

楚科奇海及其海台区粒度分级叶绿素 a 与初级生产力

刘子琳¹, 陈建芳¹, 张 涛², 陈忠元¹, 张海生¹

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

2. 卫星海洋环境动力学国家重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要:2003 年夏季中国第二次北极科学考察期间,在楚科奇海及其海台区进行了叶绿素 a 浓度与初级生产力的现场观测。结果表明,观测海区叶绿素 a 浓度范围为 0.009 ~ 30.390 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。表层浓度为 0.050 ~ 4.644 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$,平均值为 $(0.875 \pm 0.981) \mu\text{g}/\text{dm}^3$;陆架区次表层和底层的浓度高于表层,海台区深层水的浓度较低,200m 层的浓度为 $(0.015 \pm 0.007) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。水柱平均叶绿素 a 浓度区域性特征明显,陆架区高于海台区。R 断面进行 3 趟重复观测,平均叶绿素 a 浓度分别为 $(2.564 \pm 1.496) \mu\text{g}/\text{dm}^3$, $(1.329 \pm 0.882) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 和 $(0.965 \pm 0.623) \mu\text{g}/\text{dm}^3$,浓度呈下降趋势。观测站潜在初级生产力为 0.263 ~ 4.186 $\text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$,陆架区平均潜在初级生产力 $(2.305 \pm 1.493) \text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 比海台区 $(0.527 \pm 0.374) \text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 高近 4 倍。平均同化数为 $(1.22 \pm 1.14) \text{mgC}/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$ 。观测区细胞粒径 $>20\mu\text{m}$ 的小型浮游生物对总叶绿素 a 浓度和初级生产力的贡献率分别为 63.13% 和 65.16%,细胞粒径 2.0 ~ $20\mu\text{m}$ 的微型浮游生物和细胞粒径 $<2.0\mu\text{m}$ 的微微型浮游生物对总叶绿素 a 和初级生产力的贡献率相差甚小,其对总叶绿素 a 浓度的贡献率分别为 19.18% 和 17.69%,对总初级生产力的贡献率分别为 20.11% 和 14.73%。

关键词:叶绿素 a 浓度;初级生产力;粒度分级;楚科奇海;北极

文章编号:1000-0933(2007)12-4953-10 中图分类号:Q143 文献标识码:A

The Size-fractionated chlorophyll a concentration and primary productivity in the Chukchi Sea and its northern Chukchi Plateau

LIU Zi-Lin¹, CHEN Jian-Fang¹, ZHANG Tao², CHEN Zhong-Yuan¹, ZHANG Hai-Sheng¹

1 Key Laboratory of Oceanic Ecosystem and Biogeochemistry, SIO. SOA, Hangzhou 310012, China

2 State Key Lab. of Satellite Ocean Environment Dynamics, SIO. SOA, Hangzhou 310012, China

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 4953 ~ 4962.

Abstract: Investigations of chlorophyll a and primary productivity were carried out in the Chukchi Sea and its northern Chukchi Plateau during the 2nd Chinese National Arctic Research Expedition in the summer of 2003. The results showed that the chlorophyll a concentrations were 0.009 — 30.390 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ at the surveyed waters; the surface chlorophyll a concentrations were 0.050 — 4.644 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ and the average value was $(0.875 \pm 0.981) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ in the surveyed area. In the continental shelf of the Chukchi Sea, the chlorophyll a concentrations at the depths 10m to bottom were higher than that in the surface water, and the concentrations were lower at the depths below 75m in the Chukchi Plateau, with average value

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40476004, 40476003);中国第二次北极科学考察资助项目

收稿日期:2007-03-15; **修订日期:**2007-09-12

作者简介:刘子琳(1949 ~),男,福建平潭人,研究员,主要从事海洋生态学研究。E-mail: zilin1789@sina.com

致谢:本研究工作得到国家海洋局极地办公室和雪龙船船员的鼎力支持,中国海洋大学高郭平副教授、国家海洋局第一海洋研究所矫玉田高级工程师提供温、盐数据,第二海洋研究所金明明副研究员提供营养盐数据;香港科技大学刘红斌博士对本文写作给予帮助,在此一并致谢!

Foundation item: The project was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40476004, 40476003); The 2nd Chinese National Arctic Research Expedition

Received date: 2007-03-15; **Accepted date:** 2007-09-12

Biography: LIU Zi-Lin, Professor, mainly engaged in marine ecology. E-mail: zilin1789@sina.com.cn

of $(0.015 \pm 0.007) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ at the depth of 200m. The chlorophyll a concentrations decreased in 3 sequential samplings on the Section R, with column water average values of $(2.564 \pm 1.496) \mu\text{g}/\text{dm}^3$, $(1.329 \pm 0.882) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ and $(0.965 \pm 0.623) \mu\text{g}/\text{dm}^3$, respectively. The potential primary productivity in the Chukchi Sea ($(2.305 \pm 1.493) \text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$) was higher than that in the Chukchi Plateau ($(0.527 \pm 0.374) \text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$). The assimilation number of photosynthesis was $(1.22 \pm 1.14) \text{mgC}/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$ in the surveyed stations. The results of the size-fractionated chlorophyll a and primary productivity showed that microplankton accounted for the majority of the total chlorophyll a (63.13%) and primary productivity (65.16%) in the Chukchi Sea. The contributions of the nanoplankton and picoplankton to the total chlorophyll a and primary productivity were roughly the same; the average contribution rates for the total chlorophyll a were 19.18% and 17.69%, respectively; and the average contribution rates for the total primary productivity were 20.11% and 14.73%, respectively.

Key Words: chlorophyll a; primary productivity; size-fractionated; the Chukchi Sea; Arctic

极地区域是地球气候系统的重要单元,大气中 CO_2 浓度的增加导致的全球气候变暖和海平面上升已成为世人关注的重大环境问题。海洋光合浮游生物的初级生产力在相当程度上控制着海-气界面二氧化碳的交换,生物碳转化过程中大时空尺度上调节大气 CO_2 和地球气候,在全球碳循环和海洋生物地球化学过程中起重要的作用。楚科奇海是北冰洋中最大的边缘海,其陆架区和白令海峡与白令海大陆架构成了世界海洋最大的陆架海区之一^[1];在接纳北太平洋水向北冰洋输送的大洋环流中起着重要调节作用。由于客观原因使该海域的综合调查研究偏少,随着冷战的结束和全球变化科学研究的进展,对楚科奇海地区气候环境的认知与需求越来越迫切,进行了许多相关的物理环境、生源要素、生态环境与生物生产力等方面调查研究,但对楚科奇海及其北部海台区叶绿素 a 和初级生产力的研究鲜有报道^[1~12]。1999 年中国首次和第二次北极科学考察开创了我国开展北冰洋研究的先河^[13~25]。根据中国第二次北极考察的观测数据,分析探讨了楚科奇海和加拿大海盆颗粒生物硅粒级结构和白令海叶绿素 a 和初级生产力的分布特征^[26,27]。本文将进一步探讨楚科奇海及其北部海台区粒度分级叶绿素 a 浓度和初级生产力的分布特征,为海洋光合浮游生物在北极气候-海冰-海洋变化中的响应研究以及初级生产在海洋碳通量中的作用研究提供基础资料,也为北极海区碳的生物地球化学和碳的源-汇变化研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样

2003 年 7 月 30 日~9 月 10 日在楚科奇海(R 断面设 16 站: $66^\circ 59.46' \text{N} \sim 74^\circ 30.83' \text{N}$, C 区设 18 站: $167^\circ 59.05' \text{W} \sim 159^\circ 14.88' \text{W}$)及其北部海台区(设 10 站)进行了叶绿素 a 浓度和初级生产力的现场观测。7 月 30 日至 8 月 1 日、8 月 8~10 日和 9 月 8~10 日分 3 趟不同日期对 R 断面重复观测。因海台区约有 40%~50% 的海面被浮冰覆盖,观测站位间距较大(图 1)。在观测站位,用依附在 Rosette 采样器上的 Niskin 瓶采集水深 1, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150 m 和 200 m 水层样品,供叶绿素 a 浓度分析和水化学参数分析。光合作和潜在初级生产力测定用水样,按入射光强衰减至海面光强的 100%, 50%, 25%, 10% 和 1% 的深度水层采集。

1.2 方法

叶绿素 a 浓度的测定采用海洋调查规范中的荧光法^[28]。取 250cm^3 水样经 Whatman GF/F 滤膜过滤;部分测站进行粒度分级的水样,量取 250cm^3 先经孔宽 $20\mu\text{m}$ 的筛绢过滤(分离小型浮游植物细胞-Micro 级份),再经孔径 $2.0\mu\text{m}$ 的玻璃纤维素酯滤膜过滤(分离 $2.0 \sim 20\mu\text{m}$ 的微型浮游植物细胞-Nano 级份),最后用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜过滤(截留微型浮游植物细胞-Pico 级份)。截留在滤膜上的浮游植物细胞用 90% 丙酮萃取,萃取液在 Turner Designs Fluorometer, Model 10 上测定。按经典公式计算出叶绿素 a 浓度^[28,29]。

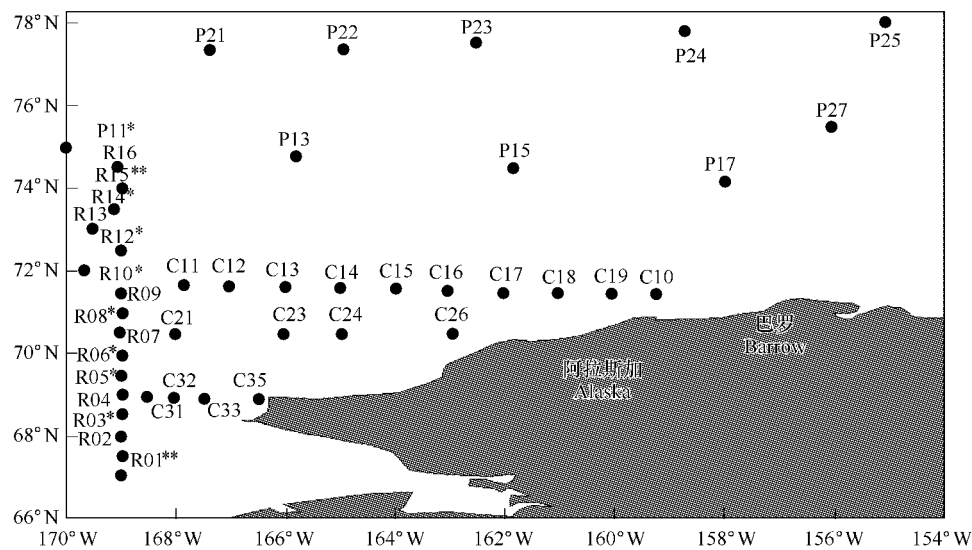


图 1 楚科奇海观测站位

Fig. 1 The sampling stations

光合作用速率和潜在初级生产力的测定,自 5 个不同光透射层次深度采集的水样,经 $280\mu\text{m}$ 孔宽的筛绢预过滤以除去大多数的浮游动物后分别注入 1 个黑瓶和 2 个白培养瓶,并分别加入 $2.22 \times 10^5 \text{ Bq NaH}^{14}\text{CO}_3$ 溶液后,置甲板现场模拟培养器中培养 5~6h。培养瓶分别用不同透光率的材质套封以使培养样品接受的光强与原水层的光强基本一致。并抽取深度 2m 的海水循环于培养水槽中以使培养水样接近近表层水温。培养完毕,水样经 Whatman GF/F 滤膜过滤(粒度分级样品分别通过孔宽 $20\mu\text{m}$ 、孔径 $2.0\mu\text{m}$ 和 Whatman GF/F 滤膜分 3 级过滤)。截留有悬浮颗粒物的滤膜经过浓盐酸熏熏处理后,低温、避光、干燥保存,带回实验室在 PACKARD 2050 CA 型液体闪烁分析仪上进行 β 计数。按海洋调查规范的方法和 Parsons 推荐的公式计算初级生产力^[28,30]。同时测定各层次水样的叶绿素 a 浓度,用以计算光合作用同化数。

2 结果

2.1 叶绿素 a 平面分布

观测海区表层叶绿素 a 浓度为 $0.050 \sim 4.644\mu\text{g}/\text{dm}^3$,平均值为 $(0.875 \pm 0.981)\mu\text{g}/\text{dm}^3$;高值出现在冰间湖(Polynya)的 R14 站,低值出现在海台东部 P27 站。叶绿素 a 浓度平面分布表明,观测海区南部的陆架海域明显高于北部海台区,在楚科奇海南部与白令海峡衔接处、阿拉斯加巴罗近岸和 R 断面中北部冰间湖等 3 处出现叶绿素 a 浓度高值区;浓度 $<0.20\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 的低值区主要位于 71°N , C2 断面西部的 C21~C23 站以及海台区,尤其在海台东部的 P17、P25 和 P27 站的表层浓度均低于 $0.10\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (图 1A)。采样底层浓度为 $0.009 \sim 30.390\mu\text{g}/\text{dm}^3$,浓度分布范围更广,平均值更高。陆架区比较浅,观测站位水深在 36~187m,底层叶绿素 a 浓度均高于表层,底层的平均浓度 $((2.526 \pm 4.788)\mu\text{g}/\text{dm}^3)$ 比海台区水深 200m 层的平均浓度 $((0.015 \pm 0.007)\mu\text{g}/\text{dm}^3)$ 高 2 个量级以上;其平面分布趋势在海台区与表层的分布相近(图 1B)。

2.2 叶绿素 a 垂直分布

观测海区叶绿素 a 浓度层化现象明显,陆架区浓度随深度增加而增高的趋势,次表层 10m 以下至底层的浓度明显高于表层,平均浓度水深 20m 层出现最大值 $((3.298 \pm 3.973)\mu\text{g}/\text{dm}^3)$;尤其在 R07 站的底层,出现低温 (-0.598°C) 高盐 (32.525) 高营养物质 $(\text{NO}_3\text{-N } 9.39\mu\text{mol/L}, \text{PO}_4\text{-P } 1.25\mu\text{mol/L}, \text{NH}_4\text{-N } 0.35\mu\text{mol/L})$ 的海水,而叶绿素 a 浓度出现 $30.390\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 的极大值。海台区水深约 3000m 左右,水温低 $(<0^\circ\text{C})$,上层海水盐度低,营养物质贫乏,平均叶绿素 a 最高浓度的 30m 层为 $(0.921 \pm 0.634)\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (表 1);随着深度的增加叶绿素 a 浓度逐渐降低,深度 $>75\text{m}$ 的深层水叶绿素 a 浓度均低于 $0.10\mu\text{g}/\text{dm}^3$,水深 200m 层,平均浓度仅为 $(0.015 \pm 0.007)\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 。观测区水柱平均叶绿素 a 浓度在楚科奇海陆架区 $((2.079 \pm 1.747)\mu\text{g}/\text{dm}^3)$ 比海

台区(0.187 ± 0.137) $\mu\text{g}/\text{dm}^3$) 高约 11 倍(表 1)。

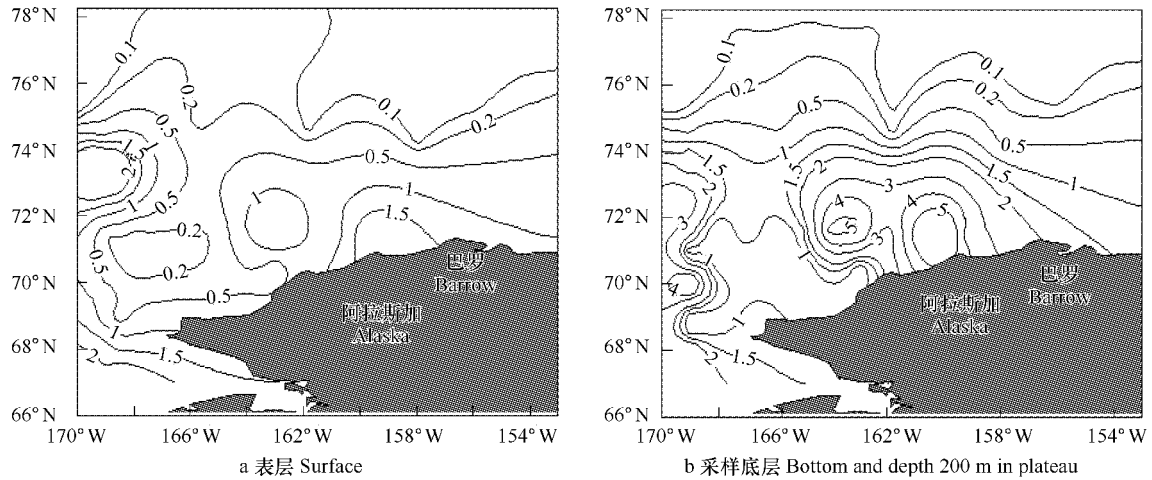


图 2 2003 年夏季楚科奇海及其海台区叶绿素 a 浓度($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) 平面分布

Fig. 2 The horizontal distribution of chlorophyll a concentration ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) in the Chukchi Sea and its northern Plateau during summer, 2003

表 1 楚科奇海陆架及其海台区叶绿素 a 浓度($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) 垂直分布

Table 1 The vertical distribution of chlorophyll a concentration ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) in the Chukchi Sea Shelf and Plateau

深度 Depth (m)	陆架区 Shelf (n = 44)		海台区 Plateau (n = 10)	
	平均值 Average	分布范围 Range	平均值 Average	分布范围 Range
1	1.060 ± 1.016	0.122 ~ 4.644	0.134 ± 0.053	0.050 ~ 0.239
10	1.493 ± 1.583	0.132 ~ 6.708	0.126 ± 0.047	0.045 ~ 0.229
20	3.298 ± 3.973	0.122 ~ 15.876	0.149 ± 0.016	0.131 ~ 0.161
30	2.867 ± 2.751	0.249 ~ 12.757	0.921 ± 0.634	0.095 ~ 2.494
50	$2.526 \pm 4.788^*$	0.039 ~ 30.390 [*]	0.322 ± 0.186	0.150 ~ 0.662
75	ND	ND	0.048 ± 0.018	0.029 ~ 0.082
100	ND	ND	0.025 ± 0.013	0.013 ~ 0.052
150	ND	ND	0.018 ± 0.014	0.009 ~ 0.052
200	ND	ND	0.015 ± 0.007	0.009 ~ 0.029
平均值 Average	2.079 ± 1.747	0.317 ~ 7.222	0.187 ± 0.137	0.074 ~ 0.499

* 陆架底层 Bottom in shelf; ND: 没有数据 No data

2.3 叶绿素 a 断面分布

楚科奇海 R 断面从南部开阔海域向北延伸至大多冰雪覆盖形成冰间湖的海区, 南北跨越 7.5 纬度, 断面叶绿素 a 浓度垂直分布示图 3A。从图 3A 可见, R 断面次表层海水叶绿素 a 浓度高于表层和北部(站 R14 ~ R16)深层水, 高值区主要出现在断面中部海脊上方和冰间湖区深度为 20 ~ 30m 的次表层水。浓度 $< 1.0 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 的低值区出现在断面中部 R05 ~ R10 站 ($69^\circ \sim 71.5^\circ\text{N}$) 0 ~ 10m 水层和北部陆坡区深度 $> 75 \text{ m}$ 的深层水。巴罗以西的 C1 横断面跨越 11 经度, 水深 42 ~ 50m, 海底比较平缓, 除 C11 ~ C14 中上层叶绿素 a 浓度 $< 0.5 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, 其它海域的浓度均较高, $> 5.0 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 的高值出现在断面西部底层、中部的中层并一直延续至东部巴罗近岸海区(图 3B), 陈志华等^[13] 研究报道的 $\delta^{15}\text{N}$ 高含量和李宏亮等^[26] 报道的 BSiO_2 高浓度也出现在此海域。

从 7 月 30 日 ~ 9 月 10 日的 43d 中对 R 断面进行了 3 趟现场观测。叶绿素 a 浓度分布表现为水深 20 ~ 30m 的次表层出现最大值, 并随观测日期的延后叶绿素 a 浓度逐渐下降的分布趋势, 水柱平均浓度分别为 $(2.564 \pm 1.496) \mu\text{g}/\text{dm}^3$, $(1.329 \pm 0.882) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 和 $(0.965 \pm 0.623) \mu\text{g}/\text{dm}^3$ (表 2)。7 月末的首次观测, 从南部观测站的海水至北部站位海面的 50% ~ 60% 浮冰雪, 说明海面处在融冰过程, 冰缘逐渐往北退缩, 冰藻

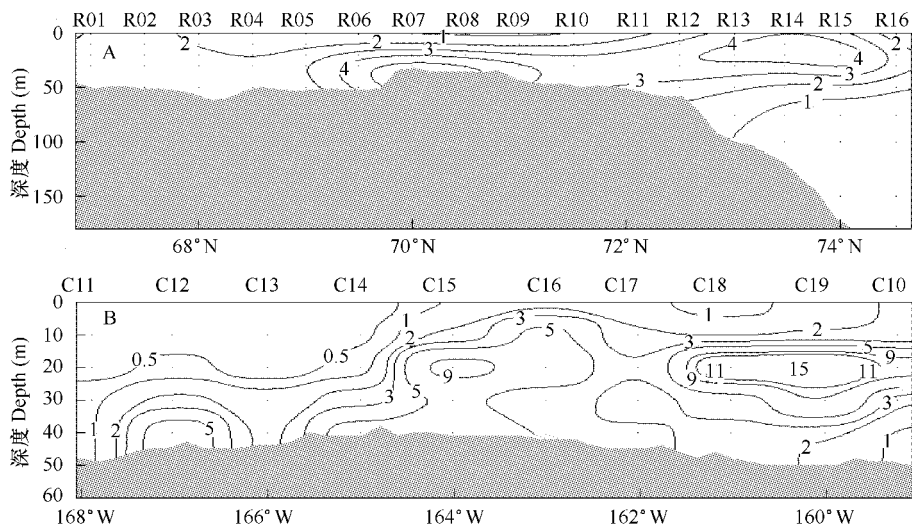


图3 R 和 C1 主断面叶绿素 a 浓度($\mu\text{g}/\text{dm}^3$)垂直分布

Fig. 3 The distribution of chlorophyll a concentration ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) in the sections R and C1

被释放入海水中,水柱中叶绿素 a 浓度较高;间隔 10d 后的第二次观测,海面浮冰全融化了,叶绿素 a 浓度下降,但 30m 水层仍有较高值;9 月初进入初秋季节,返航时遭受恶劣气候影响,观测站位、数据偏少,但仍显现 20m 水层出现叶绿素 a 浓度高值的特征(表 2)。

表 2 R 断面不同日期观测的叶绿素 a 浓度($\mu\text{g}/\text{dm}^3$)

Table 2 The average of chlorophyll a concentration($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) in Section R during different surveyed times				
水层 Layers of water	7 月 30 ~ 8 月 1 日 30, July ~ 1, August	8 月 8 ~ 10 日 8 ~ 10, August	9 月 8 ~ 10 日 8 ~ 10, September	平均值 Average
1m	1.614 ± 1.298	0.958 ± 0.903	0.610 ± 0.6378	1.310 ± 1.166
10m	2.141 ± 1.922	1.394 ± 1.408	0.604 ± 0.605	1.764 ± 1.720
20m	3.183 ± 2.653	2.553 ± 2.978	2.858 ± 0.385	2.940 ± 2.622
30m	3.481 ± 2.716	3.585 ± 3.874	0.788	3.396 ± 3.092
底层 Bottom	3.962 ± 7.691	0.796 ± 0.921	0.429 ± 0.407	2.624 ± 5.997
平均值 Average	2.564 ± 1.496	1.329 ± 0.882	0.965 ± 0.623	2.013 ± 1.399

2.4 初级生产力

观测海区潜在初级生产力为 0.263 ~ 4.186 $\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$,平均值为 $(1.861 \pm 1.513)\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 。高生产力出现在 R12、R01 和 C13 站,低生产力为 P21 站。从图 4 可见,陆架和海台区观测站表层初级生产力均低于次表层,最大值基本出现在海面光强衰减至 10% ~ 50% 的次表层水。楚科奇海陆架区(R、C 断面)的潜在初级生产力要比海台区高数倍(表 3)。观测海区水温低,光合作用中碳的同化能力弱,在初级生产力较高的水层主要与高浮游植物现存生物量有关,在 R12 和 C13 站出现潜在初级生产力随深度增加而增高趋势,底层潜

表 3 楚科奇海及海台区观测站潜在初级生产力和光合作用同化数

Table 3 The potential primary productivity and assimilation number at the surveyed stations in the Chukchi Sea and Plateau			
项目 Item	初级生产力($\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$) Primary productivity	叶绿素 a ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) Chlorophyll a	同化数($\text{mgC}/(\text{mgChl a}\cdot\text{h})$) Assimilation number
R 断面 Section R ($n=4$)	2.34 ± 1.67	4.03 ± 1.67	0.65 ± 0.46
C 断面 Section C ($n=2$)	2.24 ± 1.66	0.79 ± 0.14	2.69 ± 1.61
海台区 Plateau ($n=2$)	0.53 ± 0.37	0.60 ± 0.46	0.88 ± 0.06
平均值 Average($n=8$)	1.86 ± 1.51	2.36 ± 2.10	1.22 ± 1.14

在初级生产力分别为 $7.990\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$ 和 $6.301\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$, 其叶绿素 a 浓度分别为 $8.313\mu\text{g}/\text{dm}^3$ 和 $1.814\mu\text{g}/\text{dm}^3$, 因而同化数也仅 $0.96\text{mgC}/(\text{mgChla}\cdot\text{h})$ 和 $3.47\text{mgC}/(\text{mgChla}\cdot\text{h})$ 。观测站位的平均同化数为 $(1.22 \pm 1.14)\text{mgC}/(\text{mgChla}\cdot\text{h})$ 。

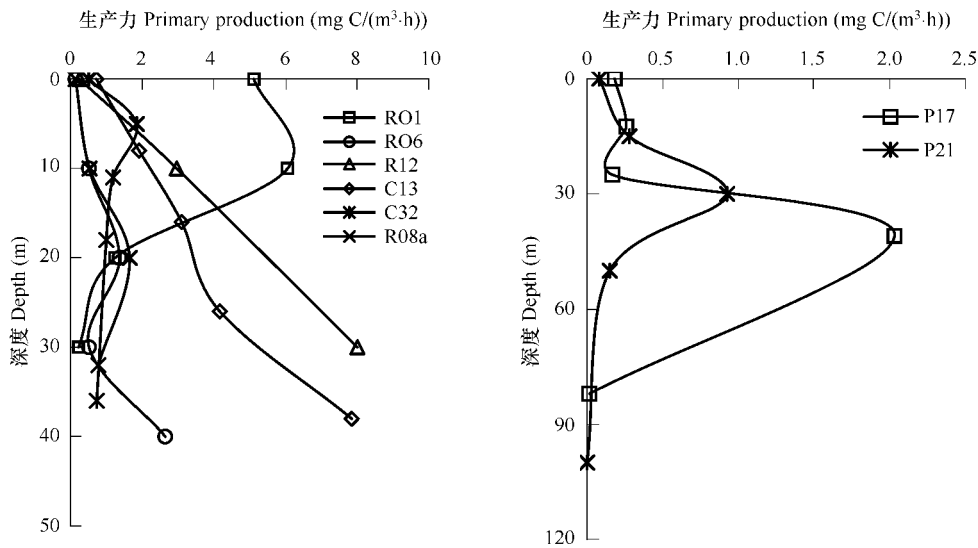


图4 观测站潜在初级生产力垂直分布

Fig. 4 The vertical distribution of the potential primary productivity at surveyed stations

2.5 浮游植物细胞粒级结构

楚科奇海陆架区细胞粒度分级表明,对总叶绿素 a 浓度和初级生产力的贡献主要以细胞粒径 $>20\mu\text{m}$ 的小型浮游植物(Micro-级份)占优势(其贡献率分别为 63.13% 和 65.16%),细胞粒径为 $2.0\sim20\mu\text{m}$ 的微型浮游植物(Nano-级份)和细胞粒径 $<2.0\mu\text{m}$ 的微微型浮游植物(Pico-级份)对总叶绿素 a 浓度和初级生产力的贡献率变化幅度差异较小。微型浮游植物对总叶绿素 a 浓度的贡献为 19.18%,对总初级生产力的贡献为 20.11%,微微型浮游植物对总叶绿素 a 浓度和初级生产力的贡献率分别为 17.69% 和 14.73%,表明观测海区大粒径浮游植物占居主要位置(表 4)。

表 4 楚科奇海观测站粒度分级叶绿素 a 和初级生产力

Table 4 The size-fractionated chlorophyll a concentration and primary productivity

浮游生物类型 Types	叶绿素 a ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$) Chlorophyll a		潜在初级生产力 ($\text{mgC}/(\text{m}^3\cdot\text{h})$) Potential primary productivity	
	平均值 Average	比率 Raties(%)	平均值 Average	比率 Raties(%)
小型浮游生物 Microplankton	1.452 ± 2.407	63.13	1.269 ± 1.298	65.16
微型浮游生物 Nanoplankton	0.441 ± 0.425	19.18	0.277 ± 0.089	20.11
微微型浮游生物 Picoplankton	0.407 ± 0.553	17.69	0.178 ± 0.049	14.73
合计 Sum	2.299 ± 2.889	100	1.724 ± 1.384	100

3 讨论

观测海域南部与白令海峡相接,西部与东西伯利亚海相连,东岸是美国的阿拉斯加,北部为水深超过 4000m 的加拿大深海平原。楚科奇海形似倒三角型的陆架海,平均水深约为 80m,海底起伏不平,面积为 $620 \times 10^3\text{km}^2$,约占北冰洋大陆架区域面积的 22%,但仅占有北冰洋水团体积的 1%,其陆架区与白令陆架相连构成世界海洋中最大的大陆架海域之一^[1,11]。因白令海峡两端的水位差,驱动北太平洋水以平均流量为 $0.8 \times 10^6\text{m}^3/\text{s}$ 的流速经白令海峡进入楚科奇海。一般认为,白令水进入楚科奇海后分成 3 支,东面的一支具有低盐、低营养盐的特征,沿着阿拉斯加沿岸向东北流,经过巴罗海谷(Barrow Canyon)后转向东,形成阿拉斯加沿

岸流;另外两支盐度和营养盐较高,分别从 Herald 浅滩的东西两侧流向北,东侧的一支穿过中央水道后,遇到 Hanna 浅滩又分为两支,西侧的一支在穿过 Herald 海谷后也分为两支,一支继续向北,另一支沿等深线向东^[2,7,18,24]。由于气候寒冷,楚科奇海每年有 5 个月时间为密集冰封期,4 个月时间为冰雪封闭或融化期,约有 3 个月时间为无冰区开阔海域^[1,24]。独特的地理位置和自然环境使的楚科奇海具有上层低温、低盐、低营养物质浓度的理化特征。2003 年夏季,观测海区表层水温为 $-1.466 \sim 8.002^{\circ}\text{C}$,南部海域由于融冰期早水温相对较高;表层盐度为 $29.210 \sim 32.394$,表层生源要素营养物质较低,硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)为 $0.305 \sim 2.690 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$,磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)为 $0.244 \sim 1.120 \mu\text{mol}/\text{dm}^3$ 。海台区的表层水温低于深层水和楚科奇海区,融冰过程使观测区表层盐度明显低于深层水,生物消耗使 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 等营养物质浓度陆架区均低于海台区和深层水(表 5)。

表 5 观测海区表层和水柱中的理化参数

Table 5 The physical and chemical parameters of the surface and column water in the Chukchi Sea and Chukchi Plateau

项目 Item	表层 Surface water		水柱 Column water	
	楚科奇海 Chukchi Sea	楚科奇海台 Chukchi Plateau	楚科奇海 Chukchi Sea	楚科奇海台 Chukchi Plateau
水温 Temperature($^{\circ}\text{C}$)	2.515 ± 3.329	-1.266 ± 0.371	1.407 ± 3.000	-1.222 ± 0.388
盐度 Salinity	30.584 ± 0.958	29.630 ± 2.204	31.502 ± 1.17	31.511 ± 1.915
溶解氧 DO ($\mu\text{mol}/\text{dm}^3$)	350.11 ± 36.67	360.56 ± 41.04	330.94 ± 46.44	325.39 ± 48.79
磷酸盐 Phosphate($\mu\text{mol}/\text{dm}^3$)	0.579 ± 0.202	0.745 ± 0.165	0.997 ± 0.585	1.246 ± 0.492
硝酸盐 Nitrate($\mu\text{mol}/\text{dm}^3$)	0.819 ± 0.530	4.108 ± 5.493	4.716 ± 5.336	9.418 ± 7.233
铵盐 Ammonium ($\mu\text{mol}/\text{dm}^3$)	0.434 ± 0.243	0.357 ± 0.081	1.183 ± 1.599	0.341 ± 0.141
叶绿素 a Chlorophyll a ($\mu\text{g}/\text{dm}^3$)	1.060 ± 1.016	0.134 ± 0.053	2.079 ± 1.747	0.187 ± 0.137

海洋浮游生物的生存与繁衍与其所处的生态环境息息相关。北冰洋观测海域常年被冰雪覆盖,每年仅在夏季约 100d 左右为无冰开阔海域^[1]。由于海冰的阻挡作用,太阳辐射能透过海冰进入海水的光强就少,不利于海水中的浮游植物的生长繁殖,但对冰藻的生长提供了有利条件,冰藻在北极地区普遍发育,对北冰洋中部初级生产力的贡献可占到一半以上^[31]。杨清良等^[22]的研究表明,随着海冰融化与季节性海冰的退却,冰藻就被释放入海水中。北冰洋浮游植物的旺发期往往出现在冰雪融化时,并已发现水华发生的观测站顺序基本上随冰缘逐渐向北退缩而移动,因而通常认为对于北极浮游植物而言光线和水温较之营养盐更为重要。海冰的影响机制归纳起来较重要的是冰融化入海时光辐射程度的显著增强,另一方面是海冰中普遍存在藻类(如硅藻类的聚生角毛藻等)的休眠孢子,进入水中即可萌发。从楚科奇海浮游植物的高密度区的研究结果分析,融冰期间可能多少也会带来较丰富的养分,尤其在浅水区。在密集浮冰区有较多藻类消耗的情况下营养盐仍较高,69°N 以南的楚科奇海南部海域藻类也较多,可能与温度、盐度较高的白令海混合水的入侵有关,69°N 以北的楚科奇浅水海域浮游动物对浮游植物丰度的区间分布也起一定程度的制约作用。在中国第二次北极考察中,从 7 月 30 日至 9 月 10 日的 43d 中进行的 R 断面 3 趟重复现场观测,表层叶绿素 a 浓度分布范围分别为 $0.222 \sim 4.644 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, $0.122 \sim 2.631 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 和 $0.159 \sim 1.061 \mu\text{g}/\text{dm}^3$,浓度分布呈逐次下降趋势(表 2)。第一趟现场观测的初级生产力($2.819 \text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$)也比第二趟的观测结果($0.902 \text{mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$)高 2 倍以上。在进行首次观测时海面浮冰较多,融冰过程冰藻进入水体,后 2 次观测时海面开阔无浮冰,尤其第 3 次观测时进入高纬度区的初秋,风大浪高,气候恶劣的生态环境状况不利于光合浮游生物的生长繁殖。

Springer 等^[1]研究结果表明,高纬度区的楚科奇海南部海域浮游植物现存量 and 初级生产力是高的(叶绿素 a 浓度最高为 $1000 \text{mg}/\text{m}^2$,初级生产力最高为 $7.2 \text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$)。在区域分布中,除非是在上升流区域,北部高纬度区的年初级生产量主要由浮游植物春季旺发期所贡献。浮游植物旺发期消耗沿海岸域 50m 以浅、混合层上方与大陆架外部出现的季节性密度跃层上方水柱中的营养盐,而大风导致密度跃层下方的富营养水混合到真光层中,增加年初级生产量。2003 年夏季观测海区叶绿素 a 浓度和初级生产力的分布区域性特征明

显,叶绿素 a 浓度高值主要出现在楚科奇海陆架区南部、中部和巴罗近岸海区(站 R01 ~ R03, R07 ~ R08, R10 ~ R13 和 C15 ~ C10 站,各观测站水柱平均叶绿素 a 浓度均在 $2.0 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 以上)。尤其在 R 断面 R07 站近底层,出现 $30.390 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ 的最高值。该站水深较浅(36m),处在海脊隆起上方,海流水团运动过程中因受地壳隆起的影响产生的爬升过程,使低温(-0.642°C ,比 20m 水层的 4.510°C 低 5°C 多)、高盐(32.529)、高营养物质($\text{NO}_3\text{-N}$ 为 $9.389 \mu\text{mol}/\text{L}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 为 $1.245 \mu\text{mol}/\text{L}$)的近底层水上升到海脊上方的次表层水中,该水域又能够接受到浮游植物进行光合作用所需的辐射光强,使浮游植物旺发(bloom)。楚科奇海及海台区表层叶绿素 a 浓度均低于 50m 以浅的上层水,陆架区表层浓度不及水柱垂直平均浓度的半数,海台区表层浓度要高于 75m 以下的深层水(表 1)。这与 Springer 等^[1]的研究中北冰洋大多数生物生产力出现在太阳辐射光强衰减至海面光强 50% 的 5 ~ 10m 上层水与海冰中的结论相吻合。

不同细胞粒径的光合浮游植物在海洋生态系自然群落的结构和营养关系中的作用已获得广泛重视。细胞粒径 $< 20 \mu\text{m}$ 的光合浮游植物具有更大的比表面积,代谢活性高,繁殖快,能量转换效率大而在海洋生态系物质循环和能量流动中起着重要作用^[32-34]。楚科奇海具有高生物现存量的陆架海区,光合浮游生物以小型浮游植物(Micro-级份)为主,观测站水柱平均叶绿素 a 浓度 Micro-级份的贡献率在 18.58% ~ 77.85%,平均值为 63.13%。融冰期间的前期观测中 Micro-级份的贡献率要高于后期,当然前期观测的生物现存量明显高于后期(表 2)。Micro-级份对初级生产力的贡献率在 61.36% ~ 83.28%,平均值为 65.16%,前期观测的平均值也略高于后期,这与在南大洋普里兹湾和南极海湾观测的结果相一致(表 6)^[35,36]。北极楚科奇海与南极普里兹湾分别是北南两极区的大海湾,均有结冰-融冰-结冰的气候特征、融冰中冰藻的释放、浮游植物富集和营养物质积累等物理过程,在分析浮游植物不同粒径对总叶绿素 a 浓度和初级生产力的贡献中具有相似分布特征。在高营养物质环境以及现存生物量和初级生产力较高的海域, Micro-级份浮游植物的贡献占优势(表 6)。从观测水体中生物硅(PBSi)粒级结构分析,也以 Micro-级份占优势,细胞粒径 $> 20 \mu\text{m}$ 的 PBSi 浓度占总浓度的 81.72%^[26]。这与在饱和光和高营养盐浓度的海区,大细胞浮游植物的生长繁殖比小细胞浮游植物来得快;在营养盐浓度低的海区,小细胞浮游植物能量转换速率快,比大细胞浮游植物具有较高的营养盐吸收率和较快的生长率的研究结论相吻合^[37]。

表 6 北极楚科奇海和南极普里兹湾光合浮游植物粒级结构的比较

Table 6 The compare of the size-fractionated photo-plankton in the Chukchi Sea and the Prydz Bay

项目 Item	海域 Sea area	小型浮游植物 Microplankton	微型浮游植物 Nanoplankton	微微型浮游植物 Picoplankton	合计 Sum	资料来源 References
叶绿素 a 贡献率 Contribution rate for chlorophyll a (%)	楚科奇海 Chukchi Sea	63.13	19.18	17.69	100	本文 This paper
	普里兹湾 Prydz Bay	72.40	27.60		100	[35]
	南极海湾 Antarctic Bay	52.50	40.85	6.65	100	[36]
初级生产力贡献率 Contribution rate for primary productivity (%)	楚科奇海 Chukchi Sea	65.16	20.11	14.73	100	本文 This paper
	普里兹湾 Prydz Bay	53.0	47.0		100	[35]
	南极海湾 Antarctic Bay	42.94	48.10	8.96	100	[36]

4 结论

(1) 楚科奇海及其海台区浮游生物现存量的分布具有明显的区域性特征。陆架区的叶绿素 a 浓度为 $0.039 \sim 30.390 \mu\text{g}/\text{dm}^3$, 海台区为 $0.009 \sim 2.494 \mu\text{g}/\text{dm}^3$; 水柱平均浓度陆架区比海台区高 1 个量级。融冰过程的物理现象、水文特征、地貌结构等对浮游植物的分布均有一定影响, R 断面叶绿素 a 浓度随观测日期的先后呈下降趋势。

(2) 观测海区潜在初级生产力在 $0.263 \sim 4.186 \text{ mgC}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$, 陆架区潜在生产力高于海台区。平均光合作用同化数为 $1.22 \text{ mgC}/(\text{mgChla} \cdot \text{h})$ 。

(3) 观测海区以细胞粒径大于 $20 \mu\text{m}$ 的小型浮游植物为主, 其对总叶绿素 a 浓度和初级生产力的贡献占优势, 微型和微微型浮游植物对总叶绿素 a 和初级生产力的贡献率较小且比较接近。

References:

- [1] Springer A M, McRoy C P, Flint M V. The paradox of pelagic food webs in the northern Bering Sea-III. Patterns of primary production. *Cont. Shelf. Res.*, 1993, 13(5/6):575—599.
- [2] Coachmann L K, Aagaard K. Transport through Bering Strait: annual and inter-annual variability. *J. Geophys. Res.*, 1988, 93, 15535—15539.
- [3] Cooper L W, Whitledge T E, Grebeier J M, *et al.* The nutrient, salinity and stable oxygen isotope composition of Bering and Chukchi Sea waters in and near the Bering Strait. *J. Geophys. Res. (C)*, 1997, 102, 12563—12573.
- [4] Cota G F, Pomeroy L R, Harrison W G, *et al.* Nutrients, primary production and microbial heterotrophy in the south-eastern Chukchi Sea: Arctic summer nutrient depletion and heterotrophy. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1996, 135, 247—258.
- [5] Bunth J N, Harland R C. Bacterial production in the bottom surface of sea ice in the Canadian Subarctic. *Can. J. Fish. Aqu. Sci.*, 1990, 47, 1986—1995.
- [6] Feder H M, Naidu A S, Jewett S C, *et al.* The northeastern Chukchi Sea: benthos-environmental interactions. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 1994, 111:171—190.
- [7] Hansell D A, Whitledge T E, Goering J J. Patterns of nitrate utilization and new production over the Bering-Chukchi shelf. *Cont. Shelf Res.* 1993, 13(5/6):601—627.
- [8] Proshutinsky A Y, Johnson M A. Two circulation regimes of the wind-driven Arctic Ocean. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102, 12493—12514.
- [9] Roach A T, Aagaard K, Pease C H, *et al.* Direct measurements of transport and water properties through the Bering Strait. *J. Geophys. Res.*, 1993, 100(C9):18443—18457.
- [10] Sambrotto R N, Goering J J, McRoy C P. Large yearly phytoplankton production in western Bering Strait. *Science*, 1984, 225, 1147—1150.
- [11] Stein R, Macdonald R W. The Organic Carbon Cycle in the Arctic Ocean. Berlin: Springer Press, 2003. 1—81, 193—203.
- [12] Walsh J J, McRoy C P, Coachman L K, *et al.* Carbon and nitrogen cycling within the Bering/Chukchi Sea: Source regions for organic matter effecting AOU demands of the Arctic Ocean. *Prog. Oceanog.*, 1989, 22, 277—359.
- [13] Chen Z H, Shi X F, Cai D L, *et al.* Organic carbon and nitrogen isotopes in surface sediments from the western Arctic Ocean and their implications for sedimentary environments. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(6):61—71.
- [14] Gao A G, Liu Y G, Zhang D J, *et al.* The latitude distribution of iodine at the sediments in the Chukchi Sea and the Bering Sea. *Science in China, (Series D)*, 2003, 33(2):139—147.
- [15] Gao G P, Dong Z Q, Shi M C. Water properties of the seas surveyed by Chinese First Arctic Research Expedition in summer, 1999. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, 15(1):11—20.
- [16] Jin M M, Wu J F, Chen J F, *et al.* Nutrient maximum in the Canada Basin. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(3):240—252.
- [17] Kan J C, Yan Q D, Sun B, *et al.* The arctic sea ice, climate and its relation with global climate system. *Chinese Journal of Polar Research*, 1999, 11(4):301—309.
- [18] Shi J X, Zhao J P, Jiao Y T, *et al.* Pacific inflow and its links with abnormal variations in the Arctic Ocean. *Chinese Journal of Polar Research*, 2004, 16(3):253—260.
- [19] Tang Y M, Jiao Y T, Zou E M. A Preliminary analysis of the hydrographic features and water masses in the Bering Sea and the Chukchi Sea. *Chinese Journal of Polar Research*, 2001, 13(1):57—68.
- [20] Xin N, Cheng M, Huang Y P. The distribution and its hydrology significance of ^{226}Ra in the Bering Sea and Arctic Ocean. *Science in China, (Series D)*, 2002, 32(5):430—440.
- [21] Xue B, Pan J M, Zhang H S, Liu X Y. Source and distribution of biogenic matter in sediments at station of Chukchi Sea area. *Chinese Journal of Polar Research*, 2006, 18(4):265—272.
- [22] Yang Q L, Lin G M, Lin M, *et al.* Species composition and distribution of phytoplankton in the Chukchi Sea and the Bering Sea. *Chinese Journal of Polar Research*, 2002, 14(2):113—125.
- [23] Yang W F, Cheng M, Liu G S, *et al.* Distribution of radionuclides at the surface sediments in Chukchi Shelf. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(2):32—35.
- [24] Zhao J P, Zhu D Y, Shi J X. Seasonal variations in sea ice and its main driving factors in the Chukchi Sea. *Advances in Marine Science*, 2003,

21(2):123—131.

- [25] Zhao J P, Shi J X, Jiao Y T. Temperature and salinity structures in summer marginal ice zone of arctic ocean and an analytical study on their thermodynamics. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(4):375—388.
- [26] Li H L, Chen J F, Liu Z L, *et al.* Size structure of particulate biogenic silica in the Chukchi Sea and the southern Canada basin. *Advances in Nature Science*, 2007, 1, 72—78.
- [27] Liu Z L, Chen J F, Chen Z Y, *et al.* Primary productivity and the standing stock of photo-plankton in the Bering Sea during the summer of 2003. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5):1345—1351.
- [28] State Technical Supervision Administration (STSA), The Specification for Oceanographic Survey Marine Biological Survey, Beijing, GB12763.6, 1991. 1—21.
- [29] Holm-Hansen O, Lorenzen C J, Holmes R W, *et al.* Fluorometric determination of chlorophyll. *J. Cons. perm. Int. Explor. Mer.*, 1965, 30:3—15.
- [30] Parsons T R, Maits Y, Lalli C M. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, 1984. 101—173.
- [31] Gosselin M, Levasseur M, Wheeler P A, *et al.* New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean. *Deep-Sea Research (Part II)*, 1997, 44(8):1623—1644.
- [32] El-Sayed S Z & S Taguchi. Primary production and standing crop of phytoplankton along the ice-edge in the Weddell Sea. *Deep-Sea Res*, 1981, 28, 1017—1032.
- [33] Li W K, Subba Rao D V, Harrison W G, *et al.* Autotrophic picoplankton in the tropical ocean. *Science*, 1983, 219, 292—295.
- [34] Platt T, Subba Rao D V, Irwin B. Photosynthesis of picoplankton in the oligotrophic ocean. *Nature*, 1983, 301(5902):702—704.
- [35] Liu Z L, Shi J X, Cheng Z Y, *et al.* Distributions of standing crop and primary productivity of phytoplankton and Particulate Organic Carbon in Prydz Bay and the Adjacent Area during Austral Summer of 1991/1992. *Oceanography in China* (9). 1998, 55—66.
- [36] Liu Z L, Cai Y M, Shi J X, *et al.* Distributions of the size-fractionated chlorophyll a and primary productivity in the surface water encircling the Antarctica during 1992/1993. *Oceanography in China* (9). 1998. 80—89.
- [37] Parsons T R, Takahashi M. Environmental control of phytoplankton cell size. *Limnol. Oceanogr.*, 1973, 18(4): 511—515.

参考文献:

- [13] 陈志华, 石学法, 蔡德陵, 等. 北冰洋西部沉积物有机碳、氮同位素特征及其环境指示意义. *海洋学报*, 2006, 28(6):61~71.
- [14] 高爱国, 刘焱光, 张道建, 等. 楚科奇海与白令海沉积物中碘的纬向分布. *中国科学, D 辑*, 2003, 33(2):139~147.
- [15] 高郭平, 董兆乾, 寺茂崇. 1999 年夏季中国首次北极考察区水团特征. *极地研究*, 2003, 15(1):11~20.
- [16] 金明明, Wu Jingfeng, 陈建芳, 等. 加拿大海盆的营养盐极大. *极地研究*, 2004, 16(3):240~252.
- [17] 康建成, 颜其德, 孙波, 等. 北冰洋海冰/气候系统及其对全球气候的影响. *极地研究*, 1999, 11(4):301~309.
- [18] 史久新, 赵进平, 矫玉田, 等. 太平洋入流及其与北冰洋异常变化的联系. *极地研究*, 2004, 16(3):253~260.
- [19] 汤毓祥, 矫玉田, 邹娥梅. 白令海和楚科奇海水文特征和水团结构的初步分析. *极地研究*, 2001, 13(1):57~68.
- [20] 邢娜, 陈敏, 黄奕普, 等. 北冰洋、白令海²²⁶Ra 的分布及其水文学意义. *中国科学, D 辑*, 2002, 32(5):430~440.
- [21] 薛斌, 潘建明, 张海生, 等. 北极楚科奇海地区沉积物生源物质的来源与分布. *极地研究*, 2006, 18(4):265~272.
- [22] 杨清良, 林更铭, 林茂, 等. 楚科奇海和白令海浮游植物的种类组成与分布. *极地研究*, 2002, 14(2):113~125.
- [23] 杨伟锋, 陈敏, 刘广山, 等. 楚科奇海陆架区表层沉积物放射性核素的分布. *海洋环境科学*, 2005, 24(2):32~35.
- [24] 赵进平, 朱大勇, 史久新. 楚科奇海海冰周年变化特征及其主要关联因素. *海洋科学进展*, 2003, 21(2):123~131.
- [25] 赵进平, 史久新, 矫玉田. 夏季北冰洋海冰边缘区海水温盐结构及其形成机理. *海洋与湖沼*, 2003, 34(4):375~388.
- [26] 李宏亮, 陈建芳, 刘子琳, 等. 北极楚科奇海和加拿大海盆南部颗粒生物硅的粒级结构. *自然科学进展*, 2007, 1, 72~78.
- [27] 刘子琳, 陈建芳, 陈忠元, 等. 白令海光合浮游生物现存量 and 初级生产力. *生态学报*, 2006, 26(5):1345~1352.
- [28] 国家技术监督局. 海洋调查规范——海洋生物调查, 中华人民共和国国家标准. 1991, (GB-12763.6). 1~21.
- [35] 刘子琳, 史君贤, 陈忠元, 等. 1991/1992 年夏季南极普里兹湾邻近海域浮游植物现存量、初级生产力和颗粒有机碳的分布. *中国海洋学文集*(9), 1998, 55~66.
- [36] 刘子琳, 蔡昱明, 史君贤, 等. 南大洋环极表层水粒度分级叶绿素 a 和初级生产力的分布. *中国海洋学文集*(9), 1998, 80~89.