

研究论文

北极拉普捷夫海春季冰藻和浮游植物群落结构及生物量分析

何剑锋^{1,2} 王桂忠² 李少菁² Tushling K³ 郑淑娴^{2,1}

¹ 中国极地研究中心, 国家海洋局极地科学重点实验室, 上海 200129;

² 厦门大学海洋学系, 亚热带海洋研究所, 厦门大学海洋环境科学教育部重点实验室, 厦门 361105;

³ Institute for Polar Ecology, 241498 Kiel, Germany

摘要 对 1999 年春季采集于北极拉普捷夫海东南部的冰藻和冰下浮游植物群落的种类组成进行了分析, 并对丰度和生物量进行了统计和对比。藻种以硅藻占绝对优势, 其中又以羽纹硅藻为主。优势种集中, 主要包括海洋拟脆杆藻 (*Fragilariopsis oceanica*)、圆柱拟脆杆藻 (*F. cylindrus*)、寒冷菱形藻 (*Nitzschia frigida*)、普罗马勒菱形藻 (*N. prumare*)、带纹曲壳藻 (*Achnanthes taeniata*)、新寒冷菱形藻 (*Nitzschia neofrigida*)、大洋舟形藻 (*Navicula pelagica*)、范氏舟形藻 (*N. vanhoeffenii*)、北极直链藻 (*Melosira arctica*)、北方舟形藻 (*N. septentrionalis*)、新月细柱藻 (*Clindrotheca closterium*) 和绿藻门的塔形藻 (*Pyrromonas* sp.)。微藻主要集中在冰底 10cm, 丰度为 $14.6—1562.2 \times 10^4$ cells · L⁻¹, 平均为 639.0×10^4 cells · L⁻¹; 生物量为 $7.89—2093.5 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $886.9 \mu\text{gC} \cdot \text{L}^{-1}$, 总体上比次冰底高 1 个数量级, 比冰下表层水柱高 2 个数量级。冰底 20cm 冰柱的累计丰度和生物量平均分别为冰下 20m 水柱累计量的 7.7 和 12.2 倍, 显示冰藻在春季海冰融化前在近岸生态系统中的重要作用。尽管各站位冰底和冰下表层水柱藻类群落的相似性普遍不高, 但整个调查海域冰底和冰下水柱优势种极为相似, 春季期间冰藻对冰下浮游植物群落的影响明显。由于浮游植物丰度和生物量明显低于冰藻, 该海域的冰藻在春季对浮游植物的“播种”作用并不明显。

关键词 冰藻 浮游植物 群落结构 生物量 拉普捷夫海 北极

1 引言

拉普捷夫海为北冰洋重要的陆架海域, 对北冰洋淡水平衡以及温、盐结构具有重要影

[收稿日期] 2004 年 2 月收到来稿, 2004 年 8 月收到修改稿。

[基金项目] 国家自然科学基金 (40006010, 30270112)、科技部科技基础性工作专项 (2003DEB5J057) 和国家海洋局青年海洋科学基金 (2003122) 项目资助。

[作者简介] 何剑锋, 男, 1968 年生。研究员, 主要从事极地海洋生态学研究。

响 (Steele *et al* , 1996; Johnson and Polyakov, 2001)。同时作为新冰的重要形成地,海冰携带生源颗粒物加入到北极贯穿流 (Transpolar Drift),影响着整个北冰洋的海冰和浮游生物群落结构 (Wollenburg, 1993; Eicken *et al* , 1997; Dethleff *et al* , 2000)。

拉普捷夫海东南部为一个水深 10—40m 的开阔浅水湾,每年 10 月至次年 6—7 月被海冰所覆盖,底层水终年维持在 0 以下。勒拿和亚拿两条河流的淡水输入,为该海域浅水区带来了丰富的营养盐、有机物质和浮游植物 (Sorokin and Sorokin, 1996; Kattner *et al* , 1999; Matthiessen *et al* , 2000)。季节性海冰覆盖和淡水注入在很大程度上支配了该海域的生物群落结构 (Clark, 1990)。

对北极近岸海域春季冰藻和冰下水柱浮游植物的研究主要集中在加拿大北极海域 (Hsiao, 1980; Michel *et al* , 1993; Monti *et al* , 1996),对拉普捷夫海的相关研究主要集中在夏季 (Gran, 1904; Kiselev, 1932; Okobdkov, 1992a, b; Heiskanen and Keck, 1996; Soroki and Sorokin, 1996; Cremer, 1998)。对夏季以外季节的相关研究, Juterzenka and Knickmeier (1999) 和 Tushling *et al* (2000) 报道了秋季结冰初期的海冰和水柱叶绿素 a 浓度和微藻群落结构, Tushling (2000) 对春、夏、秋三季的浮游植物生物量和群落结构进行了对比,但总体而言仍相当有限,对春季冰藻群落组成和生物量研究尚未见报道。

本文通过对拉普捷夫海春季海冰底部冰藻和冰下水柱浮游植物的种类组成、丰度和生物量的对比研究,将有助于更好地了解该海域冰藻群落的生态特征、与浮游植物的相关性及其生态作用。

2 材料与方法

2.1 站位分布与样品采集

样品于 1999 年 4 月 17 日—5 月 6 日期间采集于拉普捷夫海近岸海域的 10 个站位,其中大部分位于固定冰区 (见图 1)。在调查后期对 Stn 01 和 Stn 05 两个站位进行了补充采样 (站位号分别为 Stn 01- 和 Stn 05-),在 Stn 0 站位采集了 20cm 厚的新冰 (站位号为 Stn 03-)。

各站位用内径 10 cm 的 CRREL 冰钻钻取冰芯,取冰底 20cm,按 10cm 的长度分为冰底和次冰底两层。冰样在避光、低温 (约 4) 环境和 0.2 μm 过滤海水中融化以降低融化过程中渗透压改变对脆性细胞的破坏 (Garrison and Buck, 1986)。冰下水样按 0.5、10 和 20m 分层,用 Niskin 采水器采集。用棕色玻璃瓶取 250mL 水样或海冰融化样,用福尔马林硼砂缓冲液固定 (最终浓度为 1%),避光、低温保存直至分析。

2.2 丰度统计及生物量换算

固定水样各取 50 mL 按 Utemöhl 法利用 Zeiss Axiovert 135 型倒置显微镜进行分类和丰度统计 (Utemöhl, 1931),在 40 \times 相差物镜下对冰藻进行 1—2 行计数,计数量不低于 400 个细胞。冰下水柱浮游植物样品由于丰度较低,进行数行乃至整个沉降池底的计数。并利用目镜所配备的 Porton 测微尺进行细胞大小测量。根据 HELCOM (1989) 的波罗地海协议计算藻类的细胞原生质体积。原生质体积与碳量换算除具甲甲藻采用 0.13pg C $\cdot\mu\text{m}^{-3}$ 外,其余藻类均采用 0.11pg C $\cdot\mu\text{m}^{-3}$ 的换算系数 (HELCOM, 1989)。冰底与次冰底

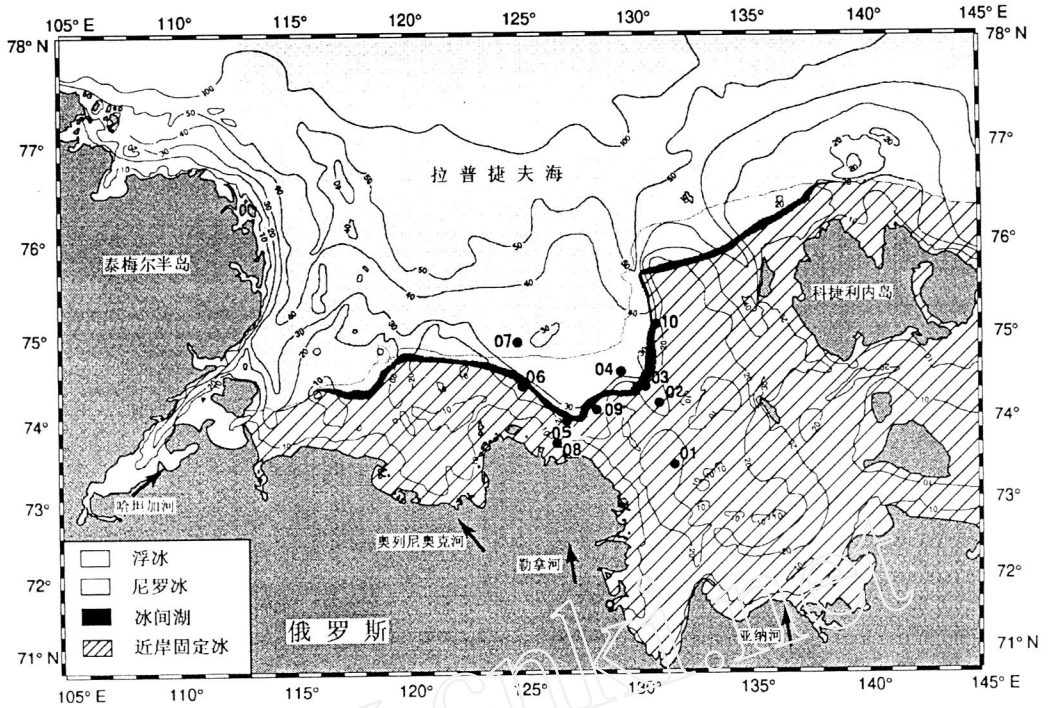


图 1 拉普捷夫海东南部采样站位图

Fig 1. The sampling sites in the southeastern Laptev Sea

以及冰底与冰下表层微藻群落的相似程度采用 Bray-Curtis相似性系数表示 (Bray and Curtis, 1957), 按如下公式进行计算:

$$C_N = 2J_N / (aN + bN)$$

式中: aN 与 bN 分别为 a 和 b 样品的微藻种数, J_N 为 a 和 b 两样品微藻共有种的种数。考虑到冰底与次冰底以及冰底与冰下表层微藻群落丰度间存在 1—2 个数量级差异, 为了便于对比, 本文用种数代替丰度进行计算。

丰度百分比占总丰度 10% 以上的藻种被认为是群落优势种。

3 结果

3.1 冰藻丰度和生物量

表 1 列出了各站位海冰冰底和次冰底冰藻丰度和生物量。其中冰底 (0—10cm) 冰藻丰度为 $(14.6—1562.2) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $639.0 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; 次冰底 (10—20cm) 冰藻丰度为 $(5.0—1170.1) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $143.2 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。冰底生物量为 $7.9—2093.5 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $886.9 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$; 次冰底的生物量为 $5.0—594.5 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $132.4 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

除 Stn 03- 新冰站位, 其余各站位冰底冰藻丰度和生物量均高于次冰底, 甚至高出 2 个数量级。Stn 03- 站位共 20cm 厚的新冰中, 10cm 上表层丰度和生物量比 10cm 冰底

分别高出 80 和 75 倍。Stn 07 浮冰站位的冰藻丰度和生物量与其他固定冰站位没有明显的差异。

海冰 20 cm 底层的累计丰度为 $(13.0—160.6) \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $79.9 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$; 累计生物量为 $12.4—212.8 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $112.0 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2}$ (表 2)。

表 1 海冰次底部冰层 (10—20cm)、底部冰层 (0—10cm) 和冰下水柱表层 (0m) 藻类丰度和生物量对比
Table 1. Comparison of algal abundance and biomass within ice bottom (0—10cm), sub-bottom (10—20cm) and underlying water surface

站位	Stn 01		Stn 02	Stn 03		Stn 04	Stn 05		Stn 06	Stn 07	Stn 08	Stn 09	Stn 10	
	- I	- II		- I	- II (新冰)		- I	- II						
丰度	次冰底	14.6	15.5	5.0	9.6	1170.1	18.1	55.4	113.6	34.3	32.2	8.5	340.1	44.1
	冰底	177.2	884.4	127.3	1239.4	14.6	906.1	74.6	1273.5	168.5	595.1	643.5	641.1	1562.2
	水表	0.1	1.0	1.0	0.8	2.3	1.9	1.7	26.4	10.6	1.5	0.4	24.8	5.26
生物量	次冰底	33.4	35.0	5.0	24.9	594.5	35.8	46.0	237.7	20.0	52.8	10.5	579.8	46.2
	冰底	292.4	2093.5	155.4	1387.0	7.9	1448.8	117.6	1642.8	104.2	911.2	971.7	890.3	1506.4
	水表	0.1	1.5	1.1	0.3	3.0	1.2	1.0	160.1	4.3	2.2	0.5	36.0	9.48

*其中丰度的单位为 $10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; 生物量的单位为 $\mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$

表 2 海冰底部 20cm 海冰和冰下 20 m 水柱藻类累计丰度和生物量对比

Table 2 Comparison of integrated abundance and biomass within bottom 20 cm ice and underlying 20 m water column

站位		Stn 01	Stn 02	Stn 03	Stn 04	Stn 05		Stn 06	Stn 07	Stn 08	Stn 09	Stn 10	平均值
		- II				- I	- II						
丰度	海冰	90.0	13.2	124.9	92.4	13.0	138.7	20.3	62.7	65.2	98.1	160.6	79.9
	水柱	6.7	8.3	6.6	14.8	13.1	263.5	72.5	32.1	1.7	308.7	63.0	71.9
	比例	13.4	1.6	18.9	6.2	1.0	0.5	0.3	2.0	38.4	0.3	2.5	7.7
生物量	海冰	212.8	16.0	141.2	148.5	16.4	188.0	12.4	96.4	98.2	147.0	155.3	112.0
	水柱	10.1	8.5	4.0	8.7	6.7	1781.7	25.2	34.3	1.9	270.4	193.1	213.1
	比例	21.1	1.9	35.3	17.1	2.4	0.1	0.5	2.8	51.7	0.5	0.8	12.2

*其中丰度的单位为 $10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$; 生物量的单位为 $\text{mg C} \cdot \text{m}^{-2}$

3.2 浮游植物丰度和生物量

冰下 20m 水柱浮游植物丰度和生物量范围分别为 $(0.02—26.4) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.03—324.9 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, 最高值出现在 Stn 05- 站位的 5m 层, 最低值出现在 Stn 02 站位的 20m 层。除个别站位水柱中浮游植物丰度和生物量峰值出现在 5m 水层外, 各站位的丰度和生物量基本上随着深度的增加而迅速下降。

其中冰下水柱表层的丰度为 $(0.1—26.4) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $6.0 \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$; 生物量为 $0.1—160.1 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均为 $17.0 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1)。各站位间的冰底和冰下水柱表层藻类丰度及生物量之比有相当大的差异。最低为 Stn 03- 新冰站位 (分别为 6.3 和 2.7), 最高为 Stn 03 站位, 分别高达 1609.6 和 4203.0。但就整体而言, 冰下水柱表层的藻类丰度和生物量比冰底的低 2 个数量级, 比次冰底的低 1 个数量级。

冰下 20m 水柱的累计丰度为 $(1.7—263.5) \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $71.9 \times 10^7 \text{ cells} \cdot \text{m}^{-2}$; 累计生物量为 $1.9—1781.7 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $213.1 \text{ mg C} \cdot \text{m}^{-2}$, 显示春季期间冰下 20m 水柱中的藻类生物量要明显低于冰底 20cm 的累计生物量 (表 2)。

3.3 冰藻群落的种类组成

共鉴定藻种 100 种, 其中硅藻占明显绝对优势 (羽纹硅藻 77 种 + 中心硅藻 11 种), 甲藻和绿藻等其他藻类 12 种 (具体内容另文发表)。

由表 3 可见, 冰藻优势种较为集中, 主要包括海洋拟脆杆藻 (*Fragilariopsis oceanica*)、圆柱拟脆杆藻 (*F. cylindrus*)、寒冷菱形藻 (*Nitzschia frigida*)、普罗马勒菱形藻 (*N. promare*)、带纹曲壳藻 (*Achnanthes taeniata*)、新寒冷菱形藻 (*Nitzschia neofrigida*)、大洋舟形藻 (*Navicula pelagica*)、范氏舟形藻 (*N. vanhoeffenii*)、北极直链藻 (*Melosira arctica*)、北方舟形藻 (*N. septentrionalis*)、新月细柱藻 (*Clindrotheca closterium*) 等 11 种, 其中海洋拟脆杆藻、圆柱拟脆杆藻和寒冷菱形藻在少数站位的冰层占据绝对优势, 而后 3 种仅在某一站位的冰层占据明显优势。各站位的优势种组成具有一定的差异 (表 3)。

表 3 次冰底、冰底和冰下水柱表层藻类优势种名录 (百分比丰度 >10%)

Table 3 List of dominant algal species (percentage abundance 10%) in bottom ice, sub-bottom ice and underlying surface water

站位	次冰底	冰底	冰下水柱表层
Stn 01-I	<i>N. frigida</i> (23.1), <i>N. neofrigida</i> (19.2), <i>F. cylindrus</i> (17.3), <i>N. vanhoeffenii</i> (15.8)	<i>F. cylindrus</i> (23.0), <i>N. frigida</i> (21.7), <i>C. closterium</i> (13.0), <i>N. neofrigida</i> (10.3)	<i>A. taeniata</i> (67.6), <i>N. frigida</i> (16.9), <i>F. oceanica</i> (11.3)
-II	<i>F. cylindrus</i> (50.3), <i>N. frigida</i> (22.7)	<i>N. frigida</i> (24.4), <i>A. taeniata</i> (16.9), <i>F. cylindrus</i> (16.0), <i>N. neofrigida</i> (13.1)	<i>A. taeniata</i> (22.7), <i>N. frigida</i> (14.6), <i>F. cylindrus</i> (12.7), <i>N. promare</i> (11.2), <i>F. oceanica</i> (10.4)
Stn 02	<i>F. cylindrus</i> (40.3), <i>F. oceanica</i> (15.2), <i>N. arctica</i> (10.2)	<i>F. cylindrus</i> (43.1), <i>N. frigida</i> (11.8)	<i>F. cylindrus</i> (57.1)
Stn 03-I	<i>F. cylindrus</i> (23.0), <i>M. arctica</i> (21.5)	<i>F. oceanica</i> (30.4), <i>F. cylindrus</i> (22.8), <i>N. promare</i> (22.2)	<i>F. oceanica</i> (92.0)
-II	<i>F. oceanica</i> (57.9), <i>N. septentrionalis</i> (20.7), <i>F. oceanica</i> (11.5)	<i>F. oceanica</i> (51.7), <i>F. cylindrus</i> (15.5), <i>A. taeniata</i> (11.2)	<i>N. septentrionalis</i> (33.5), <i>M. arctica</i> (26.8), <i>F. cylindrus</i> (11.9)
Stn 04	<i>F. frigida</i> (29.2), <i>F. cylindrus</i> (18.2), <i>N. plagica</i> (13.7), <i>S. radisonii</i> (13.0)	<i>N. frigida</i> (36.8), <i>N. plagica</i> (24.3)	<i>F. cylindrus</i> (41.7), <i>F. oceanica</i> (23.2)
Stn 05 -I	<i>N. cylindrus</i> (52.6)	<i>N. frigida</i> (25.9), <i>N. pelgica</i> (22.2)	<i>F. cylindrus</i> (56.4), <i>F. oceanica</i> (13.9)
-II	<i>N. frigida</i> (48.1), <i>N. promare</i> (24.0)	<i>N. frigida</i> (39.4), <i>N. promare</i> (39.1)	<i>M. arctica</i> (71.1), <i>F. cylindrus</i> (12.3)
Stn 06	<i>F. oceanica</i> (89.4)	<i>F. oceanica</i> (86.6)	<i>F. oceanica</i> (64.4), <i>F. cylindrus</i> (14.8)
Stn 07	<i>N. frigida</i> (49.7)	<i>N. frigida</i> (65.1)	<i>N. frigida</i> (52.8), <i>N. plagica</i> (13.0), <i>F. cylindrus</i> (10.1)
Stn 08	<i>N. frigida</i> (29.5), <i>F. oceanica</i> (10.8)	<i>N. frigida</i> (37.5), <i>F. cylindrus</i> (15.0)	<i>N. frigida</i> (26.9), <i>A. taeniata</i> (10.8)
Stn 09	<i>N. frigida</i> (20.8), <i>F. oceanica</i> (20.8), <i>A. taeniata</i> (18.3), <i>N. promare</i> (11.8), <i>M. arctica</i> (11.4)	<i>N. frigida</i> (28.5), <i>N. promare</i> (26.6), <i>N. vanhoeffenii</i> (17.8), <i>M. arctica</i> (10.9)	<i>F. oceanica</i> (44.3), <i>N. frigida</i> (12.5)
Stn 10	<i>F. cylindrus</i> (51.2), <i>N. promare</i> (27.8)	<i>N. promare</i> (47.0), <i>F. cylindrus</i> (42.9)	<i>Pyramionas</i> sp (26.8), <i>M. arctica</i> (19.3)

冰底和次冰底的相似性系数为 0.37—0.64, 平均值为 0.52, 显示两者具有一定的相似性。

3.4 浮游植物群落的种类组成

冰下水柱浮游植物的种类数量不及冰藻。优势种主要包括海洋拟脆杆藻、圆柱拟脆杆藻、寒冷菱形藻、普罗马勒菱形藻、带纹曲壳藻、大洋舟形藻、北极直链藻、北方舟形藻和绿藻门青绿藻纲中的塔形藻 (*Pyraminonas* sp.)。与冰藻较为相似,相比缺少了新寒冷菱形藻、范氏舟形藻和新月细柱藻,而塔形藻作为优势种仅出现在 Stn 10 站位的冰下表层水柱。

各站位不同水层的优势种与表层基本一致,但 Stn 10 的情况较为特殊。冰下水柱表层以包括塔形藻在内的鞭毛藻占藻类总丰度的 61% 和总生物量的 14.4%,这也是所有站位和各水层中唯一以鞭毛藻而非硅藻占优势的水层;其他各水层仍以常见优势种占有优势。

冰下水柱表层浮游植物群落与冰底的相似性系数为 0.22—0.59,平均值为 0.41,低于冰底与次冰底的相似性系数。

4 讨论

4.1 藻类的空间分布特点

各站位间相同层次的藻类丰度和生物量存在显著差异,冰底和次冰底均可达 2 个数量级,冰下水柱表层则高达 4 个数量级。Tuschling 等 (2000) 也报道在该海域秋季结冰期间新成冰、水表和 5m 水深藻类的空间分布和生物量在不同区域的明显差异。有研究表明,海冰表面积雪和冰-水界面盐度是影响北极近岸河口区冰底冰藻丰度的两个重要环境因子 (Monti *et al.*, 1996)。

海冰内部集中了很高的藻类丰度和生物量。由表 2 可见,海冰 20cm 底层和冰下 20m 水柱累计丰度和生物量比值的平均值分别高达 7.7 和 12.2,表明在多数站位所在的水深不超过 30m 的近岸海域,春季期间海冰内部的藻类丰度和生物量应高于整个冰下水柱,因而可能成为此间冰下水柱浮游动物的重要食物来源。Homer and Schrader (1982) 在波弗特海的研究表明,春季期间冰藻提供该海域总初级产量的约 2/3。尽管尚无对拉普捷夫海春季冰下水柱浮游动物摄食状况的相关报道,但在夏季冰-水界面观察到了桡足幼体富集现象,丰度峰值高达 $23911 \text{ ind} \cdot \text{m}^{-3}$ (Wemer and Martinez, 1999)。

4.2 冰藻与冰下水柱浮游植物群落的相关性

就整个调查区域而言,海冰底部和冰下水柱藻类优势种相类似,考虑到冰底藻类生物量远高于冰下水柱,推测冰下水柱中优势种至少有很大部分来源于冰底。但受海流等环境因素的潜在影响,多数站位冰底和冰下水柱藻类群落的相似性程度并不高。由于春季冰藻生物量主要集中在冰底,春季冰藻对冰下浮游植物群落的影响时间的长短和程度取决于冰藻的释放速率。Fortier 等 (2002) 对加拿大北极群岛冰藻群落的研究显示,如果海冰表面积雪受迅速升温或降水等事件的影响而突然消除,冰底的冰藻会在短期内大量释放。

春季期间对北极陆架海域的研究显示,冰藻对冰下水柱浮游植物存在一定的“播种”作用(冰藻释放入水后的大量繁殖) (Schandmeir and Alexander, 1981; Michel *et al.*, 1993)。但本研究显示,由于海洋拟脆杆藻、圆柱拟脆杆藻和寒冷菱形藻等常见优势种均

为链状或星状群体结构,具有较高的沉降速率,绝大部分被浮游动物摄食或沉降至海底 (Sancetta, 1981; Cremer, 1999; Fortier *et al*, 2002);同时冰下水柱藻类丰度和生物量明显低于冰底,冰藻的“播种”作用并不明显。拉普捷夫近岸海域浮游植物群落结构在夏季受淡水输入的影响明显,但在调查期间冰下水柱浮游植物生物量很低,并且群落组成中淡水藻类很少,表明期间淡水藻类对该近岸海域浮游植物群落的影响尚未显现。

Stn 10冰下水柱表层以鞭毛藻而非硅藻占有优势,可能是由于冰下水柱表层局部范围的鞭毛藻水华的形成。Gradinger(1996)曾在格陵兰海夏季的浮冰冰下融池中发现塔型藻单种水华,丰度高达 $19.1 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ 。而在站位 Stn 03-冰底发现有少量的淡水藻沟盘藻 (*Aulacosira sp.*),显示春季期间冰底冰藻群落可能受冰下水柱浮游植物的影响,尽管这种影响并不明显。

4.3 藻类组成与生物量的季节差异

秋季结冰期间冰藻丰度由于海冰内部的沉积物过多而难以计数 (Tuschling *et al*, 2002)。对春季和秋季冰底冰藻群落的对比显示,两者存在季节差异 (Tushling *et al*, 2000; Krember and Angle, 2001)。这主要源于秋季结冰初期浮游植物群落结构的影响。研究海域夏季受河水注入的影响,海水盐度下降,浮游植物优势种均为淡水半咸水或半咸水海洋种类 (Cremer, 1998, 1999)。秋季期间海冰开始形成和增厚,海冰通过多种物理方式富集上层水柱中的浮游植物 (何剑锋等, 2003)。但随后寒冷菱形藻作为优势种的出现,显示该种存在一个短暂的生长过程。由于春季冰下水柱中的浮游植物丰度很低,冰底冰藻的高生物量主要源于现场生长。

春季期间冰下水柱表层的浮游植物丰度为 $(0.1-26.4) \times 10^4 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$,生物量 $0.1-160.1 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$,高于 1996 年的调查结果 ($<0.1-88.4 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$) (Tushling, 2000),明显高于秋季结冰初期表层丰度和生物量 ($351-33660 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$, $0.1-5.3 \mu\text{g C} \cdot \text{L}^{-1}$, Tushling *et al*, 2000)。已有研究标明,夏季是藻类生物量最高的季节,部分海域出现水华,并且微型浮游植物占浮游植物总生物量的一半以上 (Tushling, 2000)。在拉普捷夫海北部微藻通量研究表明,夏季期间的通量要比其他季节高出数百倍 (Zemova *et al*, 2000)。

4.4 与其他北极海域的对比

优势种与波弗特海、西伯利亚海等环北冰洋近岸海域和加拿大北极海域的类似,海洋拟脆杆藻、筒状拟脆杆藻和寒冷菱形藻等是春季北极近岸冰藻普遍优势种 (Cross, 1982; Homer and Schrader, 1982; Okolodkov, 1992a, 1993; Michel *et al*, 1993),与当年生浮冰也有一定的相似性 (Syvertsen, 1990; Krember and Angle, 2001),但与北极高纬海域多年生浮冰差异明显。北极直链藻在 Stn 09 站位冰底的百分比丰度为 10.9%,在其他北极近岸海域尚无作为优势种的相关报道。该藻种是北极高纬海域多年生浮冰冰底最为重要的冰藻种类,夏季丰度峰值可达 $11.57 \times 10^6 \text{ cells} \cdot \text{L}^{-1}$ (Booth and Homer, 1997),但在近岸固定冰区其优势性并不明显 (Hsiao, 1980; Okolodkov, 1992a)。

冰下表层水柱藻类丰度要高于春季同期波弗特海的水平,但低于加拿大北极海域和楚科奇海 (Hsiao, 1980; Homer and Schrader, 1982; Okolodkov, 1992a)。

尽管对 Stn 01 和 Stn 05 站位的重复采样显示,调查期间冰底和冰下水柱的丰度和生

物量随时间呈现显著增加,但对冰底冰藻群落的观察表明,除 S_{tn 0} 站位外,其他多数已处于衰老状态,有较多的硅藻空壳,或优势种本身均有较多的北方针杆藻 (*Synedra hyperborean*)、北方四棘藻 (*Atheya septentrionalis*)和北极假异极藻 (*Pseudogamphonana arctica*)等藻类附着。显示该海域不可能像其他北极近岸固定冰区一样在海冰开始融化前的 5 月下旬至 6 月初出现春季冰底冰藻水华峰值 (Hsiao, 1980; Homer and Schrader, 1982)。该现象在拉普捷夫海的普遍性和成因有待今后进一步研究。

5 结论

拉普捷夫海东南部海域春季冰藻和冰下水柱浮游植物群落存在以下特点:

(1)藻类在海冰底层富集。总体而言,10cm 冰底的藻类丰度和生物量比次冰底高出 1 个数量级,比冰下表层水柱高出 2 个数量级,并且海冰内部的冰藻生物量极有可能超过整个冰下水柱的浮游植物生物量。

(2)藻类的空间分布差异极为显著。各站位同一层次间的藻类丰度和生物量差别显著,最高和最低值之间可以有 2—4 个数量级之差。

(3)冰底冰藻的释放入水影响了浮游植物的群落组成,但冰藻的“播种”作用并不明显。

(4)尽管春季期间的冰藻生物量远不及夏季浮游植物量,冰藻的富集表明,在冰下浮游植物量很低的特殊阶段冰藻对维持冰下水柱生态系统可能起着重要的作用。

致谢 Okobdkov 博士为藻类分类提供指导,在此表示感谢。

参考文献

- 何剑锋,王桂忠,李少菁等 (2003): 南极海冰区冰藻类群及兴衰过程, 极地研究, 15 (2), 102—114.
- Booth BC and Homer RA (1997): Microalgae on the Arctic Ocean Section, 1994: species abundance and biomass, *Deep Sea Res*, 44, 1607—1622.
- Bray JR and Curtis JT (1957): An ordination of the upland forest communities of southern Wisconsin, *Ecol Monogr*, 27, 325—349.
- Clark DL (1990): Arctic Ocean ice cover: geologic history and climatic significance. In: *The Arctic Ocean Region. The Geology of North America, Vol 1*, Ed by Grantz A, Johnson L, Sweeney JF, The Geological Society of America, Boulder, CO: 53—62.
- Cremer H (1998): Diatoms in the Laptev Sea (Arctic Ocean): Taxonomy and biogeographic distribution, *Report Polar Res*, 260, 1—205 (in German with English abstract).
- Cremer H (1999): Distribution patterns of diatom surface sediment assemblages in the Laptev Sea (Arctic Ocean), *Mar Micropaleontol*, 38, 39—67.
- Cross WE (1982): Under-ice biota at the Pond Inlet ice edge and in adjacent fast ice areas during spring, *Arctic*, 35 (1), 13—27.
- Detleff D, Rachold V, Tintelnot M *et al* (2000): Sea-ice transport of riverine particles from the Laptev Sea to Fram Strait based on clay mineral studies, *Int J. Earth Sci*, 89, 496—502.
- Eicken H, Reimnitz E, Alexandrov V *et al* (1997): Sea-ice processes in the Laptev Sea and their importance for sediment export, *Cont Shelf Res*, 17, 205—233.
- Fortier M, Fortier L, Michel C *et al* (2002): Climatic and biological forcing of the vertical flux of biogenic particles under

- seasonal Arctic sea ice, *Mar Ecol Prog Ser*, 225, 1—16.
- Gassion DL and Buck KR (1986): Organisms losses during ice melting: a serious bias in sea ice community studies, *Polar Biol*, 6, 237—239.
- Gran HH (1904): Diatomaceae from the ice floes and plankton of the Arctic Ocean. XI. In: Nansen F (eds) The Norwegian North Polar Expedition 1893—1896, *Scientific Results*, 4, 1—85.
- Gradinger R (1996): Occurrence of an algal bloom under Arctic pack ice, *Mar Ecol Prog Ser*, 131, 301—305.
- Heiskanen A-S and Keck A (1996): Distribution and sinking rates of phytoplankton, detritus, and particulate biogenic silica in the Laptev Sea and Lena River (Arctic Siberia), *Mar Chem.*, 53, 229—245.
- HELCOM (1989): Guidelines for the Baltic monitoring programme for the third stage, Part D. Biological determinands. Finn Governm Print Centre, Helsinki
- Homer R and Schrader GC (1982): Relative contribution of ice algae, phytoplankton, and benthic microalgae to primary production in nearshore regions of the Beaufort Sea, *Arctic*, 35(4), 485—503.
- Hsiao SIC (1980): Quantitative composition, distribution, community structure and standing stock of sea ice microalgae in the Canadian Arctic, *Arctic*, 33(4), 768—793.
- Johnson MA and Polyakov IV (2001): The Laptev Sea as a source for recent Arctic Ocean salinity changes, *Geophys Res Lett*, 28(10), 2017—2020.
- Juterzenka K and Knickneier K (1999): Chlorophyll a distribution in water column and sea ice during the Laptev Sea Freeze-up Study in autumn 1995. In: Land-ocean systems in the Siberian Arctic: Dynamics and history, Ed. by Bauch HA, Dmitrenko I, Eicken H *et al*, Springer-Verlag, Berlin, 153—160.
- Kattner G, Lobbes JM, Fitznar HP *et al* (1999): Tracing dissolved organic substances and nutrients from the Lena River through Laptev Sea (Arctic), *Mar Chem.*, 65(1—2), 25—39.
- Kiselev IA (1932): Material po mikroflora gevostshoi shasti more laptevish. Studies of the USSR Seas. State Hydrology Institute Publications, Leningrad, 67—103 (in Russian).
- Krembs C and Engel A (2001): Abundance and variability of microorganisms and transparent exopolymer particles across the ice-water interface of melting first-year sea ice in the Laptev Sea (Arctic), *Mar Biol*, 138, 173—185.
- Michel C, Legendre L, Theriault JC *et al* (1993): Springtime coupling between ice algal and phytoplankton assemblages in southeastern Hudson Bay, Canadian Arctic, *Polar Biol*, 13, 441—449.
- Monti D, Legendre L, Theriault J C *et al* (1996): Horizontal distribution of sea-ice microalgae: environmental control and spatial processes (southeastern Hudson Bay, Canada), *Mar Ecol Prog Ser*, 133, 229—240.
- Okolodkov YB (1992a): Cryopelagic flora of Chucki-East Siberian and Laptev Seas, *Proc NIPR Symp Polar Biol*, 5, 28—43.
- Okolodkov YB (1992b): Vodorsli Idov moria Laptevykh (Algae of the Laptev Sea ice), *Novosti System atiki N izshikh Rasteni*, 28, 29—31 (in Russian).
- Okolodkov YB (1993): A checklist of algal species found in the East Siberian Sea in May 1987, *Polar Biol*, 13, 7—11.
- Polyakova YI (1996): Diatoms of the Eurasian arctic seas and their distribution in surface sediments, *Report Polar Res*, 212, 315—324 (in German with English abstract).
- Sancetta C (1981): Oceanographic and ecologic significance of diatoms in surface sediments of the Bering and Okhotsk seas, *Deep Sea Res*, 28, 789—817.
- Schande Meir L and Alexander V (1981): An analysis of the influence of ice on spring phytoplankton population structure in the southeastern Bering Sea. *Limnol Oceanogr*, 26, 935—943.
- Sorokin YI and Sorokin PY (1996): Plankton and primary production in the Lena River Estuary and in the South-eastern Laptev Sea, *Est Coast Shelf Sci*, 43, 399—418.
- Steele M, Thomas D and Rothrock D (1996): A simple model study of Arctic Ocean freshwater balance, 1979—1985, *J. Geophys Res*, 101, 20833—20848.
- Syvertsen EE (1990): Ice algae in the Barents Sea: types of assemblages, origin, fate and role in the ice edge phytoplankton bloom, *Polar Res*, 10, 277—287.
- Tuschling K (2000): Phytoplankton ecology in the arctic Laptev Sea: A comparison of three seasons, *Report Polar Res*, 347, 1—144 (in German with English abstract).
- Tuschling K, v. Juterzenka K, Okolodkov YB *et al* (2000): Composition and distribution of the pelagic and sympagic algal assemblages in the Laptev Sea during autumnal freeze-up, *J. Plankton Res*, 22, 843—864.

- Utermöhl H (1931): Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Planktons, *Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.*, 5, 567—596.
- Werner I and Martínez AP (1999): The sub-ice fauna of the Laptev Sea and the adjacent Arctic Ocean in summer 1995, *Polar Biol.*, 21, 71—79.
- Wollenburg I (1993): Sediment transport by Arctic sea ice: the recent load of lithogenic and biogenic material, *Report Polar Res.*, 127, 1—159.
- Zemova VV, Nothig EM and Shevchenko VP (2000): Vertical microalga flux in the northern Laptev Sea (from the data collected by the yearlong sediment trap), *Oceanology*, 40(6), 801—808.

COMMUNITY STRUCTURE AND BIOMASS OF ICE ALGAE AND PHYTOPLANKTON IN THE LAPTEV SEA (ARCTIC) IN SPRING

He Jianfeng^{1,2}, Wang Guizhong², Li Shaojing²,
Tushling K³ and Zheng Shuxian^{2,1}

¹Polar Research Institute of China, Key Laboratory for Polar Science, SOA, Shanghai 200129, China;

²Oceanography Department, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

³Institute for Polar Ecology, University of Kiel, D-24148 Kiel, Germany)

Abstract

Species composition, abundance and biomass of ice algal and underlying phytoplankton communities were investigated in southeastern Laptev Sea in spring 1999. Diatoms were predominant in algal species and pennate diatoms were dominant in diatom species. 12 dominant algal species occurred in ice and underlying water column, which included *Fragilariopsis oceanica*, *F. cylindrus*, *Nitzschia frigida*, *N. primate*, *Achnanthes taeniata*, *Nitzschia neofrigida*, *Navicula pelagica*, *N. vanhoeffenii*, *N. septentrionalis*, *Melosira arctica*, *Clindrotheca closterium* and *Pyramimonas* sp. The algal abundance within bottom 10cm sea ice were between 14.6 and 1562.2 $\times 10^4$ cells $\cdot L^{-1}$ with an average of 639.0 $\times 10^4$ cells $\cdot L^{-1}$, and the algal biomass were between 7.89 and 2093.5 $\mu g C \cdot L^{-1}$ with an average of 886.9 $\mu g C \cdot L^{-1}$, which were about one magnitude higher than those of sub-bottom and two magnitude higher than those of underlying surface water. The integrated algal abundance and biomass within bottom 20cm ice column were averagely 7.7 and 12.2 times as those in underlying 20m water column, respectively, suggesting that the ice algae might play an important role in maintaining the coastal marine ecosystem before the melting of sea ice. The influence of ice algae to the phytoplankton community was obvious although the similarities of algal community in ice bottom and water surface were not high in many sites. But the "seeding" of ice algae to phytoplankton was low because the abundance and biomass in water column were much lower than those in bottom ice and no rapid growth occurred within phytoplankton community.

Key words ice algae, phytoplankton, species composition, biomass, Laptev Sea, Arctic.