角毛藻(*Chaetoceros-Oligochromatophorus* group)，以及冷淡劳德藻(*Lauderia glacialis*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、诺登海链藻(*Thalassiosira nordenskioldii*)、长菱形藻(*Nitzschia longissima*)、新月筒柱藻(*Cylindrotheca closterium*)、柔弱圆筛藻(*Coscinodiscus debilis*)、脆杆链藻(*Bacteriosira fragilis*)等圆心硅藻，具有较高的正荷载系数，多属北极-北方群落(泛北极群落)的主要种群。其中脆杆链藻为典型的北极种；叉尖角毛藻、聚

表 1 楚科奇海和白令海网采浮游植物种类组成(1999 年 7~8 月)
Table 1 Species composition of netphytoplankton in Chukchi Sea and Bering Sea (July - August, 1999)

门类 Phylum	物种和属数 Numbers of species (S) and genus (G)							
	楚科奇海 Chukchi Sea		白令海 Bering Sea		共有种 Common in both areas		小计 Total	
	属 G	种 S	属 G	种 S	属 G	种 S	属 G	种 S
硅类门 Bacillariophyta	28	94	20	57	11	44	32	104
甲藻门 Pyrrophyta	2	6	3	12	1	3	3	14
金藻门 Chrysophyta	3	3	2	2	1	2	3	3
合计 Sum	33	103	25	71	13	49	38	121

表 2 楚科奇海和白令海网采浮游植物水平分布差异(1999 年 7~8 月)
Table 2 Variances of netphytoplankton horizontal distribution in Chukchi Sea and Bering Sea (July - August, 1999)

海域 Area	测站间变化范围 Ranging of parameters among stations		
	细胞密度 Cell density (10^4 cells \cdot m $^{-3}$)	均匀度 Evenness (J)	多样性指数 Diversity index (H')
楚科奇海 Chukchi Sea	0.16 ~ 90 680.2 (平均 Mean 9 122.56)	0.07 ~ 0.87 (平均 Mean 0.43)	0.33 ~ 3.82 (平均 Mean 1.90)
白令海 Bering Sea	0.47 ~ 1 481.28 (平均 Mean 161.78)	0.01 ~ 0.75 (平均 Mean 0.45)	0.03 ~ 3.01 (平均 Mean 1.88)
平均 Average	4 733.61	0.44	1.89

表 3 主成分分析前 5 个主成分的特征值和方差贡献率
Table 3 Eigenvalues and percent of variation explained for the first 5 components of the principal component analysis (PCA)

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalues	方差贡献率 Percent of variance (%)	累积贡献率 Cumulative variance (%)
1	10.86	18.7	18.7
2	8.27	14.3	33.0
3	5.61	9.7	42.7
4	4.32	7.5	50.1
5	3.95	6.8	56.9

生角毛藻和诺登海链藻等北极-北方近海种是本航次楚科奇海的主要优势种(杨清良等, 2002); 而丹麦细柱藻等通常是北极诸海最重要的广布种(Heimdal, 1989; Melnikov, 1997; Werner, 1977)。从不同测站的样品得分状况(表 5)来看 PC1 反映了泛北极群落分布趋势的区域性和时间性。其主要分布区在楚科奇海南部(C21、C17 和 C19 等站)至白令海峡(C15 站)以及中部密集浮冰区(C28 和 C26 等站), 不仅与东北部深水测站(C34、C36、C38 和 C42)以及白令海测站不同, 甚至也和早些时候(7 月)在楚科奇海南部的另一些采样站(C1、C5 和 C6 等站)有较大差异。同步观测数据表明, 这些差异与冰情有关。调查期间曾在楚科奇海南部因遇到冰坝(7 月 14 日, C14 站)而折回白令海, 故同处在楚科奇海南部的相邻有关测站采样日期可相差近 20 d(表 5)。以 7 月

14 日采样的 C6 站为例, 其时表层水温为 0.58 °C(各层平均 -0.95 °C), 表层盐度为 27.14(各层平均 31.04), 而相邻的 C21 站是在 19 d 后采样, 表层水温和盐度已分别达 3.88 °C 和 32.67。反映了融冰期与非融冰期间较大的物理环境差异。据研究, 北极海冰对藻类分布的影响除了通过其物理状态(聚集、开裂和消融等)外, 动态的浮冰位置也会在短时间内(甚至是以 d 为单位)给调查区生物过程增加变异性(Heimdal, 1989; Melnikov, 1997)。

PC2 里荷载系数绝对值较高的种类是小环毛藻(*Corethron criophilum*)、平截鼻状藻(*Proboscia truncata*)、无刺鼻状藻(*P. inermis*)、钝棘根管藻半刺变种(*Rhizosolenia hebetata* var. *hiemalis*)、西氏细齿状藻(*Denticula seminae*)、椭圆星脐藻(*Asterolampra heptactis*)、渐尖鳍藻(*Dinophysis acuminata*)、柔弱伪菱形藻

表 4 浮游植物特选物种主成分分析的因子荷载
Table 4 Variable loadings of selected species of phytoplankton in the principal component analysis (PCA)

变量 Variable	主成分 Principal component				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
椭圆星脐藻 <i>Asterolampra heptactis</i>	-0.025	0.333	-0.043	0.008	0.069
脆杆链藻 <i>Bacteriosira fragilis</i>	0.169	-0.006	0.011	-0.198	0.130
大西洋角毛藻 <i>Chaetoceros atlanticus</i>	-0.030	0.339	-0.031	0.001	0.034
北方角毛藻 <i>C. borealis</i>	0.057	0.003	0.082	-0.135	-0.286
扁面角毛藻 <i>C. compressus</i>	0.103	-0.019	-0.100	0.173	0.033
曲刺角毛藻 <i>C. concavicornis</i>	0.049	0.067	0.116	-0.162	-0.384
缢缩角毛藻 <i>C. constrictus</i>	0.024	-0.033	-0.160	0.024	0.075
旋链角毛藻 <i>C. curvisetus</i>	0.269	0.030	0.117	0.033	0.102
柔弱角毛藻 <i>C. debilis</i>	0.263	0.028	0.141	0.042	0.112
并基角毛藻 <i>C. decipiens</i>	0.236	0.025	0.060	0.248	-0.115
密连角毛藻 <i>C. densus</i>	0.084	-0.007	0.137	-0.193	-0.180
远距离角毛藻 <i>C. distans</i>	0.220	0.012	0.145	-0.016	0.012
叉尖角毛藻 <i>C. furcellatus</i>	0.180	-0.025	-0.080	0.025	-0.139
聚生角毛藻 <i>C. socialis</i>	0.199	0.020	0.153	-0.158	0.211
冕胞角毛藻 <i>C. subsecundus</i>	0.172	0.012	0.084	0.090	-0.213
扭角毛藻 <i>C. convolutus</i>	0.145	0.243	-0.036	0.225	-0.010
圆柱角毛藻 <i>C. teres</i>	0.211	-0.009	0.073	-0.024	0.060
角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.	0.259	0.010	-0.049	0.136	-0.002
小环毛藻 <i>Corethron criophilum</i>	-0.032	0.340	-0.033	0.004	0.031
星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	0.064	-0.015	0.017	-0.103	-0.158
柔弱圆筛藻 <i>C. debilis</i>	0.191	0.009	-0.010	0.262	-0.049
偏心圆筛藻 <i>C. excentricus</i>	0.033	-0.041	-0.092	-0.014	-0.078
宽边圆筛藻 <i>C. marginatus</i>	-0.054	-0.002	0.059	0.016	-0.048
虹彩圆筛藻 <i>C. oculus-iridis</i>	0.202	0.024	0.010	0.328	-0.060
圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.011	-0.030	-0.065	-0.013	-0.040
新月筒柱藻 <i>Cylindrotheca closterium</i>	0.198	0.023	0.188	-0.161	0.191
西氏细齿状藻 <i>Denticula seminiae</i>	-0.056	0.244	0.036	-0.002	-0.186
翼内茧藻 <i>Entomoneis alata</i> (= <i>Amphiprora alata</i>)	0.040	0.007	-0.130	-0.045	0.036
脆杆藻 <i>Fragilaria</i> sp.	0.072	0	-0.275	-0.186	-0.062
冷淡劳德藻 <i>Lauderia glacialis</i>	0.228	-0.001	-0.150	0.059	-0.067
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i>	0.218	0.013	-0.118	-0.136	-0.108
舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	0.017	0.011	-0.209	-0.011	0.088
寒带菱形藻 <i>Nitzschia frigida</i>	0.030	-0.021	-0.048	-0.056	0.015
格鲁菱形藻 <i>N. grunovii</i>	0.092	-0.013	-0.270	-0.216	-0.069
长菱形藻 <i>N. longissima</i>	0.212	0.019	-0.023	0.310	-0.067
菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.	0.114	-0.037	-0.322	-0.111	-0.046
柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	0.004	0.306	-0.150	-0.066	0.038
尖刺伪菱形藻 <i>P. pungens</i>	0.135	0	-0.265	-0.170	-0.066
成列伪菱形藻 <i>P. seriata</i>	-0.039	0.117	0.026	-0.029	-0.259
斜纹藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	0.054	-0.014	-0.275	-0.084	0.069
翼鼻状藻 <i>Proboscia alata</i>	0.150	0.019	0.220	-0.254	0.157
平截鼻状藻 <i>P. truncata</i>	-0.031	0.340	-0.033	0.004	0.029
无刺鼻状藻 <i>P. inermis</i>	-0.011	0.336	-0.026	-0.008	0.059
笔尖根管藻 <i>Rhizosolenia styliiformis</i>	0.148	0.011	0.172	-0.179	-0.154
刚毛根管藻 <i>R. setigera</i>	0.084	0.020	0.168	-0.183	-0.083
钝棘根管藻半刺变种 <i>R. hebetata</i> var. <i>hiemalis</i>	0.057	0.221	0.108	-0.143	0.190
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	-0.005	-0.017	0.016	0.009	-0.003
鼓胀海链藻 <i>Thalassiosira gravida</i>	0.044	-0.025	-0.119	-0.065	-0.020
诺登海链藻 <i>T. nordenskiöldii</i>	0.216	0	0.030	-0.151	0.080
细弱海链藻 <i>T. subtilis</i>	0.141	-0.020	-0.259	-0.003	-0.091
长海毛藻 <i>Thalassiothrix longissima</i>	-0.031	0.049	0.023	-0.037	-0.027
伏恩海毛藻 <i>T. frauenfeldii</i>	0.041	0.038	-0.120	-0.163	-0.006
梭角藻 <i>Ceratium fusus</i>	-0.055	0.125	0.068	-0.020	-0.289
线纹角藻 <i>C. lineatum</i>	-0.053	0.086	0.073	-0.028	-0.293
弯顶角藻 <i>C. longipes</i>	-0.080	0.025	0.087	0.022	-0.168
渐尖鳍藻 <i>Dinophysis acuminata</i>	-0.029	0.328	-0.042	0.012	0.078
扁平多甲藻 <i>Protoperidinium depressum</i>	0.002	-0.016	-0.018	0.033	0.066
六异刺硅鞭藻 <i>Distephanus speculum</i>	0.021	-0.026	-0.079	0.003	-0.096

表5 调查区样品的主成分得分
Table 5 Principal component scores made from the samples collected in the study areas

样品 Samples	主成分得分 Principal component scores					采样日期 Sampling date
	1	2	3	4	5	月-日 Month-day
C1	-0.136	-0.479	-0.071	-0.543	1.233	7-14
C5	-0.084	-0.867	0.573	0.153	-0.205	7-14
C6	-0.833	-0.742	-0.206	0.662	0.449	7-14
C7	-0.531	-0.942	-2.208	-0.097	0.586	7-15
C8	-1.420	-0.734	0.373	0.580	0.647	7-15
C10	-0.836	-0.711	-0.487	0.398	0.665	7-16
C12	0.881	-0.878	-0.652	-0.414	1.241	7-17
C13	2.649	-0.793	-1.324	-2.413	-1.623	7-18
C14	-1.367	-0.719	0.523	0.347	0.553	7-18
C15	15.174	1.393	0.318	9.667	-1.646	8-3
C17	4.996	-0.066	3.036	-1.732	-5.940	8-3
C19	1.584	0.065	4.350	-4.339	-3.432	8-3
C21	11.518	1.167	7.191	-6.378	6.055	8-3
C24	1.917	-1.416	-1.263	-0.491	-2.309	8-4
C25	1.304	-1.048	-1.334	-0.920	-0.991	8-4
C26	2.991	-0.782	-4.809	-1.312	0.905	8-4
C28	5.374	-0.011	-10.567	-5.526	-1.659	8-5
C30	0.269	-0.498	-1.263	0.005	-0.601	8-8
C31	0.622	-1.201	-3.802	0.910	0.125	8-8
C32	0.301	-0.911	-2.821	0.806	1.866	8-8
C33	0.414	-0.859	-0.791	0.904	1.751	8-9
C34	-1.497	-0.733	0.417	0.528	0.637	8-9
C36	-1.483	-0.733	0.381	0.521	0.651	8-10
C38	-1.487	-0.737	0.406	0.526	0.665	8-19
C42	-1.485	-0.735	0.414	0.519	0.645	8-23
B1-12	-1.325	-0.429	0.278	0.582	0.613	7-31
B1-9	-1.389	-0.750	0.362	0.545	0.590	7-21
B1-8	-1.352	-0.667	0.341	0.556	0.563	7-21
B1-6	-1.533	-0.705	0.475	0.530	0.621	7-21
B1-4	-1.562	-0.628	0.495	0.534	0.513	7-21
B1-3	-1.422	0.071	0.862	0.093	0.929	7-22
B1-2	-1.79	18.764	-1.718	0.245	2.070	7-23
B1-1	-2.755	4.129	2.421	-0.802	-8.038	7-21
B2-1	-1.871	0.291	1.409	-0.147	-1.371	7-24
B3-1	-1.572	-0.626	0.506	0.517	0.430	7-24
B5-1	-1.904	-0.588	0.952	0.695	-0.303	7-24
B5-3	-1.528	-0.534	0.901	0.226	-0.035	7-26
B5-2	-1.508	-0.722	0.439	0.524	0.602	7-26
B4-1	-1.729	-0.571	0.757	0.563	-0.078	7-27
B3-2	-1.549	-0.640	0.494	0.506	0.446	7-27
B2-2	-1.910	1.323	0.784	0.154	-1.066	7-28
B2-3	-1.601	-0.642	0.576	0.514	0.308	7-28
B4-2	-1.733	-0.280	0.747	0.466	-0.119	7-30
B2-5	-1.484	-0.720	0.411	0.518	0.663	7-30
B2-9	-1.487	-0.721	0.410	0.522	0.661	7-30
B2-12	-1.484	-0.716	0.410	0.518	0.657	7-31
B5-4	-1.334	0.766	0.331	-1.292	-0.067	7-31
B5-7	-1.491	-0.715	0.408	0.498	0.638	8-1
B5-10	-1.523	-0.718	0.564	0.575	0.508	8-1

(*Pseudo-nitzschia delicatissima*) 和一些多色暗角毛类角毛藻 (*Chaetoceros-Phaeoceros-Polychromatophorus* group) 如大西洋角毛藻 (*Chaetoceros atlanticus*) 和扭角毛藻 (*C. convolutus*) 等, 多属北方大洋性群落的成员 (Motoda & Minoda, 1974; Werner, 1977), 这些种类在白令海调查区常见, 尤其是西南偶 (B1-2、B1-1、B2-2、B2-1 等); 其次在白令海峡 (C15 站) 至楚科奇海南部 (C21 等站) 细胞密度也高。该群落的分布可能和经科曼多尔群岛入侵白令海的北太平洋水系的影响有关。据研究, 温度和盐度较高的北太平洋水进入白令海后往东和往北因混和逐渐变性 (汤毓祥等, 2001)。从表层实测温度和盐度值看, B1-1、B2-1、B3-1 等站都较高, 尤其是前两站居白令海调查区各站之冠, 分别达 8.41℃ 和 33.02 左右。因此该群落虽在白令海有较广泛的分布, 但在丰度上以西南偶测站明显较多。而在楚科奇海含该群落的种类成分较高的区域仅限于与白令海直接相连的南部和东部个别站。其中最具有代表性的是西氏细齿状藻等西北太平洋指标种 (杨清良等, 2002), 反映了北太平洋水对调查区不同程度的影响以及楚科奇海与白令海在一定程度上的联系。

PC3 里正荷载系数较高的主要是翼鼻状藻

(*Proboscia alata*)、笔尖根管藻 (*Rhizosolenia styli-formis*)、刚毛根管藻 (*R. setigera*) 和新月筒柱藻等, 大多为北温带广布性外洋种, 广泛分布在盐度高于 32 的白令海海盆 (尤其是西南偶) 和楚科奇海南部测站 (C21、C19 和 C17 站); 荷载系数较高的主要是菱形藻 (*Nitzschia* sp.)、格鲁菱形藻 (*N. grunowii*)、尖刺伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*)、脆杆藻 (*Fragilaria* sp.)、斜纹藻 (*Pleurosigma* sp.) 和舟形藻 (*Navicula* sp.) 等小型羽纹硅藻, 主要分布于中部密集浮冰区 (C28、C26 和 C7 等站) 以及东部浮冰区外缘 (C31 和 C32 等站)。这些种多为北极冰藻群落的常见种 (Heimdal, 1989; Horner & Alexander, 1972; Melnikov, 1997), 应与该水域浮冰的消融直接有关。

PC4 正荷载系数较高的主要是北方大洋群落里的虹彩圆筛藻 (*Coscinodiscus oculus-iridis*) 和扭角毛藻以及泛北极群落的长菱形藻、柔弱圆筛藻等种类, 从表 5 相应的测站样品得分可知主要反映了白令海水系和楚科奇海水系在白令海峡 (C15 站) 的交汇影响, 荷载系数较高的主要是翼鼻状藻、刚毛根管藻、笔尖根管藻等两个调查区常见的广布种以及北极-北方群落的优势种格鲁菱形藻和脆杆链藻, 则主要反映这些种群在楚科奇海南部和中部 (C21、C28

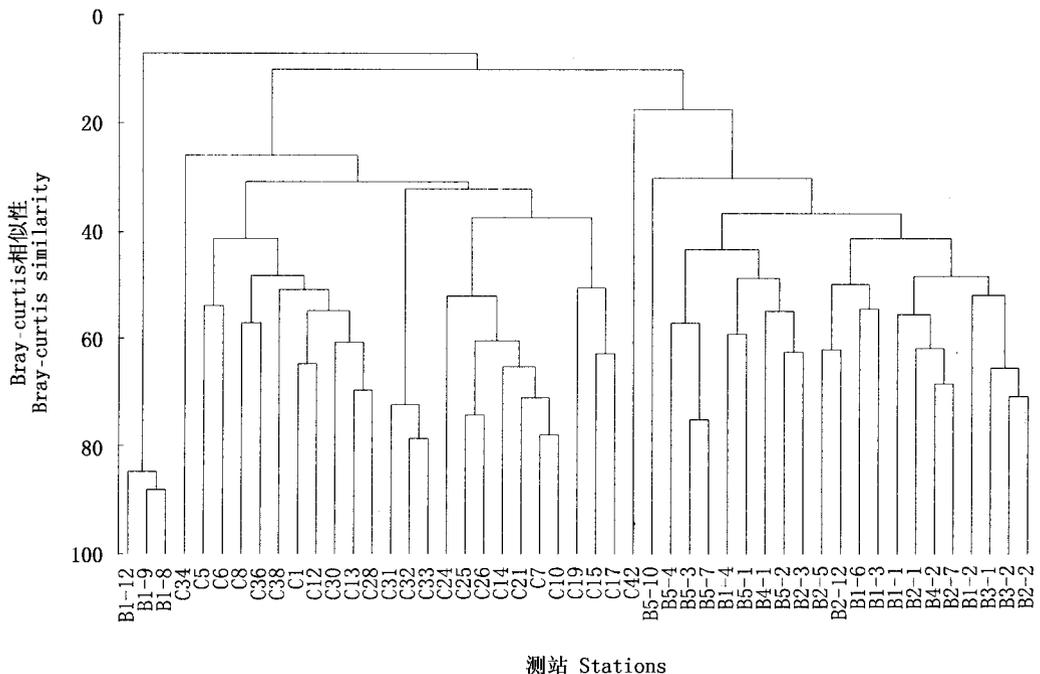


图 2 楚科奇海和白令海浮游植物群落相似性聚类树状图
 Fig. 2 Dendrogram of cluster analysis of phytoplankton assemblage collected from Chukchi Sea and Bering Sea

和 C19 等站)藻类水华区的细胞密度的异常激增。PC5 里正、负荷系数绝对值较高的分别是聚生角毛藻、新月筒柱藻和脆杆链藻等北极-北方沿岸种、泛北大洋种曲刺角毛藻(*Chaetoceros concavicornis*)、北方角毛藻(*C. borealis*)以及北温带大洋性种钝棘根管藻半刺变种、线纹角藻(*Ceratium lineatum*)、梭角藻(*C. fusus*)成列伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia seriata*)等,分别在楚科奇海南部(C21)和白令海西南部(B1-2 等站)形成密度中心。因此 P3、P4 和 P5 分别反映了与调查区植物块状密集分布区的形成有直接关系的主要种群的分布特点,同时也在一定程度上体现了北极海同一局部海区浮游植物可具多种群落混合聚集的生物地理学特征(Heimdal, 1989; Melnikov, 1997)。

为进一步认识调查区网采浮游植物聚群的复杂性,根据各测站种类组成的 Bray-Curtis 相似性系数距离进行聚类分析,结果(图 2)表明楚科奇海和白令海 2 个相似性不高的独立群落大体可细分为 7 个植物群聚区。除了白令海的陆架区测站(B1-12、B1-9、B1-8)水深小于 1 000 m 和楚科奇海的北冰洋深水测站(C42 等)水深大于 2 000 m 可独立分出外,位于白令海海盆(水深大于 2 000 m)的浮游植物测站可分为西南至中部和东侧等群聚区;而楚科奇海浅水浮冰大体上可分为白令海峡(C15 站附近)、东部(浮冰区外缘)和南部至中部(密集浮冰区)等群聚区。但受不同水系和冰情等因素的影响,各区站之间有交叉。有关浮游植物群落结构特点与诸多环境因素之间内在的动力学关系,尚需进一步深入研究。

参 考 文 献

Blasco D, Estrada M, Jones B (1980). Relationship between the phytoplankton distribution and composition and the hydrography in the Northwest African upwelling region near Cabo Corbeiro. *Deep-Sea Research*, 27A, 799 – 821.

Bray JR, Curtis JT (1957). An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin. *Ecological Monograph*, 27, 325 – 349.

Cecilie H, von Quillfeldt CH (2003). Microalgae and biodiversity in polar regions. In: Iken K, Konar B eds. *Proceedings of the Arctic Biodiversity Workshop: New Census of Marine Life Initiative*. Alaska Sea Grant College Program, Fairbanks, Alaska, M-26, 131 – 149.

Chen LQ (陈立奇), Zhao JP (赵进平), Bian LG (卞林根), Chen M (陈敏), Gao AG (高爱国), Chen B (陈波) (2003). *Marine*

Environment and Air-Sea Interaction in the Arctic Region (北极海洋环境与海气相互作用研究). China Ocean Press, Beijing, 1 – 339. (in Chinese)

Estrada M, Blasco D (1979). Two phases of the phytoplankton community in the Baja California upwelling. *Limnology and Oceanography*, 24, 1065 – 1080.

Heimdal BR (1989). Arctic ocean phytoplankton. In: Herman Y ed. *The Arctic Seas—Climatology, Oceanography, Geology, and Biology*. van Nostrand Reinhold Company, New York, 193 – 222.

Homer RA, Alexander V (1972). Algal population in Arctic sea ice: an investigation of heterotrophy. *Limnology and Oceanography*, 17, 454 – 458.

Huang R, Jan LL, Chang CH (1988). A preliminary analysis of phytoplankton variability in the western Philippine Sea. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 21, 82 – 91.

Huang R (1988). The influence of hydrography on the distribution of phytoplankton in the southern Taiwan Strait. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 26, 643 – 656.

Huang R (1993). Phytoplankton distribution in the South China Sea and Kuroshio-flowing region of Taiwan. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 31, 73 – 82.

Matta JF, Marshall HG (1984). A multivariate analysis of phytoplankton assemblages in the western North Atlantic. *Journal of Plankton Research*, 6, 663 – 675.

Melnikov IA (1997). *The Arctic Sea Ice Ecosystem*. Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, the Netherlands. 67 – 90.

Motoda S, Minoda T (1974). Plankton of the Bering Sea. In: Hood DW, Kelley EJ eds. *Oceanography of the Bering Sea*. Vail-Bal-lou Press, Fairbanks, Alaska, 207 – 241.

Odum EP (1992). Great ideas in ecology for the 1990s. *Bio-Science*, 42, 542 – 545.

Pielous EC (1969). *An Introduction to Mathematical Ecology*. Wiley Interscience, New York, 1 – 286.

Shannon CE, Weaver W (1963). *The Mathematical Theory of Communication*. Illinois University Press, Urbana, Illinois, 1 – 125.

Tang YX (汤毓祥), Jiao YT (矫玉田), Zou EM (邹娥梅) (2001). Preliminary analysis of the hydrographic features and water masses in the Bering Sea and the Chukchi Sea. *Chinese Journal of Polar Research (极地研究)*, 13, 57 – 68. (in Chinese with English abstract)

Wang ZP (王自磐) (1997). Marine biology process and global climatic changes in Polar Regions. *Donghai Marine Science (东海海洋)*, 15(3), 29 – 35. (in Chinese with English abstract)

Werner D (1977). *The Biology of Diatoms. Botanical Monographs* Vol. 13. University of California Press, Berkeley, California, 1 – 498.

Yang QL (杨清良), Lin GM (林更铭), Lin M (林茂), Lin JH (林景宏), Dai YY (戴燕玉) (2002). Species composition and distribution of phytoplankton in the Chukchi Sea and the Bering Sea. *Chinese Journal of Polar Research (极地研究)*, 14, 113 – 125. (in Chinese with English abstract)