

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2019010702

# 南极普里兹湾表层沉积物中放射虫的组合与分布特征

朱林林<sup>1</sup>, 张海峰<sup>1,2</sup>, 潘建明<sup>1</sup>, 胡佶<sup>1</sup>, 朱秋红<sup>1</sup>, 张海生<sup>1</sup>

1. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012

2. 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

**摘要:**对普里兹湾 16 个表层沉积物样品中的放射虫动物群进行了全属种鉴定和分析, 共检出放射虫 2 目 66 属 107 种, 其中单笼虫目 40 属 71 种, 泡沫虫目 26 属 36 种, 前者的属种多样性和个体数量都显著高于后者。研究结果显示: 普里兹湾放射虫多样性程度较低, 但丰度较高, 平均可达 3.36 万枚/g, 呈现出陆架区 > 湾口区 > 冰架前缘的趋势, 且湾西部高于东部, 可能主要受研究区表层生产力、环流结构、沉积物类型和冷水团分布等海洋环境要素的影响。以 *Antarctissa strelkovi*、*Antarctissa denticulata* 为代表的 *Antarctissa* group 是该区最典型的优势种组合, 平均百分含量高达 42.43%, 其分布主要受控于水体温度, 其高含量具有指示冷水团分布的潜力, 而该组合丰度的分布主要受环流和地形的影响; 由 *Phormacantha hystrix*、*Plectacantha oikiskos* 和 *Rhizoplegma boreale* 组成的特征种组合平均百分含量为 12.54%, 其丰度和含量的分布模式主要表征的是与环流结构有关的水团混合作用的强弱, 对水深或离岸距离的指示作用并不明显。

**关键词:** 表层沉积物; 放射虫; 优势种组合; 特征种组合; 普里兹湾

中图分类号: P736.2

文献标识码: A

## Radiolarian assemblages and their distribution characteristics in surface sediments of Prydz Bay

ZHU Linlin<sup>1</sup>, ZHANG Haifeng<sup>1,2</sup>, PAN Jianming<sup>1</sup>, HU Ji<sup>1</sup>, ZHU QiuHong<sup>1</sup>, ZHANG Haisheng<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

2. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

**Abstract:** Radiolarian faunas from 16 surface sediment samples of Prydz Bay are studied by the authors. A total of 2 orders, 66 genera and 107 species are identified, which consists of 71 Nasseillaria species (40 genera) and 36 Spumellaria species (26 genera), of which the former is obviously higher in genus-species diversity and quantity of individuals. Radiolarians in the surface sediments of Prydz Bay are low in diversity but high in abundance, which may reach  $3.36 \times 10^4$  ind/g (dry sample) on average. The distribution of abundance is in a descending order from the shelf zone, to the mouth of bay and to the front of ice shelf in general, and higher in the west but lower in the east, affected by such environmental factors as surface biological productivity, circulation pattern, sediment type and distribution of cold water mass. The *Antarctissa* group, mainly composed of *Antarctissa strelkovi* and *Antarctissa denticulata*, is the dominating assemblage in Prydz Bay, which may be as high as 42.43% on average depending upon water temperature. Therefore, the high percentage of this assemblage could be used as an indicator of cold water mass. The abundance of the assemblage is also affected by water circulation and subsurface topography. The typical assemblage, which is composed of *Phormacantha hystrix*, *Plectacantha oikiskos* and *Rhizoplegma boreale*, occupies 12.54% in samples. Its distribution pattern of abundance is an indicator to the mixing degree of water mass of concerned circulating currents, but not water depth or the distance to the coast in the bay.

**Key words:** surface sediment; radiolarian; dominant assemblage; characteristic assemblage; Prydz Bay

**资助项目:** 国家自然科学基金青年项目“南极普里兹湾放射虫对现代海洋环境变化的生态响应”(41506223), “利用生物标志化合物研究西太平洋雅浦海沟沉积有机碳的来源、分布和保存”(41606090); 自然资源部第二海洋研究所基本科研业务专项“南极普里兹湾放射虫的现代沉积过程研究”(JG1404), “近二百年南极半岛海洋浮游生态系统演变的沉积记录”(JG1805), “雅浦海沟沉积有机碳的来源和保存”(JG1516); 南北极环境综合考察与评估专项“南极环境综合分析与评价”CHINARE04-01, “南极周边海域海洋化学与碳通量考察”CHINARE01-04

**作者简介:** 朱林林(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事极地海洋生物地球化学、海洋生态学研究, E-mail: alanzhulin@163.com

**通讯作者:** 张海峰(1986—), 男, 助理研究员, 主要从事海洋地质学、微体古生物学和极地古海洋、古环境研究, E-mail: zhanghaif520@163.com

**收稿日期:** 2019-01-07; **改回日期:** 2019-03-19. 周立君编辑

放射虫是大洋生态系统的一个重要组成部分<sup>[1]</sup>,其生命活动受温度、盐度、营养盐、水团结构以及洋流模式等各种海洋环境要素的影响<sup>[2]</sup>。死亡后以微体化石的形式保存在海底沉积物中,这些化石蕴涵着丰富的古生态、古环境信息,尤其是在缺乏钙质沉积的极地高纬海域,对于开展极地古海洋学研究具有重要意义<sup>[3]</sup>。迄今为止,南大洋的放射虫研究工作主要集中在大西洋扇区,不仅获得了水体中活体放射虫的分布特征<sup>[4]</sup>,还利用沉积物中的放射虫化石重建了表层海水古温度<sup>[5,6]</sup>。

普里兹湾是南极大陆周围仅次于威德尔海和罗斯海的第三大海湾<sup>[7]</sup>,其“瓶颈式”喇叭状的特殊地理环境和海底地形,使其在南大洋的古海洋学、古气候学乃至全球气候变化研究中具有重要意义。然而,普里兹湾放射虫的相关研究却较为薄弱,为数不多的成果均未报道普里兹湾海域放射虫的组合及其分布特征,陈文斌的调查局限于湾外且站位较少<sup>[8]</sup>,Nishimura 等人关注的则是整个环南极地区的高纬海域<sup>[9]</sup>。本文利用中国南极考察在普里兹湾湾内采集的 16 个表层沉积物样品,开展放射虫动物群的全属种鉴定和统计工作,探讨了该区的放射虫属种组合与分布特征及其海洋学意义,以期在南大洋的古海洋研究提供新的视角。

## 1 区域概况

普里兹湾总体上呈西南—东北走向,大致在

67°45′~69°30′S,69°~76°E 的范围内,西至达恩利角及其北侧的弗拉姆浅滩,东临四女士浅滩,湾内水深约 400~600m,中间的普里兹水道(Prydz Channel)是湾内外水体交换的主要通道<sup>[10]</sup>(图 1)。该区水团结构较为复杂,从普里兹湾湾内向北至 66°S 的范围内主要都是高密度陆架水(Dense Shelf Water, DSW)( $S>34.50$ )<sup>[11]</sup>;在埃默里冰架(Amery Shelf)下部形成的分布在陆架区近底部的“过冷水团”被称为冰架水(Ice Shelf Water, ISW)<sup>[12,13]</sup>;最冷的南极表层水(Antarctic Surface Water, ASW)出现在西冰架(West Shelf)附近和埃默里冰架正北方向。在普里兹湾内,不同的水团都有其各自的温盐特性,在特定的情况下会进行互相交换,例如 DSW 的下沉可能会形成南极底层水(Antarctic Bottom Water, AABW)<sup>[11,14]</sup>,而该过程会增强放射虫壳体的沉降速率、改变垂直分布特征,进而影响表层沉积物中放射虫的丰度。

从环流的角度看,普里兹湾及其邻近海域的环流系统主要包括陆架环流和深层水环流(图 1)<sup>[15,16]</sup>。本研究区主要受前者控制,其主体是受东风驱动的南极沿岸流(Antarctic Coastal Current, ACC),从普里兹湾东侧的西冰架附近流入湾内,大部分水体向西沿埃默里冰架前缘从西北方向在达恩利角附近流出,其余部分水体进入湾内成为普里兹湾环流(Prydz Bay Gyre, PBG)的一部分<sup>[17-19]</sup>。此外,沿着陆坡边缘还存在一支相对较弱的西向流,其流场较为复杂,多为涡流结构<sup>[20]</sup>,有资料称其为极

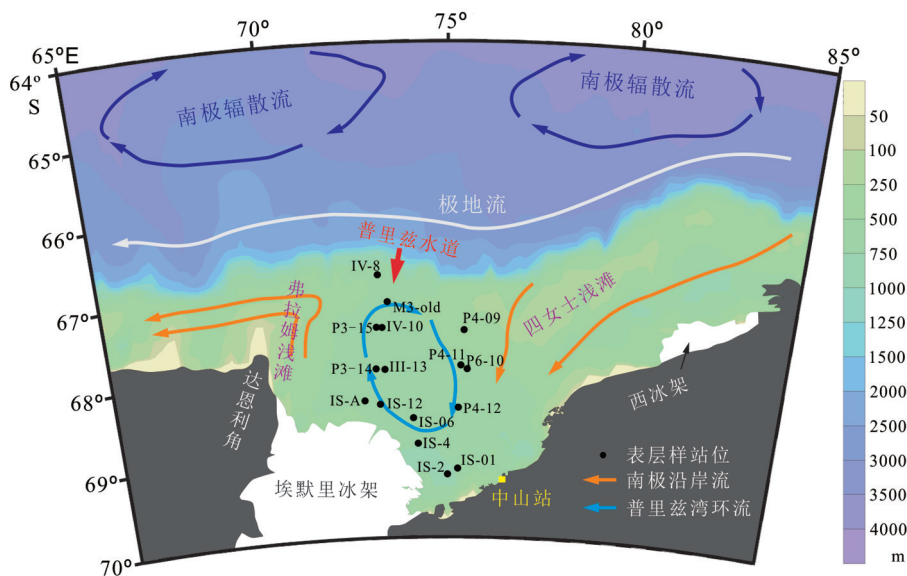


图 1 普里兹湾现代环流系统及表层样站位示意图(环流系统据文献[13,21]重绘)

Fig.1 Schematic map of modern circulation system in Prydz Bay and sampling sites

(Modern circulation system is shown by arrow lines (modified from [13, 21]), surface sediment sites are shown by black dots)

地流(Polar Current, PC)<sup>[21]</sup>。

冬季,普里兹湾海域全面冰封,夏季,部分海冰融化,但仍存少量浮冰<sup>[13]</sup>。海冰及冰架是影响普里兹湾沉积作用的主要因素之一<sup>[22]</sup>,而沉积物类型又与放射虫的沉降有关<sup>[23]</sup>。在湾东部,沉积作用主要受沿岸流及普里兹湾环流影响,使该区沉积物黏土和细粉砂含量较高,粗粉砂和砂含量较低;在湾西部,沉积作用主要受冰山、海流和埃默里冰架影响,沉积物中黏土含量较低,砂和砾石含量较高<sup>[24]</sup>。

南大洋是典型的高营养盐低叶绿素(HNLC)海区<sup>[25]</sup>,研究表明,普里兹湾及其邻近海域的初级生产力和叶绿素 a 含量的季节性变化较为明显,但从长时间尺度而言,冰架前缘与陆坡区含量相仿,较深海区高,湾内浓度远大于湾外,主要受控于海冰消融、水体的垂直稳定度、浮游动物捕食作用以及温度和光照等环境因素<sup>[26-32]</sup>,上述因素也对放射虫的分布具有较大影响<sup>[2]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 采样信息

本文研究的 16 个表层沉积物样品由我国第 18、21、24、25、27、29 次南极考察队利用箱式取样器采集,具体站位信息见表 1 及图 1。

表 1 普里兹湾表层样的站位位置及水深

Table 1 Location and water depth of sampling sites in Prydz Bay

航次	站位	位置	水深/m	环境分区
18	IV-10	67.49°S, 73.00°E	587	陆架区
18	IV-08	66.85°S, 72.99°E	510	湾口区
21	III-13	68.00°S, 73.12°E	658	陆架区
21	IS-04	68.90°S, 74.08°E	678	冰架前缘
24	IS-02	69.27°S, 74.98°E	870	冰架前缘
24	P3-14	67.99°S, 72.85°E	647	陆架区
24	P4-11	67.96°S, 75.38°E	491	陆架区
24	P4-12	68.47°S, 75.32°E	640	陆架区
25	IS-A	68.37°S, 72.49°E	828	冰架前缘
27	IS-01	69.20°S, 75.31°E	730	冰架前缘
27	IS-06	68.59°S, 73.94°E	717	冰架前缘
27	IS-12	68.42°S, 72.95°E	748	冰架前缘
27	P3-15	67.49°S, 72.94°E	575	陆架区
27	P4-09	67.53°S, 75.47°E	421	陆架区
29	M3-old	67.18°S, 73.24°E	527	湾口区
29	P6-10	68.00°S, 75.57°E	594	陆架区

### 2.2 分析方法

样品处理与薄片的制备过程均采用德国阿尔弗雷德·魏格纳极地与海洋研究所(AWI)微体古生物室的标准方法<sup>[6,33]</sup>;称取 3~10g 冻干沉积物样品放入烧杯,加入热水后用适量的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 HCl 以去除样品中的有机质和钙质,在电热板上煮沸至反应结束,用 400 目(38μm)的网筛冲洗样品并将筛上屑样收集至 100mL 塑料瓶中备用;薄片制备采用沉降法,将盖玻片在酒精中浸一下逐一放入预先编号的玻璃皿中,倒入事先配制好的盖拉丁溶液至约 3/4 高度处,再将塑料瓶中的样品充分摇匀后用注射器取一定量水样缓慢注入到对应玻璃皿中,使其均匀沉降,约半小时后用裁好的狭长滤纸条一端轻柔放入玻璃皿,利用虹吸作用将水吸干,再将带有屑样的载玻片转移至操作台并以事先配制好的加拿大树胶将其与载玻片胶合,水平放置待树胶干透后收进薄片盒保存。镜下鉴定利用 Leica DM 750 型双目生物显微镜,每个样品统计 300~400 枚放射虫样本,以确保数据的可信度;然后计算各样品中每个属种的百分含量,选取其中百分含量大于 3% 的属种列入放射虫组合的分析和讨论<sup>[34]</sup>。以上工作均在自然资源部第二海洋研究所海洋生态系统与生物地球化学重点实验室完成。

## 3 结果与讨论

### 3.1 种群结构特征

本文共检出放射虫 2 目 66 属 107 种 5152 枚。其中,罩笼虫目共计 40 属 71 种 4721 枚(含未定属样本 4 枚),占总种数的 66.36%,个体数量占比为 91.63%;泡沫虫目共计 26 属 36 种 431 枚,占总种数的 33.64%,个体数量占比为 8.37%。罩笼虫目与泡沫虫目的种数比值为 1.97,前者在属种多样性和个体数量上都占据明显优势。

在检出的全部放射虫中,选取至少在一个样品中百分含量超过 3% 的属种,共有 19 个(表 2),占检出总个体数的 82.72%,另有未定属的样本约占 0.08%。其中,平均含量 > 10% 的放射虫只有 *Antarctissa strelkovi* 和 *Antarctissa denticulata* 两个种,前者平均含量为 18.86%,后者平均含量为 14.99%,二者之和达 33.85%,是研究区放射虫组合中显著的优势种。研究表明南极虫属(genus *Antarctissa*)是南大洋 45°S 以南海域最典型的南极

种<sup>[35]</sup>,也是最重要的一个放射虫组合<sup>[6]</sup>。本文根据数据结果以及前人研究,将检出的 *A. strelkovi*、*A. denticulata* 以及 *Antarctissa cylindrica*、*Antarctissa* sp. 和 *Antarctissa denticulate* var. *cylindrica* 这 5 个种合并为南极虫组合 (*Antarctissa* group) 以便进行分析和讨论,该组合平均含量之和高达 42.43%,是研究区表层沉积物中最大的优势种组合。

此外, *Phormacantha hystrix* 和 *Plectacantha oikiskos* 的平均含量分别为 5.80% 和 5.72%,仅次于 *A. strelkovi*、*A. denticulata* (表 2)。有研究将这两者合并为 *P. hystrix*/*P. oikiskos* group 进行讨论,并指出其与 *Rhizoplegma boreale* 在 60°S 以南的环南极高纬海域是一个可以指示沿岸浅水环境的独特组合 (coastal assemblage)<sup>[9]</sup>。本研究中, *P. hystrix*、*P. oikiskos* 与 *R. boreale* 三者的平均含量之和为 12.54%,仅次于优势种组合,本文将这三者合并为特征种组合进行讨论。

表 2 普里兹湾表层沉积物中主要放射虫属种百分含量的最大、最小和平均值

Table 2 Maximum, minimum and average percentages of radiolarian species in surface sediments of Prydz Bay

属种名称	最大值 /%	最小值 /%	平均值 /%
<i>Antarctissa strelkovi</i>	27.65	13.13	18.86
<i>Antarctissa denticulata</i>	22.32	7.06	14.99
<i>Phormacantha hystrix</i>	9.60	2.53	5.80
<i>Plectacantha oikiskos</i>	10.45	0.00	5.72
<i>Lithomelissa setosa</i>	6.88	2.25	4.42
<i>Antarctissa cylindrica</i>	6.75	1.21	4.07
<i>Arachnocorallium calvata</i>	6.11	1.08	3.80
<i>Eucecryphalus</i> sp.	4.69	0.54	3.22
<i>Antarctissa</i> sp.	6.34	0.85	3.11
<i>Lithomelissa hystrix</i>	4.46	0.63	2.64
<i>Corythospyris</i> sp.	6.02	0.00	2.27
<i>Lithomelissa</i> sp.	3.32	0.32	2.19
<i>Clathrospyris sandellae</i>	3.95	0.96	2.16
<i>Plectacantha</i> sp.	4.26	0.00	2.08
<i>Lithomelissa laticeps</i>	3.92	0.33	1.63
<i>Antarctissa denticulate</i> var. <i>cylindrica</i>	3.57	0.00	1.39
<i>Acrosphaera?</i> <i>labrata</i>	3.41	0.00	1.37
<i>Clathrospyris vogti</i>	3.57	0.27	1.22
<i>Plectacantha</i> group	3.32	0.00	1.06

## 3.2 放射虫的分布特征

### 3.2.1 放射虫多样性

为研究放射虫的种群结构和多样性特征,本文引入简单分异度  $S$  及复合分异度  $H(S)$  来进行讨论。前人研究指出,  $S$  表示属种的多少,其变化反映的是生物群内种类多样性的程度,而  $H(S)$  是反映种数及其个体数间分配比例均匀程度的一个综合参数<sup>[36,37]</sup>,并采用 Shannon-Winner 公式计算<sup>[38]</sup>:

$$H(S) = - \sum_{i=1}^S P_i \log 2P_i$$

式中,  $P_i$  表示第  $i$  个种的个体数 ( $n_i$ ) 在全群总个数 ( $N$ ) 中所占的比例 ( $P_i = n_i/N$ )。

结果表明(图 2),简单分异度  $S$  为 36~52,最低值出现在冰架前缘的 IS-12 站,高值有两个,分别位于湾口水道上的 M3-old 站和湾东部四女生浅滩西南边缘的 P6-10 站;复合分异度  $H(S)$  的分布与  $S$  颇为相似,最低值也出现在冰架前缘,IS-04 站为 3.82,IS-12 站为 3.83,最大值同样出现在 P6-10 站,为 4.81。与南海等低纬海区资料相比<sup>[37]</sup>,本研究中  $S$  值明显较低,  $H(S)$  值却相对偏高,表明研究区放射虫多样性程度较低,但均匀性较好。总体上看,该区这两个指标的变化幅度都不大,且其平面分布特征也较为接近,均表现出冰架前缘向东北侧浅滩区逐渐增大的趋势,表明冰架前缘放射虫种群的多样化程度低于陆架区。造成这种现象的原因,可能主要是由于冰架前缘主要受到温度相对较低的冰架水团的控制,在一定程度上限制了放射虫种群的发育。

### 3.2.2 放射虫的丰度

普里兹湾沉积物干样中放射虫的平均丰度高达 3.36 万枚/g,其中最大值出现在湾中心偏西的 P3-14 站,达到了 5.02 万枚/g,最小值则出现在冰架前缘 IS-04 站,为 1.57 万枚/g,表明普里兹湾海域表层沉积物中放射虫含量极为丰富。其分布特征大致呈现出陆架区高、冰架前缘及湾口区域低的趋势,且湾西部略高于湾东部(图 3)。

这种分布模式主要受控于表层生产力、水团温度、海冰、沉积物类型和区域环流结构等因素。首先,从放射虫的生命过程来看,其主要摄食水体中的浮游植物等微小颗粒物,故其分布受上层海洋初级生产力的影响。普里兹湾陆架区的 *Chla* 浓度与生物量大于湾口区<sup>[31,32,39]</sup>,因此上层海洋生产力是影响这两个区域分布差异的主要因素。而冰架前缘与陆架区都属于季节性高生产力区, *Chla* 浓度、营养盐消耗量及其反映的生产力水平和浮游植物量相差

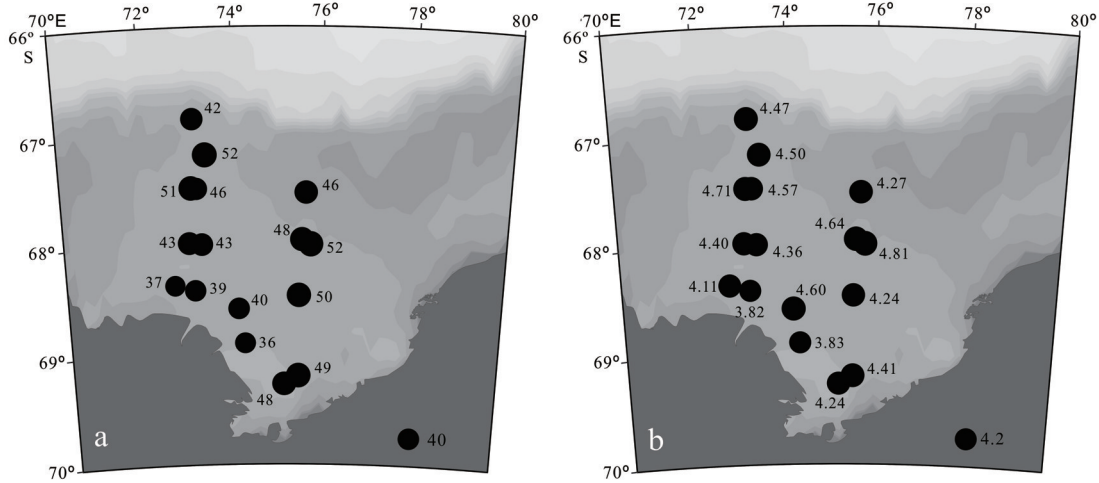


图2 普里兹湾表层沉积物中放射虫多样性的分布特征  
a.简单分异度 S; b.复合分异度 H(S)

Fig.2 Distribution of radiolarian diversity in surface sediments of Prydz Bay  
a. shows the simple diversity S; b. shows complex diversity H(S)

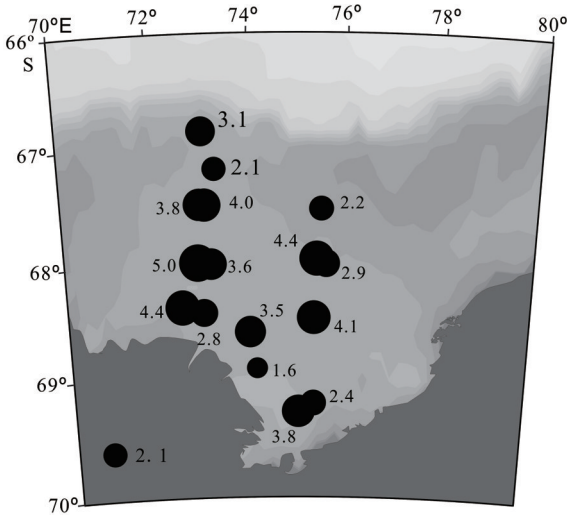


图3 普里兹湾表层沉积物中放射虫的丰度分布特征  
(单位:万枚/g)

Fig.3 Distribution of radiolarian abundance in surface sediments of Prydz Bay( $\times 10^4$  ind/g)

不大<sup>[31,32,39]</sup>,而普里兹湾附近的高盐陆架水,其温度指标为  $T < -1.5^{\circ}\text{C}$ ,冰架水由于其低压结冰温度的特性,其水温最低可以达到  $-2.4^{\circ}\text{C}$ <sup>[7]</sup>。因此,冰架前缘的水体环境较陆架区更冷,导致放射虫的生长受限,这可能是两个区域放射虫丰度分布差异的原因之一。其次,从放射虫沉降及保存的角度来看,湾内中心区域的沉积速率相对较快,而靠近陆缘和冰架的沉积速率较慢<sup>[40]</sup>;而从沉积物类型考虑,湾中心区域,受沿岸流及普里兹湾环流的影响,环流中心流速降低,周围的黏土与粉砂在此沉积,沉积物粒

度较小,利于放射虫沉降;在冰架前缘区域则主要受埃默里冰架的影响,较粗的冰筏碎屑在此沉积,沉积物粒度较大,不利于放射虫沉降<sup>[23,24]</sup>。因此相对来说,上部水体里的放射虫在沉降至表层沉积物的过程中,冰架前缘累积较少,而在陆架区累积较多。陆架区 DSW 的下沉也会增强放射虫壳体的沉降速率,造成陆架区沉积物中放射虫丰度较高的现象;与此同时,南极沿岸流的搬运作用,将部分放射虫从冰架前缘向西北方向转移。研究表明沿岸流向西流动遇到达恩利角和弗拉姆浅滩的阻挡会在达恩利角以东位置的表层和 200m 层均形成一个反气旋式涡旋<sup>[17,20]</sup>,导致放射虫在此处富集堆积。因此,湾西侧表层沉积物中放射虫的丰度明显高于湾东部地区。

陈文斌报道的普里兹湾外表层沉积物中放射虫的丰度远低于本文结果,其中丰度最大的 G1 站位仅有 1.7 万枚/g<sup>[8]</sup>。需要指出的是,该研究所用的网筛孔径为  $63\mu\text{m}$ ,比本文采用的  $38\mu\text{m}$  大,如此一来,屑样中的 *Antarctissa* sp.、*Plectacantha* group 和 *Phormacantha* group 等体型  $38\sim 63\mu\text{m}$  的个体就漏掉了<sup>[34]</sup>,不过根据本研究结果推算(表 2),即使在较为理想的情况下,损失的这部分个体占放射虫总量的比例可能也低于 10%,换言之,湾外表层沉积物中放射虫的丰度最高也不过 2 万枚/g,仅略高于湾内的最低水平。这种差异可能主要是由湾外初级生产力较低以及极地流的搬运作用所引起的,这也佐证了本研究对于放射虫丰度分布控制因素的分析。

### 3.3 放射虫的组合特征

#### 3.3.1 优势种组合

普里兹湾表层沉积物中放射虫优势种组合 *Antarctissa* group 的平均丰度为 1.42 万枚/g,其丰度分布(图 4a)与放射虫动物群的总体分布特征(图 3)颇为类似,即呈现出陆架区高于冰架前缘及湾口区、湾西部略高于湾东部的趋势,最高值出现在比 P3-14 站更靠近冰架前缘的 IS-A 站,最低值则为 P6-10 站。其百分含量总体上表现为由南向北逐渐降低的趋势(图 4b),其中最高值出现在冰架前缘的 IS-04 站,最低值出现在陆架区的 P6-10 站,与放射虫总丰度的分布特征存在较大差异。这种区别可能有两方面的原因,一是来沉积物中放射虫的丰度与其沉降过程密切相关,受水动力及地形条件的影响较大,西向沿岸流的搬运作用以及弗拉姆浅滩的阻挡作用,使得放射虫在湾西部堆积;二是优势种组合的分布还与其生活的海洋环境密切相关,普里兹湾由南向北水温逐渐上升的环境差异可能是 *Antarctissa* group 在不同区域具有不同百分含量的主要因素。

已有研究表明,在极锋区以南的冷水区, *A. strelkovi* 和 *A. denticulata* 是最具代表性的属种<sup>[41]</sup>,前者主要生活在 100m 以浅、水温低于 2°C 且富含溶解态硅酸盐的水体中<sup>[32]</sup>,在陆架浅水区其生活深度可达 385m,但几乎无法在暖水区生存<sup>[42]</sup>;后者的分布则颇为广泛,是南极深水沉积物中最丰富和典型的属种,在有冰筏沉积的沿岸地区其相对含

量约为 3%~24%<sup>[43]</sup>。此外,在亚北极太平洋边缘海, *Antarctissa* sp. 的分布与 50~150m 的冷水团关系密切<sup>[44]</sup>,可以作为次表层冷水团的指示种<sup>[45]</sup>。在普里兹湾海域,影响放射虫动物群的因素较为复杂,就 *Antarctissa* group 整体而言,冷水团可能是影响其生长的主要因素。来自西冰架的较冷的沿岸流和最低温度可达 -2.4°C 冰架水为该种群的生长发育提供了良好的环境,但低温条件对于其他放射虫产生了抑制作用,因此该组合具有较高的百分含量。再向北,水体环境也逐渐由  $T < -1.5^{\circ}\text{C}$  的陆架水变为  $T \geq -0.5^{\circ}\text{C}$  的南极表层水,水温的上升也刺激了其他放射虫的生长,导致该组合的百分含量降低。因此, *Antarctissa* group 的高含量具有指示冷水团分布的潜力。

#### 3.3.2 特征种组合

特征种组合的丰度和百分含量的分布模式总体上较为一致(图 5a,5b),表现为冰架前缘与湾口区低、陆架区高;丰度最大值出现在湾西部的 P3-14 站,最低值出现在湾口水道上的 M3-old 站,湾东部 P6-10 站的丰度较低但百分含量最高,百分含量最小值出现在 M3-old 站。这种分布特征与放射虫总丰度的分布较为接近(图 3),但与 *Antarctissa* group 百分含量(图 4b)的分布差异较大。

Jørgensen 和 Bjørklund 分别在挪威海域开展的研究发现 *P. hystrix* 和 *P. oikiskos* 主要是北方种<sup>[46-48]</sup>,但后来研究表明这两个种在南大洋高纬海域沉积物中的含量也十分丰富,尤以南奥克尼群岛和南舍得兰群岛附近海域为甚<sup>[9]</sup>。布兰斯菲尔德海

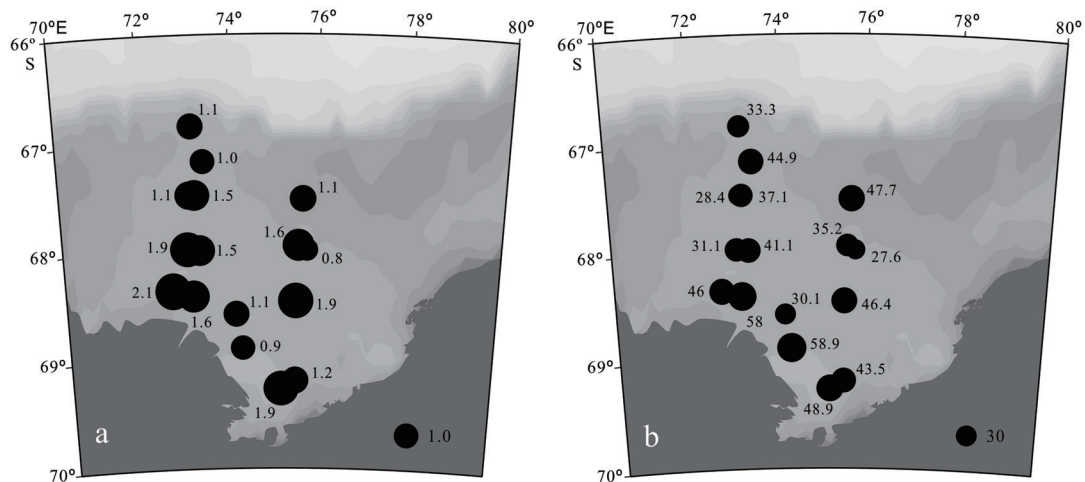


图 4 普里兹湾表层沉积物中优势种的分布特征

a. 优势种的丰度(万枚/g); b. 优势种的百分含量(%)

Fig.4 Distribution of dominating assemblage in surface sediments of Prydz Bay

a. shows the abundance of dominating assemblage ( $\times 10^4$  ind/g); b. shows the percentage of dominating assemblage(%)

峡和鲍威尔盆地的研究结果与 Abelmann 报道的沉积物捕获器的数据一致,都表明这两个种在下部水体中占主导地位<sup>[4]</sup>。对 *R. boreale* 最早的研究见于北海(Nordic Seas)<sup>[47,49]</sup>,Swanberg&Björklund 指出该种是挪威西部沿岸峡湾中最常见的9个属种之一<sup>[50]</sup>。在南大洋,南极辐合带(Antarctic Convergence Zone, ACZ)以北并未发现 *R. boreale*, ACZ以南站位中该种占放射虫动物群的比重也不到1%<sup>[43]</sup>,但在布兰斯菲尔德海峡却十分常见,而在水团高度混合的南舍得兰群岛附近海域的岩芯中,该种含量高达8%<sup>[4,41]</sup>。普里兹湾具有独特的喇叭状地形,湾口处浅滩中间的水道是其与开放大洋沟通的主要通道,在水体交换等方面与峡湾区具有一定的相似之处,这对于该组合的生长发育具有一定的积极作用。更为重要的是,强劲的海流以及PBG和涡旋的存在也会增强水体的混合作用,从而促进该组合的发育繁殖,这在本研究中有直观的反映(图5);在PBG控制的水动力条件较为复杂的陆架区,特征种组合的丰度和百分含量都要明显大于冰架前缘,在该组合的丰度和百分含量都为高值区的湾西部,也恰好存在一个顺时针运动的中尺度涡<sup>[51]</sup>,而中尺度涡对 *R. boreale* 生长发育的促进作用已经在白令海长时间序列的观测中得到了证明<sup>[52]</sup>。因此,在普里兹湾这个较为相对封闭的区,该组合可能指示的是与环流结构有关的水团混合作用的强弱。

值得注意的是,尽管特征种组合的丰度和百分含量明显低于 *Antarctissa* group,与 Nishimura 等人的研究一致<sup>[9]</sup>,但就本文结果而言,似乎并不能印

证该研究中关于该组合的分布“主要取决于水深或离岸距离而非温度”的结论,其原因可能主要在于研究区域空间跨度的差异。Nishimura 等人的研究区域涉及整个南大洋 60°S 以南海域,空间范围广、水深变化大且各海域地形地貌多变<sup>[9]</sup>,因此得以提取该组合与水深和离岸距离的关系。同时,该种群在南极半岛周边海域分布最为广泛<sup>[53]</sup>,其地形地貌均以峡湾和具有陡峭陆架的海岸为特征。相比之下,本文主要聚焦于具有宽阔陆架的普里兹湾核心区,采样站位也主要分布在湾内区域,空间跨度较小、水深基本在几百米之内,变化较缓,因此难以充分体现文献结论中所列两个因素(尤其是水深)的控制作用。因此,在普里兹湾,这个南大洋标志性的沿岸浅水组合更多反映的是与环流结构有关的水团混合作用的强弱,对站位水深或离岸距离的指示作用并不明显。

### 4 结论

(1)各站样品中共鉴定出放射虫2目66属107种5152枚,其中罩笼虫目40属71种4721枚,泡沫虫目26属36种431枚,二者个体数量比值高达10.95,前者在属种多样性和个体数量上都占据明显优势。

(2)普里兹湾表层沉积物中放射虫多样性较低,但丰度较高,平均可达3.36万枚/g;平面上看,放射虫的多样性由冰架前缘向东北方向逐渐增加,放射虫丰度的分布则呈现出陆架区高于湾口区和冰架前

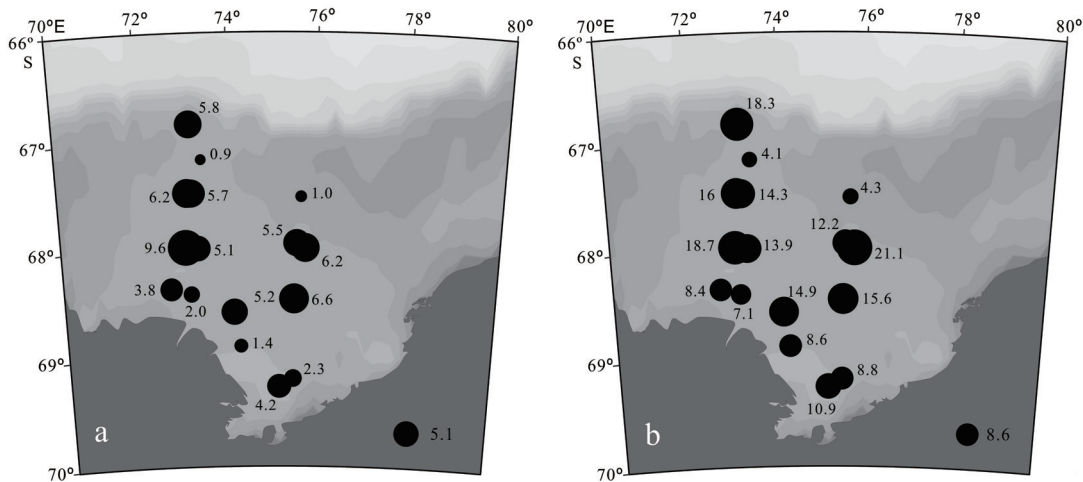


图5 普里兹湾表层沉积物中特征种的分布特征

a.特征种的丰度(千枚/g); b.特征种的百分含量(%)

Fig.5 Distribution of characteristic assemblage in surface sediments of Prydz Bay

a.shows the abundance of characteristic assemblage (×10<sup>3</sup> ind/g); b. shows the percentage of characteristic assemblage(%)

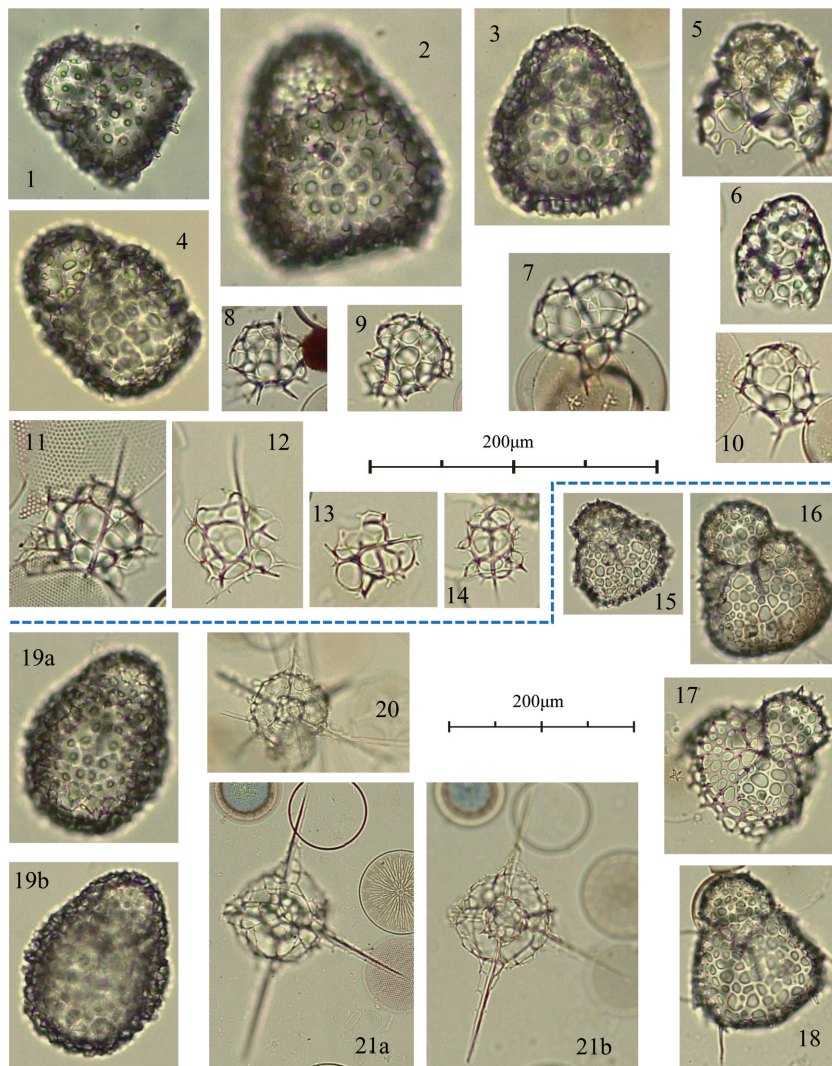
缘的特点,且湾西部高于东部,可能主要受研究区上层海洋的生产力、环流结构、沉积物类型和冷水团分布等海洋环境要素的影响。

(3)以 *A. strelkovi* 和 *A. denticulata* 为代表的南极虫组合(*Antarctissa* group)的平均百分含量高达 42.43%,是该区最大的优势种组合。受环流及地形影响,该组合的丰度分布与放射虫的总丰度相似,但其百分含量的分布特征则表现为由冰架前缘向北降低的趋势,主要受控于水体温度,该组合的高含量具有指示冷水团分布的潜力。

(4)由 *P. hystrix*、*P. oikiskos* 和 *R. boreale* 组成的特征种组合的平均百分含量为 12.54%,仅次于优势种组合。该组合的丰度和百分含量呈现出陆

架区高于冰架前缘和湾口区的特点,在普里兹湾,这种分布特征对站位水深或离岸距离的指示作用并不明显,更多的是表征与环流结构有关的水团混合作用的强弱。

**致谢:**本研究在样品采集和处理过程中得到了中国第 18、21、24、25、27 和 29 次南极科学考察队全体队员、雪龙船船员的帮助,在实验和论文撰写过程中得到了本实验室刘小涯、于培松、扈传显、孙维萍、江志兵、汤燕滨等人的帮助和支持,在此一并表示感谢;特别感谢同济大学海洋地质国家重点实验室王汝建教授及其课题组在样品处理、薄片制备和镜下鉴定等过程中给予的无私帮助。



图版 I 普里兹湾表层沉积物中的优势种和特征种放射虫显微照片

Plate I Radiolaria photomicrographs of dominant species and characteristic species in surface sediments of Prydz Bay  
 1-3. *Antarctissa denticulata* (1-2. IS-A 站, 3. IS-12 站); 4. *Antarctissa cylindrica* (M3-old 站); 5-6. *Antarctissa* sp. (5. P4-09, 6. P6-10 站); 7-10. *Plectacant haoikiskos* (7. IV-10 站, 8. IS-06 站, 9-10. P6-10 站); 11-14. *Phormacantha hystrix* (11. IS-06 站, 12-14. P6-10 站); 15-18. *Antarctissa strelkovi* (15. IS-A, 16. IS-04 站, 17. IS-A 站, 18. P4-12 站); 19. *Antarctissa denticulate* var. *cylindrica* (IS-A 站); 20-21. *Rhizoplegma boreale* (20. IS-01 站, 21. P6-10 站)



## 参考文献 (References)

- [1] 陈木宏, 谭智源. 南海中、北部沉积物中的放射虫[M]. 科学出版社, 1996. [CHEN Muhong, TAN Zhiyuan. Radiolarians in Sediments of the North and Central of the South China Sea [M]. Science Press, 1996.]
- [2] 冯庆来. 放射虫古生态的初步研究[J]. 地质科技情报, 1992(2): 41-46. [FENG Qinglai. A preliminary study on the radiolarian palaeoecology[J]. Geological Science and Technology Information, 1992(2): 41-46.]
- [3] 张兰兰, 陈木宏, 向荣, 等. 放射虫现代生态学的研究进展及其应用前景——利用放射虫化石揭示古海洋、古环境的基础研究[J]. 地球科学进展, 2006, 21(5): 474-481. [ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, XIANG Rong, et al. Progress and prospect in research on living radiolariaecology: A basic study of paleoenvironmental and paleoceanographic reconstructions[J]. Advances in Earth Science, 2006, 21(5): 474-481.]
- [4] Abelman A. Radiolarian taxa from southern-Ocean sediment traps (Atlantic Sector)[J]. Polar Biology, 1992a, 12(3-4): 373-385.
- [5] Goll R M, Björklund K R. Radiolaria in surface sediments of the South Atlantic[J]. Micropaleontology, 1974, 20(1): 38-75.
- [6] Abelman A, Brathauer U, Gersonde R, et al. Radiolarian-based transfer function for the estimation of sea surface temperatures in the Southern Ocean (Atlantic Sector)[J]. Paleoceanography, 1999, 14(3): 410-421.
- [7] 乐肯堂. 普里兹湾及邻近海区水团和环流研究述评[J]. 海洋科学, 1995, 19(2): 26-30. [LE Kentang. Review of the study of water mass and circulation in Prydz Bay and its adjacent sea [J]. Marine Sciences, 1995, 19(2): 26-30.]
- [8] 陈文斌. 南极普里兹湾邻近海域表层沉积物中的放射虫[C]// 南极科学考察论文集(第二集). 北京: 海洋出版社, 1984: 166-179. [CHEN Wenbin. Radiolaria from the surface sediments in adjacent sea of Prydz Bay, Antarctica [C]// A Collection of Antarctic Scientific Explorations (II). Beijing: China Ocean Press, 1984: 166-179.]
- [9] Nishimura A, Nakaseko K, Okuda Y. A new coastal water radiolarian assemblage recovered from sediment samples from the Antarctic Ocean[J]. Marine Micropaleontology, 1997, 30(1): 29-44.
- [10] 林丽娜. 南极普里兹湾及邻近海域水文特征分析[D]. 国家海洋局第一海洋研究所, 2013. [LIN Lina. Hydrographic features in the region of Prydz Bay[D]. The First Institute of Oceanography, SOA, 2013.]
- [11] 史久新. 南极冰架-海洋相互作用研究综述[J]. 极地研究, 2018, 30(3): 287-320. [SHI Jiuxin. A review of ice shelf-ocean interaction in Antarctica[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2018, 30(3): 287-320.]
- [12] 董兆乾, 梁湘三. 南极海冰、冰穴和冰川冰及其对水团形成和变性的作用[J]. 南极研究, 1993, 5(3): 1-16. [DONG Zhaoqian, LIANG Xiangsan. The role of antarctic sea ice, polynyas and glacier ice in formation and modification of the Antarctic water masses[J]. Antarctic Research, 1993, 5(3): 1-16.]
- [13] 史久新, 乐肯堂. 东南极冰-海相互作用研究进展[J]. 海洋科学, 1999(1): 22-25. [SHI Jiuxin, LE Kentang, A review on studies of ice-ocean interaction in the east Antarctica[J]. Marine Sciences, 1999(1): 22-25.]
- [14] 蒲书箴, 胡筱敏, 董兆乾, 等. 普里兹湾附近绕极深层水和底层水及其运动特征[J]. 海洋学报, 2002, 24(3): 1-8. [PU Shuzhen, HU Xiaomin, DONG Zhaoqian, et al. Features of Circumpolar Deep Water, Antarctic Bottom Water and their movement near the Prydz Bay[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2002, 24(3): 1-8.]
- [15] Smith N R, Dong Z, Kerry K R, et al. Water masses and circulation in the region of Prydz Bay, Antarctica[J]. Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers, 1984, 31(9): 1121-1147.
- [16] O'Brien P E, Cooper A K, Richter C, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Volume 188. [R]. Shipboard Scientific Party. Leg 188 Summary: Prydz Bay-Cooperation Sea, Antarctica. 2001.
- [17] 侍小兵, 俞光耀, 董兆乾. 南极普里兹湾夏季流场诊断分析[J]. 青岛海洋大学学报, 1995, 25(增刊): 293-311. [SHI Xiaobing, YU Guangyao, DONG Zhaoqian. Diagnostic analysis of summer flow field in Prydz Bay, Antarctica[J]. Journal of Ocean University of China, 1995, 25 (Supplement): 293-311.]
- [18] 史久新. 南大洋印度洋扇形区南极绕极流和南极沿岸流的相互作用研究[D]. 中国科学院海洋研究所, 2000. [SHI Jiuxin. Research of the interaction between Antarctic Circumpolar Current and Antarctic Coastal Current in the Indian Ocean Sector Region of the Southern Ocean[D]. The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2000.]
- [19] Middleton J H, Hamphries S E. Thermohaline structure and mixing in the region of Prydz Bay, Antarctica[J]. Deep Sea Research, 1989, 36(8): 1255-1266.
- [20] 史久新, 乐肯堂, 于康玲. 普里兹湾及其邻近海区冰-海相互作用的数值研究: II. 环流[J]. 海洋科学集刊, 2000(1): 22-37. [SHI Jiuxin, LE Kentang, YU Kangling. A numerical study of the ice-ocean interaction in the region of Prydz Bay, Antarctica II. circulation[J]. Studia Marina Sinica, 2000(1): 22-37.]
- [21] Shipboard Scientific Party. Leg 188 Summary: Prydz Bay-Cooperation Sea, Antarctica [C]// In: O'Brien P E, Cooper A K, Richter C, et al. Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports Volume 188, 2001.
- [22] Harris P, Taylor F, Pushina Z, et al. Lithofacies distribution in relation to the geomorphic provinces of Prydz Bay, East Antarctica[J]. Antarctic Science, 1998, 10(O3): 227-235.
- [23] 常凤鸣, 庄丽华, 李铁刚, 等. 冲绳海槽北部表层沉积物中的放射虫组合[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(2): 208-216. [CHANG Fengming, ZHUANG Lihua, LI Tiegang, et al. Modern radiolarian assemblages in surficial sediments of

- Northern Okinawa Trough[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(2): 208-216.]
- [24] 王豪壮,陈志华,王春娟,等. 普里兹湾陆架表层沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. *极地研究*, 2015, 27(4): 421-428. [WANG Haozhuang, CHEN Zhihua, WANG Chunjuan, et al. Characteristics of grain size in surface sediments from the continental shelf, Prydz Bay, and implications for sedimentary environment[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2015, 27(4): 421-428]
- [25] Martin J H. Glacial-interglacial CO<sub>2</sub> change: The iron hypothesis[J]. *Paleoceanography*, 1990, 5(1): 1-13.
- [26] 刘子琳,蔡昱明,宁修仁,等. 1999/2000 年夏季南极普里兹湾及湾口区叶绿素 a 和初级生产力[J]. *极地研究*, 2001, 13(1): 1-12. [LIU Zilin, CAI Yuming, NING Xiuren, et al. Primary productivity and standing stock of phytoplankton in the Prydz Bay and the adjacent northern sea area during the austral summer of 1999/2000[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2001, 13(1): 1-12.]
- [27] 刘子琳,蔡昱明,陈中元,等. 1998/1999 年夏季普里兹湾及北部海区叶绿素 a 和初级生产力的分布特征[J]. *极地研究*, 2002, 14(1): 12-21. [LIU Zilin, CAI Yuming, CHEN Zhongyuan, et al. The distribution feature of chlorophyll A and primary productivity in Prydz Bay and its north sea area during the austral summer of 1998/1999[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2002, 14(1): 12-21.]
- [28] Cai Y M, Ning X R, Zhu G H, Shi J X. Size fractionated biomass and productivity of hytoplankton and new production in the Prydz Bay and the adjacent Indian sector of the outhern Ocean during the austral summer 1998/1999[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 2(4): 651-670.
- [29] 刘诚刚,宁修仁,孙军,等. 2002 年夏季南极普里兹湾及其邻近海域浮游植物存量、初级生产力粒级结构和新生产力研究[J]. *海洋学报*, 2004, 26(6): 107-117. [LIU Chengang, NING Xiuren, SUN Jun, et al. Size structure of standing stock and productivity and new production of phytoplankton in the Prydz Bay and the adjacent Indian sector of the Southern Ocean during the austral summer of 2001/2002[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, 26(6): 107-117.]
- [30] 邱雨生,黄奕普,刘广山,等. 南极普里兹湾及邻近海域初级生产力的时空变异[J]. *厦门大学学报:自然科学版*, 2004, 43(5): 676-681. [QIU Yusheng, HUANG Yipu, LIU Guangshan, et al. Spatial and temporal variations of primary productivity in Prydz Bay and its adjacent sea area, Antarctica [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2004, 43(5): 676-681.]
- [31] 孙维萍,扈传昱,韩正兵,等. 2011 年南极夏季普里兹湾营养盐与浮游植物生物量的分布[J]. *极地研究*, 2012, 24(2): 178-186. [SUN Weiping, HU Chuanyu, HAN Zhengbing, et al. Distribution of nutrients and Chla in Prydz Bay during the austral summer of 2011[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(2): 178-186.]
- [32] 陈际雨,韩正兵,扈传昱,等. 南极普里兹湾营养盐分布特征及季节性消耗[J]. *极地研究*, 2017, 29(3): 327-337. [CHEN Jiyu, HAN Zhengbing, HU Chuanyu, et al. Distribution and seasonal depletion of nutrients in Prydz Bay, Antarctica[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(2): 178-186.]
- [33] Wang R, Abelman A. Radiolarian responses to paleoceanographic events of the southern South China Sea during the Pleistocene[J]. *Marine Micropaleontology*, 2002, 46(1): 25-44.
- [34] 王汝建,陈荣华,肖文申. 白令海表层沉积物中放射虫的深度分布特征及其海洋学意义[J]. *微体古生物学报*, 2005, 22(2): 127-135. [WANG Rujian, CHEN Ronghua, XIAO Wenshen. Depth distribution pattern of radiolarians in surface sediments of the Bering Sea and their oceanographic implications[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 2005, 22(2): 127-135.]
- [35] Abelman A, Gowing M M. Spatial distribution pattern of living polycystine radiolarian taxa — baseline study for paleo-environmental reconstructions in the Southern Ocean (Atlantic sector)[J]. *Marine Micropaleontology*, 1997, 30(1-3): 3-28.
- [36] 沈国英,施并章. *海洋生态学(第二版)*[M]. 北京:科学出版社, 2002. [SHEN Guoying, SHI Bingzhang. *Marine Ecology (Second Edition)* [M]. Beijing: Science Press, 2002.]
- [37] 张兰兰,陈木宏,陆钧,等. 南海南部上层水体中多孔放射虫的组成与分布特征[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(3): 55-64. [ZHANG Lanlan, CHEN Muhong, LU Jun, et al. Living polycystine radiolarian fauna in upper water column of southern South China sea and its distribution[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(3): 55-64.]
- [38] Shannon C E, Winner W. *The Mathematical Theory of Communication*[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1949.
- [39] 许新雨. 夏季极地海洋的初级生产力[D]. 厦门大学, 2014. [XU Xinyu. Primary productivity of the polar ocean in summer[D]. Xiamen University, 2014.]
- [40] 于培松. 南极普里兹湾海洋沉积记录及其对气候变化的响应[D]. 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2013. [YU Peisong. Ocean sedimental records and their responses to climate change in Prydz Bay, Antarctica[D]. Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2013.]
- [41] Abelman A. Radiolarian flux in Antarctic waters (Drake Passage, Powell Basin, Bransfield Strait)[J]. *Polar Biology*, 1992b, 12(3-4): 357-372.
- [42] Popofsky A. Die Radiolarien der Antarktis (mit Ausnahme der Tripyleen). *Deutsche Südpolar-Exped. 1901-1903* [R], 1908, 10 (Zool. 2). 3: 183-105.
- [43] Petrushevskaya M G. Radiolarii otryadov Spumellaria i Nassellaria Antarkticheskoi oblasti (po materialam Sovetskoi, Antarkticheskoi Ekspeditsii) [J]. *Issled Fauny Morei*, 1967, 4(3): 2-186.
- [44] Abelman A, Nimmergut A. Radiolarians in the Sea of Okhotsk and their ecological implication for paleoenvironmental reconstructions[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies*

- in *Oceanography*, 2005, 52(16): 2302-2331.
- [45] Itaki T, Kim S, Rella S F, et al. Millennial-scale variations of late Pleistocene radiolarian assemblages in the Bering Sea related to environments in shallow and deep waters[J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2012, 61-64: 127-144.
- [46] Jorgensen E. Protophyten und Protozoenim plankton aus der norwegischen Westktiste [Z]. *Bergens Museums Aarbog*, 1899, 6: 51-95.
- [47] Jergensen E. The protist plankton and the diatoms in bottom samples[Z]. *Bergen Museum Skrifter*, 1905, 7: 49-225.
- [48] Bjorklund K R. Radiolaria from the Norwegian sea, Leg 38 of the Deep Sea Drilling Project[C]//Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 38. U.S. Government Printing Office, Washington D C, 1976:1101-1168.
- [49] Cleve P T. Plankton collected by Swedish Expedition to Spitzbergen in 1898[Z]. *Kongl Svensk Vetensk Akad Handl*, 1898, 32:3-47.
- [50] Swanberg N R, Bjørklund K R. The radiolarian fauna of western Norwegian fjords: Patterns of abundance in the plankton[J]. *Marine Micropaleontology*, 1986, 11(1): 231-241.
- [51] 严金辉, 李锐祥, 侍茂崇, 等. 2011年1月普里兹湾埃默里冰架附近水文特征[J]. *极地研究*, 2012, 24(2): 101-109. [YAN Jinhui, LI Ruixiang, SHI Maochong, et al. Oceanographic features near the Amery Ice Shelf in Prydz Bay, Antarctica, January 2011[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2012, 24(2): 101-109.]
- [52] Ikenoue T, Takahashi K, Tanaka S. Fifteen year time-series of radiolarian fluxes and environmental conditions in the Bering Sea and the central subarctic Pacific, 1990-2005 [J]. *Deep-Sea Research Part II*, 2012, 61-64: 17-49.
- [53] Nishimura A, Nakaseko K. Characterization of radiolarian assemblages in the surface sediments of the Antarctic Ocean [J]. *Palaeoworld*, 2011, 20(2): 232-251.