

2003 年夏季西北冰洋浮游动物群落结构和地理分布研究

张光涛¹, 孙松¹

(1. 中国科学院 海洋研究所 胶州湾海洋生态系统研究站, 山东 青岛 266071)

摘要: 根据西北冰洋 43 个调查站位的浮游动物种类组成和数量资料, 分析了浮游动物的群落结构和地理分布特征, 探讨了浮游动物群落与环境因子的关系。结果表明, 在调查区域存在三种不同的浮游动物群落类型: 楚科奇海台和加拿大海盆地区的高纬度深海群落; 楚科奇海中部的陆架群落; 阿拉斯加沿岸和楚科奇海北部的沿岸过渡群落。深海群落浮游动物数量较少, 种类组成上以桡足类占绝对优势。优势种主要是长腹剑水蚤(*Oithona* spp.)、小厚壳水蚤(*Scolecithricella minor*)、极北哲水蚤(*Calanus hyperboreus*)和细长长腹水蚤(*Metridia longa*)。陆架群落最主要的优势种依次是藤壶腺介幼体、北极哲水蚤(*Calanus glacialis*)和纽氏伪哲水蚤(*Pseudocalanus newmani*)。过渡群落最主要的优势种依次是纽氏伪哲水蚤、藤壶无节幼体和长纺锤水蚤(*Acartia longiremis*)。藤壶腺介幼体成为全部三个群落的优势类群, 平均密度在陆架群落最高, 达到 573.2 个/ m^3 。深海群落栖息环境的特征是低温、低叶绿素, 陆架群落主要分布在高温、低叶绿素的楚科奇海中部以及少数低温、高叶绿素的站位, 过渡群落包括了上述三种栖息环境。其结果说明西北冰洋的浮游动物群落结构存在显著的地理差异, 但是在楚科奇海等浅水区域其种类组成和丰度受到环境和种群补充时间差异等多方面的影响。楚科奇海浮游动物群落结构与以前研究相比存在显著差异, 主要与采样方法有关, 并非食物网结构发生显著变化。

关键词: 西北冰洋; 浮游动物; 群落结构; 优势种

中图分类号: P727; P735

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2011)02-0146-11

1 引言

浮游动物是海洋中最主要的初级消费者类群之一。浮游植物细胞绝大部分被不同体型的浮游动物摄食, 而溶解有机碳和其他不能被浮游动物直接摄食的超微型浮游植物可以通过微食物环被微型浮游动物利用, 然后又回到经典食物链当中, 但是在西北冰洋的部分海区, 初级生产只有极小一部分被浮游动物利用^[1-2], 而大部分沉降到海底进入底栖食物链^[3-7]。在楚科奇海 300 $g/(m^2 \cdot a)$ 的初级生产中, 被植食性浮游动物利用的只有 15%。在阿拉斯加沿岸海域这一比例为 5%, 即在 60 $g/(m^2 \cdot a)$ 的初

级生产(C)中只有 3 $g/(m^2 \cdot a)$ 被植食性浮游动物利用^[8]。

随着全球变暖背景下的海冰消退, 这种底栖食物链主导的营养结构会向浮游食物链主导转化^[9]。最近研究认为楚科奇海将是这一假设最早得到验证的地区^[4]。由于浮游动物生活史周期是和温度、海冰覆盖周期以及浮游植物水华期紧密联系在一起^[10-11], 水温的升高和无冰期的延长将直接和间接地改变浮游动物种类组成和数量比例。尽管融冰的速率还存在争论^[12-13], 北极海冰的快速消融已经得到多方面的证实^[14-15]。另一方面, 随着气候变化导致的陆地生物生产力提高^[16]和淡水输入的增加^[17],

收稿日期: 2010-07-08; 修订日期: 2011-01-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40406002); 中国第二次北极科学考察项目; 中国极地科学战略研究基金项目(20080214)。

作者简介: 张光涛(1976—), 男, 山东省东营市人, 研究员, 博士, 主要从事海洋生态学研究。E-mail: gtzhang@qdio.ac.cn

北冰洋接受的陆源有机物质也将逐渐增加,生物地球化学过程也会受到影响。目前对邻近海域底栖生物的长期变化已经有所了解,白令海北部的底内生物数量从 1990 到 2000 年间呈下降趋势,而蟹类和鱼类的分布范围正在向北移动^[5],但是对浮游动物群落结构的研究还比较少,尤其对长期变化趋势的研究较少。

尽管西北冰洋浮游动物的研究历史很长,但是调查和研究的数量和频率明显少于大西洋一侧,同时由于研究的区域比较分散,难以比较不同海区之间的地理差异和相互作用。我国第二次北极考察包括了楚科奇海、阿拉斯加沿岸、楚科奇海台和加拿大海盆的广阔地区,这些海域的调查为各海区浮游动物群落的对比研究提供了很好的资料。本文拟通过整个西北冰洋浮游动物群落结构和优势种的地理分布特征,研究它们与环境因素之间的相互作用,并通

过与历史研究结果的对比来了解该地区浮游动物组成是否发生了显著的变化。

2 材料与方法

2.1 站位设置和样品采集

在 2003 年 7 月 29 日至 9 月 7 日之间,调查了包括楚科奇海、楚科奇海台和加拿大海盆等海区的 43 个站位(表 1),其中对 R 断面部分站位和相邻的 P11 重复调查两次。首次调查站位以原站号命名,重复调查以原站站号加 A 表示)。在每个站位,用浮游动物网(网目 330 μm ,网长 180 cm,网口面积 0.5 m^2)垂直拖网采集 200 m 以浅(在水深小于 200 m 的站位拖网水层为底上 2 m 到表层)的浮游动物样品。给样品加入体积百分比为 4% 的甲醛保存,带回实验室在解剖镜下鉴定计数,计数比例为 10%~100%。对调查期间各站位的海冰覆盖率通过目测以百分比表示。

表 1 调查站位名称(St.)、调查日期和海冰覆盖率

站位 St.	日期	海冰覆盖率(%)	站位	日期	海冰覆盖率(%)
R01	2003-07-29	0	R16	2003-08-09	50
R03	2003-07-29	0	P11	2003-08-09	60
R06	2003-07-30	0	P17	2003-08-11	20
R08	2003-07-30	0	B11	2003-08-11	20
R10	2003-07-30	0	B13	2003-08-14	50
R12	2003-07-31	5	S25	2003-08-14	20
R14	2003-08-03	80	S11	2003-08-17	20
C11	2003-08-03	50	S13	2003-08-17	10
C13	2003-08-03	10	S16	2003-08-17	5
C16	2003-08-03	80	P27	2003-08-18	50
S21	2003-08-05	20	B80	2003-08-24	95
C25	2003-08-06	0	P80	2003-08-25	95
C23	2003-08-06	0	B79	2003-08-26	20
C21	2003-08-06	0	B78	2003-08-29	95
C35	2003-08-07	0	P25	2003-09-04	80
C32	2003-08-07	0	P23	2003-09-05	70
R05A	2003-08-07	0	P21	2003-09-06	70
R06A	2003-08-08	0	M01	2003-09-06	50
R08A	2003-08-08	0	M02	2003-09-06	60
R10A	2003-08-08	0	M03	2003-09-07	80
R12A	2003-08-08	0	P11	2003-09-07	95
R14A	2003-08-09	50			

2.2 样品鉴定和计数

计数过程中桡足类除猛水蚤类和无节幼体外,全部鉴定到种。对猛水蚤和无节幼体没有区分种类,统一计数为猛水蚤(Harpacticoida)和无节幼体(nauplii)。对优势种北极哲水蚤(*Calanus glacialis*)和极北哲水蚤(*Calanus hyperboreus*)分别计数为成体(adults)和桡足幼体(copepodites)。对水母类鉴定到种或属。对毛颚类(cheatognaths)成体鉴定到种,对无法鉴定到种的幼体统一计数为箭虫幼体(sagitta larvae)。对其他大型甲壳动物除鉴定一种磷虾和磷虾幼体外,对其余按类计数。对底栖动物幼体鉴定到类群,无法确定类群的统一计数为未鉴定幼体(identified larvae)。藤壶幼体由于数量较多,分别计数为无节幼体和腺介幼体。对鱼卵和幼鱼没有进一步鉴定。

每一个站位的密度通过样品总量和滤水体积计数,后者为网口面积和拖网深度的乘积。种(类)的平均密度

为去掉未出现站位后,出现该种的站位的平均密度。

2.3 统计分析

以鉴定计数的 73 种(类)浮游动物的丰度为分类依据,以站位为分类单位,采用 $1-r_p$ 为距离系数,采用 Wards 分类方法进行聚类分析。以上数据计算都在用件 STATISTICA 6.0 上完成。

对划分出的群落中的优势种根据如下计算公式计算优势度(Y)^[18]:

$$Y = (n/N)f,$$

式中, n 表示群落内该种在所有站位的个体总数; N 表示群落内所有站位的个体之和; f 表示该种出现的频率,即出现站位数占总站位数的比例。 Y 大于 0.02 的种类被定为该群落的优势种。

3 结果

3.1 种类组成

在浮游动物标本鉴定过程中,计数 43 个站位样

表 2 浮游动物种名录及出现站位的平均密度(d , 个/ m^3)和出现频率(f)

种(类)	d	f	种(类)	d	f
桡足类			水母类		
长纺锤水蚤(<i>Acartia longiremis</i>)	59.5	0.58	多手帽形水母(<i>Tiaropsis multicirrata</i>)	0.1	0.05
哈氏纺锤水蚤(<i>A. hudsonica</i>) ¹⁾	2.5	0.02	藪枝螅(<i>Obelia</i> sp.)	7.1	0.21
北极哲水蚤(<i>Calanus glacialis</i>)			多管水母(<i>Aequorea</i> sp.)	0.1	0.07
成体	0.6	0.49	发水母(<i>Polyorchis</i> sp.)	4.7	0.21
桡足幼体	60.9	0.98	和平水母(<i>Eirene</i> sp.)	0.5	0.05
飞马哲水蚤(<i>C. finmarchicus</i>)			海月水母(<i>Aurelia</i> sp.)	0.1	0.05
成体	0.6	0.02	软水母(<i>Ptychogena</i> sp.)	1.5	0.05
桡足幼体	13.6	0.05	栉水母(<i>Mertensia</i> sp.)	<0.1	0.02
极北哲水蚤(<i>C. hyperboreus</i>)			指腺华丽水母(<i>Aglantha digitale</i>)	14.3	0.53
雌体	1.4	0.44	八斑芮氏水母(<i>Rathkea octopunctata</i>)	4.5	0.19
桡足幼体	26.3	0.67	荣誉间囊水母(<i>Aeginopsis laurenti</i>) ¹⁾	2.3	0.02
极地黄水蚤(<i>Xanthocalanus polaris</i>) ¹⁾	0.1	0.02	红色水母(<i>Crossata</i> sp.)	0.1	0.02
北极拟真刺水蚤(<i>Paraeuchaeta glacialis</i>) ¹⁾	0.4	0.05	真囊水母(<i>Euphysa</i> sp.)	0.4	0.05
拟真刺水蚤幼体(<i>Paraeuchaeta larvae</i>)	0.8	0.35	毛颚类		
挪威拟真刺水蚤(<i>P. norvegica</i>) ¹⁾	0.3	0.26	大型箭虫(<i>Sagitta maxima</i>)	6.8	0.56
布氏真哲水蚤(<i>Eucalanus bungii</i>)	19.0	0.28	秀箭虫(<i>Sagitta elegans</i>)	4.6	0.44
腹针胸刺水蚤(<i>Centropages abdominalis</i>)	15.5	0.28	箭虫幼体(<i>Sagitta larvae</i>)	0.5	0.05
瘦尾胸刺水蚤(<i>C. tenuiremis</i>)	1.5	0.02	钩状箭虫(<i>Eukrohnia hamata</i>)	11.7	0.02
纽氏伪哲水蚤(<i>Pseudocalanus newmani</i>) ¹⁾	72.3	0.95	其它浮游甲壳类		
小伪哲水蚤(<i>P. minutus</i>)	51.9	0.07	北方磷虾(<i>Thysanoessa raschi</i>)	<0.1	0.02
贺氏真宽水蚤(<i>Eurytemora herdmani</i>)	1.1	0.02	磷虾无节幼体	35.2	0.12

续表 2

种(类)	d	f	种(类)	d	f
太平洋真宽水蚤(<i>Eurytemora pacifica</i>)	6.0	0.09	原蚤状幼体	2.5	0.02
长尾基齿哲水蚤(<i>Clausocalanus furcatus</i>)	15.9	0.12	真虾糠虾幼体	7.6	0.26
都氏基齿哲水蚤(<i>Clausocalanus dubius</i>) ¹⁾	5.8	0.12	真虾类	4.6	0.07
小型小厚壳水蚤(<i>Scolecithricella minor</i>)	7.3	0.53	糠虾类	2.0	0.05
具喙鹰嘴水蚤(<i>Aetideopsis rostrata</i>) ¹⁾	0.3	0.14	钩虾类	5.6	0.02
拟哲水蚤(<i>Paracalanus</i> sp.)	12.0	0.09	端足类	0.4	0.35
细长长腹水蚤(<i>Metridia longa</i>) ¹⁾	4.9	0.53	枝角类	0.8	0.02
矮小微哲水蚤(<i>Microcalanus pygmaeus</i>) ¹⁾	4.9	0.30	被囊类		
小微哲水蚤(<i>Microcalanus pusillus</i>)	0.9	0.07	柱囊虫(<i>Oikopleura</i> spp.)	20.0	0.86
歪水蚤(<i>Tortanus</i> sp.)	1.3	0.09	多毛类		
墨塞真胖水蚤(<i>Euchirella messinensis</i>)	0.2	0.02	浮蚕(<i>Tomopteris</i> spp.)	0.7	0.07
大舟哲水蚤(<i>Scaphocalanus magus</i>)	0.2	0.05	底栖动物浮游幼体		
太平洋袖水蚤(<i>Chiridius pacificus</i>) ¹⁾	0.1	0.02	鱼卵	1.3	0.05
极地袖水蚤(<i>Chiridius polaris</i>) ¹⁾	0.1	0.12	幼鱼	0.4	0.09
斯氏手水蚤(<i>Chirundina streetsi</i>)	0.2	0.07	磁蟹幼体	2.2	0.09
隆剑水蚤(<i>Oncaea</i> spp.)	0.1	0.02	腹足类幼体	1.8	0.07
长腹剑水蚤(<i>Oithona</i> spp.)	23.1	0.93	藤壶无节幼体	143.4	0.56
叶剑水蚤(<i>Sapphrina</i> spp.)	0.1	0.07	藤壶腺介幼体	186.6	0.91
大眼剑水蚤(<i>Corycaeus</i> spp.)	0.1	0.05	短尾类蚤状幼体	4.2	0.16
猛水蚤	1.0	0.14	多毛类幼体	9.2	0.51
桡足类无节幼体	6.4	0.67	未鉴定幼体	3.1	0.12

注:1)标记种类为未见中文名报道,笔者根据种名意译或音译。

品,鉴定 73 种(类)浮游动物(表 2)。包括 36 种桡足类(包括没有区分种类的猛水蚤和无节幼体)、13 种(属)水母、4 种毛颚类(三种加无法区分的幼体)、9 类其他大型甲壳动物、被囊类柱囊虫一属未定种、多毛类浮蚕一属未定种和其他 9 类底栖动物的浮游幼体。其他大型甲壳动物包括一种樱磷虾、磷虾的无节幼体和蚤状幼体、未定种的真虾类和糠虾幼体、糠虾类、端足类、钩虾和枝角类。虽然它们体型较大,数量较少,但是在生物量中所占的比例比较高。底栖动物幼体包括藤壶幼体、多毛类幼体、短尾类蚤状幼体、磁蟹幼体、腹足类幼体。

3.2 群落类型和分布范围

根据聚类分析的结果从聚类联接距离(linkage distance)在 4 以下的标准划分出 3 个明显的群落(图 1)。群落 I 包括所有的高纬度站点以及位于加拿大海盆南侧陆坡区的深水站点。只有位于楚科奇海台的 P21 和 P23 站点水深较浅,其余多在千米以

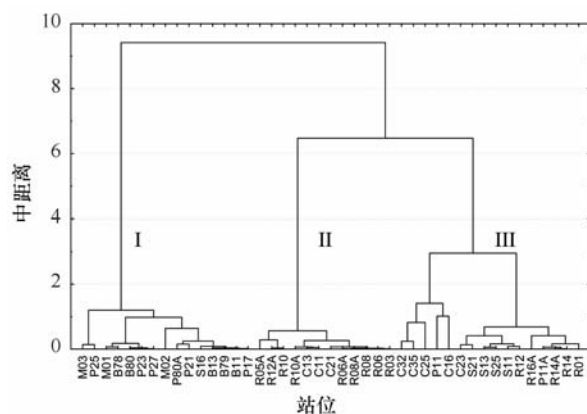


图 1 不同站位的聚类分析结构

上(见图 2)。该区域都是浮冰或者坚冰区,属于高纬度深海群落类型。其他两个群落很难在地理位置上区分出来。群落 II 主要包括 R 断面从 R3 到 R10 的站点以及相邻的 C11, C13 和 C21 站,在两次重复调查中都属于该群落类型。群落 III 主要包括离岸

较近的 R01 站和 C, S 断面的部分站位以及 R14, R16 和 P11 站三个位于楚科奇海北部的站位。R12 站在第一次调查的时候属于群落 II, 但是在第二次

调查的浮游动物组成则被划入群落 III。群落 II 被称作楚科奇海中部陆架群落, 而群落 III 被命名为过渡群落。

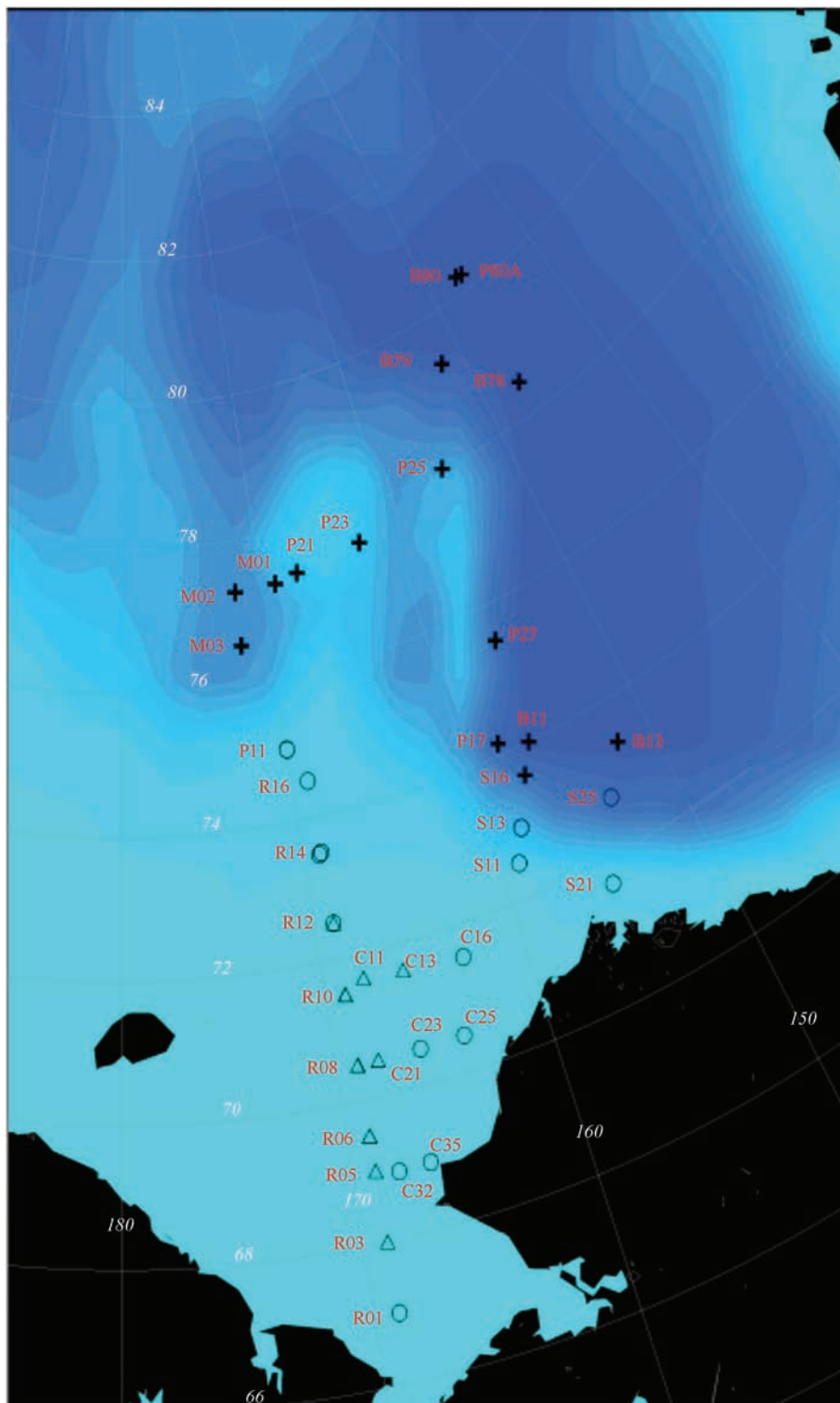


图 2 三个浮游动物群落的地理分布(+为群落 I, Δ 为群落 II, O 为群落 III)

3.3 群落种类组成和丰度比例

我们调查范围内的不同区域也就是不同群落之间的浮游动物总丰度和各类群的丰度差别非常明显。陆架群落和过渡群落的浮游动物平均丰度分别为1 130.7和532.8个/m³,而高纬度深海群落只有49.6个/m³,不到上述两个群落的二十和十分之一。过渡群落内的浮游动物丰度C16站最高达到2 973.0个/m³,在楚科奇海北部站位较低,在R12站最低为40.9个/m³,接近高纬度深海群落站位的平均水平;在陆架群落内的C11站密度最高达到2 806.1个/m³,在C21站最低为236.6个/m³;高纬度深海群落即便在位于加拿大海盆边缘的S16站密度最高也只有120.3个/m³,在位于楚科奇海台的P25站最低只有11.8个/m³。

从各类群所占比例来看,深海群落中桡足类比例最高,27种桡足类占浮游动物总丰度的93%(图3)。另外两个群落最大的区别在于陆架群落滕壶腺介幼体的丰度极大,平均达到573.2个/m³,占总丰度的

50%,而过渡群落中的平均丰度只相当于不足其二十分之一,为23.1个/m³,所占比例也只有4%。陆架群落中在所有站位都出现滕壶腺介幼体,丰度从102.3到1 188.8个/m³不等。过渡群落中只在75%的站位出现,密度从0.3到122.1个/m³。陆架群落中桡足类平均丰度为390.2个/m³,也高于过渡群落的294.2个/m³,但占浮游动物总丰度的比例只有35%,明显小于过渡群落的56%。除滕壶腺介幼体外的8种底栖动物幼体都出现在陆架和过渡群落当中,但是过渡群落的平均丰度173.1个/m³明显高于陆架群落中的139.4个/m³,在浮游动物总丰度中所占比例也是过渡群落显著高于陆架群落。陆架群落中毛颚类、水母和其他大型甲壳动物的丰度都较低,只有浮游动物总丰度的1%。过渡群落中除水母丰度显著高于陆架群落外,其他两个类群丰度接近,但所占比例都高于陆架群落。在过渡群落中记录到11种水母,明显多于陆架群落中的6种。

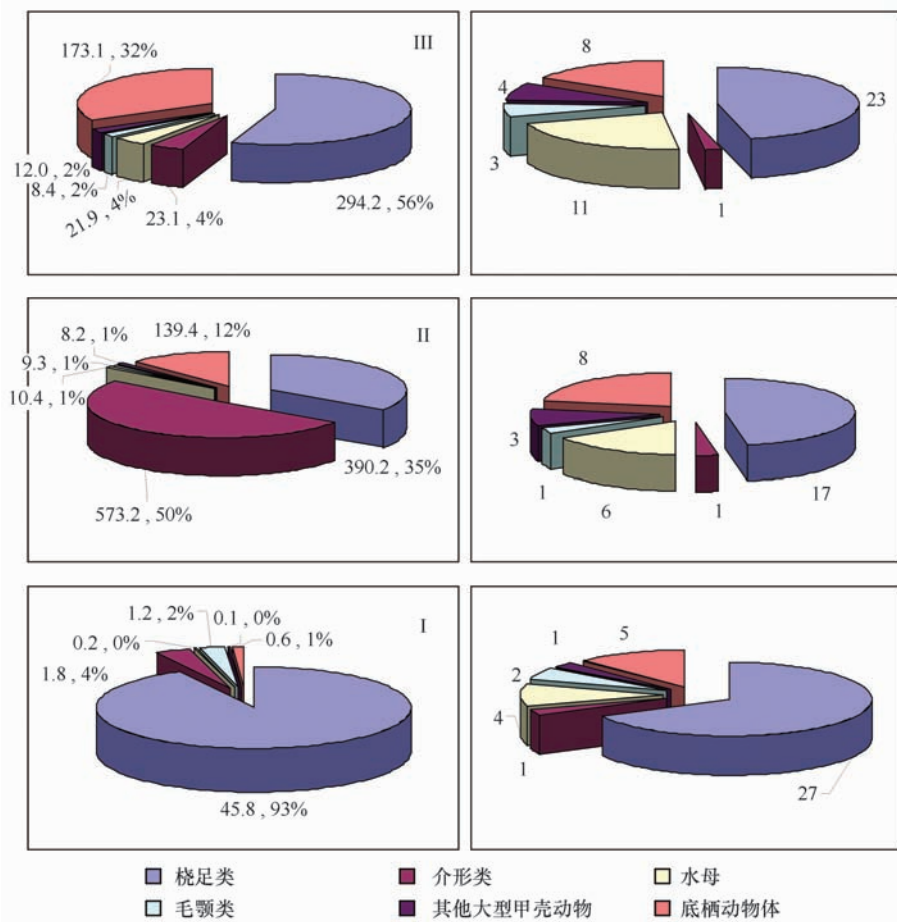


图3 三个群落中各类群的平均密度(个/m³)、占总丰度的比例(左图)和种类数(右图)

3.4 浮游动物优势种组成

在所有的浮游动物种类当中,只有纽氏伪哲水蚤、北极哲水蚤(包括成体和桡足幼体)和滕壶腺介幼体在全部三个群落当中都是优势种(表 3)。陆架群落优势种数最少,只有 6 种。除了共有的三种优势种之外,还有藤壶无节幼体、长纺锤水蚤和柱囊虫,其中滕壶腺介幼体占绝对优势,优势度高达 0.51。这六种同时也是过渡群落的优势种,

只是优势度差别较大。除此之外过渡群落的优势种还包括长腹剑水蚤和极北哲水蚤(包括成体和桡足幼体),这两种同时又是深海群落的优势种。深海群落中的优势种除滕壶腺介幼体外,全部是桡足类。优势度最高的是长腹剑水蚤,另外还有与前两个群落明显不同的微小厚壳水蚤、细长长腹水蚤、矮小微哲水蚤(*Microcalanus pygmaeus*)和桡足类无节幼体。

表 3 不同群落的优势种(类群)和优势度(Y)

群落 III	Y	群落 II	Y	群落 I	Y
纽氏伪哲水蚤	0.19	滕壶腺介幼体	0.51	北极哲水蚤	0.35
藤壶幼体	0.18	北极哲水蚤	0.14	小型小厚壳水蚤	0.15
长纺锤水蚤	0.08	纽氏伪哲水蚤	0.10	极北哲水蚤	0.12
长腹剑水蚤	0.06	藤壶无节幼体	0.09	细长长腹水蚤	0.10
北极哲水蚤	0.06	长纺锤水蚤	0.04	北极哲水蚤	0.06
柱囊虫	0.05	柱囊虫	0.02	纽氏伪哲水蚤	0.04
极北哲水蚤	0.05			滕壶腺介幼体	0.04
滕壶腺介幼体	0.03			矮小微哲水蚤	0.02
				桡足类无节幼体	0.02

4 讨论

4.1 群落分布与环境的关系

根据我们的结果,浮游动物群落的地理分布并不能完全用环境因素的差异解释。利用不同的站位的物理和生物环境条件,包括表层温度、盐度、叶绿素和海冰覆盖率(叶绿素数据参见文献[20]),对所有站点进行多元尺度分析(multidimensional scaling),可以将所有站点划分成三组(图 4)。进一步的比较发现站点之间的差异主要来自温度和叶绿素,三个组基本代表高温低叶绿素(HTLC)、低温高叶绿素(LTHC)和低温低叶绿素(LTLC)三种不同的环境特征。HTLC 站位的温度范围在 0.62 ~ 11.75°C,平均为 5.81;叶绿素 a 浓度为 0.17 ~ 2.55 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$,平均为 0.76。LTHC 的温度和叶绿素浓度范围分别是 -0.96 ~ -2.44°C 和 2.48 ~ 6.36 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$,平均为 -1.91 和 3.85 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$; LTLC 站位的平均温度和叶绿素浓度分别是 -1.83°C 和 0.20 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$,范围为 -0.59 ~ -2.35 和 0.01 ~ 0.78 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。从站位的对应关系可以看出,深海群落中的站点全部属于低温低叶绿素的

类型。陆架群落中的站点大部分属于高温低叶绿素类型,只有 R10 和 R12A 站属于低温高叶绿素的类型。最复杂的是过渡群落,它包括了全部三种环境类型,即高温低叶绿素站位(S21, C25, C23, C32, C35, R01)、低温高叶绿素站位(C16, R16A, R14A, R14, R12)和低温低叶绿素站位(S11, S13, S25, P11, P11A)。

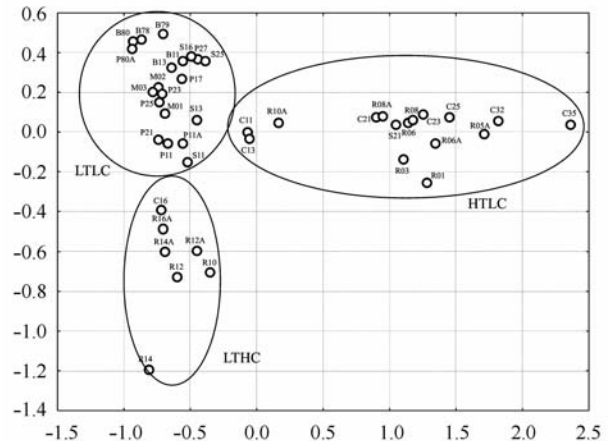


图 4 调查中所有站点环境因素(温度、盐度、叶绿素浓度、海冰覆盖率)的多元尺度分析(MDS)图
L 代表低, H 代表高, T 代表时间, C 代表叶绿素

一般来讲,地理位置对浮游动物群落组成有重要影响。高纬度的深海群落组成比较稳定,而陆架浅水区浮游动物组成的时空变化则比较显著。1994年夏季在一条从冰岛近海到白令海峡的大断面上也发现了类似的趋势^[21]。除了环境因素,导致这一趋势的主要原因在于浮游动物组成还受到物理输运和种群本地发育差异的影响。在我们的研究中,物理输运对浮游动物组成的影响并不显著,差异较大的是不同种类的生殖和生长状况。

以前的研究经常把西北冰洋浮游动物群落和水团运动联系在一起。在楚科奇海沿阿拉斯加到俄罗斯的四条断面和 Herald 各的四条较短的断面根据温度和盐度分成五种水团,它们对应五个浮游动物群落,分别是阿拉斯加沿岸流群落、白令海水群落、过渡群落、冬季水群落和楚科奇海群落^[22]。在阿拉斯加沿岸、楚科奇海和波弗特海陆坡和邻近的加拿大海盆地区,根据化学和生物特征分成五个群落,即陆架内、陆架外、楚科奇海陆坡、波弗特海陆坡和外海群落^[23]。我们的结果发现根据物理和化学参数划分的群落并不能和观察到的实际浮游动物组合完全对应,这说明大范围 and 纬向的种类组成差异只能部分地用海流影响来解释。

首先,通过输运来自南部白令海和高纬度海盆的种类数量较少,并没有成为优势种。在我们的研究中主要来自白令海的种类包括桡足类当中的腹针胸刺水蚤、布氏真哲水蚤,水母类中的发水母和蕈枝螅。典型的高纬度种类极北哲水蚤只有早期桡足幼体大量出现在楚科奇海中部靠近阿拉斯加沿岸的区域,而且这些幼体多数是当年本地补充的。在2002年夏季的研究中,楚科奇海与波弗特海陆架区的浮游动物组成表现出了明显的不同^[23]。楚科奇海的优势种主要是伪哲水蚤类、长腹剑水蚤和极北哲水蚤,而在波弗特海主要是微哲水蚤和纺锤水蚤。在本研究中并没有观察到这种区别。其次,海流输运本身的复杂性决定了对浮游动物组成影响的不确定性。有研究证实虽然楚科奇海台底层水流向东北的同时,表层海水向西流动^[24]。2004年9月在楚科奇海台的冷涡中发现的浮游动物组成也验证了这种影响的存在。来自北太平洋的新哲水蚤(*Neocalanus flemingeri*)和太平洋长腹水蚤(*Metridia pacifica*)大量存在于冷涡的底部,但同时在50 m以上的浅水层也存在大量的极区种类细长长腹水蚤和北极哲水蚤^[25]。第三,物理输运的影响存在显著的年际

变化。2004年夏季楚科奇海南部的浮游动物群落组成与白令海相似,很多种类可能来自北太平洋^[22],但是2002年夏季在稍北部的调查基本没有发现来自白令海的大型浮游动物,而更多的是从加拿大海盆受海流携带而来的高纬度种类^[23]。

浮游动物群落结构的另一个决定因素是生态适应性不同的种类在本地繁殖和扩增。对微型浮游动物的研究表明,北冰洋纬向的生物组成差异可能反映的是生长季节的变化^[26]。深海群落中桡足类占绝对优势,而浅水区的群落中包括了相当比例的藤壶腺介幼体和其他底栖动物的浮游幼体,它们只是阶段性浮游生活,其出现的时间和强度都决定于底栖动物的生殖季节和丰度。以前的研究中已经发现,浅水高生产力区存在大量的桡足类幼体^[23]。虽然无法确定是什么种类,但是这充分说明它具备桡足类种群大量繁殖的条件,而且桡足类生殖具有显著的季节性。本研究中观察到大量的藤壶腺介幼体数量超过以前北冰洋的任何研究结果,这和调查的时间和网具有关。

4.2 楚科奇海浮游动物种类组成的年际差异和长期变化

本研究中藤壶腺介幼体在浮游动物总丰度中所占的比例明显高于以前的研究。这种优势种的更替是调查期间发育时期不同和采样工具差异的结果。而一些稀有种的变化则可能仅与调查方式和计数方法有关。其他的优势种(类群)与其他研究结果相似,但是在数量和分布上存在差异,这些不同主要来自调查方式差异和年际变化,不同研究中调查的时间、范围和采样工具存在显著差异,并非长期变化的反应。

2004年夏季在楚科奇海也记录到较多的藤壶腺介幼体,但是其数量远小于藤壶无节幼体^[22]。但是在我们的研究中,腺介幼体数量总体上略高于无节幼体,在楚科奇海的密度甚至超出无节幼体一倍以上。两次调查在时间上非常接近,我们的调查甚至略早,但是在本研究中无节幼体已经多数发育到腺介幼体阶段,说明底栖动物的生殖和幼体的发育时间存在显著的年际差异。在2002年夏季的研究中只记录了藤壶无节幼体,密度只有115个/m³^[23]。这一结果明显小于2002和03年夏季,而且也低于1950和51年同一区域的藤壶无节幼体丰度^[27]。另一方面,藤壶腺介幼体和无节幼体的地理分布也不相同。在本研究中,无节幼体密度最高值出现在C16站,而腺介幼体在R断面密度最高,说明底栖

动物浮游幼体在发育过程中可能会随海流改变分布范围和趋势。

迄今为止的研究中,西北冰洋的浮游动物种类组成和相对丰度各不相同^[22-23,29]。2004年8月份在楚科奇海南部的调查中数量最多种类依次是伪哲水蚤属桡足类幼体(1 604.6个/m³)、藤壶幼体(1 235.6个/m³)、棘皮类幼体(795.1个/m³)、拟长腹剑水蚤(*Oithona similis*)(703.4个/m³)、柱囊虫(*Oikopleura vanhoefeni*)(255.9个/m³)和长纺锤水蚤(199.1个/m³)^[22]。为了排除地理差异带来的影响,我们选取相似区域的站位来计算本研究中各种类的平均密度,数量最多的依次是藤壶幼体(558.6个/m³)、伪哲水蚤属桡足类(记录到的两种合并为130.4个/m³)、极北哲水蚤(114.1个/m³)、北极哲水蚤(80.7个/m³)、长纺锤水蚤(80.3个/m³)。绝对密度的差异主要来自调查网具的不同,前者用的是网目135 μm的Bongo网,而我们用的是330 μm的网。伪哲水蚤和长腹剑水蚤由于体长只有1 mm左右,在我们的调查中可能存在一定程度的低估。

其他一些稀有种类的变化也与调查方式有关,不能作为长期变化的证据。目前完全根据形态学鉴定浮游动物还存在很大的困难和差异,尤其是我们计数的两种数量较多的哲水蚤类成体极少而以桡足幼体为主。在1974年描述了一种亚北极的哲水蚤类(*Calanus marshallae*),认为它是飞马哲水蚤

(*C. finmarchicus*)和北极哲水蚤的等位种^[29]。用分子生物学的方法发现了白令海和楚科奇海存在两个生殖隔离的北极哲水蚤地理种群^[30]。但是在实际计数过程中很难通过形态区分出来^[31]。尽管如此,我们认为哲水蚤类的数量差异还是受物理环境影响的年际差异。虽然2004年夏季在楚科奇海南部调查中哲水蚤类的数量并不是很高,但2002年7~8月在楚科奇和波弗特海陆架的调查中也记录到密度较高的北极哲水蚤成体和幼体^[23]。

那么大量的藤壶幼体所处发育阶段的不同有没有初级生产力的去向产生决定性影响呢?从同步的叶绿素研究中发现,在陆架区的绝大部分站位仍然是底层浓度高于表层,而且浮游植物以粒径较大的组分为主^[20]。即便是在藤壶腺介幼体密度最高的C11站,表层叶绿素浓度仍较低,浓度也是表层明显低于底层,这说明较高密度的藤壶腺介幼体和其他植食性和碎屑食性浮游动物的存在可能会对增加对浮游植物的摄食压力,但食物网的结构仍然没有发生根本性变化。

致谢:感谢中国第二次北极科学考察全体队员和“雪龙号”全体船员在样品采集过程中给予的无私帮助!感谢中国海洋大学史久新教授提供温盐数据!感谢国家海洋局第二海洋研究所刘子琳研究员提供叶绿素浓度数据!感谢中国海洋大学赵进平教授提供北冰洋数字地图!

参考文献:

- [1] SPRINGER A M, McROY C P, TURCO K R. The paradox of pelagic foodwebs in the northern Bering Sea;II. Zooplankton communities [J]. Cont Shelf Res, 1989, 9: 359—386.
- [2] DEIBEL D, SAUNDERS P A, ACUN A J L, et al. The role of appendicularia nticulates in the biogenic carbon cycle of three arctic polynyas[M]// GORSKY G, YOUNGBLUTH M J, DEIBEL D. Response of Marine Ecosystems to Global Change: Ecological Impact of Appendicularians. Paris:Gordon and Breach, 2005: 327—356.
- [3] FUKUCHI M, SASAKI H, HATTORI H, et al. Temporal variability of particulate flux in the northern Bering Sea[J]. Cont Shelf Res, 1993, 13: 693—704.
- [4] GREBMETER J M, COOPER L W, FEDER H M, et al. Ecosystem dynamics of the Pacific-influenced northern Bering and Chukchi Seas in the Amerasian Arctic[J]. Prog Oceanogr, 2006, 71: 331—361.
- [5] GREBMEIER J M, OVERLAND J E, MOORE S E, et al. A major ecosystem shift in the northern Bering Sea[J]. Science, 2006, 311 (5766): 1461—1464.
- [6] FEDER H M, JJWETT S C, BLANCHARD A. Southeastern Chukchi Sea (Alaska) epibenthos[J]. Polar Biol, 2005, 28: 402—421.
- [7] FEDER H M, JEWETT S C, BLANCHARD A L. Southeastern Chukchi Sea (Alaska) macrobenthos[J]. Polar Biol, 2007, 30: 261—275.
- [8] WALSH J J, MCROY C, COACHMAN L, et al. Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Seas: source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean[J]. Prog Oceanogr, 1989, 22: 277—359.

- [9] PIEPENBURG D. Recent research on arctic benthos: common notions need to be revised[J]. *Polar Biol*, 2005, 28: 733—755.
- [10] SMITH S L, SCHNACK-SCHIEL S B. Polar zooplankton[M]//SMITH W O. *Polar Oceanography: Part B: Chemistry, Biology and Geology*. New York:Academic Press, 1990:527—598.
- [11] DEIBEL D, DALY K L. Zooplankton processes in arctic and antarctic polynyas[M] // SMITH Jr, BARBER W O, D G. *Arctic and Antarctic Polynyas*. Amsterdam:Elsevier, 2007: 271—322.
- [12] ACIA. Arctic Climate Impact Assessment[M]. New York:Cambridge University Press, 2005: 21—60.
- [13] WANG J, IKEDA M, ZHANG S, et al. Linking the Northern Hemisphere sea-ice reduction trend and the quasi-decadal arctic sea-ice oscillation[J]. *Clim Dyn*, 2005, 24:115—130.
- [14] JOHANNESSEN O M, LENNART B, MILES M W, et al. Arctic climate change: observed and modelled temperature and sea-ice variability[J]. *Tellus; Ser A. Dyn Meteorol Oceanol*, 2004, 56(4): 328—341.
- [15] HOLLAND M M, BITZ C M, TREMBLAY B. Future abrupt reductions in the summer arctic sea ice[J]. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: doi:10.1029/2006GL028024.
- [16] ALSOS I G, EIDENSEN P B, EHRICH D, et al. Frequent long-distance plant colonization in the Changing Arctic[J]. *Science*, 2007, 316(5381): 1606—1609.
- [17] PETERSON B J, HOLMES R M, McCLELLAND J W, et al. Increasing river discharge to the Arctic Ocean[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2171—2173.
- [18] DUFRENE M, LEGENDRE P. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach[J]. *Ecol Monogr*, 1997, 67: 345—366.
- [20] 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[J]. *生态学报*, 2007, 27: 4953—4962.
- [21] THIBAULT D, HEAD E J H, WHEELER P A. Mesozooplankton in the Arctic Ocean in summer[J]. *Deep-Sea Res Part I-Oceanogr Res Pap*, 1999, 46: 1391—1413.
- [22] HOPCROFT R R, KOSOBOKOVA K N, PINCHUK A I. Zooplankton community patterns in the Chukchi Sea during summer 2004[J]. *Deep-Sea Res; Part II. Top Stud Oceanogr*, 2010, 57: 27—390.
- [23] LANE P V Z, LLINÁS L, SMITH S L, et al. Zooplankton distribution in the western Arctic during summer 2002: hydrographic habitats and implications for food chain dynamics[J]. *J Mar Syst*, 2008, 70: 97—133.
- [24] MÜNCHOW A, CARMACK E C, HUNTLEY D A. Synoptic density and velocity observations of slope waters in the Chukchi and East Siberian Seas[J]. *J Geophys Res*, 2000, 105: 14103—14119.
- [25] LLINÁS L, PICKART R S, MATHIS J T, et al. Zooplankton inside an Arctic Ocean cold-core eddy: probable origin and fate[J]. *Deep-Sea Res; Part II. Top Stud Oceanogr*, 2009, 56: 1290—1304.
- [26] VERITY P G, WASSMANN P, FRISCHERA M E, et al. Grazing of phytoplankton by microzooplankton in the Barents Sea during early summer[J]. *J Mar Syst*, 2002, 38: 109—123.
- [27] JOHNSON M W. The plankton of the Beaufort and Chukchi Sea areas of the Arctic and its relation to the hydrography[J]. Arctic Institute of North America, Technical Paper, 1956, 1: 1—32.
- [28] KOSOBOKOVA K N, HOPCROFT R R. Diversity and vertical distribution of mesozooplankton in the arctic's Canada Basin[J]. *Deep-Sea Res; Part II. Top Stud Oceanogr*, 2010, 57: 96—110.
- [29] FROST B W. *Calanus marshallae*, a new species of calanoid copepod closely allied to the sibling species *C. finmarchicus* and *C. glacialis*[J]. *Mar Biol*, 1974, 26: 77—99.
- [30] NELSON R J, CARMACK E C, McLAUGHLIN F A, et al. Penetration of Pacific zooplankton into the western Arctic Ocean tracked with molecular population genetics[J]. *Mar Ecol-Prog. Ser*, 2009, 381: 129—138.
- [31] LLINÁS L. Distribution, reproduction, and transport of zooplankton in the western Arctic[D]. Coral Gables, Florida:University of Miami, 2007.

The species composition and geographic distribution of zooplankton communities in the western Arctic Ocean in the summer of 2003

ZHANG Guang-tao¹, SUN Song¹

(1. Jiaozhou Bay Marine Ecosystem Research Station, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the species composition and abundance of zooplankton from 43 stations in the western Arctic Ocean, community structures and geographic distributions, as well as relations between zooplankton communities and environmental conditions were investigated. The species composition and abundance were compared with the previously published results to examine possible changes at a community level. Three zooplankton communities were identified with a cluster analysis: a high latitude deep ocean community located in the Canadian Basin and Chuchi Plateau; a shelf community located in the central Chukchi Sea; a neritic transition community including stations along the Alaska coast and in the north of Chukchi Sea. The deep ocean community was less in total zooplankton abundance, and dominated by copepods. The most important dominant species include *Oithona* spp., *Scolecithricella minor*, *Calanus hyperboreus* and *Metridia longa*. Barnacle cypris, *Calanus glacialis* and *Pseudocalanus newmani* were the most important dominant species in the shelf community, and *P. newmani*, barnacle nauplii and *Acartia longiremis* were of the most importance in the neritic transition community. Barnacle cypris was recorded as dominant taxon in all communities, with the highest average density of 573.2 ind/m⁻³ observed in the shelf community. The deep ocean community inhabited in high latitude area characterized by low temperature and low chlorophyll a concentration. The shelf community distributed mainly in the central Chukchi Sea with high temperature and low chlorophyll a concentration and at several stations with low temperature and high chlorophyll a concentration. The stations from all these three habitats were included in the neritic transition community. It was indicated that zooplankton community is rather steady in high latitude areas, but varies significantly in the Chukchi Sea due to both environmental influences and local development. Though the species composition was different from the previous results, it was induced mainly by various sampling date and gears, rather than long-term changes.

Key words: western Arctic Ocean; zooplankton; community structure; dominant species