

# 北极浮冰生态学研究进展

何剑锋

(中国极地研究中心, 上海 200129)

**摘要:**近年来随着北极地区的开放和全球变化对北极地区生态环境和海冰现存量的影响日益显现, 北极浮冰生态学研究得到了广泛的重视和实质性的进展。最新研究结果显示, 浮冰本身包含了一个复杂的生物群落, 高纬度浮冰生物群落的初级产量远高于原先的估算, 浮冰生物群落在北极海洋生态系统中的作用被进一步确认。但由于对浮冰生物群落的研究受后勤保障条件的制约, 目前尚有大量科学问题有待今后进一步深入研究, 预期我国科学家将在其中做出贡献。

**关键词:** 北极; 海冰; 浮冰; 生态学

## The recent progress in the studies of Arctic pack ice ecology

HE Jian-Feng (Polar Research Institute of China, Shanghai 200129, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(4): 750~754.

**Abstract:** The sea ice community plays an important role in the Arctic marine ecosystem. Species are transported by the Arctic transpolar drift system, and ice algae are an important source of the primary production that supports the sympagic community and may seed the spring phytoplankton bloom in ice edge areas. Because of the predicted environmental changes in the Arctic environment and specifically related to sea ice, the Arctic pack ice biota has received more attention in recent years using modern ice-breaking research vessels. Studies show that the Arctic pack ice contains a diverse biota and besides ice algae, the bacterial and protozoan biomasses can be high. Surprisingly high primary production values were observed in the pack ice of the central Arctic Ocean. Occasionally biomass maxima were discovered in the interior of the ice floes, a habitat that had been ignored in most Arctic studies. Light is one of the most important factors to control the biomass and structure of the pack ice community, together with other factors such as ice physical structure, temperature and brine volume.

Many scientific questions, which deserve special attention, remained unsolved due to logistical limitations and the sea ice characteristics. Little is known about the pack ice community in the central Arctic Ocean. Almost no data exists from the pack ice zone for the winter season, although high biological activities were observed in winter pack ice in the Antarctic Ocean. Concerning the abundance of bacteria and protozoa, more studies are needed to understand the microbial network within the ice and its role in material and energy flows. The response of the sea ice biota to global change will impact the entire Arctic marine ecosystem and a long-term monitoring program is needed. The techniques, that are applied to study the sea ice biota and the sea ice ecology, should be improved.

China has conducted some studies on Arctic pack ice ecology. The first Chinese Arctic expedition took place in summer 1999 and the second cruise is planned for the summer of 2003. Several ice stations were set up in the Canadian Basin where data are specifically scarce at present. The abundance, biomass and structure of community and the controlled environmental factors were investigated and grazing experiments were conducted.

**Key words:** Arctic; sea ice; pack ice; ecology

文章编号: 1000-0933(2004)04-0750-05 中图分类号: Q178.53 文献标识码: A

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (40006010; 30270112)

**收稿日期:** 2003-01-23; **修订日期:** 2003-08-16

**作者简介:** 何剑锋 (1968~), 男, 浙江东阳人, 博士, 研究员, 主要从事极地海洋生态学研究。E-mail: jhe66@sohu.com

**致谢:** Gradinger 博士协助修改英文摘要, 谨此致谢。

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China (No: 40006010; 30270112)

**Received date:** 2003-01-23; **Accepted date:** 2003-08-16

**Biography:** HE Jian-Feng, Ph. D., Professor, mainly engaged in the polar marine ecology.

海冰是南、北极海域共有的最主要特征,其中绝大部分以浮冰的形态存在。南极海域的浮冰主要是当年冰(first-year ice, 也称1年生海冰),而北极海域存在着大量的多年冰(multi-year ice),北冰洋的永久浮冰区面积高达 $7.8 \times 10^6 \text{ km}^2$ ,占北极海域最大海冰覆盖面积的一半以上。数米厚多年冰的存在,严重制约了对浮冰海域的深入研究。尽管对北极浮冰生物群落的研究最早可追溯到18世纪中叶,由于后勤保障等原因,在相当长的一段时间内对广大浮冰区、特别是高纬浮冰区的研究主要停留在零星的、以海冰硅藻分类为主的研究上。近年来全球变化导致了该地区生态环境急剧变化、海冰覆盖面积和多年冰现存量日益减少,北极浮冰生态学研究得到了广泛重视和实质性进展,而北极地区的逐步开放也为该研究创造了必要条件。以德国“极星”号破冰船北极航次为代表的各国对北极浮冰区的系统考察,获得了一批最新研究成果,使人们对浮冰生物群落本身有了新的认知。

### 1 初级产量

20世纪90年代初对北极海域初级产量普遍认同的估算为 $2.14 \sim 2.78 \times 10^{14} \text{ gC/a}$ ,其中约25%来源于海冰<sup>[1]</sup>。但近年来的研究显示,海冰、特别是浮冰生物群落对初级产量的贡献率很可能被明显低估。

首先,当时所采用的多年冰初级产量数据( $600 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ )是在缺乏实测数据的情况下根据夏、冬两季多年冰颗粒有机碳(POC)浓度之差估算出来的,但1994年夏季美-加联合调查显示,浮冰初级产量在整个北冰洋浮冰区断面(楚科奇海-北极点-格陵兰海)为 $0.5 \sim 310 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,平均为 $33 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,在北冰洋中心区的平均值更是高达 $57 \text{ mgC}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ <sup>[2]</sup>。即使是按整个断面的冰藻产量平均值和180 d(春、夏两季)的生长周期计算,原有的多年冰初级产量被低估了整整一个数量级,而海冰在北极海域初级产量中的贡献额也将从原有估算的1/4提高到1/3。

其次,由于浮冰在春、夏季存在明显的冰底冰藻水华,包括上述研究在内的绝大部分研究仅以冰底作为研究对象。但对格陵兰海浮冰整冰芯柱的研究显示,冰藻生物量峰值可能出现在海冰内部,海冰内部单位面积产量可能超过冰底<sup>[3,4]</sup>,同时,最新研究表明,该海域秋季也同样存在明显的冰底冰藻水华,其柱总生物量甚至高于春、夏两季<sup>[5]</sup>,因而冰藻的实际生长周期应长于原先估算所采用的180 d。

当然,考虑到海冰生物群落分布的极不均匀性和明显的年际差异<sup>[6]</sup>,较为准确的贡献率估算有赖于更多现场研究数据的积累。

### 2 生物群落及其生物量的空间分布

冰藻是浮冰中最主要的生物类群,其生物量峰值主要集中在浮冰的中下层、特别是冰底数厘米,因而以往的研究对象主要是冰底生物群落,但北极浮冰、特别是多年冰厚达数米,海冰内部生物群落在近年开始受到重视并有所了解。不同空间位置的冰藻类群差异明显,上层以雪藻为主,夏季北冰洋中心区的丰度峰值可达 $1.56 \times 10^5 \text{ cells/ml}$ <sup>[7]</sup>;海冰上层自养鞭毛藻和孢子占优势,中下层优势种为羽纹硅藻,通常冰底生物量最高,可超过 $1000 \mu\text{g C/L}$ <sup>[3,8]</sup>,但1999年秋季格陵兰海航次中曾在冰表以下50 cm发现10 cm厚的有色层,生物量近 $500 \mu\text{g C/L}$ ;冰-水界面的优势种为北极直链藻(*Melosira arctica*),它能在春、夏季多年冰冰底形成长达数米的藻丝,分布约占海冰总覆盖面积的2%<sup>[9]</sup>,在北极浮冰区生态系统和碳的生物地球化学循环中起着重要作用。冬季对单一浮冰研究显示,冰藻丰度、生物量和种类多样性都很低<sup>[10]</sup>。

与冰藻类似,浮冰细菌的丰度峰值可出现在冰底、冰内或出现多峰值,与冰藻无明显的相关性,但个体大小与冰藻生物量有关。细菌在浮冰内部生物群落中扮演着重要的角色,夏季整冰芯柱累计生物量与冰藻生物量之比最高可达10:1<sup>[11]</sup>。格陵兰海夏、秋季浮冰整冰芯柱的平均生物量为 $0.2 \text{ g C/m}^2$ ,其中藻类的贡献率为43%,其次是细菌(31%)、异养鞭毛虫(20%)和小型动物(4%)<sup>[12]</sup>,这也显示微型生物食物网(microbial loop)在浮冰生物群落中所起的重要作用。

浮冰内动物个体大小和分布受到卤道(brine channel)空间的限制,主要集中在冰底和近冰底的冰层。加拿大北极区浮冰后生动物丰度以桡足类和甲壳动物无节幼体最高,但在北冰洋中心区丰度最高是线虫<sup>[13,14]</sup>;蠕虫等无腔动物在北极浮冰中也具有较高的丰度<sup>[15]</sup>。格陵兰海浮冰冰底部表面端足类丰度在夏季最高,可达 $31.9 \text{ ind/m}^2$ <sup>[5]</sup>。北冰洋中心区浮冰动物不存在食物匮乏的问题,但格陵兰海浮冰冰藻则可能存在明显的摄食压力<sup>[12,14]</sup>。

### 3 生物多样性

浮冰内部存在一个复杂的生物群落,包括游离病毒、细菌、自养藻(硅藻和自养鞭毛藻)、原生动物(异养鞭毛虫、纤毛虫等)和后生动物(轮虫、桡足类及桡足幼体、端足类等)。

所有海冰生物中仅海冰硅藻的分类研究历史较长,已报道近300种,近期发现了*Fussila*和*Craspedopleura*等新属。浮冰内部的鞭毛类虽然具有较高的丰度和生物量<sup>[3,12]</sup>,并可能在冬季期间的浮冰生物群落中占有重要的地位<sup>[17]</sup>,但长期以来对其分类研究的忽视和种类鉴定的相对困难,已有的研究非常有限<sup>[6]</sup>。最近已利用16S rRNA和16S rDNA标记的分子生物学方法开展了浮冰细菌多样性研究<sup>[18,19]</sup>,显示其生物多样性并不高,并且与南极海冰细菌具有一定程度的同源性。而浮冰中后生动物的种类非常有限,已鉴定轮虫和冰底端足类分别为8种和4种<sup>[5,20,21]</sup>。但考虑到目前除海冰硅藻外的其他浮冰生物分类研究非常

有限,得出多样性不高的结论还为时过早。

#### 4 环境调控

目前这方面的研究有限。由于在浮冰上采样和采集环境参数费时、费力,每一航次所能完成的站位有限,往往无法安排现场原位实验和过程研究;同时浮冰内部小生境极为复杂,相邻浮冰乃至同一年多年冰的不同部分都可能具有不同的来源和年龄,这些都为环境调控研究增加了难度。不少相关研究是通过模拟实验和模式分析完成的。

光照可能是支配浮冰生物群落结构和生物量最为重要的因素。现场通过改变浮冰表面积雪厚度来调节光照的实验显示,在自然环境下,藻类以鞭毛藻和硅藻为主,异养动物中以涡虫为主;减少光照会使整个群落的生物量逐步下降,而增加光照会增加生物量,同时鞭毛藻和涡虫的优势性会被硅藻和纤毛虫所替代<sup>[22]</sup>。

模式研究显示,海冰结构、温度和卤水量均会影响捕食者和被捕食者的作用关系,从而影响海冰食物网动力学过程<sup>[23]</sup>。海冰底部的形态特征也会明显影响冰藻和冰底端足类的分布;端足类 *Apherusa glacialis* 丰度与冰水界面水文和冰底冰藻生物量密切相关<sup>[5,24,25]</sup>。同时,浮冰大小等海冰状况比海冰年龄对种群结构的影响更为明显<sup>[26]</sup>。

#### 5 生态作用

海冰在形成过程中对表层水柱中的生物、特别是较大的硅藻细胞具有选择性结合作用,因而能够富集生物,并通过北冰洋环流和经过弗朗姆海峡(Fram Strait)的北冰洋逸出流对浮冰的携带作用扩大生物种类的分布范围<sup>[27]</sup>。冰藻除了对北极海域初级产量的直接贡献外,在春季海冰融化过程中具有“播种”作用,通过释放“种子”促进浮冰冰缘浮游植物的生长和水华的形成,尽管这种作用程度具有明显的年际差异。最新研究显示,冰底冰藻层产生的生物活性物质可作为生物调节剂促进浮游植物的光合作用,与加入乙二酸四醋酸螯合剂或痕量金属的效果类似<sup>[28]</sup>。

浮冰生物群落同时支持了一个冰-水界面生物群落,其中以栖息在海冰底表的端足类最为典型。它们都为杂食性动物,其食物来源包括冰底有机碎屑、冰藻和冰-水界面哲水蚤等<sup>[21,29~31]</sup>。研究同时发现,北极海域优势种之一的冰川哲水蚤(*Calanus glacialis*),在夏季北极冰底摄食冰藻<sup>[32]</sup>。冰底端足类的存在可加速海冰碳量的向下输送,其粪便颗粒产量为  $0.7 \text{ mg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,约占冰底  $2 \text{ cm}$  总碳量的  $2\%$ <sup>[33]</sup>。

冰藻同时也是北极大气二甲基硫和能对臭氧层产生破坏作用的溴仿的一个重要来源,从而能对全球变化起反馈作用<sup>[34,35]</sup>。

#### 6 问题与展望

受后勤保障制约,目前对浮冰生物群落的研究资料有限,尚有大量的科学问题有待深入探讨;由于北极浮冰、特别是多年冰冰况和内部小生境的复杂性,海冰站位的数据采集具有一定程度的偶然性,对附近浮冰生物群落整体的代表性不如海洋站位;同时,现有的研究区域很不平衡,大部分调查均集中在大西洋一侧的北极海域,太平洋一侧北极海域的相关研究非常有限,北冰洋中心海域仅有一个航次的数据,因而增加考察航次、扩大考察范围和拓展研究领域对准确了解浮冰生物群落特性和生态作用是必需的。作者认为今后的调查和研究重点应包括以下 4 个方面:

(1)北冰洋中心区和冬季浮冰考察 对北冰洋中部夏季多年冰和冰下水柱的研究表明,北冰洋中心海域的初级产量至少比先前的估计高出 10 倍,而海冰在其中的贡献率高达  $57\%$ <sup>[2]</sup>。该研究完全改变了北冰洋永久海冰盖下低生物活性的传统观念,但应考虑到海冰生物群落可能存在年际变化,仅有一个航次的资料是远远不够的。目前已加强了对秋季北极浮冰生物群落的研究,但冬季航次实施困难,造成对冬季浮冰生物群落了解的匮乏<sup>[10]</sup>。对冬季南极浮冰区的研究显示,冬季浮冰冰-雪界面和海冰内部均有冰藻生长,其叶绿素 *a* 浓度均明显高于冰下水柱的浓度,并且冰藻很可能是南极大磷虾越冬期间的主要食物来源<sup>[36,37]</sup>,北极冬季浮冰的生物群落如何? 也值得关注。

(2)浮冰内部微型生物食物环研究 由于浮冰内部单位面积的累计生物量和初级产量均可能超过冰底数厘米的产量<sup>[3,4]</sup>,今后将改变以往只注重对产量相对较高的冰底进行研究的传统方法,从而对北极浮冰生物群落能有一个较为全面的了解。受海冰微生境空间大小的限制,海冰内部、特别是除海冰底部外的其它冰层的后生动物生物量极为有限,因而可以预期微型生物食物环在海冰生态系统的重要作用。目前对浮冰微微型藻类(pico-algae)、病毒和微型生物食物环物质和能量流动等方面的研究等都还是空白。

(3)北极浮冰区生物群落对全球变化响应的研究 受全球变暖趋势的影响,1978 年以来北极海域海冰覆盖面积以平均每年  $2.8\%$  的速率在减少;海冰的平均厚度在 20 世纪 90 年代中期已比 50 年代后期减少了  $43\%$ <sup>[38,39]</sup>。上述变化会对北极海域初级产量、群落结构和整个海洋生态系统产生深远的影响<sup>[40]</sup>。由于融冰加剧,冰藻将被海洋浮游植物、甚至是半咸水和淡水藻类所替代;依赖于冰藻的食物链将受到严重影响;而且以浮冰作为主要栖息地的海豹和北极熊等动物的生存也将受到严重威胁。应该看到,对浮冰生物群落及其生态作用的认识是了解浮冰变异对北极海洋生态系统的影响程度的关键。反过来,研究浮冰生物群落及其生态的变化也可以反映全球变化的影响。

(4) 研究方法的进一步改进 由于海冰是冰与卤水的一个复杂混合体, 目前更多的研究只能通过海冰在过滤海水中低温等渗融化后开展。这种方法虽被广泛采用, 但仍存在较大的缺陷。它只能减少、但无法消除处理过程对海冰内脆性细胞、特别是鞭毛藻和原生动物的破坏, 同时融化的过程也使原本生活在海冰卤道和卤水泡(brine pocket)的海冰生物群落得到相当程度的稀释, 就实验研究而言难保其结果的可靠性。目前已尝试开展了部分现场原位实验<sup>[4]</sup>, 但均难以推广。

欧洲各国以德国的“极星”号破冰船为主要平台在格陵兰海和巴伦支海等海域进行了较为集中的浮冰生态学研究, 其中也包括了我国科学家的参与。然而由于历史的原因, 在楚科奇海及其以北海域的研究数据很少, 这正好是我国北极科学考察的主要调查区域。我国已进入少数拥有自己科学考察破冰船的国家之列, 并依托“雪龙”号破冰船于 1999 年实施了首次北极科学考察<sup>[41]</sup>, 并定于 2003 年夏季开展第二次北极科学考察, 在加拿大海盆区设立冰站, 这将有助于我国直接对北极浮冰群落、特别是北洋中心区浮冰生物群落的研究。可以预见, 尽管我国自己组队参加北极考察的时间较晚, 随着我国综合国力的增强和对北极考察的深入, 将对北极海冰生态学研究做出重要的贡献。

## References:

- [1] Legendre L, Ackley S F, Dieckmann G S, *et al.* Ecology of sea ice biota 2. Global significance. *Polar Biol.*, 1992, **12**: 429~444.
- [2] Gosselin M, Levasseur M, Wheeler P A, *et al.* New measurements of phytoplankton and ice algal production in the Arctic Ocean. *Deep-Sea Res. II*, 1997, **44**: 1623~1644.
- [3] Gradinger R. Vertical fine structure of the biomass and composition of algal communities in Arctic pack ice. *Mar. Biol.*, 1999, **133**: 745~754.
- [4] Mock T and Gradinger R. Determination of Arctic algal production with a new and easy *in situ* incubation technique. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 1999, **177**: 15~26.
- [5] Werner I and Gradinger R. Under-ice amphipods in the Greenland Sea and Fram Strait (Arctic): environmental controls and seasonal patterns below the pack ice. *Mar. Biol.*, 2002, **140**: 317~326.
- [6] Hegseth E N. Primary production of the northern Barents Sea. *Polar Res.*, 1998, **17**: 113~123.
- [7] Gradinger R and Nürnberg D. Snow algal communities on Arctic pack ice floes dominated by *Chlamydomonas nivalis* (Bauer) Wille. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.*, 1996, **9**: 35~43.
- [8] Booth B C and Horner R A. Microalgae on the Arctic Ocean section, 1994: species abundance and biomass. *Deep-Sea Res. II*, 1997, **44**: 1607~1622.
- [9] Melnikov I A. *The Arctic sea ice ecosystem*. Goeden and Breach Science Publishers, 1997.
- [10] Druzhkov N V, Druzhkova E I and Kuznetsov L L. The sea-ice algal community of seasonal pack ice in the southwestern Kara Sea in late winter. *Polar Biol.*, 2001, **24**: 70~72.
- [11] Gradinger R and Zhang Q. Vertical distribution of bacteria in Arctic sea ice from the Barents and Laptev Seas. *Polar Biol.*, 1997, **17**: 448~454.
- [12] Gradinger R, Friedrich C and Spindler M. Abundance, biomass and composition of the sea ice biota of the Greenland Sea pack ice. *Deep-Sea Res. II*, 1999, **46**: 1457~1472.
- [13] Nozais C, Gosselin M, Michel C, *et al.* Abundance, biomass, composition and grazing impact of the sea-ice meiofauna in the North Water, northern Baffin Bay. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 2001, **217**: 235~250.
- [14] Gradinger R. Integrated abundance and biomass of sympagic meiofauna in Arctic and Antarctic pack ice. *Polar Biol.*, 1999, **22**: 169~177.
- [15] Friedrich C and Hendelberg J. On the ecology of Acoela living in the Arctic Sea ice. *Belgian J. Zoology*, 2001, **131**: 213~216.
- [16] Ikävalko J and Gradinger R. Flagellates and heliozoans in the Greenland Sea ice studied alive using light microscopy. *Polar Biol.*, 1997, **17**: 473~481.
- [17] Okolodkov Y B. Cryopelagic flora of the Chukchi, East Siberian and Laptev Seas. *Proc. NIPR Symp. Polar Biol.*, 1992, **5**: 28~43.
- [18] Brown M V and Bowman J P. A molecular phylogenetic survey of sea-ice microbial communities (SIMCO). *Microbiol. Ecol.*, 2001, **35**: 267~275.
- [19] Junge K, Imhoff F, Staley T, *et al.* Phylogentic diversity of numerically important Arctic sea-ice bacteria cultured at subzero temperatures. *Microbiol. Ecol.*, 2002, **43**: 315~328.
- [20] Friedrich C and De Smet W H. The rotifer fauna of arctic sea ice from the Barents Sea, Laptev Sea and Greenland Sea. *Hydrobiologia*, 2000, **万方数据**
- [21] Poltermann M. Arctic sea ice as feeding ground for amphipods - food sources and strategies. *Polar Biol.*, 2001, **24**: 89~96.

- [22] Gradinger R, Spindler M and Henschel D. Development of Arctic sea-ice organisms under graded snow cover. *Polar Res.*, 1991, **10**: 295~307.
- [23] Krembs C, Gradinger R and Spindler M. Implications of brine channel geometry and surface area for the interaction of sympagic organisms in Arctic sea ice. *J. Exper. Mar. Biol. Ecol.*, 2000, **243**: 55~80.
- [24] Hop H, Poltermann M, Lonne O J, *et al.* Ice amphipod distribution relative to ice density and under-ice topography in the northern Barents Sea. *Polar Biol.*, 2000, **23**: 357~367.
- [25] Krembs C, Tuschling K and Juterzenka K V. The topography of the ice-water interface——its influence on the colonization of sea ice by algae. *Polar Biol.*, 2002, **25**: 106~117.
- [26] Beuchel F and Lønne O J. Population dynamics of the sympagic amphipods *Gammarus wilkitzkii* and *Apherusa glacialis* in sea ice north of Svalbard. *Polar Biol.*, 2002, **25**: 241~250.
- [27] Gradinger R and Ikävalko J. Organism incorporation into newly forming Arctic sea ice in the Greenland Sea. *J. Plankton Res.*, 1998, **20**: 871~886.
- [28] Apollonio S, Pennington M and Cota G F. Stimulation of phytoplankton photosynthesis by bottom-ice extracts in the Arctic. *Polar Biol.*, 2002, **25**: 350~354.
- [29] Scott C L, Falk-Petersen S, Sargent J R, *et al.* Lipids and trophic interactions of ice fauna and pelagic zooplankton in the marginal ice zone of the Barents Sea. *Polar Biol.*, 1999, **21**: 65~70.
- [30] Scott C L, Falk-Petersen S, Gulliksen B, *et al.* Lipid indicators of the diet of the sympagic amphipod *Gammarus wilkitzkii* in the Marginal Ice Zone and in open waters of Svalbard (Arctic). *Polar Biol.*, 2001, **24**: 572~576.
- [31] Werner I, Auel H and Friedrich C. Carnivorous feeding and respiration of the Arctic under-ice amphipod *Gammarus wilkitzkii*. *Polar Biol.*, 2002, **25**: 523~530.
- [32] Werner I and Martinez Arbizu P. The sub-ice fauna of the Laptev Sea and the adjacent Arctic Ocean in summer 1995. *Polar Biol.*, 1999, **21**: 71~79.
- [33] Werner I. Faecal pellet production by Arctic under-ice amphipods - transfer of organic matter through the ice/water interface. *Hydrobiology*, 2000, **426**: 89~96.
- [34] Levasseur M, Gosselin M and Michaud S. New source of dimethylsulfide (DMS) for the arctic atmosphere: ice diatoms. *Mar. Biol.*, 1994, **121**: 381~387.
- [35] Sturges W T, Cota G F and Buckley P T. Bromoform emission from Arctic ice algae. *Nature*, 1992, **358**: 660~662.
- [36] Stevens J E. Antarctic pack-ice ecosystem. *BioScience*, 1995, **45**: 128~132.
- [37] Melnikov I A. Winter production of sea ice algae in the western Weddell Sea. *J. Marine Syst.*, 1998, **17**: 195~205.
- [38] Parkinson C L, Cavalieri D J, Gloersen P, *et al.* Arctic sea ice extents, areas, and trends, 1978-1996. *J. Geophys. Res.-Oceans*, 1999, **104** (C9): 20837~20856.
- [39] Kerr R A. Whither Arctic ice? Less of it, for sure. *Science*, 2002, **297**: 1491.
- [40] Krajick K. Arctic life, on thin ice. *Science*, 2001, **291**: 424~425.
- [41] *CHINARE Report*. Beijing: Ocean Press, 2000. 191.

#### 参考文献:

- [41] 中国首次北极科学考察报告. 北京: 海洋出版社, 2000. 191.